



# Bodenzustandsbericht Ortenaukreis



# Bodenzustandsbericht Ortenaukreis

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>HERAUSGEBER</b> | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>BEARBEITUNG</b> | Landratsamt Ortenaukreis, R. Olschewski<br>LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>Referat 22, Boden - Altlasten<br><br>auf der Grundlage interner Berichte von<br>ahu AG Wasser Boden Geomatik, Aachen<br><br>solum, büro für boden + geologie, Freiburg i. Br.<br><br>Ingenieurbüro Feldwisch, Bergisch Gladbach<br><br>Agentur für Nachhaltige Nutzung von Agrarlandschaften, Freiburg i. Br.<br><br>Dr. Matthias Geyer, Freiburg i. Br.<br><br>Dr. F. Waldmann, Dr. M. Martin, G. Gollembeck, Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9<br>Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB)<br><br>mit einem Beitrag von<br>Dr. K. v. Wilpert, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)<br>& Dr. D. Zirlewagen, Interra Büro für Umweltmonitoring Kenzingen<br><br>Fotos Titelseite: R. Olschewski |
| <b>REDAKTION</b>   | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>Referat 22<br>Landratsamt Ortenaukreis<br>Regierungspräsidium Freiburg, Referat 93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>BEZUG</b>       | Kostenloser Download unter: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>ISBN</b>        | 978-3-88251-365-3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>STAND</b>       | 2013                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>VORWORT</b>                                                                    | <b>10</b> |
| <b>1 WARUM BODENZUSTANDSBERICHT ?</b>                                             | <b>13</b> |
| <b>2 NATURRAUM ORTENAU</b>                                                        | <b>15</b> |
| 2.1 Zahlen, Daten, Fakten                                                         | 15        |
| 2.2 Geologie                                                                      | 17        |
| 2.2.1 Allgemeines                                                                 | 17        |
| 2.2.2 Abriss der Erdgeschichte                                                    | 20        |
| 2.2.3 Gesteinsbeschreibung                                                        | 22        |
| 2.2.4 Entstehung hydrothermaler Erz- und Mineralgänge                             | 26        |
| 2.3 Der Einfluss der Landnutzung                                                  | 28        |
| 2.4 Klima                                                                         | 33        |
| 2.4.1 Allgemeines                                                                 | 33        |
| 2.4.2 Klimatische Wasserbilanz                                                    | 34        |
| 2.4.3 Klimawandel                                                                 | 34        |
| <b>3 BÖDEN DER ORTENAU</b>                                                        | <b>35</b> |
| 3.1 Entstehung und Verbreitung der Böden                                          | 35        |
| 3.1.1 Grundzüge der Bodenbildung                                                  | 35        |
| 3.1.2 Entstehung der häufigsten Böden des Ortenaukreises                          | 38        |
| 3.2 Bodenfunktionen und Bodenbewertung                                            | 42        |
| 3.2.1 Bodenfunktion „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“                               | 43        |
| 3.2.2 Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“                     | 46        |
| 3.2.3 Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“                         | 49        |
| 3.2.4 Bodenfunktion „Filter und Puffer für Schadstoffe“                           | 52        |
| 3.2.5 Bodenfunktion „Archive der Natur- und Kulturgeschichte“                     | 55        |
| <b>4 GEFÄHRDUNG DER BÖDEN</b>                                                     | <b>56</b> |
| 4.1 Wie Schadstoffe in den Boden gelangen                                         | 56        |
| 4.1.1 Geogene Spurenstoffe                                                        | 56        |
| 4.1.2 Schadstoffeinträge durch Bergbau und Verhüttung                             | 59        |
| 4.1.3 Schadstoffeinträge durch Emissionen                                         | 61        |
| 4.1.4 Schadstoffeinträge durch den Straßenverkehr                                 | 63        |
| 4.1.5 Schadstoffeinträge durch Oberflächenabschwemmungen und Abwassereinleitungen | 65        |
| 4.1.6 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung                                   | 66        |
| 4.1.7 Landwirtschaftliche Kompostverwertung                                       | 68        |
| 4.1.8 Schwermetalleinträge durch Düngemittel                                      | 69        |
| 4.1.9 Kupfereinträge durch Fungizideinsatz                                        | 72        |
| 4.1.10 Abschätzung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzten Böden | 73        |
| 4.2 Anorganische und organische Schadstoffe                                       | 75        |
| 4.2.1 Bewertungsmaßstäbe der BBodSchV                                             | 75        |
| 4.2.2 Arsen                                                                       | 77        |
| 4.2.2.1 Gehalte der Böden                                                         | 77        |

|          |                                                             |     |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2.2  | Wirkung erhöhter Arsengehalte auf Schutzgüter               | 77  |
| 4.2.3    | Blei                                                        | 80  |
| 4.2.3.1  | Gehalte der Böden                                           | 80  |
| 4.2.3.2  | Wirkung erhöhter Bleigehalte auf Schutzgüter                | 80  |
| 4.2.4    | Cadmium                                                     | 84  |
| 4.2.4.1  | Gehalte der Böden                                           | 84  |
| 4.2.4.2  | Wirkung erhöhter Cadmiumgehalte auf Schutzgüter             | 84  |
| 4.2.5    | Chrom                                                       | 86  |
| 4.2.5.1  | Gehalte der Böden                                           | 86  |
| 4.2.5.2  | Wirkung erhöhter Chromgehalte auf Schutzgüter               | 86  |
| 4.2.6    | Kobalt                                                      | 87  |
| 4.2.6.1  | Gehalte der Böden                                           | 87  |
| 4.2.6.2  | Wirkung erhöhter Kobaltgehalte auf Schutzgüter              | 88  |
| 4.2.7    | Kupfer                                                      | 89  |
| 4.2.7.1  | Gehalte der Böden                                           | 89  |
| 4.2.7.2  | Wirkung erhöhter Kupfergehalte auf Schutzgüter              | 89  |
| 4.2.8    | Nickel                                                      | 91  |
| 4.2.8.1  | Gehalte der Böden                                           | 91  |
| 4.2.8.2  | Wirkung erhöhter Nickelgehalte auf Schutzgüter              | 91  |
| 4.2.9    | Quecksilber                                                 | 93  |
| 4.2.9.1  | Gehalte der Böden                                           | 93  |
| 4.2.9.2  | Wirkung erhöhter Quecksilbergehalte auf Schutzgüter         | 93  |
| 4.2.10   | Zink                                                        | 94  |
| 4.2.10.1 | Gehalte der Böden                                           | 94  |
| 4.2.10.2 | Wirkung erhöhter Zinkgehalte auf Schutzgüter                | 94  |
| 4.2.11   | PAK - Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe          | 96  |
| 4.2.11.1 | Gehalte der Böden                                           | 96  |
| 4.2.11.2 | Wirkung erhöhter PAK-Gehalte auf Schutzgüter                | 97  |
| 4.2.12   | PCB - Polychlorierte Biphenyle                              | 98  |
| 4.2.12.1 | Gehalte der Böden                                           | 98  |
| 4.2.12.2 | Wirkung erhöhter PCB-Gehalte auf Schutzgüter                | 98  |
| 4.2.13   | Dioxine/Furane (PCDD/F)                                     | 99  |
| 4.2.13.1 | Gehalte der Böden                                           | 99  |
| 4.2.13.2 | Wirkung erhöhter PCDD/F-Gehalte auf Schutzgüter             | 99  |
| 4.3      | Stickstoff und Pflanzenschutzmittel                         | 101 |
| 4.3.1    | Stickstoff - Quellen und Bedeutung                          | 101 |
| 4.3.2    | Einfluss des Bodens auf die Nitratauswaschung               | 103 |
| 4.3.3    | Einfluss der Bodenbewirtschaftung auf die Nitratauswaschung | 104 |
| 4.3.4    | Nitrat im Grundwasser                                       | 106 |
| 4.3.5    | Pflanzenschutzmittel - Allgemeines                          | 108 |
| 4.3.6    | Verhalten von PSM im Boden                                  | 109 |
| 4.3.7    | Anwendung von PSM                                           | 109 |
| 4.3.8    | Folgen des PSM-Einsatzes                                    | 111 |
| 4.4      | Bodenversauerung                                            | 112 |

|          |                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.1    | Ursachen der Bodenversauerung                                     | 112        |
| 4.4.2    | Bodenversauerung im Ortenaukreis                                  | 114        |
| 4.4.3    | Auswirkung der Bodenversauerung                                   | 118        |
| 4.4.3.1  | Quell- und Oberflächenwässer                                      | 118        |
| 4.4.3.2  | Forstwirtschaft                                                   | 119        |
| 4.4.3.3  | Landwirtschaft                                                    | 121        |
| 4.4.4    | Bodenschutzkalkung im Forst                                       | 122        |
| 4.4.4.1  | Beobachtung und Entwicklung des chemischen Zustands von Waldböden | 122        |
| 4.4.4.2  | Ableitung des langfristigen Kalkungsbedarfs                       | 123        |
| 4.5      | Flächeninanspruchnahme                                            | 129        |
| 4.6      | Bodenerosion                                                      | 132        |
| 4.6.1    | Allgemeines                                                       | 132        |
| 4.6.2    | Die Faktoren der Erosion                                          | 133        |
| 4.6.3    | Folgen der Bodenerosion                                           | 133        |
| 4.6.4    | Maßnahmen zur Erosionsminderung                                   | 135        |
| 4.6.5    | Einzugsgebiet „Schlossberg - Maierthal“                           | 137        |
| <b>5</b> | <b>DAS SCHUTZGUT BODEN IN DER PLANUNG</b>                         | <b>139</b> |
| 5.1      | Bodenschutz in Planungsverfahren                                  | 139        |
| 5.1.1    | Allgemeines                                                       | 139        |
| 5.1.2    | Rechtliche Grundlagen                                             | 139        |
| 5.1.3    | Bodenkundliche Fachgrundlagen                                     | 141        |
| 5.1.3.1  | Bodendaten                                                        | 141        |
| 5.1.3.2  | Bodenbewertung                                                    | 142        |
| 5.1.4    | Das Schutzgut Boden in der Umweltprüfung                          | 143        |
| 5.1.4.1  | Eingriffe und Auswirkungen                                        | 144        |
| 5.1.4.2  | Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen                            | 145        |
| 5.2      | Kompensation von Eingriffen in das Schutzgut Boden                | 146        |
| 5.2.1    | Allgemeines, Rechtsgrundlagen                                     | 146        |
| 5.2.2    | Bewertung                                                         | 146        |
| 5.2.3    | Maßnahmen                                                         | 147        |
| 5.2.3.1  | Entsiegelung                                                      | 148        |
| 5.2.3.2  | Rekultivierung                                                    | 148        |
| 5.2.3.3  | Oberbodenauftrag                                                  | 149        |
| 5.2.3.4  | Erosionsschutz, Verbesserung der Wasseraufnahme der Böden         | 151        |
| 5.2.3.5  | Dachbegrünung                                                     | 153        |
| 5.2.3.6  | Bodenkalkung                                                      | 153        |
| 5.2.3.7  | Nutzungsintensivierung und Wiedervernässung                       | 154        |
| 5.3      | Umgang mit Bodenaushub                                            | 157        |
| 5.3.1    | Allgemeines                                                       | 157        |
| 5.3.2    | Bodenauftrag auf durchwurzelbare Bodenschichten                   | 159        |
| 5.3.2.1  | Rechtliche Grundlagen                                             | 159        |
| 5.3.2.2  | Fachtechnische Anforderungen                                      | 159        |
| 5.3.2.3  | Folgen von Bodenverdichtungen                                     | 159        |

|               |                                                                           |            |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.2.4       | Vorsorge                                                                  | 161        |
| 5.3.2.5       | Nachsorge                                                                 | 162        |
| 5.3.3         | Umgang mit schadstoffhaltigem Bodenaushub                                 | 163        |
| 5.3.3.1       | Verwertung in Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten                    | 163        |
| 5.3.3.2       | Verwertung außerhalb durchwurzelbarer Bodenschichten                      | 164        |
| 5.3.4         | Erdaushubdeponien und -börse                                              | 167        |
| 5.4           | Naturnahe Regenwasserversickerung                                         | 168        |
| 5.4.1         | Allgemeines                                                               | 168        |
| 5.4.2         | Bodeneigenschaften                                                        | 169        |
| 5.4.3         | Eignung der Ortenauer Böden zur naturnahen Regenwasserversickerung        | 171        |
| <b>ANHANG</b> |                                                                           | <b>174</b> |
| A.2.2.3       | Gesteinsbeschreibung                                                      | 174        |
| A.3.1.1       | Grundzüge der Bodenbildung                                                | 176        |
| A.3.1.2       | Entstehung der häufigsten Böden des Ortenaukreises                        | 178        |
| A.3.1.2.1     | Horizontbezeichnungen und Zusatzsymbole                                   | 180        |
| A.3.2         | Bodenfunktionen und Bodenbewertung                                        | 182        |
| A.4.1         | Wie Schadstoffe in den Boden gelangen                                     | 184        |
| A.4.1.9       | Kupfereinträge durch Fungizideinsatz                                      | 184        |
| A.4.1.10      | Abschätzung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzte Böden | 185        |
| A.4.2         | Anorganische und organische Schadstoffe                                   | 186        |
| A.4.2.1       | Bewertungsmaßstäbe der BBodSchV                                           | 186        |
| A.4.2.1.1     | Bindung und Mobilisierung von Schadstoffen im Boden                       | 186        |
| A.4.2.1.2     | Natürliche Vorkommen und Einsatzbereiche                                  | 193        |
| A.4.2.1.3     | Magen-Darm-Modell                                                         | 197        |
| A.4.2.2.1     | Arsengehalte in den Böden des Ortenaukreises                              | 198        |
| A.4.2.4.1     | Cadmiumgehalte in den Böden des Ortenaukreises                            | 199        |
| A.4.2.5.1     | Chromgehalte in den Böden des Ortenaukreises                              | 200        |
| A.4.2.6.1     | Kobaltgehalte in den Böden des Ortenaukreises                             | 201        |
| A.4.2.7.1     | Kupfergehalte in den Böden des Ortenaukreises                             | 202        |
| A.4.2.8.1     | Nickelgehalte in den Böden des Ortenaukreises                             | 203        |
| A.4.2.9.1     | Quecksilbergehalte in den Böden des Ortenaukreises                        | 204        |
| A.4.2.10.1    | Zinkgehalte in den Böden des Ortenaukreises                               | 205        |
| A.4.2.11.1    | PAK-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises                               | 206        |
| A.4.2.12.1    | PCB-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises                               | 207        |
| A.4.2.13.1    | PCDD/F-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises                            | 208        |
| A.4.3.1       | Stickstoff - Quellen und Bedeutung                                        | 209        |
| A.4.4.2       | Bodenversauerung im Ortenaukreis                                          | 210        |
| A.4.4.5       | Kennwerte der Bodenversauerung                                            | 211        |
| A.5.1         | Bodenschutz in Planungsverfahren                                          | 214        |
| A.5.1.3.1     | Bodendaten - Bodenschätzung                                               | 214        |
| A.5.1.3.1.1   | Ackerschätzungsrahmen                                                     | 214        |
| A.5.1.3.1.2   | Grünlandschätzungsrahmen                                                  | 217        |
| A.5.1.3.1.3   | Bewertungsbeispiel                                                        | 219        |

|                                            |                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| A.5.3                                      | Umgang mit Bodenaushub                                                                                                     | 221        |
| A.5.3.1                                    | Sickerwasseruntersuchungen im Hinblick auf die Entsorgung von bergbau- und verhüttungsbedingt schadstoffhaltigem Erdaushub | 221        |
| A.5.3.2                                    | Bodenauftrag auf durchwurzelbare Bodenschichten                                                                            | 224        |
| A.5.3.2.5                                  | Nachsorge                                                                                                                  | 224        |
| A.5.4                                      | Naturnahe Regenwasserversickerung                                                                                          | 225        |
| A.5.4.4                                    | Methoden zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten                                                                      | 225        |
| <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>                |                                                                                                                            | <b>226</b> |
| <b>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS</b> |                                                                                                                            | <b>240</b> |



# Vorwort



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Böden bilden zusammen mit Luft, Wasser und Sonnenlicht die natürlichen und unentbehrlichen Lebensgrundlagen für Menschen, Tiere und Pflanzen. Sie sind die natürliche Grundlage für unsere Nahrungsmittelproduktion, speichern und reinigen Wasser, beeinflussen das Klima, sind Lebensraum für eine große Anzahl an Tieren und Pflanzen und wirken steuernd auf den Stoffkreislauf. Böden sind somit das zentrale Fundament unserer terrestrischen Ökosysteme.

Der Boden ist die Schnittstelle von Luft, Wasser, Pflanzen- und Tierreich. Als Naturkörper kann er einerseits Umweltbelastungen puffern und damit abrupte Veränderungen abfedern. Andererseits sind Böden durch vielfältige menschliche Aktivitäten starken Belastungen ausgesetzt. Sie werden als Siedlungs- und Verkehrsfläche überbaut. Ihre Qualität verändert sich aber auch durch Belastungen mit Schadstoffen, durch Erosion, Verdichtung oder den Klimawandel. Bodenschädigungen treten oft schleichend ein und werden erst über einen langen Zeitraum sichtbar. Einmal eingetretene Beeinträchtigungen der Funktionen und damit der Nutzbarkeit unserer Böden sind meist unumkehrbar. Ein vorsorgender, schon auf leichte Veränderungen reagierender Schutz ist für den Boden besonders notwendig, weil die natürliche Bodenneubildung langsam verläuft und Jahrtausende benötigt. Das Naturgut Boden ist eine nicht vermehrbare, aber leicht zerstörbare Lebensgrundlage.

In der Fachwelt herrscht Einvernehmen, dass die komplexen Wechselwirkungen der Ökosysteme und die vielfältigen Einwirkungen der Menschen auf die Böden regionalspezifisch zugeschnittene konzeptionelle Handlungsmuster erfordern. Der Bodenzustandsbericht Ortenaukreis bietet mit seinen umfangreichen Fachdaten und Kartenauswertungen ein wichtiges Planungs- und Arbeitsinstrument für Kommunen, Planer, Behörden und die Nutzer von Böden des Ortenaukreises. Die Handlungsempfehlungen unterstützen die praktische Umsetzung des Bodenschutzes.

Ich wünsche mir, dass der Bodenzustandsbericht für den Ortenaukreis das Bewusstsein für die wertvolle Ressource Boden stärken kann und die im Bericht aufbereiteten Grundlagen den vor Ort zuständigen Behörden eine wertvolle Hilfe für einen nachhaltigen Bodenschutz sind.

*Margareta Barth*

*Präsidentin der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg*



Der Ortenaukreis umfasst Teile der Oberrheinebene, der Vorbergzone und des Schwarzwaldes mit jeweils unterschiedlichem geologischem Untergrund. Im Westen die Oberrheinebene mit ihren bis vor 2,6 Millionen Jahren geschütteten Kiesen und Sanden, daran anschließend die hauptsächlich aus Buntsandsteinen bestehende Vorbergzone und im Osten der Schwarzwald aus alten kristallinen Gesteinen und überlagerten jüngeren Sedimentgesteinen. Diese Geologie hat zusammen mit dem Klima und der Geländemorphologie die Bildung unterschiedlichster Bodentypen im Ortenaukreis bewirkt.

Die Böden des Ortenaukreises waren und sind verschiedenen schädlichen Einflüssen ausgesetzt: vom Mittelalter bis in das 19. Jahrhundert waren es Schwermetalle durch den Bergbau und die Verhüttung von Eisenerzen, heute sind es industrielle und gewerbliche Emissionen sowie Pflanzenschutzmittel in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten. Eine offensichtliche Gefährdung der endlichen Ressource Boden ist der Flächenverbrauch, den wir trotz des unbestritten erforderlichen Wachstums unserer Kommunen begrenzt halten müssen.

Der Bodenzustandsbericht stellt die Beschaffenheit, die Inanspruchnahme und die Belastung der Böden dar und zeigt zugleich, wie Eingriffe minimiert und vermieden werden können. Kommunen, Behörden, Planungsbüros und Nutzern von Böden dient er als fachlich fundierte Arbeitsgrundlage und wichtiges Planungsinstrument.

Der Bodenzustandsbericht zeigt bei bodenschutzrelevanten Problemstellungen in der Bauleitplanung sowie im Umgang mit belastetem Boden praktische Möglichkeiten auf - von konkreten Kompensationsmaßnahmen für unvermeidbare Eingriffe in Natur und Landschaft bis zur praktischen Umsetzung anhand von Planungskarten für ein Gemeindegebiet. Hervorzuheben sind die möglichen Ausgleichsmaßnahmen direkt im betroffenen Schutzgut Boden - Entsiegelung, Bodenauftrag oder Waldkalkung - und die aufgezeigten Lösungen für den Umgang mit belastetem Bodenaushub aus den im Ortenaukreis großflächig vorhandenen ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsflächen oder ehemaligen Weinbauflächen.

*Frank Scherer*

*Landrat des Ortenaukreises*



# 1 Warum Bodenzustandsbericht?

Böden sind Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Menschen mit ihren unterschiedlichen, z.T. durchaus gegensätzlichen, Nutzungsansprüchen. Landwirtschaft, Wohnungsbau und Naturschutzgebiete stehen z.B. in direkter Flächenkonkurrenz. Neben der Funktion als Nutzfläche speichern und reinigen Böden das Grundwasser und binden Kohlenstoff und Klimagase. Böden sind Filter, Puffer, Transformator, Genreservoir und schließlich archäologisches Archiv.

Beeinträchtigt werden Böden durch Flächenversiegelung, Schad- und übermäßige Nährstoffeinträge, Erosion, Bodenverdichtung und Humusverluste. Das dringlichste Problem für den Boden ist die Flächeninanspruchnahme (Abb. 1-1). Im Jahr 2010 folgte die Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt: „104 ha/Tag (Zuwachs an Siedlungs- und Verkehrsflächen bundesweit) ist dramatisch und nicht akzeptabel“.

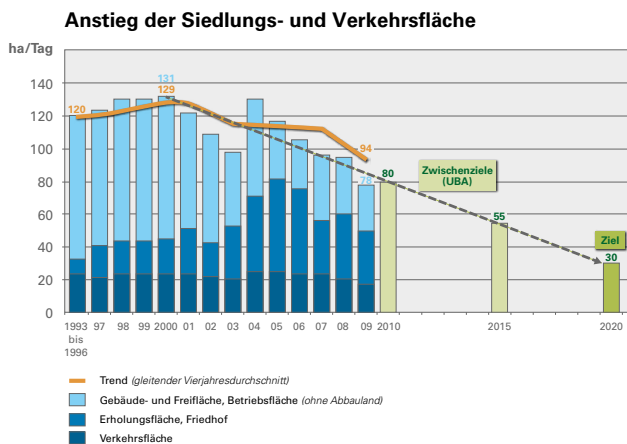


Abb. 1-1: Beeinträchtigung des Bodens - Flächenverbrauch;  
Quelle: Umweltbundesamt (UBA 2010), Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR 2009)

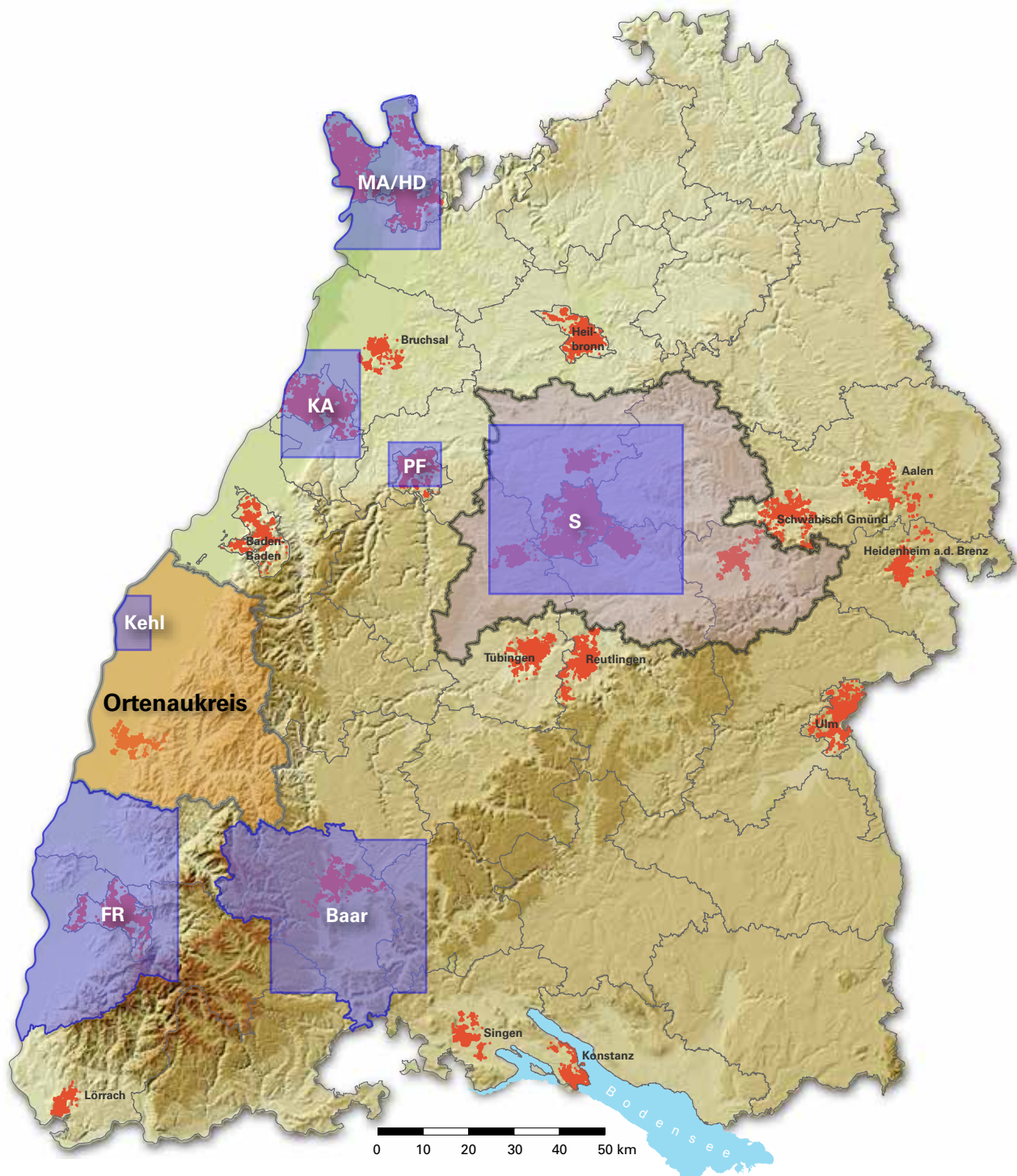
Die Qualität der Böden ist die Grundlage dauerhafter Erträge. Die landwirtschaftlichen Nutzer haben deswegen ein hohes Interesse, einen guten Bodenzustand zu erhalten. Dennoch können auch von der landwirtschaftlichen Nutzung Beeinträchtigungen des Bodenzustands durch den Eintrag von Schad- und Nährstoffen aus Pflanzenschutz- und Düngemitteln, durch Erosion und Verdichtung sowie den Verlust an organischer Substanz ausgehen.

Mit dem Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 wurde dem Boden auf Bundesebene die Bedeutung beigemessen, welche die Umweltmedien Wasser und Luft schon seit geraumer Zeit haben. Auf der Grundlage des Bundes-Bodenschutzgesetzes wurde 2004 in Baden-Württemberg das Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz erlassen. In Baden-Württemberg wurde als erstem Bundesland schon 1991 ein Bodenschutzgesetz in Kraft gesetzt.

Der Bodenzustandsbericht für den Ortenaukreis ist der achte Band einer kontinuierlich fortentwickelten Berichtsreihe, in der Daten über die Beschaffenheit, die Inanspruchnahme und die Belastung der Böden in Regionen des Landes mit urban/industriell, aber auch landwirtschaftlich geprägten Räumen zusammengetragen, dokumentiert und bewertet werden (Abb. 1-2). Der Bericht leistet damit einen wichtigen Beitrag zum vorsorgenden Schutz der Böden.

Er gibt den zuständigen Behörden vor Ort Erkenntnisse an die Hand, um Maßnahmen zur Abwehr möglicher Gefahren, die von schadstoffbelasteten Böden ausgehen können und zum Schutz des Bodens selbst ergreifen zu können.

Prävention und Nachsorge sollten auf die örtlichen Verhältnisse zugeschnitten werden.



#### abgeschlossene Bodenzustandsberichte

  Karlsruhe (1995) - Pforzheim (1995) - Kehl (1995) - Mannheim / Heidelberg (1998) - Stuttgart (1999) - Freiburg (2004) - Baar (2005)

#### aktuell

  Ortenaukreis

#### Bodenzustandsbericht in Vorbereitung

  Region Stuttgart

Abb. 1-2: Bodenzustandsberichte in Baden-Württemberg; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW)

## 2 Naturraum Ortenau

### 2.1 Zahlen, Daten, Fakten

Mit 1 851 km<sup>2</sup> und einem Anteil von 5,2 % an der Landesfläche ist der Ortenaukreis der flächengrößte Landkreis in Baden-Württemberg. In den 51 Städten und Gemeinden leben zur Zeit mehr als 417 000 Einwohner; davon ungefähr 183 000 in den großen Kreisstädten Achern, Kehl, Lahr, Offenburg und Oberkirch (Tab. 2.1-1).

Tab. 2.1-1: Daten zum Ortenaukreis; \*Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Stand: 31.12.2011)

| Wichtige Kenngrößen des Ortenaukreises |                                                                               |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Fläche*                                | 185 085 ha                                                                    |
| Flächenverteilung*                     | 11,6 % Siedlungs- und Verkehrsfläche (Land: 14,1 %)                           |
|                                        | 38,2 % Landwirtschaftsfläche (Land: 45,7 %)                                   |
|                                        | 47,3 % Waldfläche (Land: 38,3 %)                                              |
|                                        | 2,9 % Wasserflächen und übrige Nutzungen (Land: 1,8 %)                        |
| Ausdehnung                             | 60 km Nord-Süd<br>48 km West-Ost                                              |
| Höhenextreme                           | 1 164 m NN höchste Erhebung: Hornisgrinde<br>124 m NN tiefster Punkt: Rheinau |
| Einwohner*                             | 417 875                                                                       |
| Bevölkerungsdichte*                    | 226 Einwohner/km <sup>2</sup><br>(Land: 302 Einwohner/km <sup>2</sup> )       |

Die Wirtschaft im Ortenaukreis ist mittelständisch geprägt. Kennzeichnend ist das produzierende Gewerbe mit Maschinen- und Fahrzeugbau, Stahlerzeugung sowie Druck- und Medienindustrie. Industrie- und Gewerbeschwerpunkte liegen in Achern, Kehl, Offenburg und Oberkirch.

Von den Ende 2011 insgesamt etwa 155 000 Beschäftigten sind 40,75 % im produzierenden Gewerbe, im Dienstleistungsbereich 58,75 % und in Land- und Forstwirtschaft 0,48 % tätig.

In der Landwirtschaft werden aktuell 55 500 ha Fläche, davon 87 % als Acker- und Dauergrünland bewirtschaftet (Abb. 2.1-1). Der Anbau von Obst und Wein (12,1 %) hat in der Ortenau eine wesentlich größere Bedeutung als im Landesdurchschnitt (3,2 %).

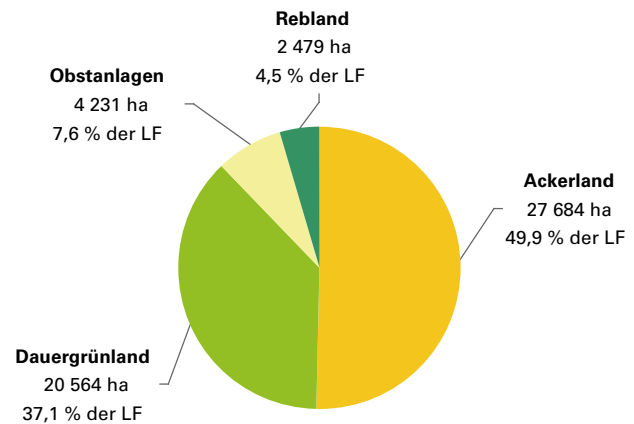


Abb. 2.1-1: Hauptnutzungsarten der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) im Ortenaukreis; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2010

Der Ortenaukreis umfasst drei geologisch und klimatisch unterschiedliche Naturräume (Kap. 2.2, 2.4; Abb. 2.1-2):

- Oberrheinebene
- Vorbergzone, unterteilt in Lahr-Emmendinger und Ortenau-Bühler Vorberge
- Schwarzwald, unterteilt in Nördlicher Talschwarzwald, Mittlerer Schwarzwald und Grindenschwarzwald.



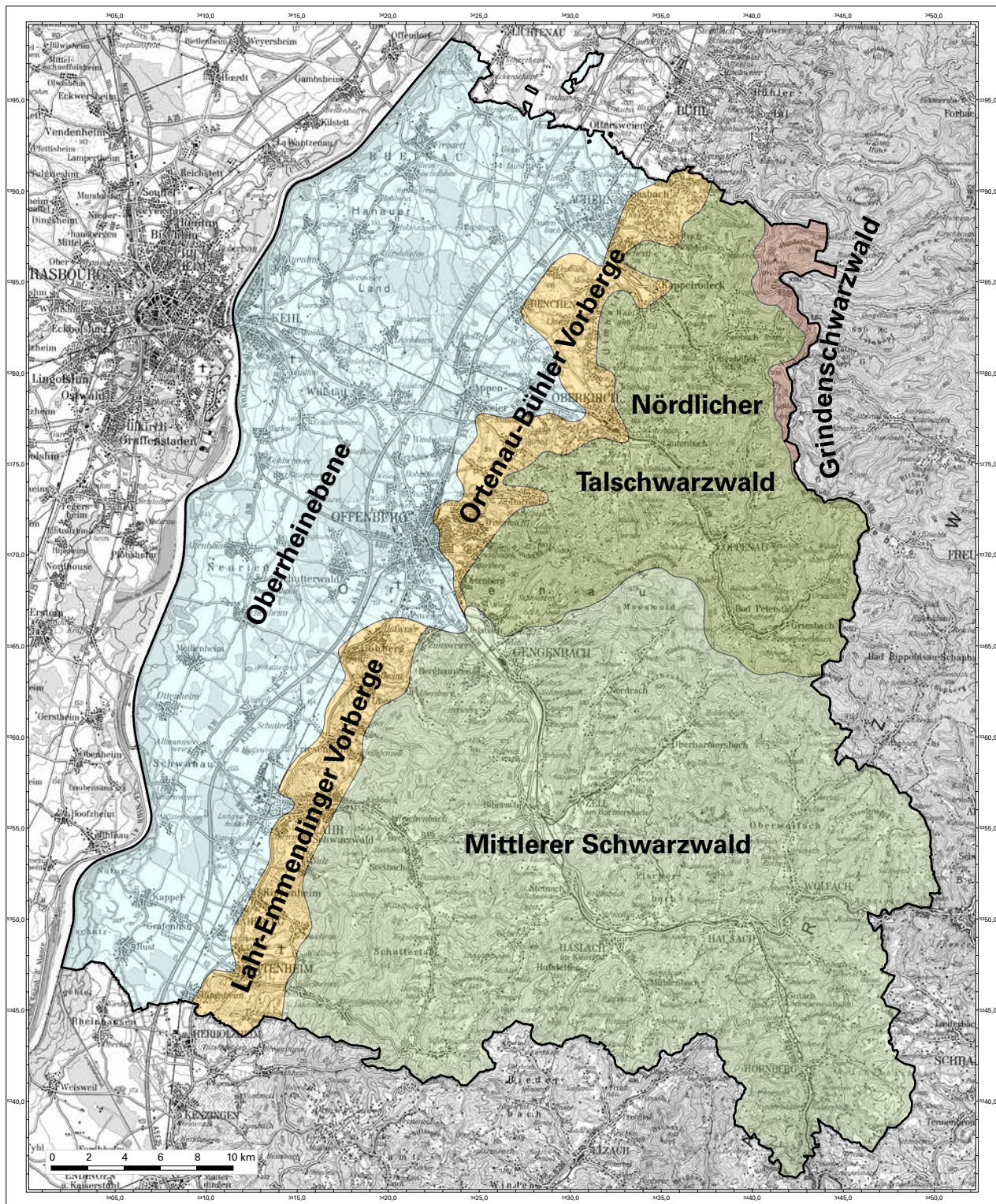


Abb. 2.1-2: Naturraumeinheiten des Ortenaukreises; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



## 2.2 Geologie

### 2.2.1 Allgemeines

Geographisch umfasst der Ortenaukreis Teile der Oberrheinebene, der Vorbergzone und des Schwarzwalds. Diese naturräumliche Gliederung bringt eine Vielfalt von Landschaftsformen mit sich, die durch den geologischen Untergrund stark geprägt sind. Geologie, Klima und Geländemorphologie haben wiederum entscheidenden Einfluss auf die sich entwickelnden Bodentypen und ihren Stoffbestand. Ein Profilschnitt zeigt die Dreigliederung der Ortenau in West-Ost Richtung (Abb. 2.2.1-1).

Das beherrschende geologische Element im Westen der Ortenau ist der Oberrheingraben. Er ist eine bedeutende, mitteleuropäische Bruchstruktur, die durch eine West-Ost Dehnung der Erdkruste bei gleichzeitiger Absenkung im Bereich der heutigen Oberrheinebene entstanden ist. Der morphologische Graben trat durch die spätere Hebung der Randgebirge (Vogesen und Schwarzwald) in Erscheinung. In der Oberrheinebene ist die Rheinaue in eine Niederterrassen-Landschaft eingebettet, deren Kiese und Sande im Pleistozän vor 2,6 Mio. - 10 000 Jahren geschützt wurden.

Eine Sonderstellung im Bereich der Ortenau nimmt die Kinzig-Murg-Rinne ein, die unmittelbar westlich der Vorbergzone ein zum Rhein paralleles und unabhängiges Gewässersystem des östlichen Oberrheingrabens darstellt. Entstanden ist dieser ehemalige Grabenrandfluss durch stärkere Absenkbewegungen in weiten Bereichen des östlichen Oberrheingrabens während des Pleistozäns. Der verlandete Bereich der Kinzig-Murg-Rinne ist heute z.B. nördlich von Rastatt an Mooren zu erkennen [EBERLE ET AL. 2010].

Die Vorbergzone umfasst geologisch den Bereich zwischen der östlichen inneren Grabenrandverwerfung und der Schwarzwaldrandverwerfung. Hier sind die Gesteinsschichten staffelartig zum Oberrheingraben hin eingesunken (Abb. 2.2.1-1).

Der geologische Untergrund der überwiegend lössbedeckten Ortenauer Vorbergzone besteht hauptsächlich aus Buntsandstein. Untergeordnet sind Muschelkalk und Sedimentgesteine des Jura anzutreffen. Wirtschaftlich bedeutend waren die Eisenerz führenden Formationen des Mitteljura (Dogger) bei Ringsheim.

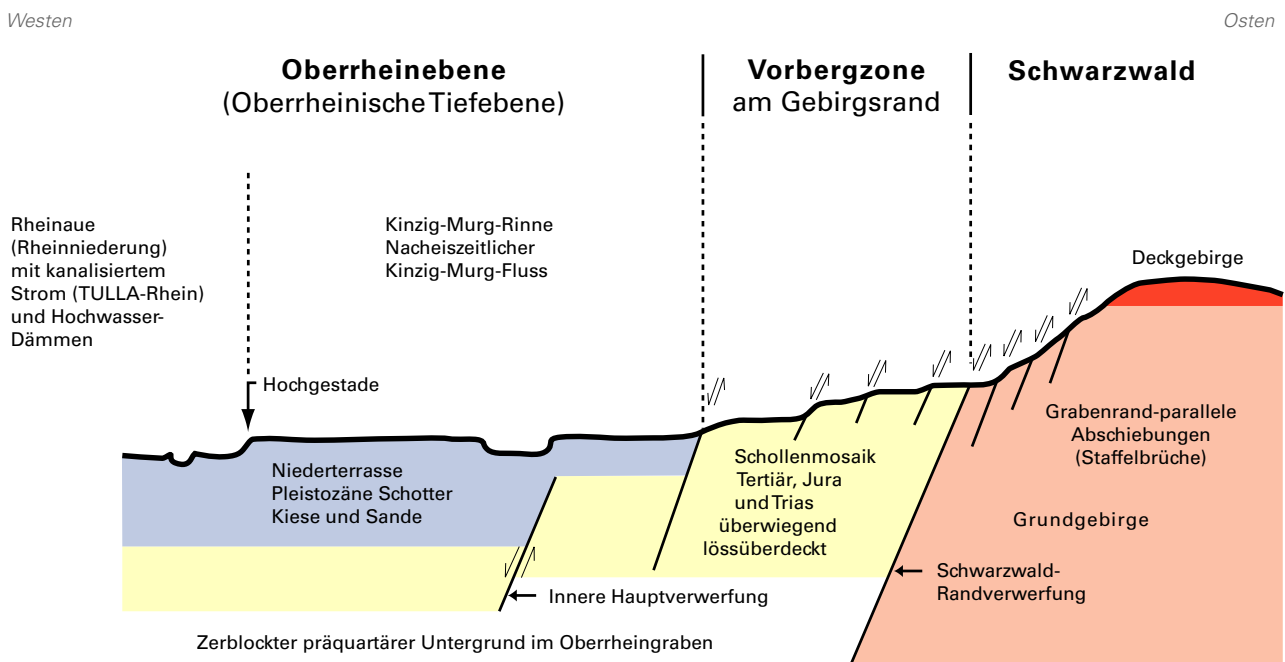


Abb. 2.2.1-1: Schematischer West-Ost-Schnitt vom Oberrhein zur Hornisgrinde (nicht maßstäblich; nach Metz 1989)



Die Schwarzwaldrandverwerfung trennt die Vorbergzone vom Schwarzwald. Hier sind zwei geologische Baueinheiten zu unterscheiden:

- das Grundgebirge als Sockel aus älteren kristallinen Gesteinen
- das stockwerkartige Deckgebirge aus jüngeren Sedimentgesteinen [METZ 1989].

Im Ortenaukreis umfasst das kristalline Grundgebirge den Zentralschwarzwälder Gneiskomplex, der von Oppenau im Norden bis weit über das Kinzigtal hinaus nach Süden reicht sowie zwei Granitplutone des Nordschwarzwälder Granitgebiets, den räumlich begrenzten Seebachgranit unterhalb und südlich der Hornisgrinde und den weite Flächen beherrschenden Oberkirchgranit. Granitplutone treten auch innerhalb des Zentralschwarzwälder Gneiskomplexes auf. Die beiden wichtigsten sind der lokal begrenzte Nordrachgranit und der im südöstlichen Landkreis flächig verbreitete Triberggranit.

Zum Grundgebirge zählt ein Migmatit-Komplex zwischen dem Südrand des Oberkirchgranits und dem Zentralschwarzwälder Gneiskomplex. Dort anstehende Gesteine wurden bereits 1893/94 erstmals beschrieben und nach dem benachbarten Weinbauort als Durbachit benannt [KESSLER, LEIBER 1994].

Die Basis des Deckgebirges wird überwiegend von rötlichen Sedimentgesteinen (überwiegend Sand- und Tonsteine) und Vulkaniten (Quarzporphyr) des Perms gebildet. Darüber stehen mächtige Formationen des Buntsandsteins an (Abb. 2.2.1-2). Flächenhaft verbreitet ist der Buntsandstein zwischen Diersburg und Ettenheimmünster, um den Mooskopf und an der östlichen Landkreisgrenze.

Der ursprünglich über den Formationen des Buntsandsteins anstehende Muschelkalk ist bis auf wenige, z.T. stark verwitterte Vorkommen südlich und nördlich von Lahr abgetragen. Die geologische Karte zeigt die Verbreitung der Gesteinsarten im Ortenaukreis (Abb. 2.2.1-3).

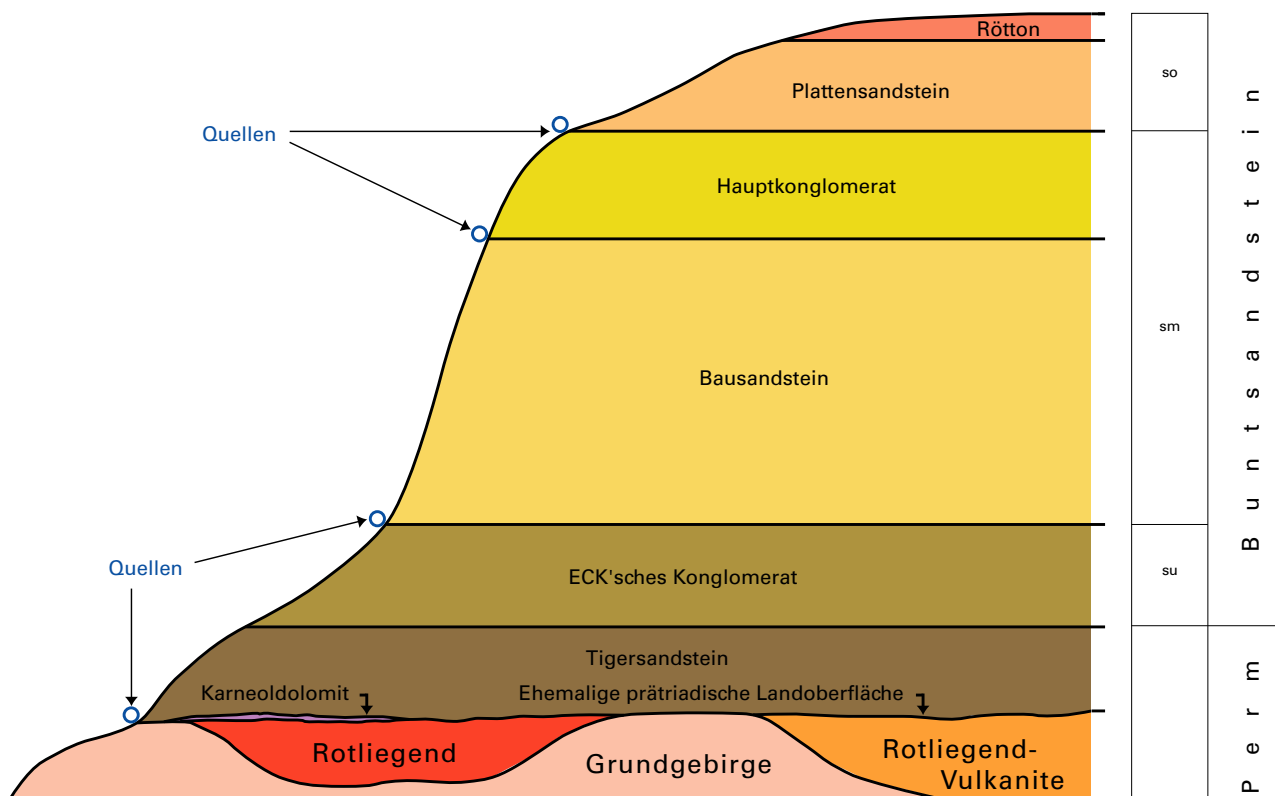
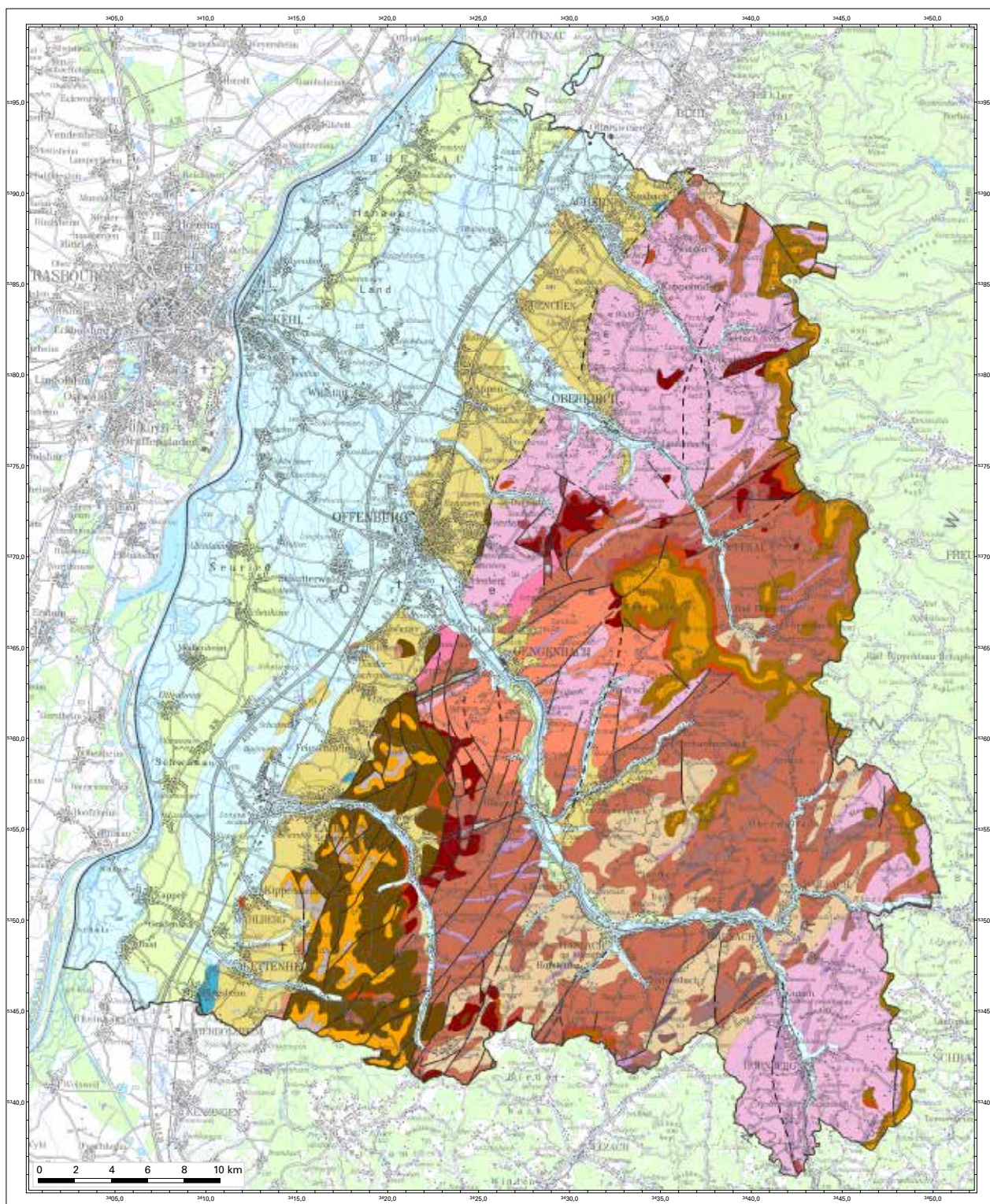


Abb. 2.2.1-2: Aufbau des Deckgebirges im mittleren Schwarzwald (nach Metz 1989)



### Geologische Einheiten

- Hochwassersediment (meist auf Flussschotter; lokal andere Talfüllungen)
- Hangschutt (lokal Rutschmassen und andere Umlagerungssedimente)
- Lösssediment (lokal Abschwemmmassen)
- Lösssediment (lokal Schwemmsediment) auf Würm-Schotter
- Würm-Schotter
- Tertiär**
- Eozän-Schichten, ungegliedert
- Jüngere Magmatite**
- Basaltuff und Basalt (im weiteren Sinn)

- Jura**
- Mitteljura, ungegliedert
- Unterjura (z. T. mit Oberkeuper), ungegliedert
- Trias**
- Muschelkalk, ungegliedert
- Oberer Muschelkalk
- Mittlerer Muschelkalk
- Unterer Muschelkalk
- Oberer Buntsandstein
- Mittlerer Buntsandstein (linksrhein. z. T. mit Unt. Buntsandstein)
- Zechstein bis Mittlerer Buntsandstein
- Zechstein bis Unterer Buntsandstein

- Perm**
- Rotliegend, ungegliedert
- Oberrotliegend
- Unterrotliegend
- Karbon-Sedimente**
- Oberkarbon, ungegliedert
- Paläozoische Magmatite**
- Rotliegend-Quarzporphyr
- Heller Gangmagmatit
- Granitplutone
- Granodiorit
- Erzenbach-Komplex

- Metamorphe Gesteine**
- Migmatit-Komplex
- Flasergneis (überwiegend)
- Leukokrater Gneis (überwiegend)
- Paragneis (überwiegend)
- Tektonitzone
- Tektonik**
- Störung, nachgewiesen
- - Störung, vermutet

Kartgrundlage: Geologische Karte des Schwarzwalds 1 : 150.000 (GKS150) © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
 Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
 Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 2.2.1-3: Geologische Karte, Ortenaukreis



### 2.2.2 Abriss der Erdgeschichte

Erdgeschichtlich beginnt die Gesteinsabfolge in der Ortenau mit den Gneisen des Zentralschwarzwälder Gneiskomplexes, die der Zeit vor dem Karbon (> 358 Mio. Jahre) zuzuordnen sind. Es handelt sich um metamorphe Gesteine, die aus älteren Ausgangsgesteinen (Magmatite und Sedimentgesteine) gebildet worden sind. In die Gneise sind während des Karbons vor 358 - 296 Mio. Jahren im Zug tektonischer Bewegungen der variskischen Gebirgsbildung Granite eingedrungen. Ursache der Gebirgsbildung war die Kollision kontinentaler Platten [GEYER, GWINNER 2011].

Mit der Gebirgsbildung setzte die Erosion und Abtragung ein, wobei die Sedimente in bruchtektonisch entstandenen, grabenartigen Becken innerhalb des Gebirges abgelagert wurden. Dort sind bei tropisch warm-feuchtem Klima im Oberkarbon auch organische Ablagerungen entstanden, die später zu Steinkohle verfestigt wurden. Bei Berghaupten sind sie steilstehend in das umgebende Grundgebirge eingeschuppt [KESSLER, LEIBER 1994].

Bereits im Oberkarbon war das variskische Gebirge soweit abgetragen, dass Granitplutone zum Vorschein kamen. Infolge spätvariskischer Dehnungs- und Scherungsvorgänge senkten sich die grabenartigen Becken im Perm vor 296 - 250 Mio. Jahren weiter ein. Sie wurden weitgehend mit Sedimenten aus der Umgebung gefüllt. Die oft roten Sedimente (Rotliegend) kennzeichnen eine Zeit mit wüstenartigem Klima in einem neu entstandenen Großkontinent.

Die Graben- und Senkenbildung war mit verstärkter vulkanischer Aktivität vor allem an den Randzonen verbunden [GEYER, GWINNER 2011]. Dabei wurden saure Magmen gefördert, die heute als Quarzporphyr (Rhyolithe) den vulkanischen Ursprung belegen. Die räumliche Ausdehnung z.B. des Brandeck-Porphyr nord- und südöstlich von Lahr lässt vermuten, dass diese Gesteine ursprünglich einen Bereich von mehr als 200 km<sup>2</sup> überdeckten [METZ 1989]. Ein Beispiel für eine Spaltenfüllung aus Quarzporphyr ist der Karlsruher Grat bei Oppenau.

In der Trias vor 250 - 200 Mio. Jahren war die Ortenau Teil eines großen Sedimentbeckens. Unter einem ariden Klima sind dort in breit gefächerten Flusssystemen Sedimente des Buntsandsteins abgelagert worden. Die Landschaft war damals bereits durch fortschreitende Abtragung weitgehend eingeebnet [GEYER, GWINNER 2011]. Zwischen Diersburg und Ettenheimmünster sind zahlreiche Steinbrüche zu finden, in denen der Bausandstein des Mittleren Buntsandsteins aufgeschlossen ist (Abb. 2.2.2-1).

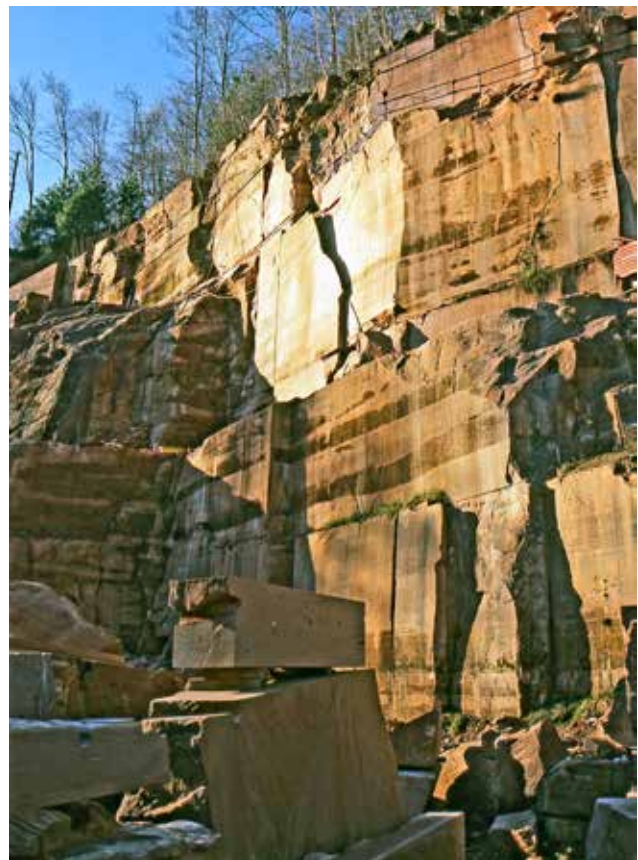


Abb. 2.2.2-1: Abbau von Bausandstein bei Lahr-Kuhbach;  
Bild: W. Werner

Später überflutete das Meer die Sedimentationsräume des Buntsandsteins vollständig. Für diesen Zeitabschnitt sind z.T. fossilführende graue Kalke oder Dolomite des Muschelkalks charakteristisch. Gesteine aus terrestrischen und marinen Sedimenten der nachfolgenden Keuperzeit sind nur im Untergrund des Oberreingrabens erhalten.

Im Jura vor 200 - 146 Mio. Jahren drang das Meer erneut in die Ortenau vor. Erwähnenswert sind die eisenhaltigen Kalksteine aus dem Mitteljura (Dogger), die bei Ringsheim abgebaut wurden. Während der Kreidezeit vor 146 - 65 Mio. Jahren waren weite Bereiche von Süddeutschland, so z.B. das Gebiet der Ortenau, Festland.

Mit dem Beginn des Tertiärs vor etwa 65 Mio. Jahren setzte zunächst im Süden die Bildung des Oberrheingrabens ein. In der Folgezeit wurde die einsinkende Grabensohle mehrfach vom Meer überflutet. Vor 30 Mio. Jahren waren die Grabenschultern bereits stark angehoben und Teile des Deckgebirges im Schwarzwald unter Bildung von Tälern abgetragen.

Die mit der Grabenentstehung verbundene Bruchtektonik war erneut mit vulkanischer Aktivität verbunden. Im Ortenaukreis steht das Mahlberger Schloss auf einer durch Abtragung herauspräparierten Schlotfüllung eines basaltischen Vulkans [LUBW 2005a].

Im Quartär vor 2,6 Mio. Jahren setzte die eiszeitliche Überprägung im süddeutschen Raum ein. Im Schwarzwald zeugen z.B. die Kare des Mummelsees und des Biberkessels von der ehemaligen Vereisung.

In den damals periglazialen (gletscherfreien) Gebieten hat wiederkehrender Frostwechsel über dauerhaft gefrorenem Untergrund (Permafrost) zur Bildung von Hangschuttdecken und Blockhalden sowie zu Bodenfließen (Solifluktion) geführt. Im Schwarzwald sind dadurch mächtige periglaziale Deckschichten entstanden, die sich meist in eine Basislage aus verwitterten Materialien hangaufwärts anstehender Gesteine und eine Decklage mit Lössbeimengung gliedern lassen (Abb. 2.2.2-2).

Die physikalische Verwitterung in den eiszeitlichen Kaltzeiten förderte maßgeblich die Bodenbildung während der interglazialen Warmzeiten. Während der Kaltzeiten wurden aus den vegetationsfreien Frostschuttzonen und trockengefallenen Schotterflächen der alpinen Schmelzwasserströme große Mengen an Mineralstaub ausgeblasen und hauptsächlich in der Oberrheinebene und Vorbergzone als Löss abgelagert.



Abb. 2.2.2-2: Bodenbildung auf periglazialer Deckschicht aus lösslehmhaltiger Decklage (< 70 cm Tiefe) über steinigen und steinfreien Basislagen, Gemarkung Berghaupten; Bild: LGRB

Ältere Lösslehme (Decklehme) sind auch in Schwarzwaldtälern zu finden. In der Oberrheinebene wurden über die Terrassenschotter bei Hochwasser Hochflutseimente aufgelandet, die aus den Hangbereichen periglazial überformter Gebiete erodiert worden sind.

### 2.2.3 Gesteinsbeschreibung

Nachfolgend werden die wichtigsten Gesteine im Ortenaukreis beschrieben. Informationen zum Aufbau der gesteinsbildenden Silikatminerale enthält Kap. A.2.2.3.

Gneise sind metamorphe Gesteine, die durch Umwandlung (Metamorphose) unter hohem Druck und Temperaturen  $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei gebirgsbildenden (orogenetischen) Vorgängen in tieferen Bereichen der Erdkruste (bis 60 km) aus unterschiedlichen Ausgangsgesteinen (Edukten) entstanden sind.

Gneise haben oft ein typisches, deutlich lagiges Gesteinsgefüge, das an mehr oder weniger scharfen Wechseln von hellem Feldspat und Quarz mit dunklen Glimmern (oft Biotit) zu erkennen ist. Daneben kommen Minerale wie Granat, Cordierit oder Sillimanit vor, deren Auftreten von bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen abhängt.

Im Ortenaukreis können je nach Ausgangsgestein verschiedene Gneisarten unterschieden werden. Flasergneise (Orthogneise; Abb. 2.2.3-2) sind aus magmatischen Gesteinen hervorgegangen (z.B. Granit), während die typisch gebänderten Paragneise aus früheren Sedimentgesteinen entstanden sind (z.B. Tonstein; Abb. 2.2.3-3), was u.a. durch Funde von Mikrofossilien belegt werden konnte. Für die um Gengenbach verbreiteten leukokraten Gneise (leukos: hell) werden rhyolithische Vulkanite als Edukte angenommen. Ihr Anteil an hellen Feldspäten und Quarz beträgt um 95 %, während der Anteil dunkler Mineralgemengteile (hauptsächlich Biotit) mit durchschnittlich 2,5 % gering ist [GEYER, GWINNER 2011; RÖHR 1990; OKRUSCH, MATTHES 2005; VINX 2011].

Die Durbachite des bei Ohlsbach anstehenden Migmatit-Komplexes bestehen hauptsächlich aus Kalifeldspat, Plagioklas sowie dunklem Glimmer (Biotit) und Amphibol (Hornblende). Die dunklen Minerale sind z.T. in die großen Kalifeldspäte eingeschlossen (Abb. 2.2.3-4), was auf das jüngere Bildungsalter der Kalifeldspäte hindeutet.

Biotit und Hornblende zeichnen sich durch hohe Gehalte an Chrom und Nickel aus. In der Kristallstruktur ersetzen Chrom und Nickel das Eisen und das Magnesium. Erhöhte Chrom- und Nickelgehalte weisen somit auch die Böden im Bereich des Migmatit-Komplexes auf (Kap. 4.1.1). Die Entstehung der Durbachite bzw. des Migmatit-Komplexes steht mit der variskischen Gebirgsbildung im Zusammenhang [GEYER, GWINNER 2011; KESSLER, LEIBER 1994; MORCHE 1979].

Auch Serpentine sind metamorphe Gesteine. In der Regel handelt es sich um tief dunkelgrüne bis schwarze Gesteine, die in Linsen und Schollen sehr geringer Ausdehnung in Paragneisen der Ortenau eingeschaltet sind. Vorkommen sind u.a. bei Schuttertal-Höfen, Gengenbach-Strohbach, Oppenau-Maisach und Wolfach bekannt.

Edukte der Serpentine sind Erdmantelgesteine wie z.B. Peridotite. Der Serpentin in Abb. 2.2.3-5 bestand ursprünglich aus Olivin, Pyroxen und Amphibol. Durch tektonische Vorgänge wurden die Erdmantelgesteine in die Erdkruste eingeschuppt und zusammen mit umgebenden Gneisen in höhere Stockwerke transportiert. Mit der metamorphen Überprägung verbunden ist die Aufnahme von Wasser in die Kristallstrukturen der Minerale der Ursprungsgesteine (Serpentinisierung). Aus Olivin entstehen Serpentinminerale, die Hydroxylionen in ihrer Struktur enthalten [BAATZ 1988; LGRB 1997; VINX 2011]. Bei der Verwitterung der Serpentine machen sich die erhöhten Chrom- und Nickelgehalte in den Böden bemerkbar (Kap. 4.1.1).

Granite sind magmatische Gesteine, die durch Teilauflösung kontinentaler Kruste entstanden sind. Sie bestehen hauptsächlich aus den Mineralen Feldspat, Quarz und Glimmer. Das charakteristische grobkörnige Aussehen der Gesteine ist auf den längeren Kristallisationsverlauf der in der Erdkruste langsam erstarrenden Granitschmelzen zurückzuführen (Abb. 2.2.3-6).



Beim Seebachgranit handelt es sich um einen Zweiglimmergranit, der zusätzlich zum normalerweise auftretenden Biotit auch Muskovit enthält. Oberkirch-, Nordrach- und Triberggranit sind dagegen Biotitgranite; letzterer weist örtlich Schlieren von Zweiglimmergranit auf. Die Magmen dieser Granite sind durch Teilaufschmelzung von Sediment- und magmatischen Gesteinen im Zug von tektonischen Bewegungen in der tieferen Erdkruste entstanden, wie sie bei der Kollision der Kontinente auftreten [GEYER, GWINNER 2011; VINX 2011].

Bei den Quarzporphyren handelt es sich um vulkanische Förderprodukte (Laven, Pyroklastite) mit rhyolithischer Zusammensetzung. Die chemische und die mineralogische Zusammensetzung entsprechen weitgehend der von Graniten.

Im Gegensatz zur gleichförmig grobkörnigen Textur der Granite ist die Grundmasse der Porphyre feinkörnig und dicht, wobei Einsprenglinge von Quarz und Kalifeldspäten sowie Biotit mit dem bloßen Auge erkennbar sind (Abb. 2.2.3-7).

Im Ortenaukreis lassen sich verschiedene Quarzporphyr-Typen unterscheiden, die nach den Lokalitäten bezeichnet werden:

- der grauviolette bis rote Brandeck-Quarzporphyr (Abb. 2.2.3-7)
- der violettbraune bis graue, einsprenglingsarme bis -freie Grünberg-Quarzporphyr
- der gebleichte, blassgraue bis weißliche Mooswald-Quarzporphyr (Abb. 2.2.3-1) [MAUS 1965; VINX 2011], der z.B. an der L 103 nahe Hintergeisberg auf Gemarkung Schweighausen aufgeschlossen ist.

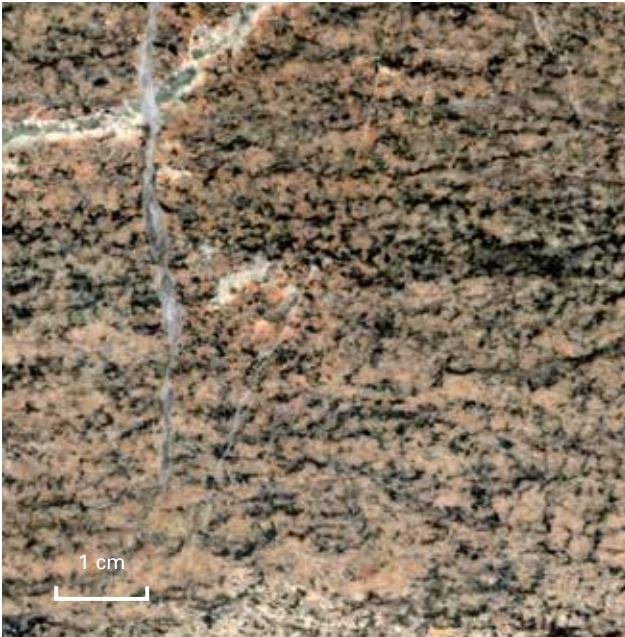
Rotbraune bis rote Sandsteine unterschiedlicher Körnung repräsentieren den Buntsandstein. Sie bestehen in bergfrischem Zustand überwiegend aus Quarz und 5 - 25 % Feldspat. Im Unteren und Mittleren Buntsandstein führen die Sandsteine Lagen von Geröllen aus Gesteinen, die aus dem Schwarzwald nicht bekannt sind und auf einen weiteren Transportweg hinweisen. Im Oberen Buntsandstein herrschen glimmer-



Abb. 2.2.3-1: Weißlicher Mooswald-Quarzporphyr, in einem Steinbruch aufgeschlossene Schlotfüllung; Bild: R. Olschewski

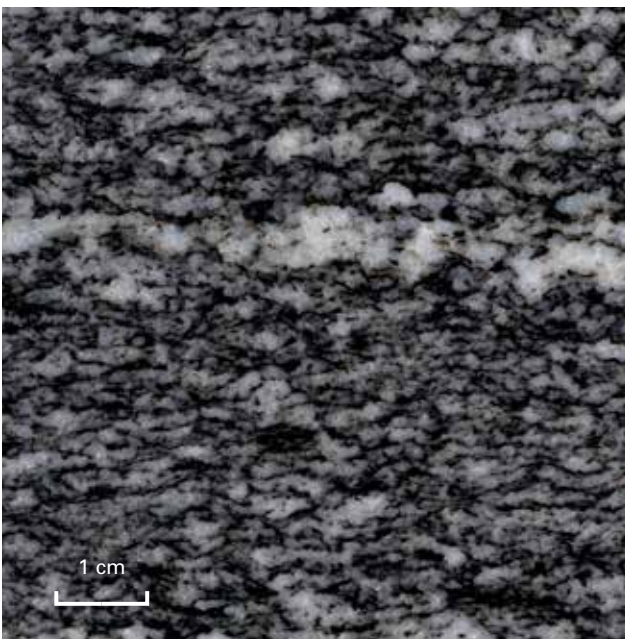
führende Feinsandsteine vor (Plattensandstein), die von rotbraunen Schlufftonsteinen (Rötton) überlagert werden (Abb. 2.2.1-2) [GEYER, GWINNER 2011].

Löss ist ein graugelbes, wenig verfestigtes Lockersediment aus äolisch verfrachtetem Gesteinsstaub. Die 0,01 - 0,05 mm großen Lösspartikel bestehen vorwiegend aus Quarzkörnern sowie zu 10 - 20 % aus Feldspat, Ton und anderen Mineralen. Im unverwitterten Löss ist außerdem bis zu 40 % Carbonat in Form von detritischen Körnern enthalten [SCHREINER 1992].



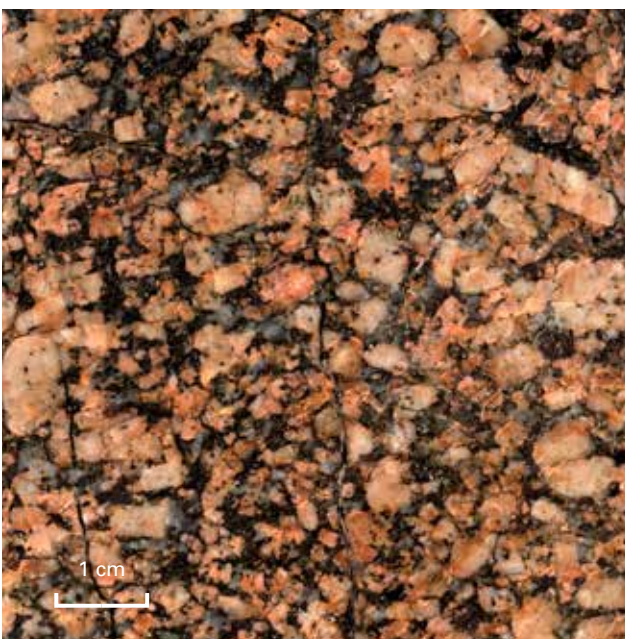
**Abb. 2.2.3-2: Flasergneis**

aus dem Steinbruch „Artenberg“ Gemarkung Steinach; mittelkörnig, aus hell fleischfarbig bis rötlichem Kalifeldspat, Plagioklas, Quarz (grau), Biotit; grobblinsige Paralleltexur und flasrig eingeregelter Biotit (schwarz); quer zur Textur eine hydrothermale Kluftfüllung aus Calcit (linke Bildhälfte); Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski



**Abb. 2.2.3-3: Paragneis**

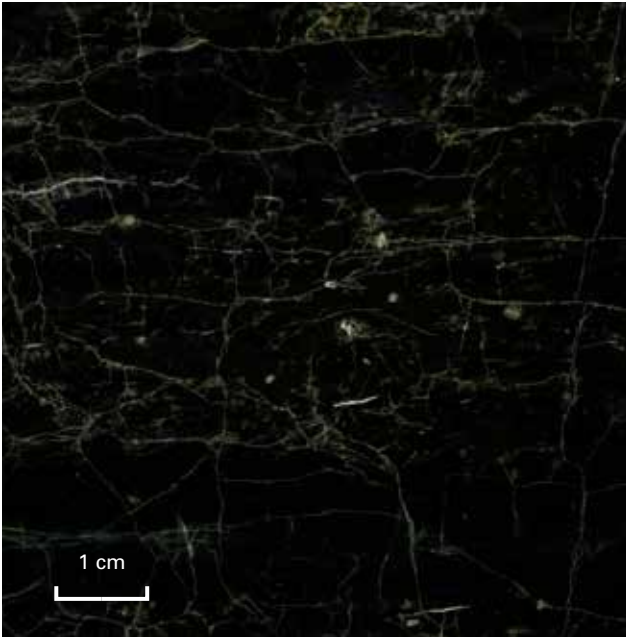
aus dem Steinbruch „Hechtsberg“ Gemarkung Hausach-Einbach; Biotit-Quarz-Plagioklas-Gneis, mittelkörnig, geschiefert, strafflagige Anordnung des Biotits (schwarz), Quarz (glasig bis gräulich), Plagioklas (weiß bis milchig); Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski



**Abb. 2.2.3-4: Durbachit**

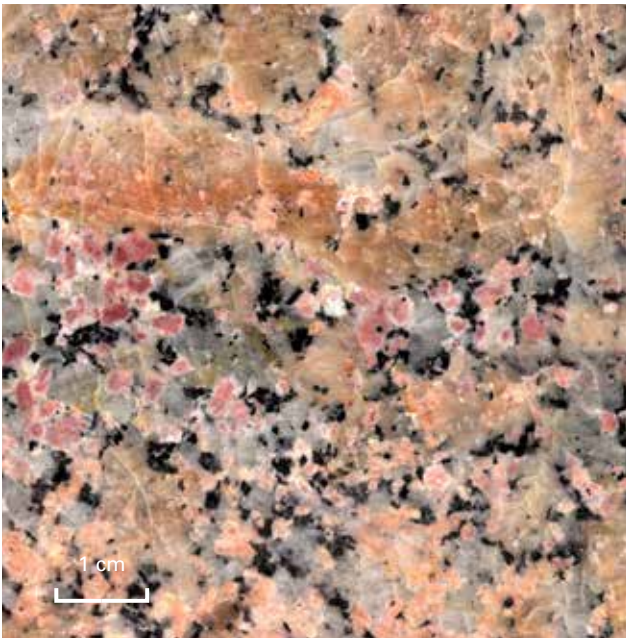
Fundort nahe dem „Scheibenköpfe“ Gemarkung Ohlsbach; grobkörnig, aus viel Biotit und Hornblende (schwarz) mit Kalifeldspat-Großkristallen; letztere zeigen eine angedeutete schwache Einregelung; Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski





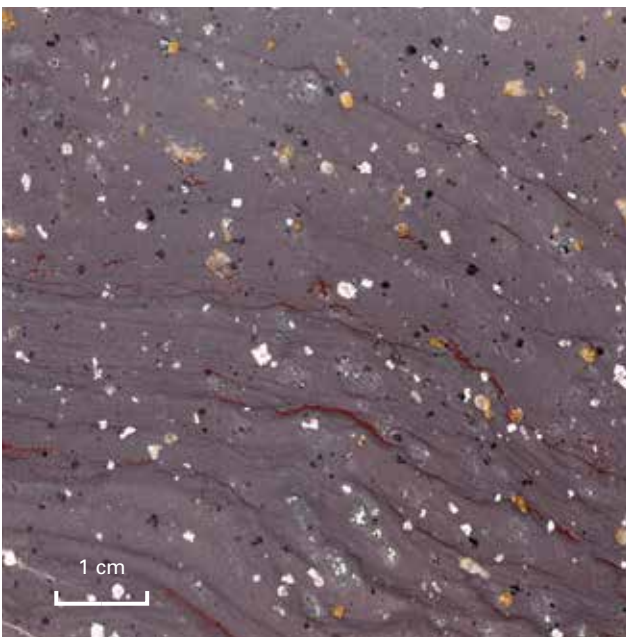
**Abb. 2.2.3-5: Serpentin**

aus einem kleinen, aufgelassenen Steinbruch bei Höfen, Gemarkung Schuttertal; feinkörnig bis dicht, die Serpentinminerale (Chrysotil, Antigorit, Lizardit) sind so feinfasrig, dass sie mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind; zusätzlich können Hornblende und Talk enthalten sein (z. B. auf Rissen); Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski



**Abb. 2.2.3-6: Oberkirch-Granit (Biotit-Granit)**

aus dem Steinbruch der Fa. Ossola bei Kappelrodeck-Waldulm, grobkörnig, bestehend aus Kalifeldspat (schwach gelblich bis rot), Quarz (grau), Biotit (schwarz) sowie orange bis rötlich gefärbten Kalifeldspat-Großkristallen; Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski



**Abb. 2.2.3-7: Brandeck-Quarzporphyr**

aus dem Steinbruch der Fa. Vogel-Bau GmbH, im Gereut bei Lahr-Reichenbach; feinkörnige bis dichte Grundmasse mit Fluidaltextur und Einsprenglingen aus Quarz (grau bis glasig, rundlich), Feldspäten (hell, idiomorph) sowie Pyroxene oder Biotit (frisch: schwarz; verwittert: bräunlich), rote Bänderchen aus Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) zeichnen die Fluidaltextur nach; Gesteinsanschliff: G. Gollembeck; Bild: R. Olschewski

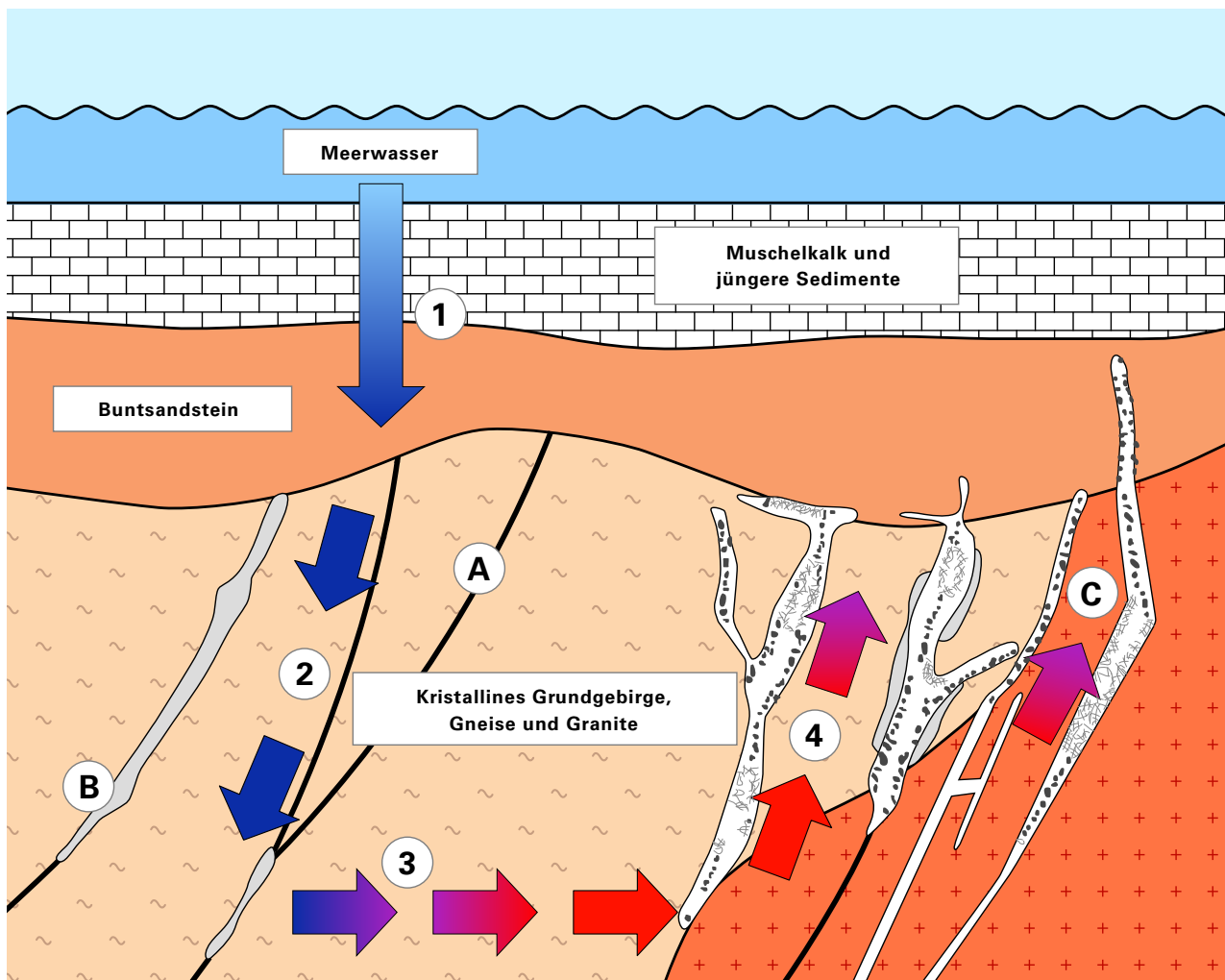
## 2.2.4 Entstehung hydrothermaler Erz- und Mineralgänge

Durch den mittelalterlichen und frühneuzeitlichen Bergbau sind bedeutende Mengen an Spurenmetallen in die Böden der betroffenen Regionen eingetragen worden (Kap. 4.1.2). Nachfolgend wird die Entstehung der hydrothermalen Erz- und Mineralgänge im Schwarzwald grob skizziert.

Hydrothermale Erz- und Mineralgänge sind stets an Spalten- und Kluftsysteme (Störungszonen) gebunden, die bei tektonischen Dehnungs- und Scherungsvorgängen in der oberen Erdkruste entstehen. In solchen Störungszonen kommt es zur Ausfällung von Erzen bzw. Mineralen,

wenn zirkulierende heiße wässrige Lösungen beim Aufsteigen abkühlen oder auf kühlere Oberflächenwässer treffen (Abb. 2.2.4-1). Anhand von Isotopenuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die hydrothermalen Lösungen, die an der Bildung der meisten Erz- und Mineralgänge des Schwarzwalds beteiligt waren, auf ehemalige Oberflächenwässer (z.B. Meerwasser) zurückgeführt werden können.

Diese Oberflächenwässer sind in das sedimentäre Deckgebirge eingedrungen, wobei ihr Salzgehalt u.a. bei der Passage von Sedimentgesteinen mit Steinsalz (NaCl) oder Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) führenden Formationen z.B. im Mittleren Muschelkalk zugenommen hat.



- (1) Meerwasser dringt in das Deckgebirge ein und erhöht dort den Salzgehalt (Salinität)
- (2) an Schwäche zonen (Störungen) gelangt die Salzlauge in das kristalline Grundgebirge
- (3) dort reagiert die Salzlauge mit dem Gestein und löst Elemente (z. B. Barium, Blei, Fluor, Kupfer, Silber)
- (4) die angereicherten Lösungen zirkulieren durch den Untergrund und steigen an anderen Störungssystemen wieder auf
- (A,B) Ältere (variskische) Störungen und Erzgänge
- (C) Jurassische Erzgänge

Abb. 2.2.4-1: Modell zur Entstehung der hydrothermalen Erz- und Mineralgänge im Schwarzwald; Quelle: Markl 2004



Entlang von Störungszonen sind die salinaren Lösungen tief in das Grundgebirge eingedrungen und dabei aufgeheizt worden. Heiße, unter Druck stehende Lösungen reagierten mit Gneisen und Graniten, Feldspäte und Glimmer wurden zerstört und die darin enthaltenen Elemente freigesetzt. Dazu zählen u.a. größere Mengen an Eisen, Calcium, Barium, Fluor sowie Spuren an Arsen, Blei, Kupfer und Silber. Bereits vorhandene ältere Erzgänge können auf diese Weise wieder aufgelöst werden.

Die heißen Lösungen stiegen aufgrund ihrer geringeren Dichte in den Kluftsystemen wieder auf. Dabei wurden aus Gesteinen oder älteren Erzgängen freigesetzte Schwermetalle, die mit den Inhaltsstoffen der salinaren Lösungen gebildet wurden ( $\text{ZnCl}^+$ ,  $\text{PbCl}^+$ ,  $\text{FeCl}^+$ ,  $\text{FeSO}_4$  u.a.), als gelöste anorganische Komplexe weggeführt.

Beim Aufstieg in Richtung Erdoberfläche kam es durch Temperaturabnahme und ggfs. Vermischung mit kühleren, sulfathaltigen Wässern zur Abscheidung der Gangminerale Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und/oder Schwerspat (Baryt  $\text{BaSO}_4$ ) sowie Flussspat (Fluorit  $\text{CaF}_2$ , Abb. 2.2.4-2). Unter den veränderten physikochemischen Milieubedingungen (pH-Wert, Redoxpotenzial) verblieben die anorganischen Komplexe nicht mehr in der Lösung und kristallisierten als Erzminerale aus. Zu nennen sind insbesondere der silberhaltige Bleiglanz (Galenit,  $\text{PbS}$ ), Zinkblende (Sphalerit,  $\text{ZnS}$ ), Kupferkies (Chalkopyrit,  $\text{CuFeS}_2$ ) und Fahlerze wie z.B. Tennantit  $\text{Cu}_{10}(\text{Fe}, \text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}$ .

Schwermetalle sind in den hydrothermalen Lösungen nur in geringen Mengen enthalten (0,001 - 0,05 Gew.-%), so dass zur Bildung ertragreicher Lagerstätten Erzminerale aus aufsteigenden Fluiden über Jahrtausende abgeschieden werden müssen. Oft bildeten sich die Lagerstätten in zeitlich getrennten Phasen, wenn ältere, vererzte Kluftsysteme infolge tektonischer Vorgänge erneut geöffnet und den zirkulierenden hydrothermalen Lösungen zugänglich wurden (Abb. 2.2.4-2) [BLIEDTNER, MARTIN 1988; MARKL 2004; OKRUSCH, MATTHES 2005; SEWARD, BARNES 1997; WERNER, DENNERT 2004].



Abb. 2.2.4-2: Gangmineralisation aus Baryt und Fluorit unterschiedlicher Generationen (links und rechts) aus der Grube Segen Gottes, Haslach; Bild: W. Werner

Im Schwarzwald können die folgenden Vererzungsphasen unterschieden werden [MARKL 2004]:

- spätvariskische Phase vor bis zu 300 Mio. Jahren
- jurassische und kretazische Phase vor 190 - 80 Mio. Jahren
- tertiäre Phase vor 40 - 20 Mio. Jahren, in der die vorwiegend parallel zum Rheingraben verlaufenden Erzgänge entstanden sind, die mit seiner Bildung im Zusammenhang stehen.

## 2.3 Der Einfluss der Landnutzung

Seit die ersten Ackerbauern in der Jungsteinzeit (Neolithikum, 5500 - 2200 v. Chr.) sesshaft wurden wirkten die Menschen landschaftsgestaltend. Wegen ihrer hohen Fruchtbarkeit und guten Bearbeitbarkeit wurden zuerst die Lössböden der Vorbergzone gerodet [MÄCKEL 1997; KÜSTER 1998]. Waren die sehr erosionsanfälligen Lössböden von Vegetation befreit, setzte vermehrt Bodenabtrag ein. Dadurch wurde nicht nur die Bodenentwicklung in der Vorbergzone beeinflusst (Kap. 3.1.2), sondern auch die Bodenbeschaffenheit in angrenzenden Bach- und Flussauen verändert.

Untersuchungen mit der Radiokarbonmethode haben ergeben, dass z.B. in der Ettenbachaue bis in die späte Bronzezeit (1300 - 800 v. Chr.) zwischen 60 und 150 cm mächtiges, humoses Bodenmaterial aufgelandet worden ist [SCHNEIDER 2000; SEIDEL 2004]. Solche Ablagerungen lassen sich an überdeckten („fossilen“) humosen Oberböden erkennen, die die frühere Geländeoberfläche kennzeichnen (Abb. 2.3-1).

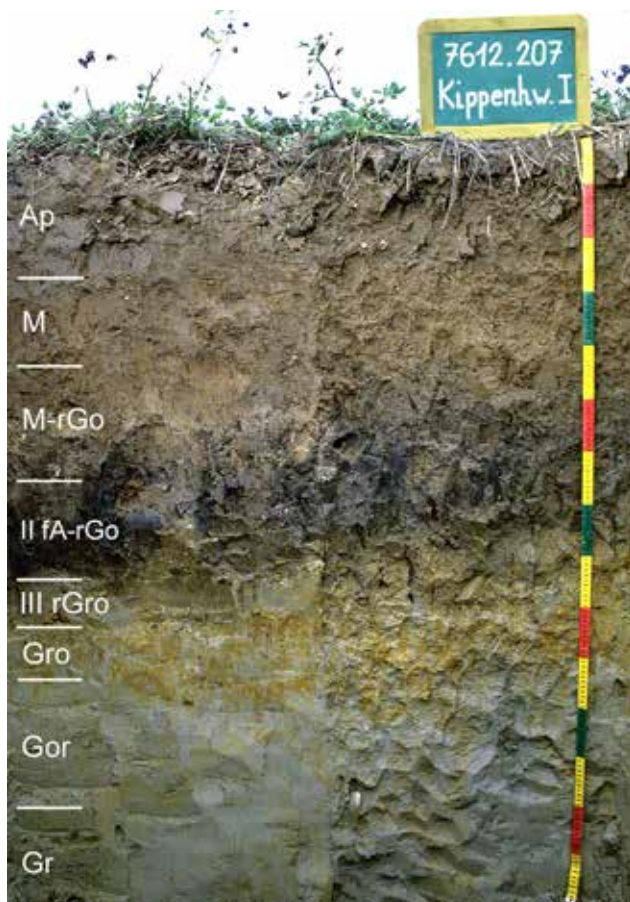


Abb. 2.3-1: Überdeckter humoser Oberboden in 50 - 60 cm Tiefe östlich von Kippenheimweiler, Bodentyp: Auengley - Brauner Auenboden; Bild: LGRB

Der Einsatz besserer Bodenbearbeitungsgeräte seit der vorrömischen Eisenzeit und die Ausdehnung einer weitgehend gerodeten Kulturlandschaft in der Römerzeit haben die Bodenerosion in der Vorbergzone intensiviert, so dass weiter große Mengen an Löss erodiert und anderenorts als Schwemmlöss abgelagert worden sind.

Bedingt durch die Völkerwanderung und einsetzendes feuchtkaltes Klima in den folgenden Jahrhunderten nahmen die Besiedlungsdichte und die ackerbauliche Nutzung zunächst wieder ab.

Die vom Elsass ausgehende fränkische Besiedlung, von der Ortsnamen mit der Endung „-heim“ zeugen, leitete im Frühmittelalter eine neue, weit umfangreichere Rodungs- und Landnutzungsphase ein, in deren Folge das Ausmaß der Bodenerosion bis in die Neuzeit hinein wieder deutlich zugenommen hat [KAUSS 1989; MÄCKEL 1997; SCHNEIDER 2000].

Ein im Vergleich zu heute etwas trockeneres und wärmeres Klima begünstigte die Ausdehnung des Obst- und Weinanbaus in der Vorbergzone. Anhaltende Bodenerosion dürfte dazu geführt haben, dass damit begonnen wurde, die Hangformen der Lössflächen durch Terrassierungen umzugestalten. Ausgehend von ersten Klostergründungen im 8. Jahrhundert (Benediktinerabteien Gengenbach und Ettenheimmünster) wurden zunehmend höhere Schwarzwaldlagen besiedelt und erschlossen.

Der stetig wachsende Bedarf an Holz, Erz, Weide- und Ackerland führte dazu, dass im Schwarzwald kontinuierlich immer mehr Hangflächen abgeholzt wurden. Im Jahr 1780 war der Schwarzwald nur noch zu einem Drittel mit Wald bestockt [SCHMIDT 1989].

Dieser Eingriff hatte eine veränderte Abflussdynamik und zunehmende Abflussmengen zur Folge. Die Häufigkeit von Überschwemmungen nahm zu und Flussläufe änderten sich. Ein Beispiel ist der Unterlauf der Elz, der vermutlich bis ins Hochmittelalter östlich von Rust verlief. Die trockenen Mäanderbögen des ehemaligen Flussbetts sind noch im Gelände erkennbar. Der begradigte Verlauf der heutigen Elz liegt 1,5 km entfernt im Westen [SCHNEIDER 2000].

In weite Bereiche der ehemaligen Schwemmfächer der Kinzig und der Schutter sind Sedimente mit z.T. hohen Bleigehalten eingetragen worden. Sie sind auf mittelalterliche bis früh neuzeitliche Bergbau- und Verhüttungstätigkeiten in den Einzugsgebieten zurückzuführen (Kap. 4.1.2, Abb. 4.2.3.1-1). Bergbau und Verhüttung wurden in der Ortenau schon in keltischer und römischer Zeit betrieben. In der Schutteraue bei Lahr-Reichenbach sind z.B. schlackenführende Schichten in > 2 m Tiefe mit der Radiokarbonmethode auf ein Alter um  $205 \pm 55$  v. Chr. bis  $190 \pm 40$  n. Chr. datiert worden [LEIBER 1994].

Besonders ertragreich war vom 13. bis ins 16. Jahrhundert der auf Blei- und Silbererze ausgerichtete Bergbau in und um Prinzbach, bei Haslach und bei Hausach im Kinzigtal. Silberbergbau ging in dieser Zeit auch im oberen Haigerach- und Nordrachtal um (Abb. 2.3-2).

In der Folgezeit wurde die Ausbeutung oberflächennaher Vererzungen wegen der im Vergleich zu anderen

Bergbaugebieten ärmeren Erzführung und aufgrund des Holzmangels immer kostspieliger. Pestepidemien, Kriege und soziale Unruhen mögen dazu beigetragen haben, dass die Bergbauaktivitäten während des 17. Jahrhunderts nahezu vollständig zum Erliegen kamen.

Ab Mitte des 18. Jahrhunderts erlebte der Bergbau im Schwarzwald eine ungefähr 100 Jahre dauernde, im Gegensatz zu früheren Zeiten recht kontinuierliche Wiederbelebung. Zu erwähnen sind die Gruben „Segen Gottes“ bei Haslach-Schnelllingen und „Wenzel“ im Frohnachtal bei Oberwolfach. Aus Erzen wurden dort in den Jahren 1766 bis 1818 4 t Silber gewonnen [BLIEDTNER, MARTIN 1986]. Beide Gruben sind als Besucherbergwerke zugänglich.

Der Bergbau war in dieser Zeit teilweise auch auf Kupfer und Eisen ausgerichtet. Im Sulzbachtal bei Gutach z.B. wurden Kupfererze zur Weiterverarbeitung für die Messingherstellung gefördert.

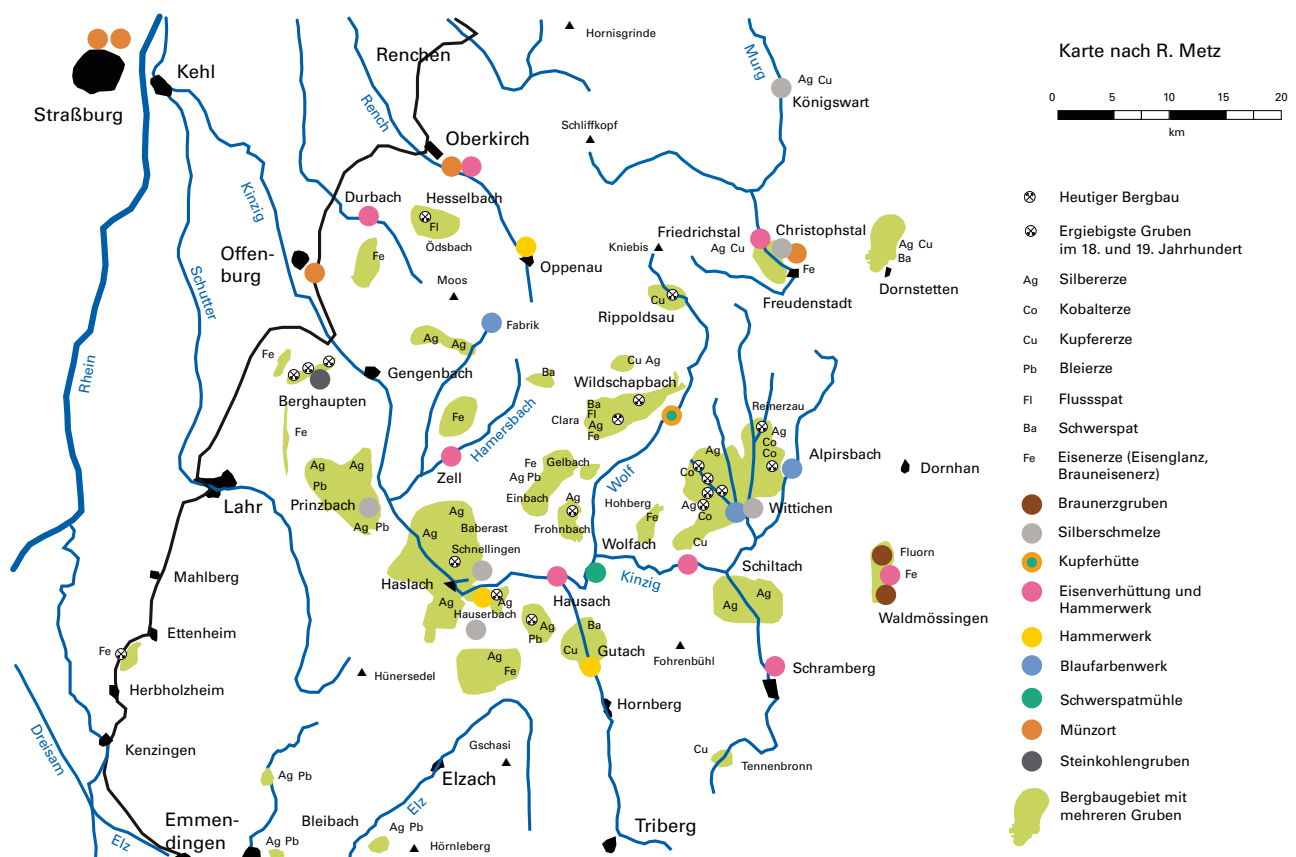


Abb. 2.3-2: Bergbaureviere und Verhüttungsplätze im Kinzigtal nach Metz; Quelle: Markl, Lorenz 2004



Eisenerze hat man u.a. nördlich von Zell am Harmersbach bei Hohberg-Diersburg und Wolfach abgebaut und in Eisenhütten und Hochöfen bei Oberkirch, Durbach, Hausach und Zell a. H. verarbeitet (Abb. 2.3-3) [BLIEDTNER, MARTIN 1986].



Abb. 2.3-3: Verhau in der Eisenwand am Kuhhornkopf, Gemarkung Zell a. H.; Bild: R. Olschewski

konnte damals durchaus mit Zechen im Ruhrgebiet konkurrieren. Heute zeugen noch einzelne Halden von den 1925 endgültig aufgegebenen Aktivitäten (Abb. 2.3-4) [KESSLER 1994].



Abb. 2.3-4: Halde aus dem ehemaligem Kohlebergbau im Bellenwald östlich von Offenburg-Zunsweier; Bild: R. Olschewski

Erste Anfänge des Doggereisenerz-Abbaus bei Ringsheim reichen bis in die keltisch-römische Zeit zurück. Von 1937 bis 1969 wurden mehr als 14,5 Mio. t Roherz gefördert. Es existierten zwei Tagebauflächen mit zusammen mehr als 3 km<sup>2</sup>. Größtenteils sind sie durch Rekultivierung umgestaltet worden und werden heute weinbaulich genutzt. Auf der Teilfläche am Kahlenberg befindet sich die Kreismülldeponie [GASSMANN 1991].

Mitte des 19. Jahrhunderts begann u.a. im Gutacher Revier und im Rankachtal bei Oberwolfach der Abbau von Schwerspat (Baryt). Das reinweiße Mineral wird u.a. zur Farbherstellung benötigt. Zur gleichen Zeit stand der Kohlebergbau bei Diersburg und Berghaupten in voller Blüte. Die Förderung von ca. 10 000 t/a

Der in Erzgängen oft zusammen mit Schwerspat auftretende Flussspat (Fluorit), z.B. in der 1955 aufgegebenen Flussspatgrube Hesselbach bei Oberkirch, war erst im 20. Jahrhundert Ziel der Bergbautätigkeiten. Fluorit wird u.a. als Flussmittel z.B. in der Stahlindustrie oder zur Herstellung von Flusssäure verwendet.

Heute wird noch in der Grube „Clara“ bei Oberwolfach Bergbau auf Schwer- und Flussspat betrieben. In der dazu gehörenden Erzaufbereitungsanlage bei Wolfach wird seit wenigen Jahren wieder Silber gewonnen.

Der auf Kohle, Schwer- und Flussspat ausgerichtete neuzeitliche Bergbau hat in ähnlicher Weise zu Schadstoffeinträgen in Böden geführt. Die Flächen haben jedoch eine weit geringere Ausdehnung als die von den Bleieinträgen



des mittelalterlichen bis neuzeitlichen Silberbergbaus betroffenen Flächen (Abb. 4.2.3.1-1).

Bergbau- und Verhüttungstätigkeiten haben sich indirekt auf die Böden und die Umwelt ausgewirkt. Durch den hohen Holzbedarf für den Grubenausbau sowie Röst- und Schmelzprozesse wurde die ohnehin fortschreitende Rodung der Wälder zusätzlich forciert (Kap. 4.1.2).

Ein wichtiger Zulieferer für Erz- und Glashütten war das Köhlergewerbe (Abb. 2.3-5). Buchenholzkohle entwickelt hohe Brenntemperaturen, weshalb sie bevorzugt in den Hütten Verwendung fand.



Abb. 2.3-5: Großflächige Entwaldung bei der Holzkohleproduktion („Les charbonniers“; Darstellung aus dem Buch von H. Gross um 1550 zum Lothringer Bergbau; Quelle: Bergbau, Verhüttung und Waldnutzung im Mittelalter; Jockenhövel 1994)

Glashütten wurden im Lauf der Zeit in immer höheren Lagen mit bis dahin unerschlossenen Waldflächen errichtet. Ein Beispiel ist die um 1745 vom Kloster Gengenbach gegründete Glashütte im oberen Nordrachtal. Im etwa zeitgleich errichteten Blaufarbenwerk sind Kobalterze u.a. aus dem Schwarzwald und aus Spanien sowie Flussspat und Quarz aus der Umgebung verarbeitet worden [BLIEDTNER, MARTIN 1986].

Das seit dem Mittelalter aufgekommene Waldgewerbe (Köhlerei, Harzerei, Rindengewinnung, z.B. für Gerberlohe) hat zusammen mit dem überregional gestiegenen Bauholzbedarf und der zunehmenden landwirtschaft-

lichen Nutzung nicht nur zur starken Degeneration der Wälder geführt, sondern auch den Nährstoffhaushalt der Waldböden verändert.

Bis in das 19. Jahrhundert war eine konsequente Trennung zwischen Wald und Weide nicht üblich. Weidehaltung wurde betrieben, wo sich nach Rodungen ein üppiger Unterwuchs entwickelte.

Im Schwarzwald ist daraus die ehemals verbreitete Reutfeldwirtschaft hervorgegangen. Reut- bzw. Weidfelder sind periodisch genutzt worden, wozu man den Boden nach der Rodung durch Weidbrennen für kurze ackerbauliche Nutzungsphasen vorbereitet hat (Abb. 2.3-6). Nach zweijährigem Ackerbau war die Furchtbarkeit des Bodens oft so erschöpft, dass er bis zu 20 Jahre brachliegen musste und als Viehweide diente. Während der Beweidung anfallender Dung wurde gesammelt und wie Streu aus dauerhaften Waldflächen den kontinuierlich ackerbaulich genutzten Flächen zugeführt.



Abb. 2.3-6: Anzünden und Abzug von Rodungsresten beim Weidbrennen („Rüttebrennen“); Quelle: Abetz 1955

Bodenuntersuchungen haben ergeben, dass heutige Waldböden, die früher stets als Acker oder Wiesen dienten, weniger stark versauert sind und höhere Nährstoffvorräte enthalten, als Böden, die immer mit Wald bestanden waren oder als Weide genutzt wurden [BÜRGER 2004].

Waldböden sind schon vor der Industrialisierung durch Jahrhunderte andauernden Nährstoffentzug in ihren chemischen Eigenschaften verändert worden. Die Ent-

stehung der Grinden des Hochschwarzwalds ist u. a. auf Brandrodungen, um Weideland zu schaffen, zurückzuführen.

Vor dem Hintergrund knapp werdender Holzvorräte wurde 1833 das 1. Badische Forstgesetz eingeführt. Es erlaubte, Eingriffe in den Wald einzuschränken und den ehemals mit Buchen und Tannen bestandenen Schwarzwald mit schnell wachsenden Fichten wieder aufzuforsten.

Darüber hinaus wirkte sich die Erschließung von Verkehrswegen im Schwarzwald im 19. Jahrhundert aus. Die bessere Marktanbindung ermöglichte ein Abrücken vom landwirtschaftlichen Selbstversorgerprinzip und die Aufgabe schwer zu bewirtschaftender Acker- und Weideflächen. Holz wurde zunehmend durch Kohle als Energieträger ersetzt. Diese Entwicklung leitete den Niedergang der Kinzig-Flößerei ein.

Der Rückgang der Waldflächen hatte die Situation beim Abfluss von Oberflächenwasser verschärft. Mit Beginn des 19. Jahrhunderts wurden von J. G. Tulla Rhein und Kinzig begradigt, eingedeicht bzw. kanalisiert. Dadurch konnten nicht nur die jährlichen Überschwemmungen unterbunden, sondern auch weite Teile der ehemaligen Überschwemmungs- und Feuchtgebiete in Kulturland umgewandelt werden.

Als größte Wasserbaumaßnahme der jüngeren Zeit ist 1967 nach 30-jähriger Bauzeit die Acher-Rench-Korrekti-

on abgeschlossen worden. Neben dem Hochwasserschutz (Acher- und Renchflutkanal) dient sie der Strukturverbesserung von 600 km<sup>2</sup> meist landwirtschaftlicher Nutzfläche.

Sieht man von der zunehmenden Flächenversiegelung ab (Kap. 4.5), wurden Böden und Landschaft in den Jahrzehnten nach 1945 zunehmend durch Neuanlagen und Erweiterungen von Kiesgruben und Steinbrüchen sowie durch Flurbereinigungsverfahren im Weinbau verändert.

Großflächige Umgestaltungen im Reb Gelände werden heute inzwischen nur noch vereinzelt durchgeführt. Bei den heutigen Umgestaltungsmaßnahmen handelt es sich vor allem um Kleinterrassierungen (Abb. 2.3-7).



Abb. 2.3-7: Umgestaltung von Reb Gelände bei Ortenberg mit umfangreichen Erdbewegungen (2008); Bild: R. Olschewski

## 2.4 Klima

### 2.4.1 Allgemeines

Klimatisch neigt die Ortenau zu Extremen, die sich aus dem Aufeinandertreffen von subtropisch-mediterraner Warmluft aus Südwesten und subpolarer Kaltluft aus Osten ergeben.

Aus Südwesten durch die Burgundische Pforte zuströmende warmfeuchte Luftmassen bewirken in der Oberrheinebene mit 9 - 10 °C milde Jahresdurchschnittstemperaturen. Im Juni bis August sind mittlere Monatsmaxima von über 30 °C häufig.

Im Schwarzwald nimmt die Jahresdurchschnittstemperatur etwa um 0,5 - 0,8 °C je 100 m Höhenzunahme ab. In den höchsten Lagen des Schwarzwalds beträgt sie 3 - 4 °C [PARLOW, ROSNER 1997].

Klimatisch begünstigt sind die süd- und südwest-exponierten Hanglagen der Vorbergzone. Die Sonnenscheindauer von > 1700 h/a und eine höhere Jahresdurchschnittstemperatur als die Höhenlage erwarten lässt, macht sie für Rebkulturen geeignet.

In den Schwarzwaldtälern beträgt die mittlere Sonnenscheindauer < 1400 h/a [PARLOW, ROSNER 1997; REKLIP 1995].

Die aus Westen einfließenden atlantischen Luftmassen bringen das ganze Jahr über ausreichend Niederschläge, weshalb das Klima der Ortenau durch keine ausgeprägten Trocken- oder Feuchtperioden gekennzeichnet ist. Vogesen und Schwarzwald als eine Nord-Süd-ausgerichtete Barriere bedingen eine asymmetrische Verteilung der Niederschläge und der Sonnenscheindauer. Der Oberrheingraben gehört auf der überwiegend vom Wind abgewandten Seite der Vogesen durch den Föhneneffekt zu den sonnenreichsten und trockensten Gegenden Deutschlands. Am Schwarzwald kommt es zu Stauwirkungen, die im Nordschwarzwald besonders ausgeprägt sind, weil durch die Zaberner Senke am gegenüberliegenden Rheingraben die Barriere der Vogesen fehlt.

In der Ortenau reichen die durchschnittlichen Jahresniederschläge von 700 mm/a in der Rheinebene und etwa 800 - 1000 mm/a in der Vorbergzone bis zu Spitzenwerten von > 1900 mm/a in den Kammlagen des Schwarzwalds. In grober Näherung nimmt die Niederschlagsmenge im Schwarzwald um 100 mm pro 100 m Höhenunterschied zu (Abb. 2.4.1-1) [PARLOW, ROSNER 1997].

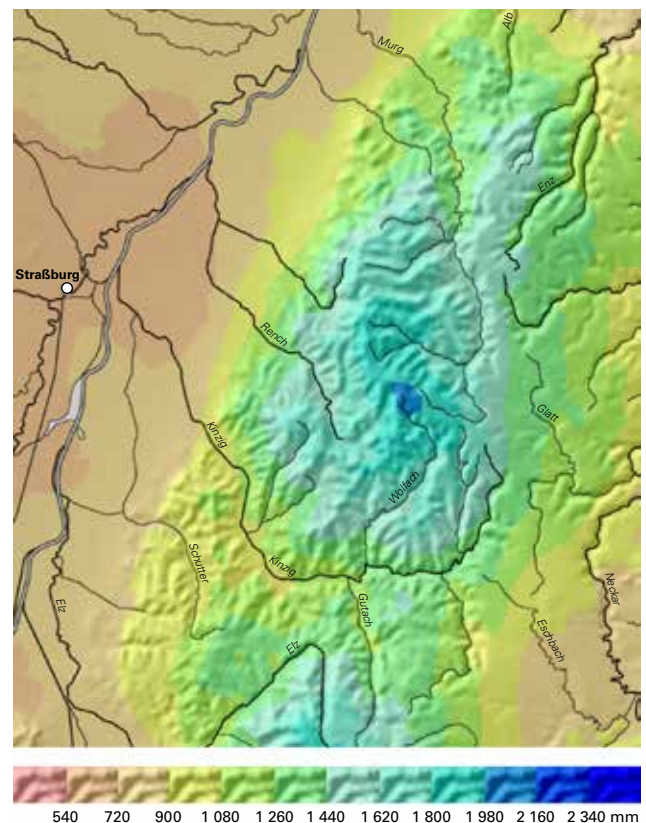


Abb. 2.4.1-1: Mittlere Niederschlagshöhe in mm/a im Zeitraum 1951 - 1980; Quelle: Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt (REKLIP) 1995

Die Niederschlagsverteilung zeigt den typischen Jahresgang. Sowohl in der Rheinebene als auch in den Hochlagen des Schwarzwalds ist das Niederschlagsmaximum in den Monaten Mai und Juni ausgeprägt. Die Niederschläge gehen in dieser Zeit größtenteils als Gewitterregen nieder.

Mit Schneefällen in den Monaten Dezember bis März gibt es in den Hochlagen des Schwarzwalds ein zweites Niederschlagsmaximum.



## 2.4.2 Klimatische Wasserbilanz

Eine wichtige meteorologische Kenngröße ist die klimatische Wasserbilanz. Sie ist definiert als Differenz der Niederschlagssumme und der Verdunstung. Übersteigt die Niederschlagssumme die Menge des über dem Boden und der Vegetation verdunstenden Wassers, ergibt sich eine positive, im umgekehrten Fall eine negative klimatische Wasserbilanz (Abb. 2.4.2-1).

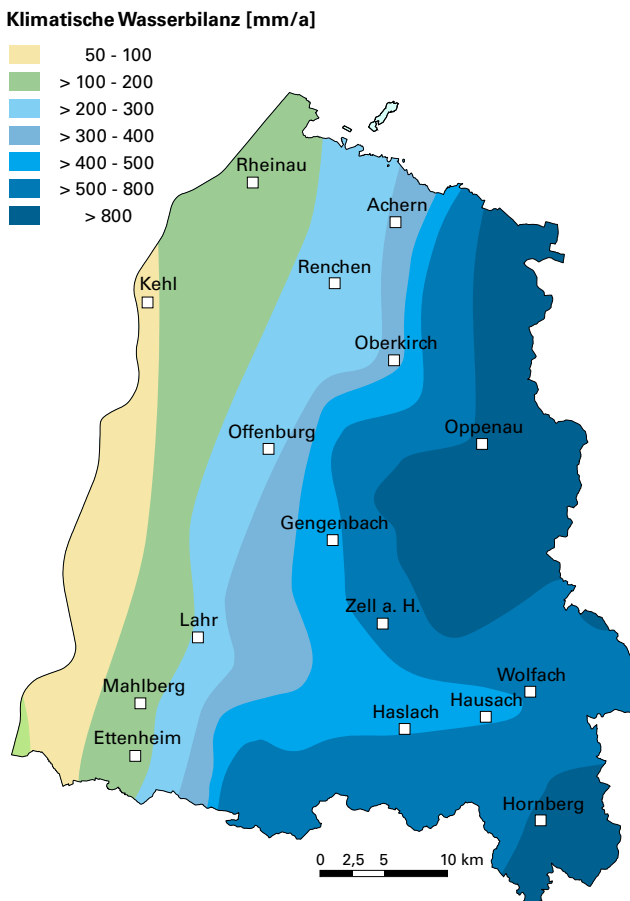


Abb. 2.4.2-1: Klimatische Wasserbilanz 1951 - 1980;  
Quelle: Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt (REKLIP) 1995

Während in der Oberrheinebene mehr als 50 % der Gebietsniederschläge verdunsten, liegt der Verdunstungsanteil im Schwarzwald durchweg unter 40 %. Bei einem ganzjährigen Niederschlagsüberschuss von > 800 mm/a ist die klimatische Wasserbilanz dort stark positiv.

Positive Wasserbilanz, steiles Relief und geringes Wasserspeichervermögen der Böden führen in den höheren Schwarzwaldlagen dazu, dass ein Großteil der Nieder-

schläge aus dem Gebiet abfließt statt zu verdunsten. In den Hochlagen zwischen Wolfach und Baden-Baden beträgt die zum Abfluss beitragende Niederschlagshöhe > 1 000 mm/a.

In der Oberrheinebene fällt der jährliche Niederschlagsüberschuss mit 50 - 300 mm/a deutlich geringer aus. Trockene und heiße Sommer können hier bei ausbleibenden Niederschlägen zu einer negativen Wasserbilanz führen.

Werden landwirtschaftliche Kulturen in dieser Zeit nicht bewässert, hängt der Ernteertrag maßgeblich von der Fähigkeit der Böden ab, Niederschlagswasser pflanzenverfügbar zu speichern (Kap. 3.2.1).

Im Winterhalbjahr ist die klimatische Wasserbilanz in der Rheinebene stets positiv. Überschüssiges Regenwasser versickert im Boden und trägt zur Grundwasserneubildung bei. Dadurch wird, je nach Wasserspeichervermögen, die Auswaschung von Nitrat aus landwirtschaftlich genutzten Böden begünstigt (Kap. 4.3.2).

## 2.4.3 Klimawandel

Der anthropogene Anteil am Treibhauseffekt beschleunigt den natürlichen Klimawandel. Man nimmt an, dass sich eine steigende Durchschnittstemperatur in der Atmosphäre künftig auf die Böden und ihre Nutzung auswirken könnte.

Für Süddeutschland hält der Arbeitskreis KLIWA (2005a, 2005b, 2006) basierend auf der Auswertung regionaler Klimaszenarien folgende Veränderungen im Zeitraum 2021-2050 für wahrscheinlich:

- bis zu 10 % weniger Regenfälle im Sommer bei entsprechender Verlängerung der Trockenperioden
- bis zu 35 % mehr Niederschlag im Winterhalbjahr
- häufigere Westwetterlagen mit höheren Niederschlagsmengen im Winter
- insbesondere im Winter deutlich zunehmende Starkniederschlagsereignisse mit Regenmengen > 25 mm pro Tag und erhöhter Hochwassergefahr (Kap. 4.6.2, Regenfaktor).

# 3 Böden der Ortenau

## 3.1 Entstehung und Verbreitung der Böden

### 3.1.1 Grundzüge der Bodenbildung

Böden entstehen durch Verwitterung oberflächennah anstehender Fest- und Lockergesteine sowie durch Abbau und Umwandlung abgestorbener organischer Substanz (Abb. 3.1.1-1).

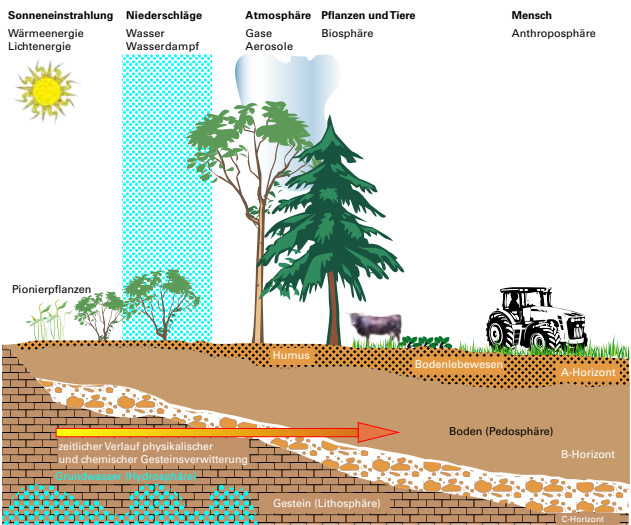


Abb. 3.1.1-1: Schema zur Bodenentwicklung; Quelle: Mayer 1996

Bei Festgesteinen führt die physikalische Verwitterung zunächst zum Zerfall des Mineralverbands. In entstehende Risse und Klüfte dringen Pflanzenwurzeln und Wasser ein, wodurch der Mineralverband des Gesteins weiter zersetzt wird. Die Frostsprengung während der Eiszeiten hat im Schwarzwald maßgeblich zur Solifluktion (Bodenfließen) und zur Bildung periglazialer Deckschichten beigetragen (Kap. 2.2.2).

Die physikalische Verwitterung zerkleinert das Gestein und die Bruchstücke über die Grobbodenfraktionen ( $\varnothing > 2\text{ mm}$ ; Blöcke, Steine, Grus) bis zum Sand und Mittelschluff als Teile der Feinbodenfraktion ( $\varnothing < 2\text{ mm}$ ; Tab. 3.1.1-2). Mit der Zerkleinerung nimmt die Oberfläche stark zu. Beim schrittweisen Zerfall eines Felsquaders von ursprünglich 1 m Kantenlänge in immer kleinere Würfel bis hin zu einer Kantenlänge von 0,1 mm wird sie von 6 m<sup>2</sup> auf 60 000 m<sup>2</sup> vergrößert (Tab. 3.1.1-1).

Tab. 3.1.1-1: Zunahme der Oberfläche bei der Zerkleinerung eines Felsquaders mit 1 m<sup>3</sup> Volumen

| Anzahl an Quader  | Kantenlänge<br>[cm] | Oberfläche<br>[m <sup>2</sup> ] |
|-------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1                 | 100                 | 6                               |
| 1 000             | 10                  | 60                              |
| 1 000 000         | 1                   | 600                             |
| 1 000 000 000     | 0,10                | 6 000                           |
| 1 000 000 000 000 | 0,01                | 60 000                          |

An der zunehmend größeren Oberfläche der neu entstandenen, immer kleineren Kornfraktionen setzt die chemische Verwitterung ein. Dabei werden die vorzerkleinerten Mineral- bzw. Gesteinskörner auch in ihrer Zusammensetzung verändert.

Im mitteleuropäischen Klimaraum beeinflussen hauptsächlich chemische Reaktionen mit Wasser (Hydrolyse) und den H<sup>+</sup>-Ionen aus Versauerungsvorgängen die fortschreitende Verwitterung der Feinbodenfraktion (Kap. 4.4.1, Tab. A.4.4.5-2). Carbonathaltige Lockergesteine wie Löss oder Festgesteine wie Kalkstein verlieren zunehmend ihren Kalkanteil. Die nicht carbonatischen Anteile werden im Verwitterungsrückstand angereichert.

Bei der chemischen Verwitterung werden aus den gesteinsbildenden Mineralen unter anderem Nährstoffe für Pflanzen und Mikroorganismen herausgelöst (z.B. Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium). Freigesetztes Eisen und Mangan bilden Oxide und Hydroxide, wobei insbesondere die Eisenverbindungen den Böden die charakteristisch braune bis rostrote Färbung verleihen.

Die chemischen Verwitterungsvorgänge werden unter dem Begriff Verbraunung zusammengefasst. Eisen- und Manganoxide und -hydroxide übernehmen eine wichtige Rolle bei der Bindung von Schwermetallen und Arsen (Kap. A.4.2.1.1).

Aus Zerfallsprodukten gesteinsbildender Minerale (z.B. Glimmer; Kap. A.2.2.3) entstehen auch unterschiedliche

Tonminerale (Verlehmung). Die Oberflächen der Tonminerale sind elektrisch negativ geladen. Dadurch werden Nährstoff- und Schwermetall-Kationen an den Tonmineral-Oberflächen sorbiert (angelagert).

Tonminerale gehören der Korngrößenfraktion  $< 0,002$  mm an (Tab. 3.1.1-2). Wegen des schichtartigen Aufbaus der Kristallstrukturen ist die spezifische Oberfläche der Tonminerale weit größer als bei der Kornzerkleinerung durch die physikalische Verwitterung (Tab. 3.1.1-1). Für die spezifische Oberfläche unterschiedlicher Tonminerale werden Werte von  $1 - 1100 \text{ m}^2/\text{g}$  angegeben. Mit Werten von  $0,1 - 1 \text{ m}^2/\text{g}$  liegt sie bei Schluffen deutlich darunter (Kap. A.3.1.1) [HEIM 1990].

Tab. 3.1.1-2: Untergliederung der Feinbodenfraktion

| Fraktion | Unterfraktion | Durchmesser<br>[mm] |
|----------|---------------|---------------------|
| Ton      |               | $< 0,002$           |
| Schluff  | Feinschluff   | $0,002 - < 0,0063$  |
|          | Mittelschluff | $0,0063 - < 0,02$   |
|          | Grobschluff   | $0,02 - < 0,063$    |
| Sand     | Feinsand      | $0,063 - < 0,2$     |
|          | Mittelsand    | $0,2 - < 0,63$      |
|          | Grobsand      | $0,63 - < 2,0$      |

Der Mineralbestand der Böden und seine Verteilung in den Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton spiegelt den Grad der Verwitterung bzw. Bodenbildung wider. Er lässt auch erkennen, wie stark gesteinsbildende Silikate der Verwitterung widerstehen (Abb. 3.1.1-2). In der Sandfraktion wird überwiegend der verwitterungsstabile, chemisch inerte Quarz angereichert, während in der Schlufffraktion noch viele Feldspäte und die leichter spaltbaren Glimmer enthalten sind. Durch Verlehmung und Verbraunung werden Glimmer und Feldspäte in Tonminerale und Oxide umgewandelt; der Gehalt an Glimmer und Feldspäten ist daher in der Tonfraktion am geringsten.

Je nach Anteil der Feinbodenfraktion werden die Bodenarten-Hauptgruppen „Sand“, „Schluff/Lehm“ und „Ton“ unterschieden. Lehme sind ein Gemenge von Sand, Schluff und Ton.

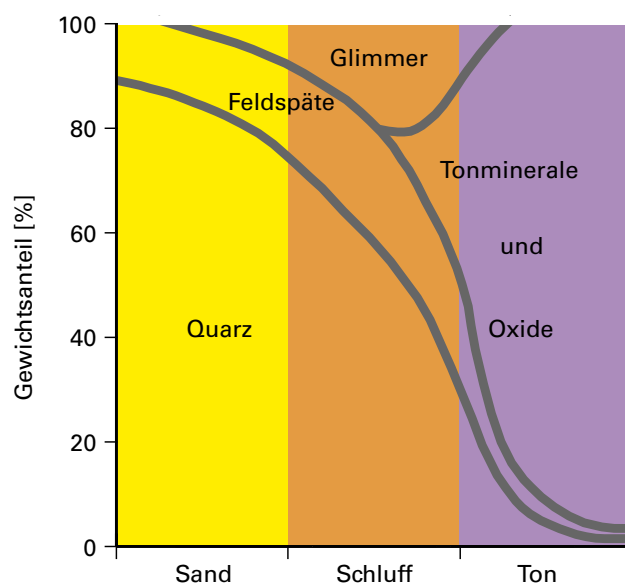


Abb. 3.1.1-2: Mineralbestand in den Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton; Quelle: Scheffer, Schachtschabel 2010

Unter den Schluffen wird beispielsweise Feinbodenmaterial zusammengefasst, das mindestens 50 % Schluffkörner und maximal 30 % Tonteilchen enthält (Abb. 3.1.1-3). Die Bodenarten-Hauptgruppen werden in Bodenartengruppen und diese in einzelne Bodenarten unterteilt (z.B. schluffiger Lehm, Kürzel „Lu“).

Mit fortschreitender Bodenbildung wird nicht nur die Bodenart, sondern auch der Porenraum zwischen den Körnern zunehmend ausdifferenziert. Das Porensystem hat sehr unregelmäßige Formen unterschiedlichster Größenordnung. Unterschieden werden enge bzw. weite Grobporen ( $\varnothing > 0,01 - 0,05$  mm bzw.  $> 0,05$  mm), Mittelporen ( $\varnothing 0,01 - > 0,0002$  mm) und Feinporen ( $\varnothing \leq 0,0002$  mm).

Die Volumenanteile der jeweiligen Porengrößen beeinflussen entscheidend die natürliche Bodenfruchtbarkeit und die Bodenfunktion als Ausgleichskörper im Wasserhaushalt einer Landschaft (Kap. 3.2 u. A.3.2).

Humus bildet sich aus abgestorbener organischer Substanz. Der Gehalt und die Qualität des Humus in Böden hängen wesentlich von der Wasser- und Nährstoffversorgung, der Vegetation sowie der jeweiligen Bodenart ab.



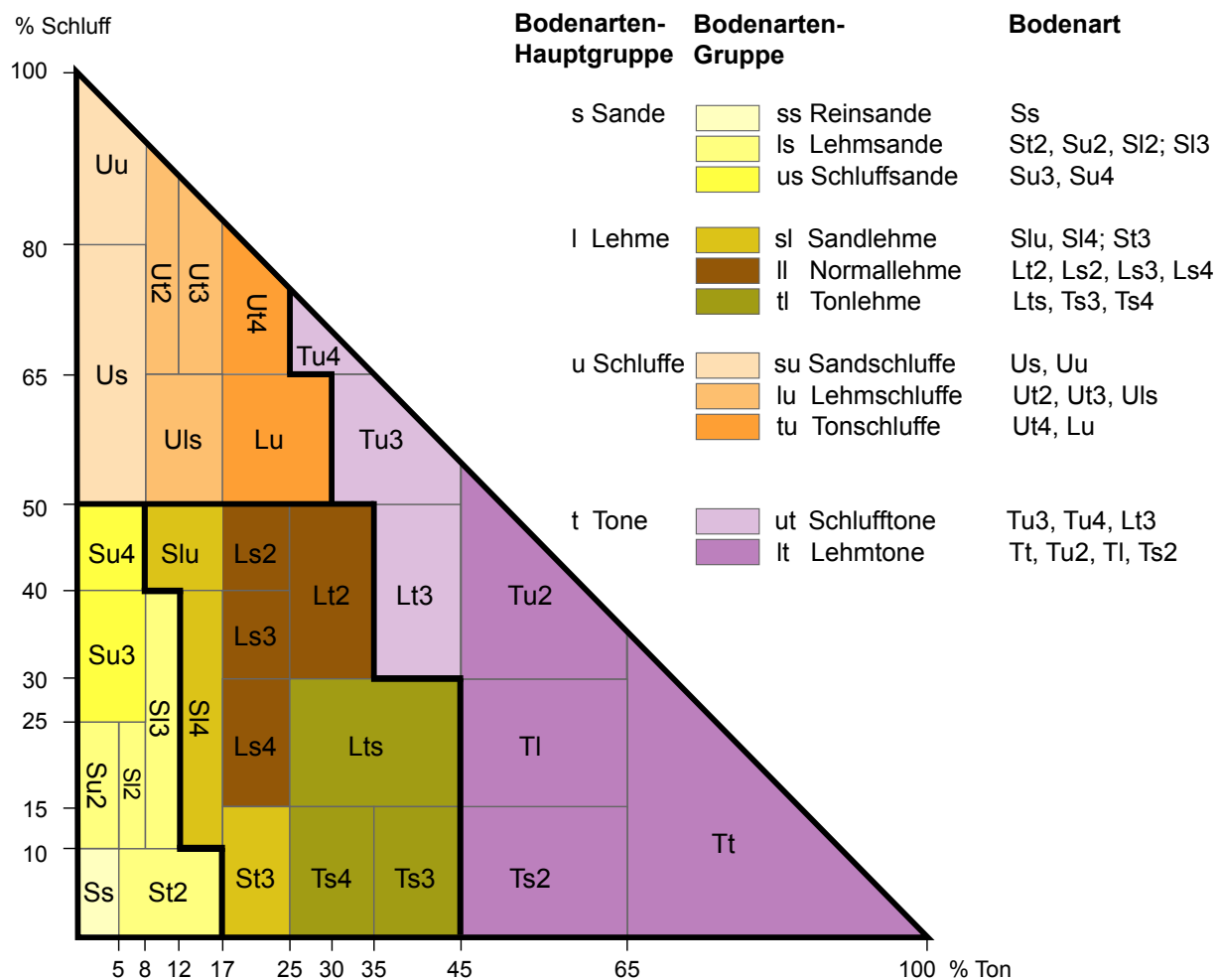


Abb. 3.1.1-3: Bodenarten des Feinbodens < 2 mm mit Klassifikation auf verschiedenen Niveaus; Quelle: AG Boden 2005

Bei stark ausgeprägtem Grund- und Stauwassereinfluss kann der Abbau organischer Substanz im sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Milieu gehemmt werden. Je nach Wasserregime führt dies zur Moorbildung.

Stark schluffige Böden, die für Böden aus Löss typisch sind, haben daher einen niedrigen Humusgehalt. Sie sind deswegen u.a. bei Starkniederschlägen besonders anfällig gegen Wassererosion (Kap. 4.6.2, 4.6.3).

Geringe Nährstoffgehalte begünstigen die Humusanreicherung. Sie sind für saure, quarzreiche Sandböden typisch. Die anspruchslose Vegetation solcher Böden liefert eine nährstoffarme, schwer zersetzbare Streu, die als Rohhumus auf der Bodenoberfläche akkumuliert wird.

Auf ungedüngten Böden stellt der Humus zusammen mit den Pflanzenresten der Vegetation das wichtigste Nährstoffreservoir dar. Humus ist wegen der großen spezifischen Oberfläche der Huminstoffe (800 - 1000 m<sup>2</sup>/g) bedeutend für die Bindung von Nähr- und Schadstoffen (Kap. A.4.4.5).

In tonreichen Böden ist der Humusgehalt in der Regel höher als in Sand- und Schluffböden, da Tonminerale organische Stoffe sorbieren und vor dem weiteren mikrobiellen Abbau schützen. Dabei werden Ton-Humus-Aggregate gebildet, die den Oberböden eine stabilere, krümelige Struktur verleihen.

### 3.1.2 Entstehung der häufigsten Böden des Ortenaukreises

Die Böden der Ortenau können in terrestrische und semiterrestrische Böden unterteilt werden. Für die Bildung und die Eigenschaften terrestrischer Böden (Landböden) sind Ausgangsgestein, Geländere relief und Klima entscheidend. Für die Bildung und die Eigenschaften semiterrestrischer Böden (Grundwasserböden) spielt die Tiefenlage des Grundwasserspiegels die maßgebliche Rolle.

Einen Überblick über die Lage und die Verbreitung der Böden im Ortenaukreis gibt die Bodenkarte im Maßstab 1:50 000 (Abb. A.3.1.2-1). Beschreibungen der bodenkundlichen Horizontbezeichnungen der Bodentypen enthält Kap. A.3.1.2.1.

#### Terrestrische Böden

Aus den im Schwarzwald anstehenden Gneisen, Graniten, Quarzporphyren und Migmatiten haben sich auf schmalen Hangrücken und in sehr steilen Hanglagen relativ flachgründige Bodentypen, Ranker und Regosole, entwickelt. Humoser Oberboden (Ah-Horizont) liegt bei beiden Bodentypen direkt auf dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung - dem Fest- oder Lockergestein (C-Horizont). Beim Ranker ist der humose Oberboden weniger als 3 dm, beim Regosol bis zu 4 dm mächtig. Tiefgründigere Böden haben sich in diesen Hanglagen nicht entwickelt. Eiszeitlicher Permafrost im Unterboden und jahreszeitliches Auftauen haben dazu geführt, dass Bodenmaterial mit Wasser hangabwärts verlagert wurde (Solifluktion).

An Mittel- und Unterhängen haben sich aus den durch Solifluktion entstandenen mächtigeren Schuttdecken und Fließerden Braunerden entwickelt. Für diesen Bodentyp ist der durch Verbraunung und Verlehmung entstandene Bv-Horizont charakteristisch (Abb. 3.1.2-1).

An Hanglagen im Schwarzwald auf Mittlerem Buntsandstein haben die natürlichen Versauerungsvorgänge seit der letzten Eiszeit zur Bildung von Podso len (russisch: Boden unter Asche) geführt. Der kalkfreie Sandstein zeichnet sich bei einem sehr hohen Anteil an chemisch inertem Quarz durch einen geringen Anteil verwitterbarer Silikatminerale wie Feldspäte (< 10 %) und sehr geringe Eisengehalte aus (< 1 %). Diese Substanzen puffern die rasch fortschreitende



Abb. 3.1.2-1: Braunerde über Gneishangschutt auf Gemarkung Mühlenbach; Bild: R. Olschewski

Versauerung zwar ab, können sie jedoch nicht völlig verhindern (Tab. A.4.4.5-2).

Bei den Pufferreaktionen werden die Feldspäte und Eisenoxide aufgelöst und Eisen und Nährstoffe freigesetzt. Die Nährstoffe reichen nur für eine anspruchslose Vegetation, deren Reste sich als Rohhumus auf der Oberfläche der stark sauren Böden anreichern. Das freigesetzte Eisen wird, wie Mangan und Aluminium, zusammen mit gelösten organischen Verbindungen aus der nährstoffarmen, schwer zersetzbaren Streu in tiefere Bodenschichten verlagert. Es entsteht ein sauergebleichter, an Humus verarmter Oberboden (Ae-Horizont) und darunter an Eisen- und Aluminiumoxiden und/oder Humus angereicherte Bs- oder Bh-Horizonte (Abb. 4.4.2-3). Hohe Niederschläge und die gute Versickerung in den blockreichen Sandböden fördern die Sauerbleichung [STAHN ET AL. 2008].

In den Lössgebieten der Vorbergzone sind in allen Bereichen mit großer Geländeneigung Pararendzinen anzutreffen. Der 2 - 4 dm mächtige humose Oberboden (Ah-Horizont) liegt hier unmittelbar auf mehr oder weniger unverwittertem carbonathaltigen Lössmaterial (elC-Horizont, Abb. 4.6.3-1).

Die Pararendzina stellt bei jahrhundertelanger ackerbaulicher Nutzung das Endstadium der Bodenbildung dar. Anhalten-der Bodenabtrag verhindert das Vordringen von Verlehmung und Verbraunung in tiefere Bodenzonen [GHANEM 1976].

In ebeneren Lagen sowie unter Wald ist in Lössgebieten die Parabraunerde anzutreffen. Entkalkung, Verbraunung und Verlehmung haben den kalkhaltigen, schluffreichen Löss in einen bis ca. 10 dm tief reichenden lehmigen Unterboden verwandelt (Abb. 3.1.2-2). Stellen sich bei diesen Vorgängen im Oberboden schwach saure Verhältnisse ein (pH-Wert 5 - 6,5), werden bei Starkregen die Tonminerale über Poren und Trockenrisse in tiefere Bodenschichten verlagert. Es entstehen ein oberer, tonverarmter Al-Horizont und ein unterer, tonangereicherter Bt-Horizont.

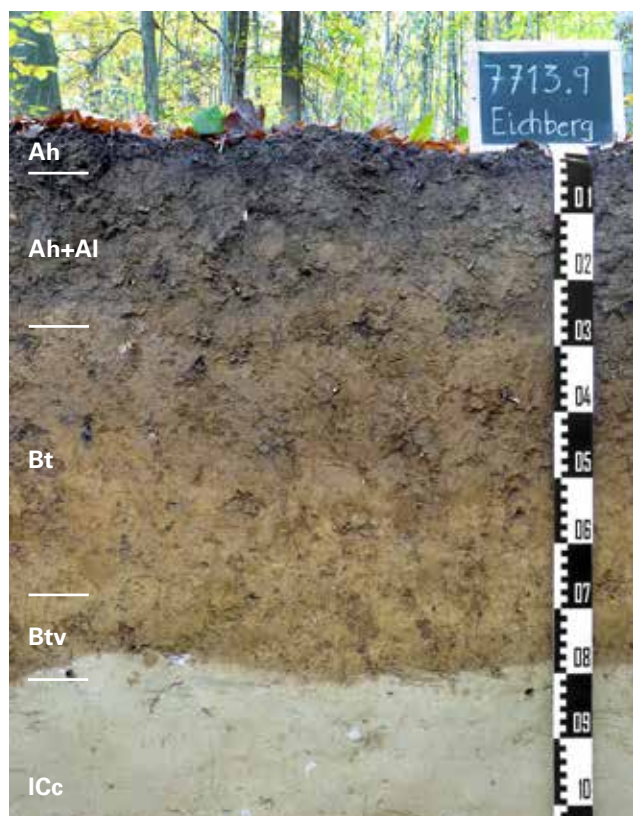


Abb. 3.1.2-2: Parabraunerde aus Lössverwitterung; die obersten 5 dm sind durch aktuelle Niederschläge dunkler gefärbt, Gemarkung Kippenheim; Bild: LGRB

Abb. 3.2.1-1 zeigt eine Parabraunerde unter landwirtschaftlicher Nutzung. Das Profil ist hier jedoch durch Erosion verkürzt. Der tonverarmte Al-Horizont sowie Teile des Tonanreicherungs-horizonts sind abgetragen. In den Unterboden (R-Bt-Horizont) wurden Humus und Ziegelbruchstücke durch tiefe reichende Bodenbearbeitung (Rigolen) eingearbeitet.

Das erodierte, humose und i.d.R. nährstoffreiche Bodenmaterial wurde an Unterhängen, in Senken und kleineren Talmulden der Vorbergzone über Jahrtausende akkumuliert. Aufgelandetes humoses Bodenmaterial in einer Mächtigkeit von  $\geq 4$  dm (Ah- und M-Horizont) bildet Kolluvien (Abb. 4.6.3-2). Die meist ackerbaulich genutzten Böden sind sehr fruchtbar.

In geneigten Lagen hat die Tonanreicherung im Unterboden auf den durch eiszeitliche Solifluktion dicht gelagerten Lösslehm oft zur Bildung von Pseudogleyen geführt (Abb. 3.1.2-3). Aus dem vormaligen Bt-Horizont entwickelte sich mit der Zeit der für Stauwasserböden typische, dichte Staukörper (Sd-Horizont), der von einem im Winter und Frühjahr wassergesättigten Stauwasserleiter (Sw-Horizont) überlagert wird. Wiederholte Wassersättigung führt zur Lösung von Eisen- und Manganoxiden (Nassbleichung), die kleinräumig umgelagert und wieder ausgefällt werden. Die Böden erhalten dadurch ihre charakteristische Farbverteilung („Marmorierung“) [STAHR ET AL. 2008].

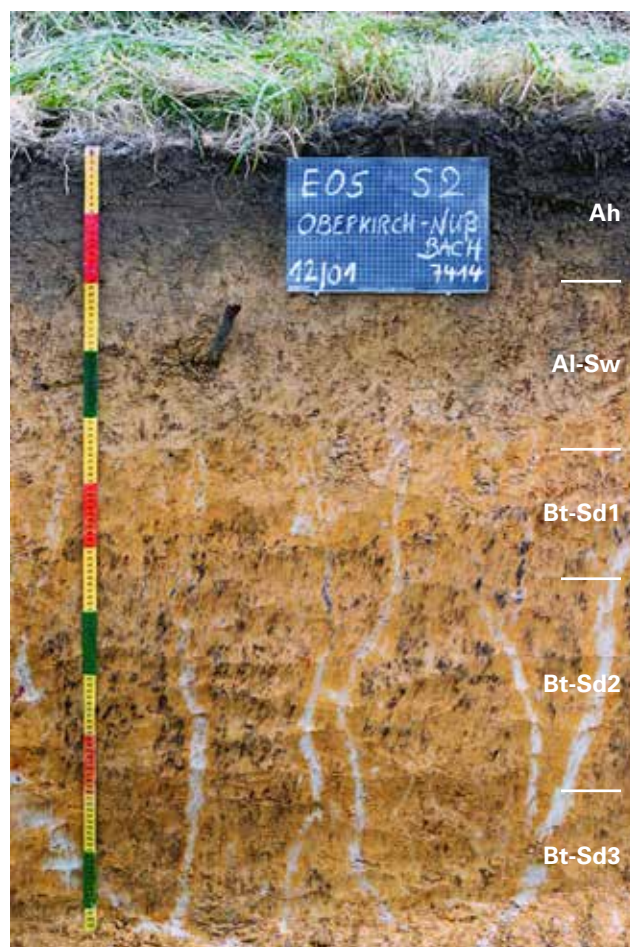


Abb. 3.1.2-3: Aus der Verwitterung von Lösslehm hervorgegangener Pseudogley, Gemarkung Nußbach; Bild: G. Glomb



Parabraunerden und Pseudogleye sind großflächig auch in der Rheinebene anzutreffen. Sie haben sich dort häufig auf Hochflutsedimenten und verschwemmtem Löss entwickelt, die bei Überschwemmungen während der letzten Eiszeit abgelagert worden sind. Der Sd-Horizont der Pseudogleye ist oft nicht allein durch die Verlagerung von Tonmineralen in den Unterboden entstanden. Stauende Schichten können bereits durch die Ablagerung tonreicher Sedimente im Bodenausgangsmaterial angelegt sein, die dann von lehmigen oder schluffigen Materialien überdeckt worden sind.

Stauwasserbeeinflusste Böden auf Hochflächen am Schwarzwaldrand östlich von Friesenheim, Lahr und Ettenheim bildeten sich aus der Verwitterung von Mergelsteinen des Unteren Muschelkalks. Dabei ist stark toniges Material entstanden, das sich nach eiszeitlicher Überdeckung mit wenigen Dezimetern Löss zum Sd-Horizont entwickelt hat (Abb. 4.4.2-4).

In den niederschlagsreichen Buntsandsteinhochlagen entlang der östlichen Landkreisgrenze hat eiszeitlicher Permafrost zur Verdichtung des sandigen Verwitterungsmaterials und zur Ausbildung eines dünnen, wasserstauenden Eisenbands geführt. Bei hohem Niederschlagsangebot ist der darüber gelegene Srw-Horizont fast das ganze Jahr über mit Stauwasser gesättigt. Hier ist ein Bändchenstagnogley entstanden (Abb. 3.2.2-1; Einband).

### Semiterrestrische Böden

Böden mit Grundwassereinfluss sind im Landkreis vorwiegend in der Rheinebene und in den Auen der Schwarzwaldtäler, aber auch in Muldentälern und Hanglagen verbreitet.

Bodenbildendes Ausgangsmaterial wurde von den Flüssen herantransportiert und sedimentiert. Je nach Gefälle und Transportstrecke ist grober Kies oder zunehmend feiner Sand abgesetzt worden. Die Kornzerkleinerung erfolgt maßgeblich beim Transport im Flussbett.

Auch Solum-Material wurde in die Flüsse eingetragen und bei Hochwasser im Überflutungsbereich sedimentiert. Je nach Entfernung vom Flussbett und Fließgeschwindigkeit werden in den Auenbereichen die Kornfraktionen getrennt. Auensande sedimentieren nahe, Hochflut- bzw. Auenlehme oft weiter entfernt vom Flusslauf. In der Kinzigau finden sich vorherrschend sandige Auensedimente.

In den Flussauen des Ortenaukreises sind Braune Auenböden weit verbreitet. Zwischen dem humosen Oberboden und verwittertem Kies im Untergrund (ICv-Horizont) ist ein Unterbodenhorizont aus sedimentiertem humosem Bodenmaterial (M-Horizont) eingeschaltet, der stellenweise von einem verbraunten und verlehmtten Bv-Horizont abgelöst wird.

Abb. 3.1.2-4 zeigt einen Braunen Auenboden im Bereich einer flachen Erhebung westlich von Allmannsweiler. Das unter dem gepflügten humosereren Oberboden (Ap-Horizont) liegende Bodenmaterial ist teils angeschwemmt worden, teils vor Ort verwittert (M-Bv-Horizonte).

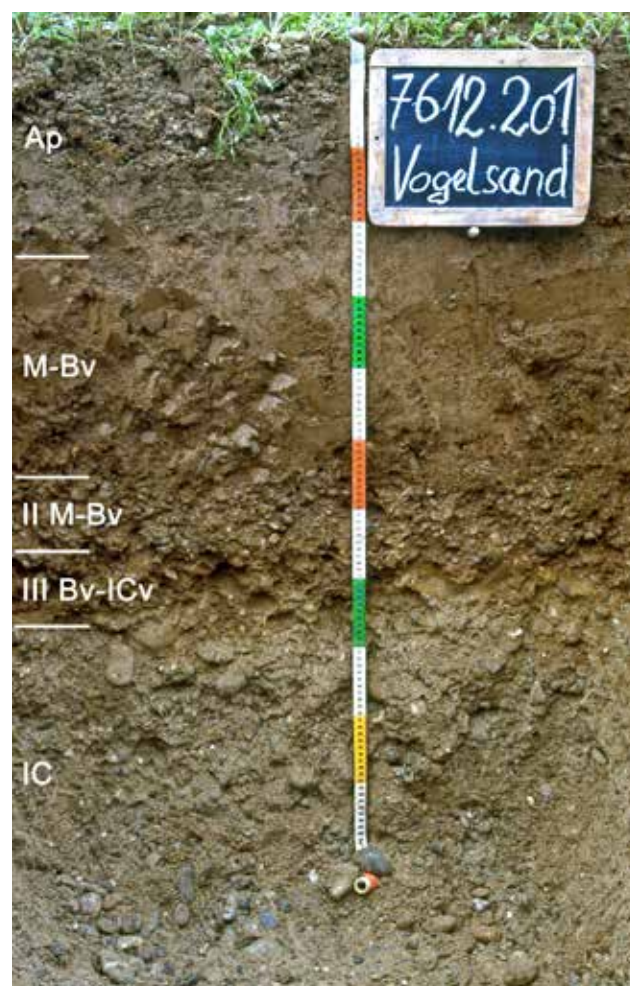


Abb. 3.1.2-4: Brauner Auenboden auf sandig-kiesigen Flussbettablagerungen, Gemarkung Allmannsweiler; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB)

Bei Braunen Auenböden setzen die vom Grundwasser geprägten G-Horizonte erst in 1 - 2 m Tiefe ein. Die oberen, grundwasserfreien Bodenhorizonte sind definitionsgemäß mindestens 8 dm mächtig.



Tab. 3.1.2-1: Unterscheidung der Auenböden nach Tiefenlage der vom Grundwasser beeinflussten Horizonte (Tiefenangaben für die Go- bzw. Gr-Horizonte in Dezimeter unter Geländeoberfläche)

| Brauner Auenboden | Auengley - Brauner Auenboden, Brauner Auenboden - Auengley (Übergangstypen) |    |        | Auengley | Nassgley  | Anmoorgley |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|--------|----------|-----------|------------|
| Ah                | ≥ 8 dm                                                                      | Ah | ≤ 8 dm | Ah       | Go < 4 dm | Go-Ah      |
| M/Bv              |                                                                             | M  |        | M        |           |            |
| IC                |                                                                             | IC |        | Go       |           |            |
| Go/r              | Go/r                                                                        |    | Gr     |          | Gr ≥ 4 dm | Gr < 4 dm  |

Steht der Grundwasserspiegel wenige Dezimeter unter der Geländeoberfläche an, kann sich kein oder nur ein geringmächtiger M- oder Bv-Horizont ausbilden. Im Grundwasser der Rheinebene wirkt die ständige Nährstoffnachlieferung der Versauerung damit der Verlehmung und Verbraunung entgegen. Je nach Tiefenlage der G-Horizonte und dem Humusgehalt im Oberboden werden unterschiedliche Typen von Auenböden unterschieden (Tab. 3.1.2-1).

Im ganzjährig wassergesättigten Unterboden der Auen herrscht ein sauerstoffarmes bis -freies, reduzierendes Milieu. Mangan- und Eisenoxide sind instabil oder werden gelöst. Der Gr-Horizont ist meist fahlgrau gefärbt. Darüber liegt der zeitweise grundwasserbeeinflusste, je nach Amplitude des Grundwasserspiegels bzw. Kapillarschubs unterschiedlich mächtige Oxidationshorizont (Go-Horizont). Im Go-Horizont kommen mit dem aufsteigenden Grundwasser gelöste Eisen- und Manganionen mit Luftsauerstoff in Kontakt und werden überwiegend in Grobporen als Oxide ausgefällt. Der Go-Horizont ist daher auffällig durch rostrote Eisenoxidflecken gefärbt.

Setzt der Go-Horizont in weniger als 4 dm Bodentiefe und der Gr-Horizont unter 4 dm ein, liegt ein Auengley vor (Tab. 3.1.2-1, Abb. 3.1.2-5). Bei Übergangstypen zwischen Auengley und Braunem Auenboden beginnt der Go-Horizont zwischen 4 - 8 dm Tiefe (Abb. 2.3-1).

Beginnt der Gr-Horizont in weniger als 4 dm unter der Geländeoberfläche, handelt es sich um einen Nassgley. Aufgrund des oberflächennahen Grundwassers wird die organische Substanz im mäßig durchlüfteten Milieu schlecht abgebaut und angereichert. Humusgehalte zwischen 15 und 30 Gew.-% kennzeichnen den

Anmoorgley. Eine höhere Humusanreicherung führt zur Entwicklung eines Niedermoores.

In einigen Bereichen der Rheinebene wurde in den rostroten Eisenoxiden der Go-Horizonte Arsen natürlich angereichert. Je nach Lage der Go-Horizonte können die höchsten Arsengehalte auch im humosen Oberboden vorliegen. Im sauerstoffarmen, reduzierenden Milieu der Gr-Horizonte sind die Arsengehalte stets gering (Kap. 4.1.1).



Abb. 3.1.2-5: Auengley aus Auenlehm und sandig-kiesigen Flussbettablagerungen, Gemarkung Nonnenweiher; Bild: LGRB

### 3.2 Bodenfunktionen und Bodenbewertung

Böden erfüllen wichtige Funktionen im Naturhaushalt. Sie dienen nicht nur Pflanzen als Standort, sondern haben auch wichtige Regelfunktionen im Wasser- und Stoffkreislauf der Landschaften.

Zweck der Bodenschutzgesetze von Bund und Ländern ist es, die Bodenfunktionen nachhaltig zu sichern oder wieder herzustellen und bei Eingriffen in den Boden Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen so weit wie möglich zu vermeiden (§ 1 BBodSchG).

Dazu ist es notwendig die Bodenfunktionen zu bewerten, um bei Planungs- und Genehmigungsverfahren den Schutz der Böden im Sinne eines sparsamen, schonenden und haushälterischen Umgangs mit dieser begrenzten Ressource angemessen zu berücksichtigen (Kap. 5.1).

Bei der Bewertung werden vier natürliche Bodenfunktionen unterschieden:

- Natürliche Bodenfruchtbarkeit
- Sonderstandort für naturnahe Vegetation
- Ausgleichskörper im Wasserkreislauf
- Filter und Puffer für Schadstoffe.

Darüber hinaus sind Böden Archive der Natur- und Kulturgeschichte.

Die Bewertung der natürlichen Bodenfunktionen stützt sich i.d.R. auf messbare chemische und physikalische Bodeneigenschaften. Sie können z.T. von Bodenschätzungsdaten abgeleitet werden (Kap. 5.1.3). Für den Erfüllungsgrad der Archivfunktion sind Messdaten weniger wertgebend, sondern seltene oder besondere Merkmale der Bodenentwicklung oder Zeugnisse historischer Siedlungs- und Landnutzungen (Kap. 3.2.5).

Bei der Bewertung der Bodenfunktionen werden fünf Klassen der Funktionserfüllung unterschieden (Tab. 3.2-1).

Tab. 3.2-1: Bewertungsklassen für die Funktionserfüllung von Böden (LUBW 2010a)

| Funktionserfüllung         | Bewertungsklasse |
|----------------------------|------------------|
| keine (versiegelte Fläche) | 0                |
| gering                     | 1                |
| mittel                     | 2                |
| hoch                       | 3                |
| sehr hoch                  | 4                |

Nachfolgend werden die Funktionen der Böden im Ortenaukreis anhand ausgewählter Standorte beschrieben. Bewertungsrelevante Messdaten ermöglichen, die Leistungsfähigkeit der Böden zu vergleichen. Dazu zählen neben Angaben zur Bodenart (Tab. 3.1.1-2), zum Humusgehalt und pH-Wert (Kap. A.4.4.5) weitere Daten über physikalische Kenngrößen, die die Beschaffenheit des Bodenporenraums charakterisieren (Kap. A.3.2).

Die Beschreibungen der Bodenfunktionen werden auf die Darstellung und Bewertung der maßgeblichen Kenngrößen beschränkt. Sie werden durch Karten ergänzt, die einen Überblick über die räumliche Verteilung der unterschiedlich leistungsfähigen Böden im Ortenaukreis geben. Die Karten sind aus Daten der bodenkundlichen Landesaufnahme abgeleitet worden. Der Darstellungsmaßstab (1:50 000) der digitalen Daten erfordert eine Erweiterung der Bewertungsskala um Zwischengrößen (z.B. sehr gering bis gering).

Weitere Informationen über die Grundlagen, die Vorgehensweise bei der Bewertung, die Einflussgrößen auf das Bewertungsergebnis sowie die entsprechenden Tabellen zur Werteableitung enthält der Leitfaden der LUBW „Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit“ [LUBW 2010a].

### 3.2.1 Bodenfunktion „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“

Das im Boden gespeicherte Wasser wird von Pflanzen benötigt, um Stoffwechselfunktionen und die Standfestigkeit der oberirdischen Pflanzenteile zu gewährleisten. Mit dem Bodenwasser werden den Pflanzen gelöste Nährstoffe zugeführt. Unabhängig von pflanzenbaulichen und kulturtechnischen Maßnahmen wie Düngung und Bewässerung wird die natürliche Bodenfruchtbarkeit, die sich im Biomassezuwachs bzw. im landwirtschaftlichen Ernteertrag niederschlägt, von der Fähigkeit der Böden bestimmt, die Pflanzen mit Wasser zu versorgen.

Bei Böden ohne Grund- und Stauwassereinfluss ist die Menge des pflanzenverfügbaren Bodenwassers, d.h. die nutzbare Feldkapazität nFK bis 1 m Bodentiefe für die Bewertung der Böden maßgeblich (Tab. 3.2.1-1; Kap. A.3.2, Physikalische Kenngrößen des Bodenporenraums).

Tab. 3.2.1-1: Bewertung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit nach der nFK bis in 1 m Bodentiefe (LUBW 2010a)

| nFK Boden           |    | Bewertungsklasse |
|---------------------|----|------------------|
| versiegelte Flächen |    | 0                |
| < 50                | mm | 1                |
| 50 - 140            | mm | 2*               |
| 140 - 200           | mm | 3                |
| > 200               | mm | 4                |

\* bei Sanden (S, Su2, Sl2) = 1 - 2

Abb. 3.2.1-1 zeigt eine Parabraunerde mit sehr hoher natürlicher Bodenfruchtbarkeit (Bewertungsklasse 4), wie sie in den Lössgebieten der Vorbergzone verbreitet ist (Abb. 3.2.1-2). Aufgrund des hohen Mittelporenanteils im schluffreichen Löss kann viel pflanzenverfügbares Wasser gespeichert werden. Die das Totwasser TW bindenden Feinporen treten dagegen wie die Grobporen zurück. Bei einer nutzbaren Feldkapazität von etwa 260 l/m<sup>2</sup> kann die aus würmzeitlichem Löss entstandene Parabraunerde bis in 1 m Bodentiefe weit mehr Wasser pflanzenverfügbar speichern als die Auenparabraunerde aus Hochwassersedimenten in Abb. 3.2.3-1 (nFK: 142,7 l/m<sup>2</sup>).

Bei Böden mit Grund- oder Stauwassereinfluss ist die Tiefenlage der grund- bzw. stauwasserführenden Horizonte bei der Bewertung entscheidend. Der Wasserhaushalt solcher Böden kann für Nutzpflanzen nachteilig sein, wenn der Porenraum so stark wassergesättigt ist, dass das Wurzelwachstum durch Luftmangel eingeschränkt wird. Je nach topographischer Lage und Wassersättigung erwärmen sich staunasse Böden im Frühjahr langsamer.

Liegen der Grundwasserspiegel oder Stauhorizonte, wie bei Auen- und Stagnogleyen, in einem Tiefenbereich von bis zu 4 dm (z.B. Abb. 3.1.2-5), bleibt der Boden in der Wachstumsperiode für Ackerkulturen zu feucht bzw. zu nass und die die Luftkapazität bestimmenden weiten Grobporen sind lange Zeit wassergesättigt. Hier finden nur speziell angepasste Pflanzen günstige Wachstumsbedingungen (Kap. 3.2.2).

Anders stellen sich die Verhältnisse bei dem gering grundwasserbeeinflussten Boden in Abb. 3.2.4-1 dar. Bis zur Obergrenze des lang anhaltend grundwassergesättigten Gor1-Horizonts beträgt die nFK nur etwa 80 l/m<sup>2</sup>. Da auch kapillar aufsteigendes Grundwasser an diesem Standort zur Versorgung der Pflanzen beitragen kann, ist dennoch eine hohe Bodenfruchtbarkeit gewährleistet (Bewertungsklasse 3).



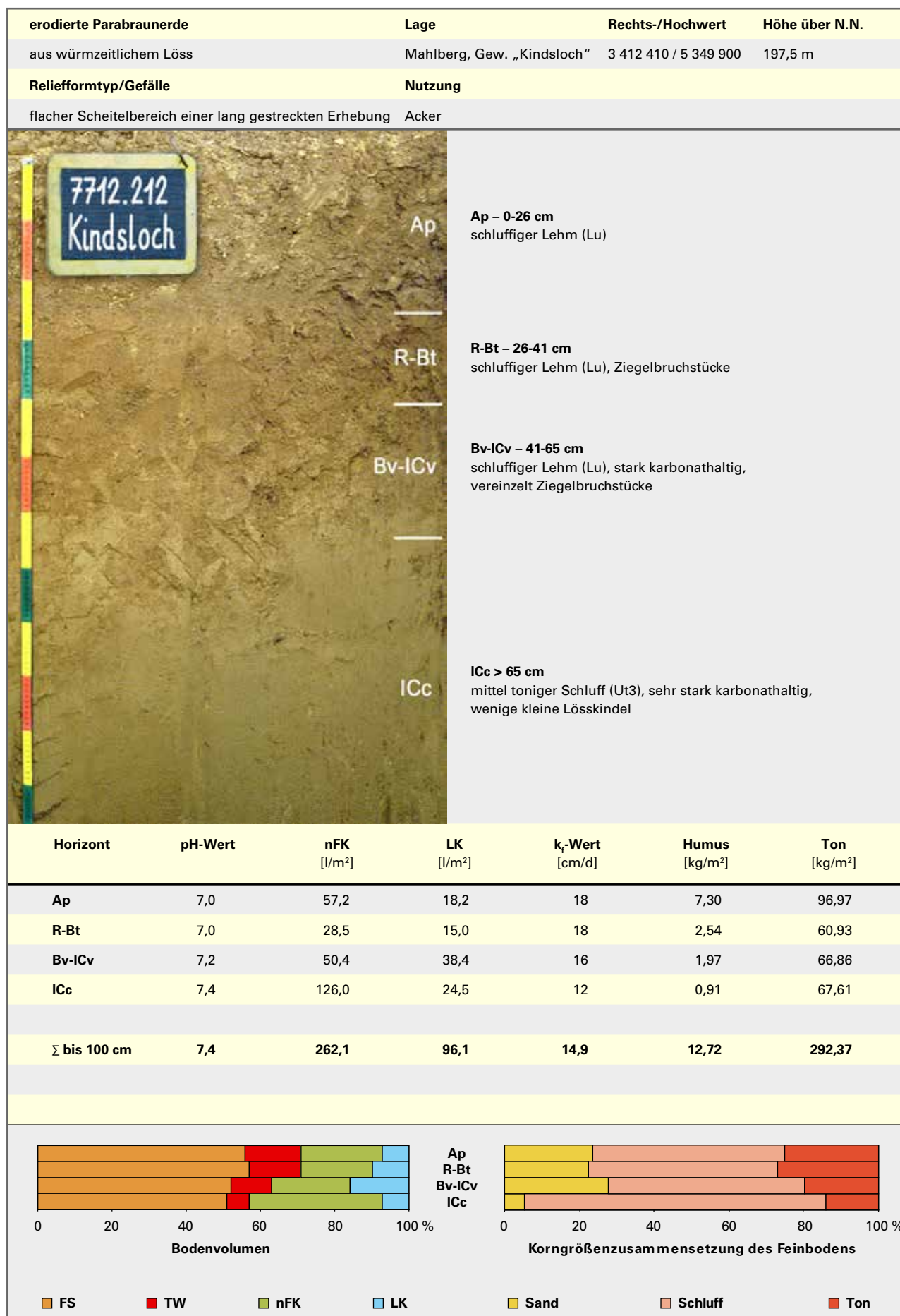
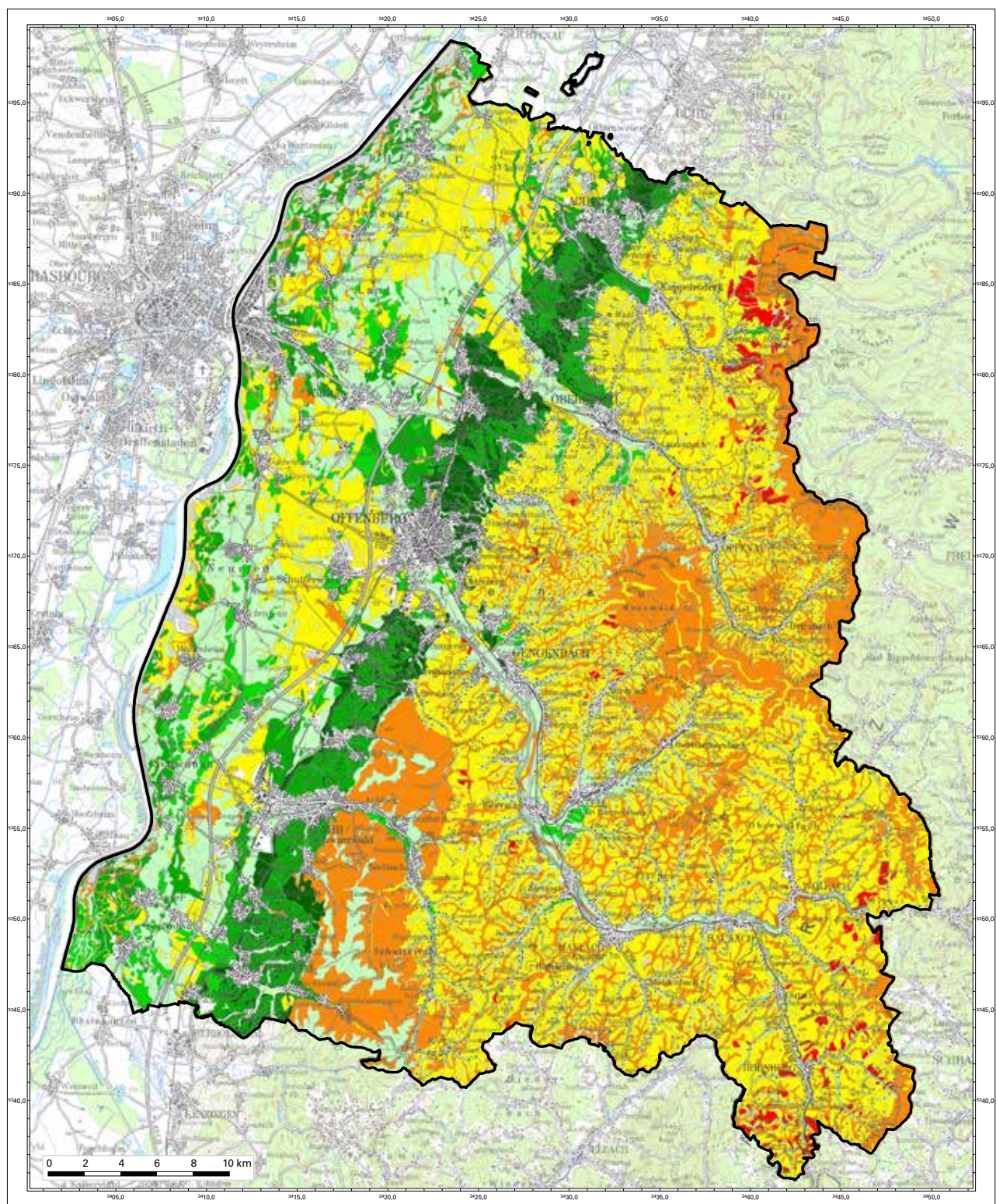


Abb. 3.2.1-1: Profildatenblatt, Standort: „Kindsloch“, Gemarkung Mahlberg; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB





#### Natürliche Bodenfruchtbarkeit

- gering
  - gering bis mittel
  - mittel
  - mittel bis hoch
  - hoch
  - hoch bis sehr hoch
  - sehr hoch
  - keine Angaben (Ortslagen, versiegelte Flächen, Gewässer)
- Landkreisgrenze

Kartengrundlage:  
 Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)  
 © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
 Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200)  
 © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

Kartographie:  
 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 3.2.1-2: Bodenfunktionskarte „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“, Ortenaukreis

### 3.2.2 Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“

Böden mit extremen Standorteigenschaften bieten für besonders angepasste, seltene und schützenswerte Pflanzengesellschaften günstige Wachstumsbedingungen, ohne dass bereits naturschutzfachlich wertvolle Pflanzengesellschaften vorliegen.

Trockene oder feuchte bis nasse, nährstoffarme Böden zeichnen sich durch eine hohe Funktionserfüllung als Sonderstandort für naturnahe Vegetation aus. Ihre natürliche Bodenfruchtbarkeit ist dagegen gering.

Sind diese Böden nicht zu stark durch Eingriffe verändert worden (z.B. Drainagen, gering mächtige Bodenaufträge) oder noch keine stark spezialisierten Pflanzengesellschaften vorhanden, bieten sie ein hohes Biotopentwicklungspotenzial, das im Rahmen des naturschutzrechtlichen Ausgleichs genutzt werden kann (Kap. 5.2.3).

Die Funktionserfüllung als Sonderstandort für naturnahe Vegetation wird weitgehend vom Wasserhaushalt und von der Gründigkeit des Bodens bestimmt. Da ausschließlich extreme Standorteigenschaften wertgebend sind, werden bei der Bodenfunktion als Sonderstandort für naturnahe Vegetation nur die Bewertungsklassen hoch (3) und sehr hoch (4) in der Gesamtbewertung der Bodenfunktionen berücksichtigt.

Der Wasserhaushalt wird über die bodenkundliche Feuchtestufe beurteilt. Er beeinflusst den Pflanzenwuchs und die hydroökologischen Standortfaktoren (Tab. 3.2.2-1).

Tab. 3.2.2-1: Bewertung des Wasserhaushalts nach der bodenkundlichen Feuchtestufe (LUBW 2010a)

| Bodenkundliche Feuchtestufe | Bewertungsklasse |
|-----------------------------|------------------|
| äußerst trocken             | 4                |
| sehr trocken                | 4                |
| trocken                     | 3                |
| mäßig trocken               | 3*               |
| feucht und wechselfeucht    | 3                |
| sehr feucht bis nass        | 4                |

\* mit Einschränkungen

Bei Böden ohne Grund- und Stauwassereinfluss wird die bodenkundliche Feuchtestufe mit Hilfe der nutzbaren Feldkapazität und der reliefabhängigen Klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum Mai bis Oktober abgeleitet.

Bei Grund- und Stauwasserböden sowie Mooren lässt die Tiefenlage der lang anhaltend grund- und stauwasserführenden Horizonte auf Extreme des Wasserhaushaltes schließen.

„Sehr feucht bis nass“ (Bewertungsklasse 4) ist z.B. die Feuchtestufe des BändchenstauPodsols (Abb. 3.2.2-1). Wie bei Bändchenstagnogleyen ist hier ein gebleichter, zuweilen taschenförmig ausgeprägter, stauwasserführender Srw-Horizont in < 4 dm Tiefe typisch (Einbandfoto). Beide Bodentypen sind beschränkt auf abflussträge Hochlagen des Schwarzwalds. Mit > 800 mm/a ist die Klimatische Wasserbilanz deutlich positiv (Kap. 2.4), d.h. der Porenraum des Bodens ist über lange Zeit wassergesättigt.

Bei gleichmäßig eben (horizontal) ausgeprägtem Srw-Horizont können im BändchenstauPodsol über dem stauenden Eisenbändchen nur ca. 250 l/m<sup>2</sup> Niederschlagswasser aufgenommen werden (nFK + LK); im gesamten Bodenkörper sind es maximal 390 l/m<sup>2</sup>.

Die Gründigkeit von Böden ist hinsichtlich der Funktion als Sonderstandort für naturnahe Vegetation bedeutend, wenn sie auf Trockenheit und/oder Nährstoffarmut schließen lässt. In sehr hohem Maß (Bewertungsklasse 4) erfüllen flachgründige Bodentypen wie Ranker und Regosole, die sich an Bergkuppen und -rücken finden, die Funktion als Sonderstandort für naturnahe Vegetation (Abb. 3.2.2-2).



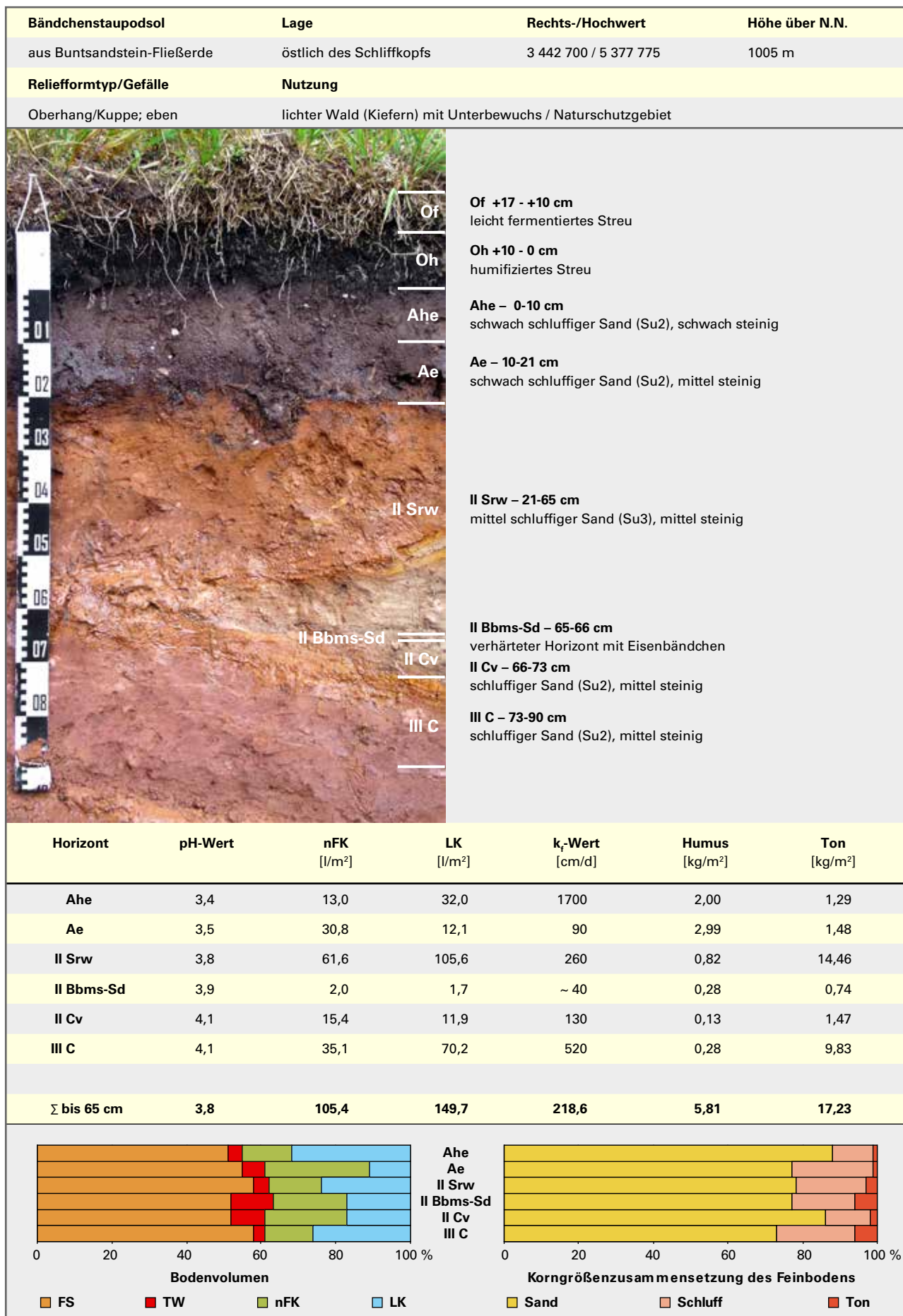
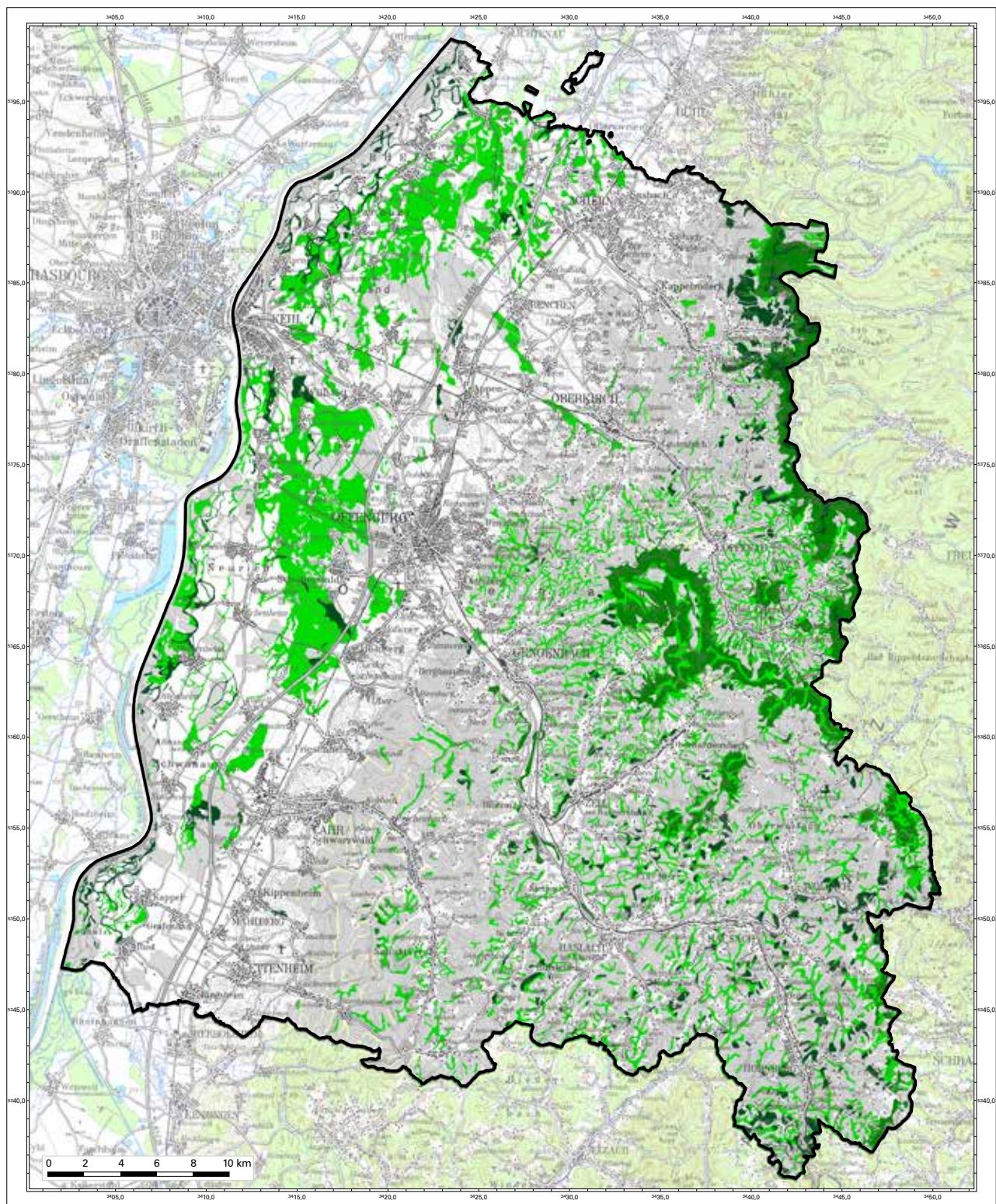


Abb. 3.2.2-1: Profildatenblatt, Standort: „Schliffkopf“; die im Bild bezeichneten Bodenhorizonte wurden an einem unmittelbar benachbarten Profilibereich aufgenommen; Quelle: Herrmann, Stahr 1998; Bild: R. Olschewski





#### Sonderstandort für naturnahe Vegetation

- mittel bis hoch
- hoch
- hoch bis sehr hoch
- sehr hoch
- Landkreisgrenze

Kartengrundlage:  
 Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)  
 © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
 Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200)  
 © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung ([www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de)), Az. : 2851.9-1/19

Kartographie:  
 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 3.2.2-2: Bodenfunktionskarte „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“, Ortenaukreis

### 3.2.3 Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“

Böden als poröse Körper speichern das Niederschlagswasser und geben es zeitlich verzögert wieder ab. Böden wirken im Wasserhaushalt der Landschaft als Ausgleichskörper (Abb. 3.2.3-2).

Die Funktionserfüllung der Böden wird hauptsächlich von der Ausprägung des Porensystems bestimmt. Maßgebliche Kenngrößen sind das Wasserspeichervermögen WSV und die Wasserleitfähigkeit  $k_f$ , die gewichtet für alle untersuchten Bodenhorizonte als  $K_{fp}$  in die Bewertung einfließen (Kap. A.3.2).

Bei Böden in abflussträger Lage ( $< 6\%$  Hangneigung) wird das Wasserspeichervermögen von der nutzbaren Feldkapazität nFK und der Luftkapazität LK, bei Böden in geneigter Lage nur von der nFK bestimmt.

Für die Bewertung sind i. d. R. die Kenngrößen bis maximal 1 m Bodentiefe wesentlich, während bei grundwasserbeeinflussten Böden nur die Kenngrößen über dem Gr-Horizont herangezogen werden (Kap. 3.1.2; Tab. 3.2.3-1).

Tab. 3.2.3-1: Bewertung als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf nach Wasserspeichervermögen (WSV) und  $K_{fp}$  bis 1 m Bodentiefe (LUBW 2010a)

| $K_{fp}$<br>[cm/d] | WSV [l/m <sup>2</sup> ] |         |           |            |      |
|--------------------|-------------------------|---------|-----------|------------|------|
|                    | <50                     | 50 - 90 | >90 - 140 | >140 - 200 | >200 |
| < 7                | 1                       | 1       | 1         | 1-2        | 2    |
| 7-15               | 1                       | 1-2     | 1-2       | 2          | 3    |
| 15-30              | 1                       | 2       | 2         | 2-3        | 3    |
| > 30               | 1                       | 2       | 3         | 3-4        | 4    |

Die Auenparabraunerde (Abb. 3.2.3-1) erfüllt die Bodenfunktion als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf in einem hohen bis sehr hohen Maß (Bewertungsklasse 3-4). Das Wasserspeichervermögen ist bis in 1 m Tiefe mit 212 l/m<sup>2</sup> zwar um etwa 145 l geringer als bei der Parabraunerde aus Löss (358,1 l/m<sup>2</sup>; Abb. 3.2.1-1), dafür versickern die Niederschläge in der Auenpa-

rabraunerde bei der durchschnittlichen Wasserleitfähigkeit von 27 cm/d schneller, was das höhere Maß der Erfüllung dieser Bodenfunktion begründet (Abb. 3.2.3-1).

Die Differenz der  $k_f$ -Werte beider Böden zeigt, dass die Höhe der Wasserleitfähigkeit nicht unbedingt von der Größe des gesamten Porenvolumens bestimmt wird. Bedeutender ist der Sandanteil. Sand dominiert mit  $> 40\%$  die Korngrößenzusammensetzung der Auenparabraunerde. Die geringere Wasserleitfähigkeit der erodierten Parabraunerde aus Löss ist im höheren Schluffanteil begründet, der bei hohen Bodenwassergehalten dazu neigt, Grobporen zu verschlammern.

Bei der Bewertung von Stauwasserböden ist zu berücksichtigen, dass der Porenraum über längere Perioden wassergesättigt ist. Sie können daher nur eingeschränkt Niederschlagswasser aufnehmen.

Bei angenommenem horizontalem Verlauf des stauend wirkenden Eisenbändchens (Bbms-Sd-Horizont) verfügt der stauwasser geprägte Boden in Abb. 3.2.2-1 zwar über günstige Kenngrößen (WSV:  $\sim 255$  l/m<sup>2</sup>;  $K_{fp}$ :  $\sim 219$  cm/d). Die Erfüllung der Ausgleichsfunktion ist wegen der langfristigen Wassersättigung des Srw-Horizonts jedoch als gering einzustufen (Bewertungsklasse 1).

Stauwasserböden werden daher pauschal nach dem Bodentyp bzw. der Tiefenlage der stauwassergesättigten Horizonte bewertet. Unterschieden wird zwischen Lehm- bzw. Schluffböden und Tonböden.



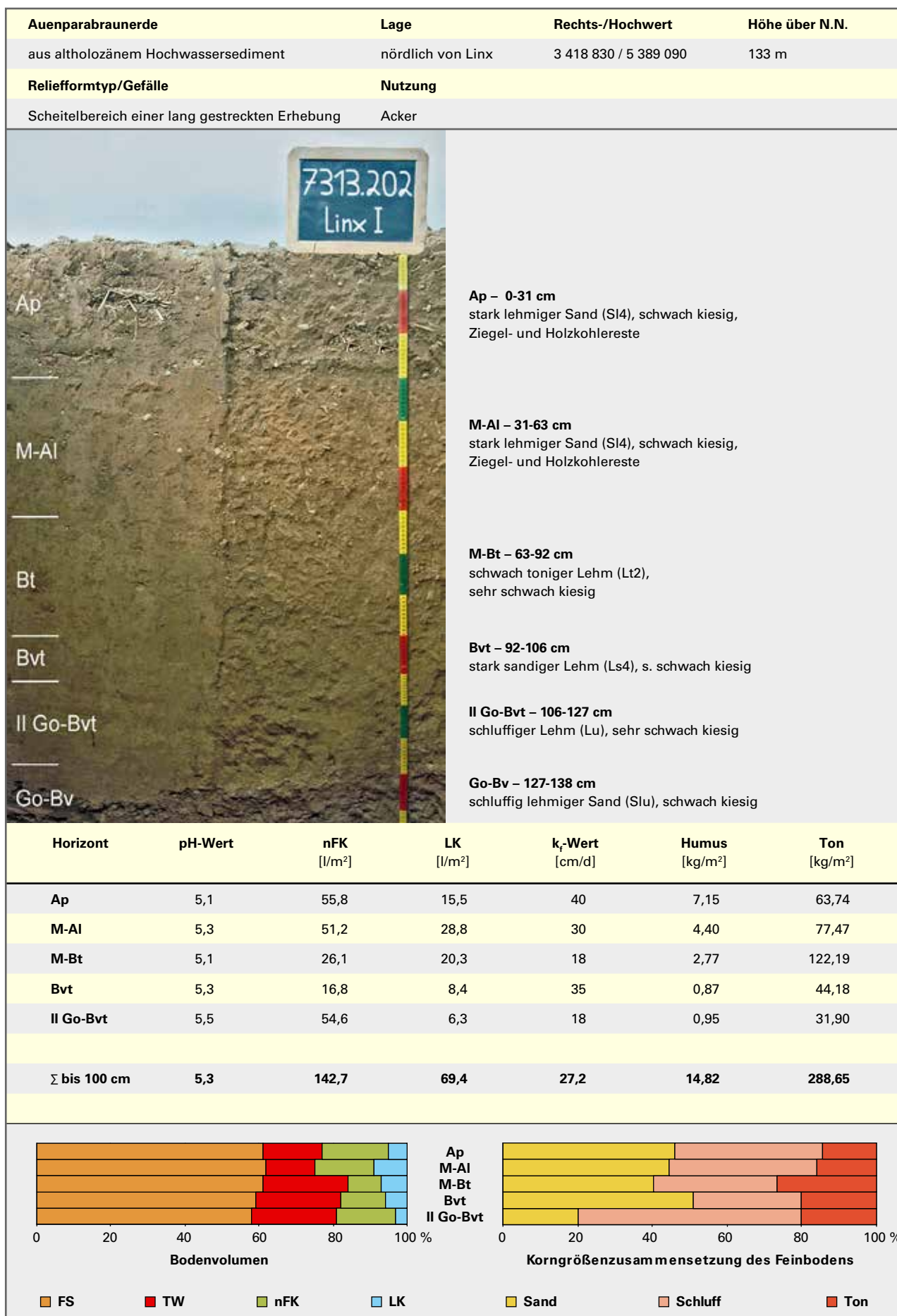
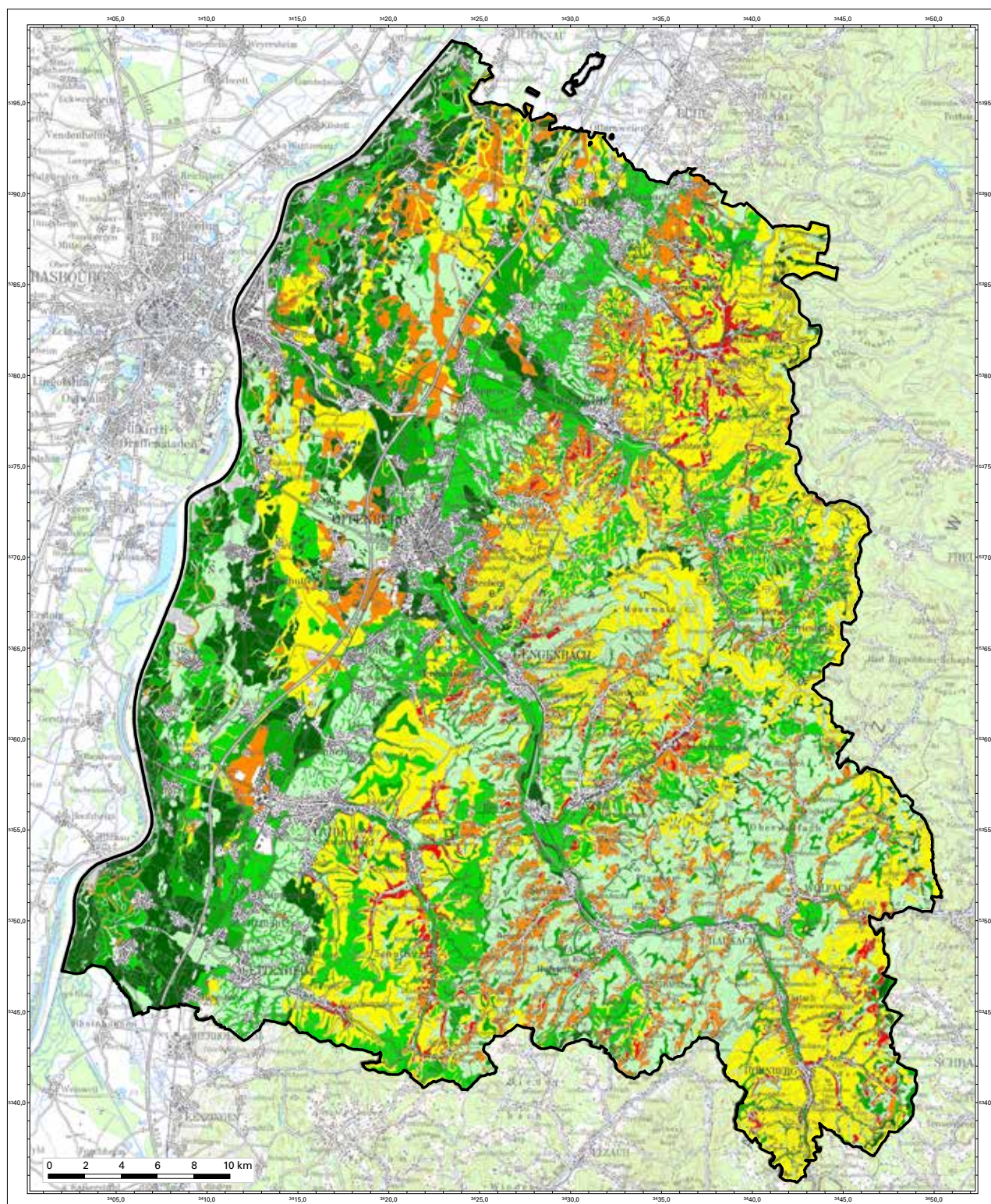


Abb. 3.2.3-1: Profildatenblatt, Standort: „Linx“; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB





#### Ausgleichskörper im Wasserkreislauf

- gering
- gering bis mittel
- mittel
- mittel bis hoch
- hoch
- hoch bis sehr hoch
- sehr hoch
- keine Angaben (Ortslagen, versiegelte Flächen, Gewässer)
- Landkreisgrenze

Kartengrundlage:  
 Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)  
 © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
 Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200)  
 © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung ([www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de)), Az.: 2851.9-1/19

Kartographie:  
 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 3.2.3-2: Bodenfunktionskarte „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“, Ortenaukreis

### 3.2.4 Bodenfunktion „Filter und Puffer für Schadstoffe“

Böden erfüllen im Stoffkreislauf der Landschaften wichtige Regelfunktionen. Sie binden Schadstoffe und/oder tragen zu ihrem Abbau bei. Schädliche Wirkungen, die von Schadstoffen ausgehen können, werden dadurch verringert oder unterbunden (Abb. 3.2.4-2).

Die Bewertungsergebnisse ermöglichen einen qualitativen Vergleich der Böden. Aussagen über konkrete Auswirkungen spezifischer Schadstoffeinträge lassen sich aus den Bewertungsergebnissen jedoch nicht ableiten. Dazu sind gezielte Untersuchungen notwendig (Kap. A.4.1, A.4.2). Für die Bewertung der Filter- und Pufferfunktion sind der höchste gemessene Boden-pH-Wert sowie die Humus- und Tonmenge ( $\text{kg/m}^2$ ), bis in 1 m Bodentiefe, hauptsächlich aber der höchste gemessene pH-Wert maßgeblich (Tab. 3.2.4-1).

Tab. 3.2.4-1: Bewertung der Filter- und Pufferfunktion nach Humus- und Tonmenge sowie pH-max bis in 1 m Bodentiefe (LUBW 2010a)

| Humusmenge<br>[ $\text{kg/m}^2$ ] | Tonmenge<br>[ $\text{kg/m}^2$ ] | pH-max |           |           |       |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------|-----------|-----------|-------|
|                                   |                                 | < 4,2  | 4,2 - 5,0 | 5,0 - 6,9 | ≥ 7,0 |

| versiegelte Flächen |           | 0 |     |     |     |
|---------------------|-----------|---|-----|-----|-----|
| < 13                | < 100     | 1 | 1   | 1   | 1-2 |
|                     | 100 - 300 | 1 | 1   | 1-2 | 2-3 |
|                     | > 300     | 1 | 2   | 2   | 3   |
| 13 - 25             | < 100     | 1 | 1   | 1   | 2   |
|                     | 100 - 300 | 1 | 1   | 2   | 3   |
|                     | > 300     | 1 | 2   | 3   | 4   |
| > 25                | < 100     | 1 | 1   | 1-2 | 2-3 |
|                     | 100 - 300 | 1 | 1-2 | 2   | 3   |
|                     | > 300     | 2 | 2   | 3   | 4   |

Bei grundwasserbeeinflussten Böden werden nur die Horizonte über dem Gr-Horizont berücksichtigt (Kap. 3.1.2). Der grundwasserbeeinflusste Boden in Abb. 3.2.4-1 enthält bis in 68 cm Bodentiefe (Gor-Horizont)  $15,6 \text{ kg/m}^2$  Humus und  $265,5 \text{ kg/m}^2$  Ton. Der Boden ist stark versauert, so dass die Funktionserfüllung als Filter und Puffer wegen des in 44 - 68 cm Tiefe gemessenen höchsten pH-Werts von 4,5 als gering einzustufen ist (Bewertungsklasse 1).

Dagegen wird die Funktionserfüllung der Auenparabraunerde in Kap. 3.2.3 als mittel eingestuft (Bewertungsklasse 2), obwohl Humus- und Tonmengen in vergleichbaren Größenordnungen vorliegen ( $14,8 \text{ kg/m}^2$  und  $288,7 \text{ kg/m}^2$ ; Abb. 3.2.3-1). Entscheidend dafür ist der im Unterboden höchste gemessene pH-Wert, der mit 5,3 eine nur mäßige Versauerung kennzeichnet.

Die Bedeutung des pH-Werts für die Leistungsfähigkeit der Filter- und Pufferfunktion wird bei zusammenfassender Betrachtung der Daten für die in Kap. 3.2.1 beschriebene Parabraunerde aus Löss ersichtlich (Abb. 3.2.1-1).

Die Humus- und Tonmengen in der Parabraunerde entsprechen denen der zuvor genannten Böden ( $12,7 \text{ kg/m}^2$  bzw.  $292,4 \text{ kg/m}^2$ ). Die pH-Werte liegen jedoch im neutralen bis sehr schwach alkalischen Bereich (pH-max: 7,4). Nach Tab. 3.2.4-1 ergibt sich daraus eine hohe Funktionserfüllung (Bewertungsklasse 3).

Besonders ungünstig sind die bewertungsrelevanten Kennwerte des Stauwasserbodens aus Buntsandsteinmaterial in Abb. 3.2.2-1. Der Boden ist mit pH-Werten < 4,2 sehr stark sauer und mit ähnlich geringen Humus- und Tonmengen ausgestattet wie die Parabraunerde (<  $13 \text{ kg/m}^2$  bzw. <  $100 \text{ kg/m}^2$ ; Bewertungsklasse 1).

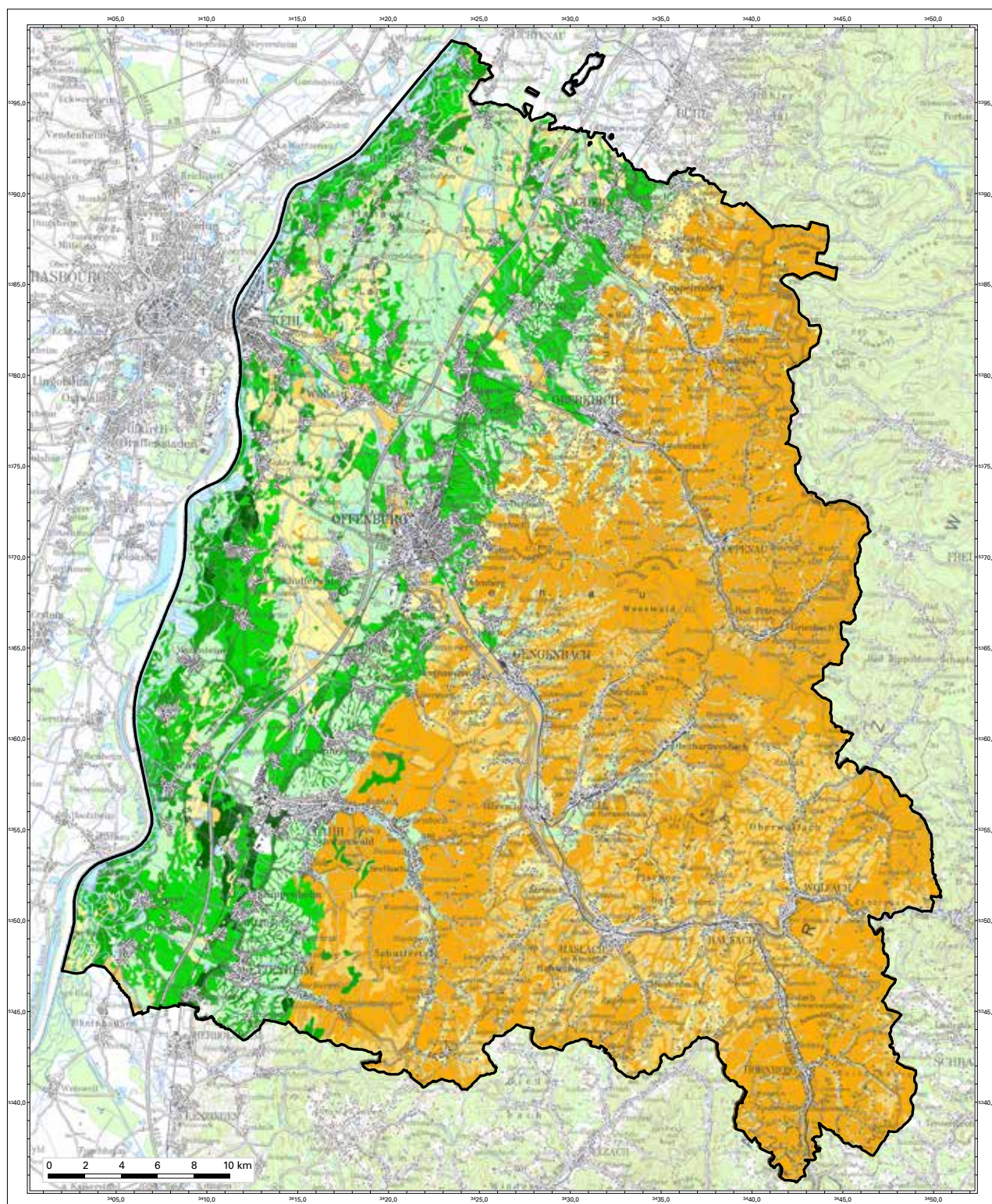
Weitere Informationen über die Ursachen und Kenngrößen der Bodenversauerung sowie zur Bedeutung des Boden-pH-Werts für die Bindung und Mobilisierung anorganischer Schadstoffe im Boden enthalten Kap. 4.4.1 und A.4.4.5.





Abb. 3.2.4-1: Profildatenblatt, Standort: „Bodersweier“; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB





#### Filter und Puffer für Schadstoffe

- gering
  - gering bis mittel
  - mittel
  - mittel bis hoch
  - hoch
  - hoch bis sehr hoch
  - sehr hoch
  - keine Angaben (Ortslagen, versiegelte Flächen, Gewässer)
- Landkreisgrenze

Kartengrundlage:  
 Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)  
 © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
 Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200)  
 © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

Kartographie:  
 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 3.2.4-2: Bodenfunktionskarte „Filter und Puffer für Schadstoffe“, Ortenaukreis



### 3.2.5 Bodenfunktion „Archive der Natur- und Kulturgeschichte“

In Böden können die eigene Entstehungsgeschichte, die Landschafts- oder die Kulturgeschichte wie in einer Urkunde dokumentiert sein.

Klimatische Bedingungen, Ausgangsgestein und historische Nutzungen haben in den Böden Spuren hinterlassen, die je nach Ausprägung oder Seltenheit schutzwürdig sind. Beispielsweise gewähren Geotope in Form von Gesteinsaufschlüssen und Fossilienfundstellen Einblicke in die Entwicklung der Erde und des Lebens.

Böden sind in vielfältiger Weise naturgeschichtliche Urkunden. Lösssedimente der Vorbergzone können überdeckte Reste fossiler Bodenbildungen (Paläoböden) enthalten, die auf die Landschaftsgeschichte und die klimatischen Bedingungen vor dem Ende der letzten Eiszeit schließen lassen.

Im Torf von Moorböden wie etwa im Hochmoor der Hornisgrinde (Abb. 3.2.5-1) sind Pollen, Samen und Sporen in unterschiedlicher Menge, Artenzusammensetzung und Tiefe eingelagert. Analysen dieser Materialien ermöglichen die Rekonstruktion der spät- und postglazialen Landschafts- und Vegetationsgeschichte des Schwarzwalds und des oberrheinischen Tieflands [FRIEDMANN 2000].

Wertvolle Urkunden der Naturgeschichte sind z.B. seltene, nacheiszeitliche Böden mit besonderen Merkmalen der Bodenentwicklung. Dazu zählt der beschriebene Bändchenstaupodsol. Permafrostverhältnisse haben wahrscheinlich zur Ausbildung des stauenden Eisenbändchens beigetragen (Abb. 3.2.2-1; Einband).

Böden sind kulturgeschichtliche Urkunden, wenn sie bedeutende archäologische Spuren enthalten wie z.B. Siedlungsreste oder frühere Nutzungsformen dokumentieren. Solche Flächen können unter Natur- oder Denkmalschutz stehen, wobei nicht der Boden das eigentliche Schutzziel ist.

Ein Beispiel sind historische Weinberge mit Trockenmauern. Sie zählen zu den nach dem Naturschutzrecht geschützten Biotopen. Auch Lösshohlwege, die sich durch



Abb. 3.2.5-1: Das Hochmoor der Hornisgrinde - ein Archiv der Natur- und Landschaftsgeschichte; Quelle Landratsamt Ortenaukreis

die jahrhundertelange Nutzung tief in den Löss eingegraben haben, sind oftmals kulturgeschichtliche Zeugnisse. Am Hagenberg bei einem Hohlweg am westlichen Ortsende von Lahr-Sulz haben sich auch schützenswerte Gehölze und an den Flanken Magerrasen entwickelt. Sie wurden als Biotop gemäß § 32 NatSchG kartiert.



## 4 Gefährdung der Böden

### 4.1 Wie Schadstoffe in den Boden gelangen

#### 4.1.1 Geogene Spurenstoffe

Die Erdkruste enthält Gesteine und Minerale, in denen Schwermetalle und Arsen natürlich angereichert sind (Kap. 2.2). Bei der Verwitterung gelangen Spurenelemente in die Böden und können lokal zu Bodengehalten über den landesweiten Hintergrundwerten oder den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) führen (Kap. A.4.2.1).

Durch pedogene Vorgänge wie Sauerbleichung (Podsolierung), Tonmineralverlagerung, Umlagerung (Fließerdebildung) und Lösseninträge kommt es zu einer ungleichmäßigen Verteilung geogener Spurenstoffe im Bodenkörper.

Im Ortenaukreis nehmen Böden mit naturbedingt über die Vorsorgewerte der BBodSchV erhöhten Schadstoffgehalten insgesamt eine beachtliche Fläche ein.

Die flach- bis mittelgründigen Böden (Regosole, Braunerden) im Bereich des Migmatit-Komplexes (Durbachit, Kap. 2.2), der sich von Durbach-Gebirg über den Ausgang des Kinzigtals bis Hohberg-Diersburg erstreckt, weisen hohe natürliche Chrom- und Nickelgehalte auf. Die meist sandigen Böden enthalten 135 - 510 mg Cr/kg und 43 - 151 mg Ni/kg (Kap. 4.2.5; Abb. 4.1.1-1).

Auch Böden aus Serpentin enthalten überdurchschnittlich viel Chrom und Nickel (Kap. 2.2). Ergebnisse von Bodenuntersuchungen liegen für das kleine Serpentinivorkommen bei Schuttertal-Höfen vor. Ein Grünlandstandort weist dort mit 741 mg Nickel und 530 mg Chrom/kg noch höhere Gehalte als die meisten Böden des Migmatit-Komplexes auf. Die landesweiten Hintergrundwerte werden 10- bis 20-fach überschritten [LABO 2003].

In den Gebieten mit Rhyolithen der Rotliegend-Zeit (Kap. 2.2) sind in überwiegend flachgründigen, steinreichen Böden (Ranker, Regosol) Arsengehalte bis zu

52 mg/kg anzutreffen [LANDRATSAMT ORTENAUKEIS 2007]. Der landesweite Hintergrundwert für Böden liegt bei ca. 20 mg/kg.

Abb. 4.1.1-2 zeigt einen erhöht arsenhaltigen, tiefgründigen Boden aus Rotliegend-Tonstein. Solche Sedimentgesteine stehen unter anderem an den Unterhängen um Moos- und Rautschkopf an (Abb. 2.2.1-3). Die intensiv rote Bodenfarbe ist für die meisten Böden typisch, die durch die Verwitterung von Rotliegend-Gesteinen entstanden sind.

In vielen Landesteilen enthalten die Böden aus Kalk- und Mergelsteinen des Unteren Muschelkalks erhöhte Arsen-, Blei- und Kupfergehalte über den Vorsorgewerten der BBodSchV [LUBW, REGIERUNGSPRÄSIDIUM KARLSRUHE 2009]. Im Ortenaukreis stehen solche Gesteine oberflächennah nördlich und südlich von Lahr und bei Offenburg an. Sie sind größtenteils von Löss- und Solifluktslehmen überdeckt. An wenigen Standorten mit oberflächlich austreichendem Unteren Muschelkalk sind höhere Arsen- und Bleigehalte im Oberboden angetroffen worden.

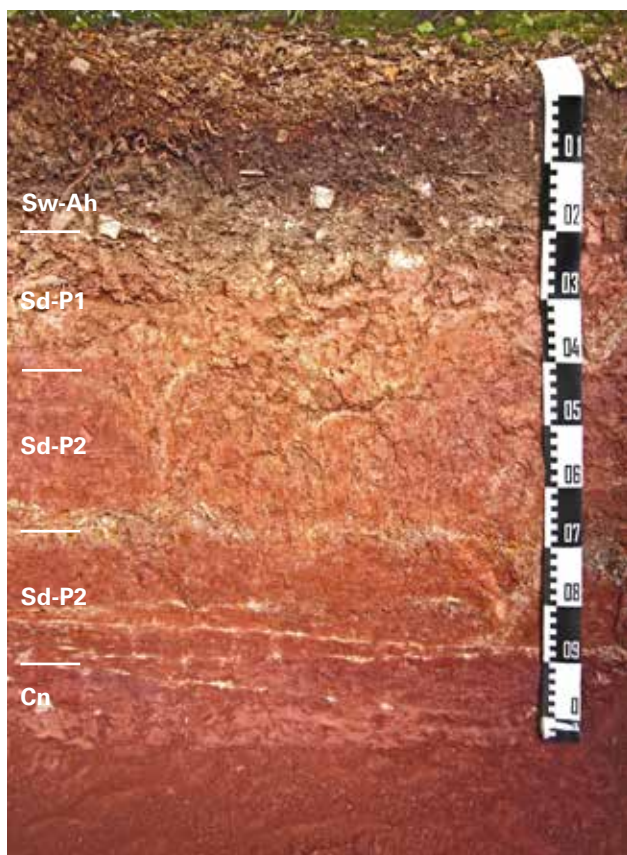
Abb. 4.1.1-3 zeigt einen tiefgründigen Boden aus Lösslehm über Tonfließerde und verwittertem Rötton östlich von Kippenheim-Schmieheim. Die Arsen- und Kupfergehalte steigen im verwitterten Rötton sprunghaft an. Jüngere Untersuchungen haben gezeigt, dass Röttone im Ortenaukreis um den Faktor 10 höhere Arsen- und Kupfergehalte aufweisen können.

In der Rheinebene zwischen Kippenheimweiler und Eckartsweier weisen Auenböden in einem etwa 25 km<sup>2</sup> großen Gebiet hohe Arsengehalte auf (Karte Kap. A.4.2.2.1). Zurückzuführen sind sie auf höhere Arsen- und Eisenkonzentrationen im sauerstoffarmen bis -freien Grundwasserkörper (Kap. 4.2.2.2). Das im Grundwasser in Spuren natürlich enthaltene Arsen wird zusammen mit Eisen in den Auenböden oberhalb des Grundwasserspiegels bei Zutritt von Sauerstoff ausgefällt.



| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>off</sub><br>[mmol/kg]     | Basensättigung<br>[%]             |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ~ 20          | 4,05                            | 118,0                               | 22,9                              |
| ~ 50          | 4,37                            | 78,0                                | 43,6                              |
| ~ 70          | 4,29                            | 59,0                                | 33,9                              |
| Tiefe<br>[cm] | Bodenart                        | erhöhte<br>Chromgehalte<br>[mg/kg]  | Vorsorgewert<br>Chrom<br>[mg/kg]  |
| ~ 20          | Su4                             | 136                                 | 30                                |
| ~ 50          | Su3                             | 194                                 | 30                                |
| ~ 70          | Su2                             | 148                                 | 30                                |
| Tiefe<br>[cm] | Bodenart                        | erhöhte<br>Nickelgehalte<br>[mg/kg] | Vorsorgewert<br>Nickel<br>[mg/kg] |
| ~ 20          | Su4                             | 44,5                                | 15                                |
| ~ 50          | Su3                             | 83,0                                | 15                                |
| ~ 70          | Su2                             | 58,8                                | 15                                |

Abb. 4.1.1-1: Mäßig tiefe Braunerde aus Durbachitzersatz am „Scheibenköpfle“, Gemarkung Ohlsbach;  
Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>off</sub><br>[mmol/kg]    | Basensättigung<br>[%]             |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| ~ 16          | 3,1                             | 166,4                              | 50,4                              |
| ~ 40          | 3,8                             | 99,9                               | 30,5                              |
| - 68          | 3,9                             | 94,9                               | 20,5                              |
| - 90          | 3,8                             | 120,3                              | 23,8                              |
| Tiefe<br>[cm] | Bodenart                        | erhöhte<br>Arsengehalte<br>[mg/kg] | Vorsorgewerte<br>Arsen<br>[mg/kg] |
| ~ 16          | Lt2                             | 45                                 | 15                                |
| ~ 40          | Tu2                             | 30                                 | 20                                |
| - 68          | Tu2                             | 35                                 | 20                                |
| - 90          | Tu2                             | 48                                 | 20                                |

Abb. 4.1.1-2: Pseudogley-Pelosol aus Tonfließerde über Tonstein des Mittleren Rotliegenden, am Langhärde, Gemeinde Oberharmersbach; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



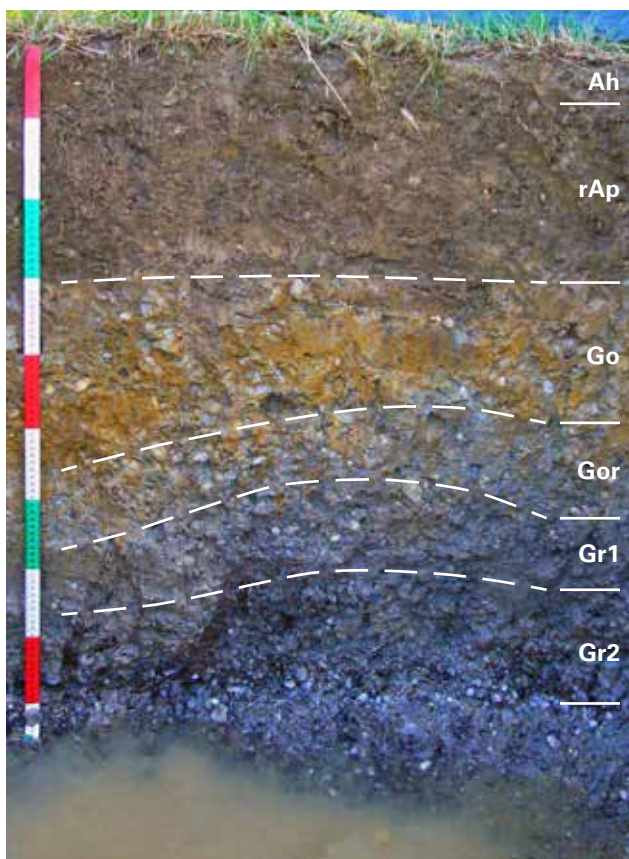


| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>pot</sub><br>[mmol/kg] | Basensättigung<br>[%] |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| - 10          | 3,93                            | 72,5                            | 12,7                  |
| - 32          | 3,83                            | 72,1                            | 4,5                   |
| - 58          | 3,84                            | 60,4                            | 5,8                   |
| - 97          | 3,73                            | 87,4                            | 31,9                  |
| - 115         | 4,06                            | 68,1                            | 70,8                  |

| Tiefe<br>[cm] | Bodenart | erhöhte Gehalte<br>[mg/kg] |        | Vorsorgewerte<br>[mg/kg] |        |
|---------------|----------|----------------------------|--------|--------------------------|--------|
|               |          | Arsen                      | Kupfer | Arsen                    | Kupfer |
| - 10          | Lu       | 14                         | 31,3   | 15                       | 40     |
| - 32          | Ut4      | 13                         | 35,4   | 15                       | 40     |
| - 58          | Lu       | 14                         | 47,3   | 15                       | 40     |
| - 97          | Tu3      | 12                         | 31,1   | 20                       | 60     |
| - 115         | Tu3      | 65                         | 158,0  | 20                       | 60     |

Abb. 4.1.1-3: Pseudogley-Braunerde aus Lösslehm über Tonfließerde (58 - 97 cm) und verwittertem Rötton, Zone III WSG „Kippenheim-Schmieheim“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>pot</sub><br>[mmol/kg] | Basensättigung<br>[%] |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| ~ 10          | 5,78                            | 37,9                            | 85                    |
| ~ 28          | 5,52                            | 36,6                            | 78                    |
| ~ 40          | 6,47                            | 34,1                            | 87                    |
| ~ 57          | 7,23                            | 13,7                            | 100                   |
| ~ 75          | 7,66                            | 15,5                            | 100                   |
| ~ 90          | 7,70                            | 8,1                             | 100                   |

| Tiefe<br>[cm] | Bodenart | erhöhte<br>Arsengehalte<br>[mg/kg] | Vorsorgewerte<br>Arsen<br>[mg/kg] |
|---------------|----------|------------------------------------|-----------------------------------|
| ~ 10          | Lt3      | 164                                | 15                                |
| ~ 28          | Lt3      | 168                                | 15                                |
| ~ 40          | Lt2      | 215                                | 15                                |
| ~ 57          | Ls4      | 135                                | 15                                |
| ~ 75          | Sl3      | 7,4                                | 10                                |
| ~ 90          | Su2      | 2,9                                | 10                                |

Abb. 4.1.1-4: Auengley aus Auenlehm in Zone IIIb, WSG „Neuried-Dundenheimer Wald“, Gemarkung Hohberg-Niederschopfheim; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



Im Lauf der Zeit haben die Fällungsreaktionen im Oberboden zu Arsenanreicherungen geführt, welche die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Nutzpflanze teilweise überschreiten (Kap. A.4.2.2.1.). Die Herkunft des Arsens im Grundwasser ist wahrscheinlich zurückzuführen auf

- bakterielle Lösung von arsenhaltigen Eisenoxiden in den Auenböden und in Schluff- und Tonlinsen des Kiesaquifers in sauerstofffreiem Milieu. Aus den grau gefärbten Schichten wird Arsen zusammen mit Eisen weggeführt (Abb. 4.1.1-4),
- ggfs. bakterielle Lösung von arsenhaltigem Pyrit ( $\text{FeS}_2$  bzw. Arsenkies  $\text{FeAsS}$ ) in den Auenböden und im Kiesaquifer (Kap. A.4.2.1.2),
- Verwitterung von gesteinsbildenden Mineralen der Kiese, die Spuren von Arsen enthalten.

#### 4.1.2 Schadstoffeinträge durch Bergbau und Verhüttung

Der mehr als 2000 Jahre zurückreichende Bergbau hat im Ortenaukreis zu Einträgen von Arsen und Schwermetallen in die Böden geführt.

Hervorzuheben ist der mittelalterliche und frühneuzeitliche Abbau silberhaltiger Bleierze. Aufbereitung und Verhüttung haben Bleikontaminationen hervorgerufen, die hinsichtlich der Konzentrationen und der Größe der betroffenen Gesamtfläche selbst die Bleieinträge aus Industrie- und Straßenverkehrsemissionen der letzten 150 Jahre übertreffen (Abb. 4.2.3.1-1).

Dies wird verständlich, wenn man sich den Ablauf der damaligen Bergbau- und Verhüttungstätigkeiten vergegenwärtigt. In der Frühzeit des Erzbergbaus wurde hauptsächlich auf silberhaltigen Bleiglanz ( $\text{PbS}$ ) gebaut. Er wurde zunächst von den anderen Begleiterzen und vom Nebengestein (Gneis, Granit) abgetrennt und anschließend geschmolzen.

Mit der Aufbereitung hat man bereits im Umfeld der Bergwerke begonnen, wo Nebengestein und schwach vererztes Gangmaterial (z.B. Quarz) oft schon bei den Gruben aufgehaldet wurden (Abb. 4.2.3.2-2). Erzhaltiges Ma-

terial wurde anschließend von Hand mit dem Hammer und/oder in wassergetriebenen Poch- und Mühlwerken zerkleinert (Abb. 4.1.2-1).

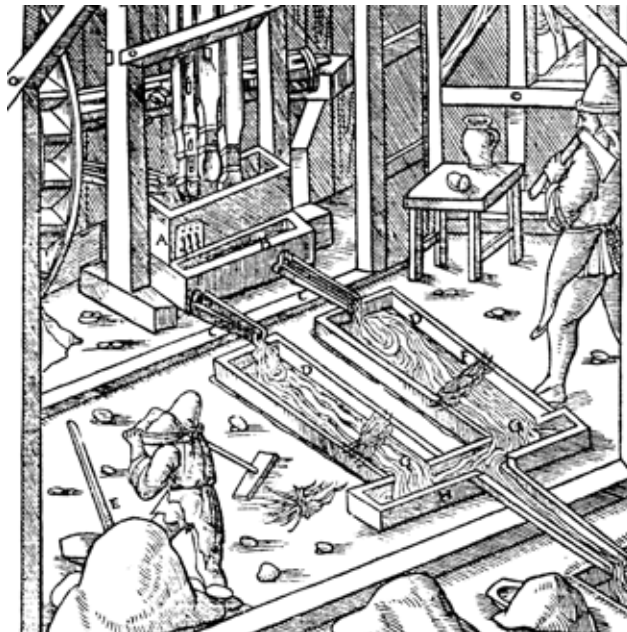


Abb. 4.1.2-1: Wassergetriebenes Pochwerk; Quelle: Agricola 1556; Nachdruck: Belles Lettres, Paris 1990, ISBN 2-251-34504-3

Das mehr oder weniger feinkörnige Material wurde dann gewaschen, um die spezifisch schwereren silberhaltigen Erze durch Sieben und Schlämmen von anderem, leichtem Gangmaterial zu trennen (Abb. 4.1.2-2).



Abb. 4.1.2-2: Schlämmen von gepochtem Erzmaterial; Quelle: Agricola 1556; Nachdruck: Belles Lettres, Paris 1990, ISBN 2-251-34504-3

Danach wurden die silberhaltigen Erze in Röstöfen oder Röststadeln weiter verarbeitet (Abb. 4.1.2-3). Der im Bleiglanz enthaltene Schwefel entwich als Schwefeldioxid, Elementverbindungen wie Arsentrioxid (Arsenik) wurden freigesetzt. Bleiglanz (PbS) wurde auf diese Weise in das für den nachfolgenden Verhüttungsprozess günstigere Bleioxid (PbO, „Bleiglätte“) überführt:

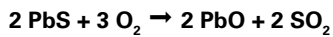


Abb. 4.1.2-3: Röstöfen und -stadel für Bleierze;  
Quelle: Agricola 1556; Nachdruck: Belles Lettres, Paris 1990,  
ISBN 2-251-34504-3

Die silberhaltige „Bleiglätte“ wurde in Schachtöfen schichtweise mit Holzkohle und anderen Zuschlagstoffen (z.B. Kalk) eingebaut und weitgehend unter Luftabschluss geschmolzen. Der Kohlenstoff der Holzkohle entwich mit dem Sauerstoff der „Bleiglätte“ als Kohlenmonoxid und Kohlendioxid:



Die Zuschlagstoffe bildeten mit noch vorhandenen Verunreinigungen wie Quarz (SiO<sub>2</sub>) eine leichte Schlacke (CaSiO<sub>3</sub>), die abgezogen werden konnte. Übrig blieb flüssiges, silberhaltiges Blei. Dieses „Werkblei“ wurde in Treiböfen unter kontinuierlicher Luftzufuhr nochmals aufgeschmolzen, um das Silber vom Blei zu trennen [BLIEDTNER, MARTIN 1986; BACHMANN 2004].

Bei der heute flächigen Verbreitung der bergbau- und verhüttungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalte haben Erosion, Verschwemmungen in die Gewässer und Hüttenrauch zusammengewirkt. Um die Erzlagerstätten für den zunächst oberflächennahen Abbau freizulegen oder um Bauholz und die für die Verhüttung notwendige Holzkohle zu gewinnen, wurde großflächig gerodet. Der über den Erzgängen freigelegte Boden hielt der Erosion durch Niederschläge nicht stand. Zusammen mit Haldenmaterial wurde schwermetall- und arsenhaltiger Boden aus den steilen Hanglagen abgetragen.

Abb. 4.1.2-4 zeigt einen Auenboden am Ausgang des Prinzbachtals bei Biberach, der durch Auflandung von schwermetallhaltigen Abschwemmmassen entstanden ist. Der lagenweise Aufbau in Verbindung mit den zur Tiefe zunehmenden Schwermetallgehalten lässt vermuten, dass das Material u.a. von ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsstandorten und aus der Umgebung stammt.

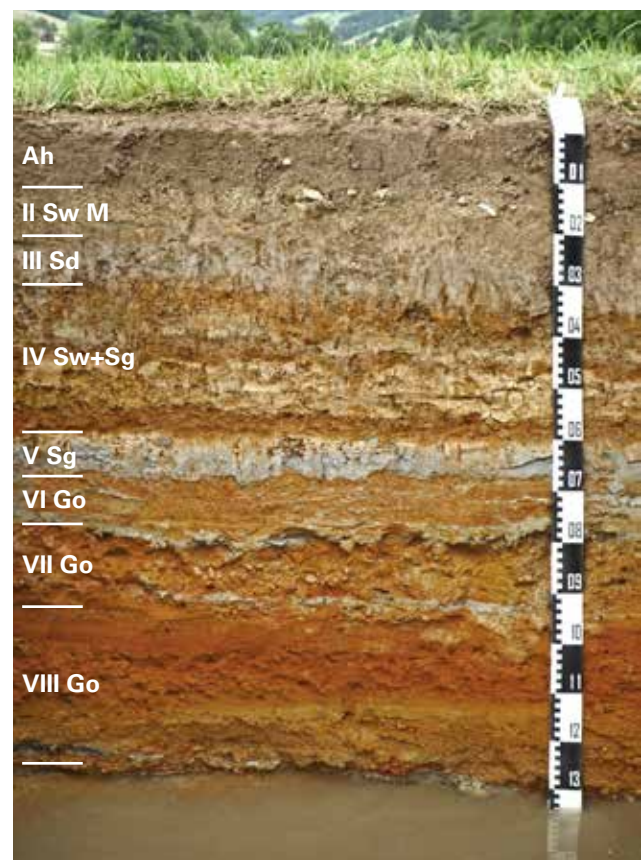


Abb. 4.1.2-4: Auengley-Auenpseudogley aus sandigen, lehmigen und schluffigen Abschwemmmassen, Gemarkung Biberach; Bild: R. Ölschewski



Im Lauf des 12./13. Jahrhunderts wurden Hüttenwerke an Bachläufen errichtet, um die Wasserkraft zum Betreiben von Poch- und Mahlwerken sowie der Blasebälge für die Schmelzöfen zu nutzen [GOLDENBERG 1996]. Beim Schlämmen und Sieben gelangte schadstoffhaltiges Material (z. B. Pochsande) in die Gewässer und wurde flussabwärts verfrachtet. In den natürlichen Überschwemmungsbereichen der Talauen wurde das Material sedimentiert. Abb. 4.2.3.1-1 zeigt die über viele Kilometer erhöhten Bleigehalte der Böden in den Schwemmflächen der Kinzig und der Schutter.

Vor allem in der näheren Umgebung der Verhüttungsstandorte hat die Verfrachtung von Stäuben und Dämpfen der Schmelzöfen zu massiven Bleieinträgen geführt. Im Kinzig- und Schuttertal haben Röststadel bzw. Röst- und Schmelzöfen giftige, schwefeldioxidhaltige Rauchgase emittiert und die Waldvegetation in der Umgebung sowie die Gewässer geschädigt.

Schon damals waren den Menschen die nachteiligen Umweltauswirkungen bewusst. Dies verdeutlichen Texte aus dem Handbuch „De Re Metallica“ (zu Deutsch: „Vom Berg- und Hüttenwesen“) von Georgius Agricola (1556):

*„Durch das Schürfen von Erz werden die Felder verwüstet, Wälder und Haine werden umgehauen; denn man bedarf zahlloser Hölzer für die Gebäude und das Gezeug sowie, um die Erze zu schmelzen. Durch das Niederlegen der Wälder und Haine aber werden die Vögel und andren Tiere ausgerottet. Die Erze werden gewaschen; durch dieses Waschen aber werden, weil es die Bäche und Flüsse vergiftet, die Fische aus ihnen vertrieben oder getötet...“*

Heute künden Orts- und Gewannnamen von der ehemaligen Verarbeitung. Erze wurden zum Beispiel in Biberach im Gewann „Schmelzhöfe“ oder bei der Häusergruppe „Poche“ auf Gemarkung Lahr-Reichenbach verhüttet. Davon zeugen zahlreiche Schlackenfunde im Boden (Abb. 4.1.2-5). Schmelzöfen standen u. a. in Prinzbach und am Ausgang des Prinzbach- und Emersbachtals, am Gießen sowie an der Schutter nahe Lahr-Reichenbach, am Schloss Dautenstein bei Seelbach, in Haslach und Hausach.



Abb. 4.1.2-5: Schlackenfundstücke aus Biberach; Bild: R. Olschewski

In der jüngeren Vergangenheit (1980-1995) wurden in einzelnen Fällen feinkörnige Rückstände aus der Fluss- und Schwerspataufbereitung des umgehenden Bergbaus zur Verfüllung von Grünlandflächen verwendet. Wegen der damit verbundenen Schadstoffeinträge in den Boden wurde diese Art der Verwertung aufgegeben.

#### 4.1.3 Schadstoffeinträge durch Emissionen

Viele Schadstoffe werden über die Luft flächig in die Böden eingetragen. Die Einträge können in der Umgebung von Punktquellen lokal begrenzt oder weiträumig verbreitet erfolgen, wenn die Stoffe durch Wind und Niederschläge diffus verteilt werden.

Drei Gruppen von Emissionsquellen werden unterschieden [UM 1993a]:

- industrielle und gewerbliche Anlagen,
- nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (u. a. in Privathaushalten),
- Verkehr.

Ursachen der Schadstoffeinträge sind überwiegend Verbrennungsvorgänge. Emittiert werden neben Stickoxiden und Schwefeldioxid (Kap. 4.1.3), Schwermetalle und organische Schadstoffe wie PAK (Kap. 4.2 bzw. 4.2.11).



Bei Schadstoffeinträgen über die Luft in die Böden werden nasse und trockene Depositionen unterschieden. Nasse Depositionen umfassen Schadstoffeinträge über Regen, Nebel, Tau und Schnee. Die Schadstoffe können darin partikulär gebunden sein oder gelöst vorliegen. Zur trockenen Deposition zählt die Ablagerung von Schwebteilchen (Aerosole,  $\varnothing < 0,1 \mu\text{m}$ ) und Staub ( $\varnothing > 0,1 \mu\text{m}$ ) auf die Erd- und Pflanzenoberfläche.

Bei den PAK liegt der Anteil der trockenen an der Gesamt-Deposition bei 80 - 90 %, bei den Schwermetallen dagegen bei etwa 25 - 40 % [HUTH ET AL. 1995; KÖNIG, BALFANZ 1991; MARFELS ET AL. 1991]. Unter Wald werden Luftschadstoffe durch die Vegetation (Blätter und Nadeln der Bäume) „ausgekämmt“. An exponierten, bewaldeten Kuppenlagen werden deshalb vermehrt Schadstoffe in die Auflagenhorizonte der Waldböden eingetragen.

Böden von Ballungsräumen und größeren Siedlungsbereichen weisen im Schnitt höhere Schadstoffgehalte auf als Böden ländlicher Regionen. Die Schadstoffanreicherungen sind zum Teil die Folge der Emissionen in

der Vergangenheit (Exkurs: Luftreinhaltung; Kap. 4.1.3) [UM 1995a, 1995b, 1995c].

Im Ortenaukreis standen vor allem die Emissionen im Ballungsraum Straßburg/Kehl in der Diskussion. Noch zu Beginn der 1990er Jahre wurden in der Innenstadt von Kehl und entlang des Rheins höhere Luftschadstoffkonzentrationen gemessen als in östlich gelegenen Stadtbereichen [UM 1993a]. Im Jahr 1998 wurde im Rahmen des landesweiten Bodenmonitorings durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) eine Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche in Betrieb genommen (Abb. 4.1.3-1).

Tab. 4.1.3-1 stellt Konzentrationsspannen der Depositionen an Spurenmetallen und Arsen im Zeitraum von 2004 - 2010 im Stadtgebiet von Kehl den großräumigen Hintergrundwerten in Süddeutschland und im Alpenraum gegenüber. Die in diesem Zeitraum in Kehl gemessenen Depositionen liegen demnach überwiegend im Bereich der üblichen verbreiteten Hintergrundbelastung [UMEG 2004a, 2004b].

Tab. 4.1.3-1: Ubiquitäre Depositions-Hintergrundwerte im Großraum Schweiz/Österreich/Süddeutschland und Messdaten der Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche im Stadtgebiet von Kehl aus den Jahren 2004-2010, Angaben in g/ha\*a; Quellen: Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen u. Gerätesicherheit Baden-Württemberg (UMEG) 2004c; Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) 2012

| Parameter | Umfeld           | Hintergrundwerte im Raum Schweiz/Österreich/Süddeutschland |                |                | Stadtgebiet Kehl           |  |
|-----------|------------------|------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|--|
|           |                  | 10. Perzentil*                                             | 50. Perzentil* | 90. Perzentil* | 50. Perzentil* (2004-2010) |  |
| Arsen     | Industriebereich | 1,6                                                        | 3,1            | 6,9            | 1,60 - 7,2                 |  |
|           | Siedlungsbereich | 1,5                                                        | 2,6            | 5,8            |                            |  |
|           | Außenbereich     | 0,8                                                        | 1,6            | 4,0            |                            |  |
| Cadmium   | Industriebereich | 0,5                                                        | 1,1            | 4,4            | 0,50 - 0,8                 |  |
|           | Siedlungsbereich | 0,4                                                        | 1,1            | 2,7            |                            |  |
|           | Außenbereich     | 0,4                                                        | 0,7            | 1,1            |                            |  |
| Blei      | Industriebereich | 28,0                                                       | 61,0           | 242,0          | 28 - 42                    |  |
|           | Siedlungsbereich | 18,0                                                       | 45,0           | 571,0          |                            |  |
|           | Außenbereich     | 13,0                                                       | 26,0           | 72,0           |                            |  |
| Zink      | Industriebereich | 615,0                                                      | 1 349,0        | 3 144,0        | 262 - 390                  |  |
|           | Siedlungsbereich | 190,0                                                      | 730,0          | 3 796,0        |                            |  |
|           | Außenbereich     | 89,0                                                       | 124,0          | 358,0          |                            |  |

\* Perzentile (Prozentränge) kennzeichnen Werte, die bei 10, 50 und 90 % der durchgeführten Messungen unterschritten wurden.  
Bei Arsen und Zink handelt es sich wegen des kleineren Datenkollektivs um vorläufige Angaben zu den großräumigen Hintergrundwerten.



Abb. 4.1.3-1: Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) im Stadtgebiet von Kehl; Bild: R. Olschewski

#### Exkurs: Luftreinhaltung

Aufgrund der Maßnahmen zur Luftreinhaltung (z. B. 17. BImSchV) und der einhergehenden Weiterentwicklung der Technik konnten die atmosphärischen Schadstoffeinträge seit den 1980er Jahren z. T. deutlich verringert werden. Die Verpflichtung, bei Neuerrichtung von Müllverbrennungsanlagen Minderungstechniken nach dem aktuellen Stand der Technik einzusetzen, hat 1992 - 1996 zu einer Reduktion um etwa 86 % bei den emittierten Cadmiumverbindungen und um etwa 50 % bei Dioxinen und Furanen (PCDD/F) geführt [LfU 2003a].

#### 4.1.4 Schadstoffeinträge durch den Straßenverkehr

Schadstoffeinträge in Böden durch den Straßenverkehr hängen ab vom:

- durchschnittlichen täglichen Fahrzeugaufkommen (DTV)
- Anteil des Schwerlastverkehrs
- Straßenalter, Fahrbahnbelag
- Bewuchs am Fahrbahnrand
- und von der Geländemorphologie.

Zu den wichtigsten und am stärksten frequentierten Straßenverkehrswegen im Ortenaukreis zählen die Bundesautobahn BAB A5, die Bundesstraße B33 zwischen Offenburg und Haslach sowie die Bundesstraße B28 zwischen Appenweier und Kehl.

Im Boden der Straßenrandbereiche wurden erhöhte Gehalte besonders bei PAK, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink festgestellt. In den Fokus rücken z.B. auch Platin oder Antimon (Exkurs: Verkehrsemissionen im Wandel; Kap. 4.1.4). PAK stammen sowohl aus der Kraftstoffverbrennung als auch aus dem Abrieb von Teer und Asphalt. Im Abrieb von Reifen und Bremsbelägen können Blei, Cadmium, Kupfer und Zink enthalten sein [BOLLER 2004; SCHERER, FUCHS 2004].

Bei trockener Witterung gelangen die Stoffe mit dem Staubbiederschlag, bei Regen mit dem Oberflächen- und Spritzwasser in die Straßenbankette und in die angrenzenden Böden. Der Haupteintragsbereich reicht i.d.R. bis in eine Entfernung von 10 m vom Fahrbahnrand. Die Schadstoffe werden in diesem Bereich hauptsächlich in den obersten Bodenschichten angereichert [LfU 1995b; ROMMEL, SCHNEIDER 1997; UM 1992].

Ergebnisse von Untersuchungen im Ortenaukreis zu Beginn der 1990er Jahre zeigen, dass in Böden entlang von Fahrbahnrandern Vorsorgewerte der BBodSchV überschritten werden (Abb. 4.1.4-1, 4.1.4-2). An der B3 nördlich von Offenburg lag der Bleigehalt in 2,5 m Entfernung vom Fahrbahnrand über dem Vorsorgewert von 70 mg/kg. An der Bundesautobahn A5 in Höhe Niederschopfheim ist dies in 10 m Entfernung der Fall. An der weniger frequentierten L 99 westlich von Schutterwald und an der K 5326 bei

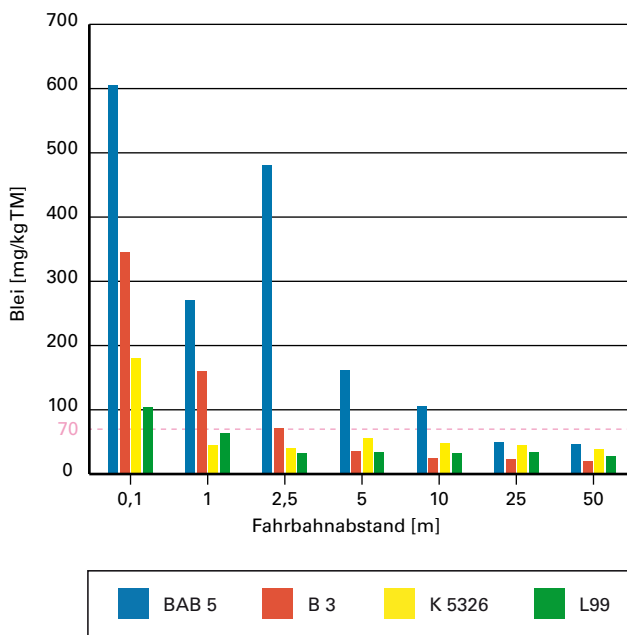


Abb. 4.1.4-1: Bleikonzentrationen in 0 - 5 cm Bodentiefe am Straßenrand in unterschiedlichen Abständen vom Fahrbahnrand; rosa gestrichelt: Vorsorgewert für die Hauptbodenart Lehm/Schluff; Quelle: Umweltministerium Baden-Württemberg 1992



Abb. 4.1.4-2: Untersuchungsstandort an der BAB 5 in Höhe Niederschopfheim (s. Abb. 4.1.4-1); Bild: R. Olschewski

Ortenberg war der Vorsorgewert bereits in einem Abstand von 1 m von der Fahrbahn unterschritten.

Bei PAK sind Überschreitungen der Vorsorgewerte an stark frequentierten Straßen vorwiegend auf den unmittelbaren Fahrbahnrand oder die Straßenbankette beschränkt [ROMMEL, SCHNEIDER, 1997]. Für Bankettschälgut wird ein mittlerer PAK-Gehalt von 33 mg/kg angegeben [LfU 2005a/b].

Am Fahrbahnrand stark frequentierter Straßen können erhöhte Schadstoffgehalte auch in tieferen Bodenschichten vorliegen. Insbesondere bei den Erdarbeiten im Rahmen von Aus- und Umbaumaßnahmen an den Straßen wird schadstoffhaltiger Boden umgelagert oder von anderem Material überdeckt. Außerdem kann der Einsatz der chloridhaltigen Streusalze im Winter die Verlagerung von Schwermetallen am Fahrbahnrand bis in mehrere Dezimeter Bodentiefe intensivieren [BAUSKE, 1994].

Die Schadstoffanreicherung in straßennahen Böden und im Bankettschälgut ist bei Unterhaltungsmaßnahmen sowie Um- und Ausbaurbeiten zu beachten. Schadstoffhaltiges Bodenmaterial aus dem Fahrbahnnahbereich sollte möglichst vor Ort wieder eingebaut werden (Kap. 5.3).

#### Exkurs: Verkehrsemissionen im Wandel

Gesetzliche Vorgaben und technische Maßnahmen führten zu einer stetigen Veränderung des Spektrums verkehrsbedingter Stoffemissionen. Beispielsweise sind die Bleiemissionen aufgrund der Maßnahmen anlässlich des Bundesgesetzes zur Verminderung von Blei-Emissionen aus Kfz-Verbrennungsmotoren (1976) und der Einführung unverbleiter Kraftstoffe (1984) seit den 1980er Jahren um ca. 70 % gesunken. Unverbleiter Ottokraftstoff enthält heute maximal 13 mg Blei/l [UMEG 2004d].

Mit der Einführung der Katalysatortechnik konnte die Emission von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden weiter gemindert werden. Aktuelle Untersuchungen verzeichnen jedoch einen Anstieg der Konzentrationen an Platingruppen-Elementen (PGE) in straßennahen Böden, die aus den Abgaskatalysatoren stammen.

Anstelle von Asbest oder Cadmium wird Antimon in Legierungen von Brems- und Kupplungsbelägen eingesetzt. An der Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche „Forst“ der LUBW an der Bundesautobahn A 5 bei Bruchsal wurden seit 1998 bis in eine Entfernung von 5 m vom Fahrbahnrand kontinuierlich zunehmende Antimonkonzentrationen im Boden registriert [UMEG 2003].



#### 4.1.5 Schadstoffeinträge durch Oberflächenabschwemmungen und Abwassereinleitungen

Vom Straßenverkehr oder mit anderen Emissionen freigesetzte Schadstoffe werden in Siedlungsgebieten auf befestigten Flächen und Dächern deponiert. Sie gelangen mit dem Oberflächenwasser in die Kanalisation.

Je nach örtlichem Kanalisationssystem werden die Niederschlagsabflüsse entweder zusammen mit Schmutzwässern aus Haushalten, Gewerbe und Industrie der Kläranlage oder direkt dem nächsten Fließgewässer oder einer dezentralen Versickerungsanlage zugeführt (Abb. 4.1.5-1, 4.1.5-2).

Bei Hochwasser können Schadstoffe in gewässernahe Flächen oder größere Überschwemmungsgebiete eingetragen werden. Neben den über die Luft eingetragenen Schadstoffen (Kap. 4.1.4) enthalten Dach- und Straßenablaufwässer oft Kupfer und Zink aus metallischen

Bauwerkskonstruktionen oder Straßeneinrichtungen (Abb. 5.4.2-2) [BOLLER 2004; SCHERER, FUCHS 2004].

Die Schadstoffkonzentrationen und -frachten hängen von vielen Faktoren ab [HARITOPOULOU 1996], wie

- Größe, Versiegelungsgrad und Nutzungsstruktur im Einzugsgebiet
- lokales Verkehrsaufkommen
- Art und Alter der verwendeten Baumaterialien (Straßenbau, Dächer)
- Niederschlagsintensität und -menge.

Stichprobenartige Untersuchungen des Landratsamts bestätigen, dass von befestigten Oberflächen Schadstoffe in Entwässerungskanäle eingetragen werden. In den Kanalsedimenten sind hauptsächlich höhere Kupfer- und Zinkgehalte festzustellen. Je nach Einzugsgebiet und Nutzungsstruktur können höhere Blei- und PAK-Gehalte auftreten (Tab. 4.1.5-1).

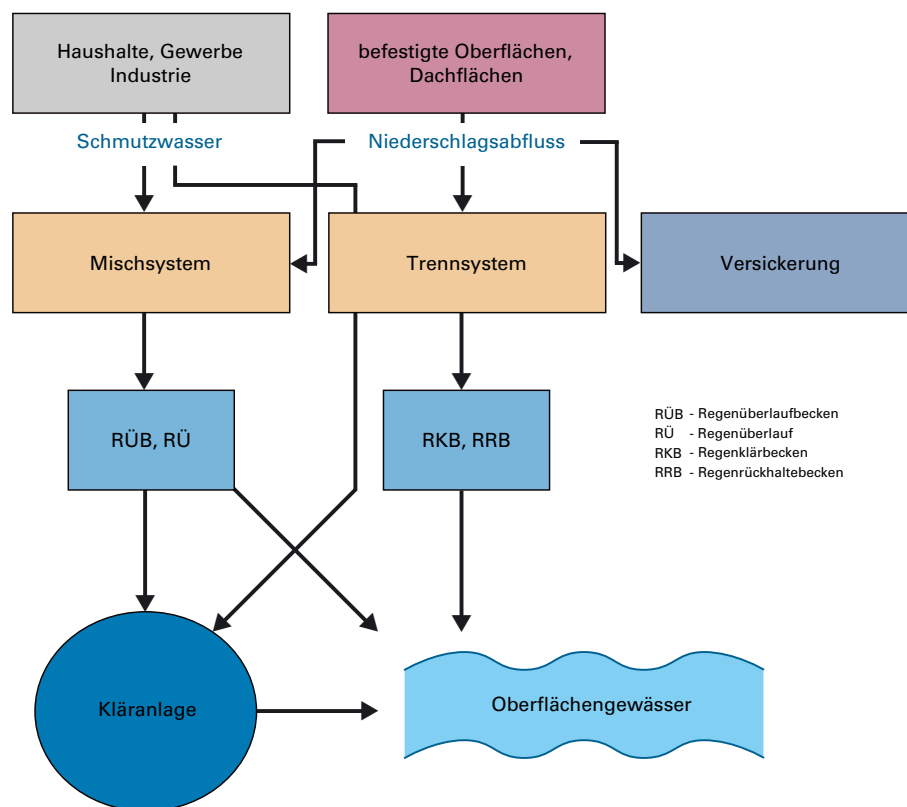


Abb. 4.1.5-1: Schematische Darstellung der kommunalen Entwässerungssysteme

Tab. 4.1.5-1: Schadstoffgehalte in Sedimenten von Oberflächenwasserkänen (Angaben in mg/kg TM); Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

| Ortschaft   | Blei  | Cadmium | Chrom | Kupfer | Nickel | Quecksilber | Zink | PAK  |
|-------------|-------|---------|-------|--------|--------|-------------|------|------|
| Kehl        | 168,0 | 0,54    | 33,7  | 210,0  | 15,1   | 0,07        | 704  | 5,34 |
| Offenburg   | 45,1  | 0,80    | 43,1  | 84,3   | 24,7   | 0,06        | 546  | 1,28 |
| Friesenheim | 67,4  | 0,60    | 41,1  | 93,1   | 31,4   | 0,50        | 364  | 2,92 |

Im Ortenaukreis sind in nahezu allen gewässernahen Böden erhöhte PAK-Gehalte nachgewiesen worden (Kap. A.4.2.11.1). Dadurch werden Unterhaltungsmaßnahmen an eingedeichten Fließgewässern erheblich erschwert (z.B. Kinzig), denn die Verwertung der in den Vorländern akkumulierten Sedimentmengen ist aufgrund der Schadstoffgehalte im üblichen 10 - 15-jährigen Turnus nur mit Schwierigkeiten zu bewältigen.



Abb. 4.1.5-2: Mündung eines Oberflächenwasserkanales in den Mühlbach der Stadt Offenburg; Bild: R. Olschewski

In Sedimenten vieler Fließgewässer liegen erhöhte PAK-, Kupfer- und Zinkgehalte vor. Müssen die Sedimente aus Gründen des Hochwasserschutzes entfernt werden, ist bei überschrittenen Vorsorgewerten die früher übliche Praxis der Ablagerung auf benachbarten Bodenflächen nicht

mehr zulässig. Derartige Maßnahmen in der Vergangenheit haben in einzelnen Fällen zu Bodenbelastungen geführt (Kap. 4.2.4).

Bis Anfang der 1960er Jahre haben direkte Abwassereinsleitungen aus Gewerbebetrieben zu Schadstoffeinträgen in flussabwärts gelegenen Auenböden geführt.

Beispiele im Landkreis sind die erhöhten Kupfer- und Zinkgehalte in den Auenböden des Gutachtals sowie die erhöhten Chromgehalte entlang der Schutter nördlich von Lahr. Die Schwermetalle stammen aus Metall verarbeitenden Betrieben und dem ehemaligen Ledergewerbe.

#### 4.1.6 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Klärschlämme fallen in kommunalen Kläranlagen bei der Reinigung von häuslichen und gewerblichen Schmutzwässern und von Oberflächenwässern an (Abb. 4.1.5-1). Die in den Klärschlämmen angereicherten Schadstoffe gelangen u.a. aus Wasch-, Reinigungs-, Desinfektions-, Arznei- und Pflegemitteln (Kosmetika) und durch unkorrekte Entsorgung anderer Substanzen (z.B. Farben, Holzschutzmittel) oder durch Havarien in das Abwasser.

1994 - 2011 fielen im Ortenaukreis im Schnitt jährlich 9 400 t Trockenmasse (TM) an Klärschlämmen an, die unterschiedlich verwertet bzw. entsorgt wurden (Abb. 4.1.6-1).

Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung erreichte in den Jahren 1997 - 2000 ihr Maximum. In dieser Zeit wurden jährlich ca. 1 350 ha Ackerfläche beaufschlagt, was etwa 4,8 % der bewirtschafteten Ackerfläche entspricht.

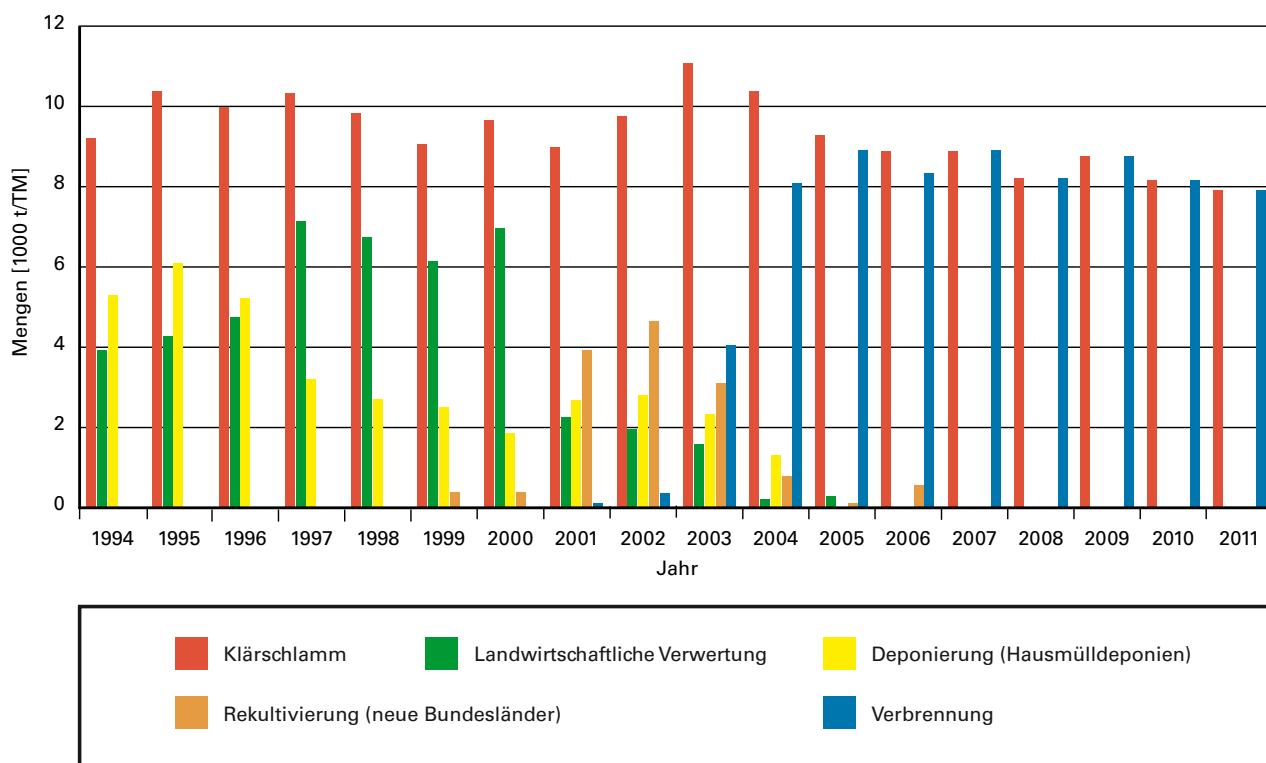


Abb. 4.1.6-1: Entsorgungswege des Ortenauer Klärschlammes 1994 - 2011; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

Die Diskussion um die mögliche Übertragung von BSE-Erregern hat 2001 den Anstoß für den Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung in Baden-Württemberg gegeben. Seit 2003 werden die Ortenauer Klärschlämme thermisch verwertet. Die Gehalte an Blei, Cadmium und Quecksilber sind in den Klärschlämmen seit 1984 deutlich zurückgegangen. Die Kupfer- und Zinkgehalte sind jedoch auf einem vergleichsweise hohen Niveau verblieben.

che Verwertung im Jahr 1992 keinen Trend erkennen. Sie liegen i.d.R. bei weniger als 20 % der für eine landwirtschaftliche Verwertung zulässigen Höchstgehalte.

Über die Gehalte anderer organischer Schadstoffe oder an Rückständen von Arznei- und Desinfektionsmitteln der Ortenauer Klärschlämme liegen keine Informationen vor. Analysen auf diese Inhaltsstoffe sind nicht Gegenstand der Untersuchungspflicht.

Beide Schwermetalle werden bei der Fertigung unterschiedlichster Gebrauchs- und Werkgegenstände verwendet (Kap. A.4.2.1.2). Die Gehalte an PCB sowie an Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Klärschlamm lassen seit der Einführung von Grenzwerten für die landwirtschaftli-

Tab. 4.1.6-1 enthält die geschätzten Schwermetallfrachten, die in den Jahren 1997 und 2001 - 2004 in Ortenauer Ackerböden gelangten. Im Spitzenjahr der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung 1997 waren es bei ca. 7 130 t Klärschlamm (TM) 0,6 t Blei, 3,0 t Kupfer und

Tab. 4.1.6-1: Geschätzte jährliche Schwermetall-Fracht durch landwirtschaftliche Klärschlammverwertung auf Ortenauer Ackerböden 1997 und 2001 - 2004 (Angaben in kg/a); Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

| Jahr | Blei | Cadmium | Chrom | Kupfer | Nickel | Quecksilber | Zink  |
|------|------|---------|-------|--------|--------|-------------|-------|
| 1997 | 585  | 10,0    | 327   | 3 043  | 234    | 6,3         | 6 560 |
| 2001 | 76   | 1,6     | 46    | 600    | 33     | 1,0         | 960   |
| 2002 | 55   | 1,4     | 31    | 610    | 21     | 0,9         | 830   |
| 2003 | 47   | 1,3     | 24    | 488    | 15     | 0,8         | 750   |
| 2004 | 8    | 0,2     | 4     | 110    | 3      | 0,1         | 110   |



6,5 t Zink. Mit dem Rückgang der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung seit 2001 ist die jährliche Schadstofffracht deutlich verringert worden.

In den Ortenauer Kläranlagen werden die im Abwasser enthaltenen Phosphate überwiegend mit Eisensalzen als schwerlösliches Eisenphosphat gefällt. Da die Fällungsmittel im Überschuss zugegeben werden, um eine vollständige Phosphatfällung sicherzustellen, ist von einer geringen Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors in den Fällungsprodukten auszugehen, wenn sie später als Dünger auf Ackerböden ausgebracht werden. Tatsächlich blieb vor allem auf Ackerflächen mit einer niedrigen bis mittleren Phosphatversorgung der erwartete Nutzen der Klärschlamm- aufbringung aus [RÖMER, SAMIE 2001, 2002; RÖMER 2003; SAMIE 2003]. Nach heutiger Kenntnis ist davon auszugehen, dass die frühere Klärschlamm- aufbringung infolge der in den Kläranlagen üblichen Abwasserbehandlung i.d.R. nicht die gewünschte Nährstoffzufuhr erbrachte. Der Verzicht auf das Ausbringen von Nährstoffen in einer wenig pflanzenverfügbaren Form wird durch den Vorteil der verringerten Schadstofffracht aufgewogen.

Im Jahr 2003 hat die Landesanstalt für Umweltschutz eine landesweite Studie über Schadstoffanreicherungen durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung veröffentlicht [LfU 2003a/b]. Im Rahmen dieser Studie ist u.a. eine Ackerfläche bei Kehl untersucht worden, auf der eine signifikante Anreicherung bei Kupfer, Zink, Organozinnverbindungen und Polyzyklischen Moschusverbindungen festgestellt worden ist.

Die Anreicherung von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) ist statistisch eindeutig, obwohl die Gehalte in klärschlammbeaufschlagten Ackerböden noch im Bereich landesweiter Hintergrundgehalte liegen (Kap. 4.2.13).

Aufbauend darauf wurde die zu erwartende Schadstoffanreicherung bei fortwährender landwirtschaftlicher Klärschlammverwertung landesweit hochgerechnet. Die Prognosen kamen zum Ergebnis, dass in den Ackerböden Baden-Württembergs bei andauernder Klärschlammverwertung im Lauf der nächsten 70 Jahre Kupfer und Zink soweit angereichert würden, dass Vorsorgewerte der BBodSchV erreicht oder überschritten wären.

#### 4.1.7 Landwirtschaftliche Kompostverwertung

Die Kompostanlagen im Ortenaukreis erzeugen derzeit überwiegend Substrate für den Garten- und Landschaftsbau sowie für Privatabnehmer. Die landwirtschaftliche Verwertung von Bioabfallkomposten war bisher von untergeordneter Bedeutung und auf wenige Ackerflächen beschränkt. Die verwerteten Komposte wurden unter Verwendung von Papierfaserschlämmen hergestellt.

Künftig könnte der Verwertungsdruck von Kompost in der Landwirtschaft zunehmen. Es bestand z.B. die Absicht, jährlich bis zu 15 000 t TM Papierfaserschlämme mit Grünschnittgut zu Kompost zu verarbeiten und auf landwirtschaftlichen Nutzflächen des Landkreises zu verwerten (Abb. 4.1.7-1).



Abb. 4.1.7-1: Papierfaserschlämme wurden Mitte der 1990er Jahre vereinzelt ohne vorherige Kompostierung auf Ackerflächen verwertet; Bild: R. Olschewski

Papierfaserschlämme sind in Anhang 1 der Bioabfallverordnung nicht unter den für eine Verwertung auf Flächen geeigneten Bioabfällen aufgeführt [BioAbfV 2012]. Für die Verwertung solcher Abfälle ist daher die Zustimmung des Landratsamts notwendig (§ 6 Abs. 2 BioAbfV).

Vor der erstmaligen Verwertung von Bioabfallkomposten sind Bodenuntersuchungen auf Schwermetalle erforderlich. Auf Untersuchungen kann nur verzichtet werden, wenn der Komposterzeuger Mitglied bei einem Träger einer regelmäßigen Güteüberwachung ist und für sein Produkt eine kontinuierliche Gütesicherung nachweist (§ 9 Abs. 2 BioAbfV).

Werden die Schwermetallgehalte nach § 4 Abs. 3 der Bioabfallverordnung eingehalten, ist es zulässig, innerhalb von 3 Jahren bis zu 20 - 30 t Trockenmasse Kompost pro Hektar auszubringen (§ 6 Abs. 1 BioAbfV).

Darüber hinaus sind die Vorgaben der Düngeverordnung einzuhalten, d.h. die mit den Komposten oder Bioabfällen aufgetragenen Nährstoffe müssen auf den Düngebedarf der angebauten Kulturpflanzen angerechnet werden (Kap. A.4.3.1) [DüV 2007].

#### **Schadstoffe**

Schadstoffgehalte von Bioabfallkomposten sind auf die allgemeine Grundbelastung biologischer Abfälle zurückzuführen (z.B. Schnittgut, Grünabfälle). Die Belastung ist höher, wenn vor der Kompostierung schadstoffhaltige Fremdbestandteile nicht ausreichend abgesiebt (z.B. Metallteile) oder Abfälle mit erhöhten Schadstoffgehalten wie Asche, Straßenbegleitgrün oder behandeltes Holz verarbeitet wurden.

Bundesweite Untersuchungen von ca. 5700 Kompostproben in den Jahren 2004 - 2005 ergaben, dass güteüberwachte Komposte im Mittel weniger als 30 % der nach BioAbfV zulässigen Schwermetallgehalte aufweisen. Lediglich bei Kupfer und Zink werden im Mittel 40 - 50 % der zulässigen Konzentrationen erreicht [BGK 2007].

Im Jahr 1995 wurden in Baden-Württemberg Feldversuche eingerichtet, um die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Kompostanwendung zu prüfen. Nach 9- bis 12-jähriger Anwendung güteüberwachter Komposte konnte in den Ackerböden keine statistisch gesicherte Anreicherung von Schwermetallen oder organischen Schadstoffen festgestellt werden. Lediglich bei Kupfer und Zink ergaben sich tendenziell etwas höhere Bodengehalte [LTZ 2008].

#### **Vorteile der Kompostanwendung**

Die Feldversuche haben gezeigt, dass die in Komposten enthaltenen Hauptnährstoffe Phosphor und Kalium aufgrund ihrer nachgewiesenen guten Düngewirkung voll auf den Nährstoffbedarf angebaute Kulturpflanzen angerechnet werden können. Der düngewirksame Stickstoffanteil von Komposten ist dagegen sehr gering. Der jährlich an-

rechenbare Stickstoffanteil beträgt bei kurzfristiger Kompostanwendung im Mittel maximal nur 3 % der mit Komposten zugeführten Stickstoffmenge.

Bei langjährigem regelmäßigem Komposteinsatz sind höhere Stickstoffanteile von jährlich 5 - 12 % zu veranschlagen [LTZ 2008]. Ungünstige C/N-Verhältnisse in Komposten z.B. aus holzreichem Grünschnittgut, können in Böden eine Immobilisierung von Stickstoff bewirken (Exkurs: C/N-Verhältnis; Kap. 4.3.1), die durch entsprechende Zuschläge bei der Stickstoffdüngung ausgeglichen werden müssen [LTZ 2008].

Regelmäßige Gaben güteüberwachter Komposte steigern den Humusgehalt von Ackerböden nachhaltig. Bei den Feldversuchen stiegen bei maximal zulässigen Kompostgaben von jährlich 10 t TM/ha die Gehalte an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) je Versuchsjahr um 0,82 - 1,13 t/ha [LTZ 2008]. Im Ortenaukreis könnte dieser Vorteil gerade auf Ackerböden der Vorbergzone genutzt werden, da höhere Humusgehalte die Erosionsanfälligkeit der Lössböden verringern (Kap. 4.6).

### **4.1.8 Schwermetalleinträge durch Düngemittel**

#### **Mineralische Dünger**

Insbesondere Phosphatdünger und manche Kalkdüngemittel enthalten im Vergleich zu anderen mineralischen Düngern höhere Schwermetallgehalte.

Phosphatdünger werden aus Rohphosphaten hergestellt, deren natürliche Gehalte z.B. an Cadmium von der Herkunft (Phosphatlagerstätte) abhängen (Tab. 4.1.8-1). Rohphosphate werden bei der Herstellung von Mineräldüngern chemisch aufgeschlossen und/oder fein vermahlen. Dadurch werden die in ihrer ursprünglichen Form wenig nutzbaren Rohphosphate in Produkte mit verbesserter Pflanzenverfügbarkeit umgewandelt. Zur Herstellung von wasserlöslichem Super- bzw. Triplesuperphosphat wird Rohphosphat mit Schwefel- bzw. Phosphorsäure aufgeschlossen. Die Bezeichnung Triplesuperphosphat steht für den 3-fach höheren Phosphatgehalt gegenüber dem Rohphosphat. Die Schwermetallgehalte der verwendeten Rohphos-

Tab. 4.1.8-1: Schwermetallgehalte einer Auswahl von Phosphatdüngemitteln (Mittelwerte)

| Phosphat-Dünger                | n  | Schwermetallgehalte [mg/kg TM] |         |         |        |        |       |
|--------------------------------|----|--------------------------------|---------|---------|--------|--------|-------|
|                                |    | Blei                           | Cadmium | Chrom   | Kupfer | Nickel | Zink  |
| Rohphosphat teilaufgeschlossen | 21 | 4,0                            | 64,0    | 152,0   | 31,7   | 36,9   | 448,0 |
| Rohphosphat teilaufgeschlossen | 34 | 1,2                            | 7,2     | 170,0   | 15,6   | 15,6   | 195,0 |
| Superphosphat                  | 28 | < 1,0                          | 6,0     | 181,0   | 22,5   | 14,6   | 138,0 |
| Triplesuperphosphat            | 96 | < 1,0                          | 30,6    | 300,0   | 23,0   | 31,0   | 448,0 |
| Triplesuperphosphat            | 11 | 14,7                           | 62,1    | 229,0   | 15,3   | 20,9   | 354,0 |
| Thomasphosphat                 | 45 | 5,6                            | < 0,1   | 1 759,0 | 33,0   | 6,0    | 6,0   |
| Thomasphosphat                 | 19 | 13,1                           | < 0,1   | 1 269,0 | 13,0   | 13,0   | 6,0   |

n = Anzahl untersuchter Düngerproben; Quellen: Umweltbundesamt (UBA) 1992, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) 2008

phate bestimmen maßgeblich die Gehalte in den daraus hergestellten Düngerphosphaten.

Bis vor wenigen Jahren wurden Calciumsilicophosphate aus der Eisenerzverhüttung zu Phosphatdüngern verarbeitet. Europäische Eisenerze enthalten u.a. Phosphat, das bei der Stahlerzeugung entfernt wird. Im Thomaskonverter entsteht nach Zuschlag von Kalk durch Oxidation bei 1600 °C eine phosphatreiche Schlacke, die fein vermahlen als Thomasphosphat abgegeben wurde [FINK 1992]. Thomasphosphate zeichneten sich produktionsbedingt durch hohe Chromgehalte aus. Im Vergleich zu anderen Phosphatdüngern waren die Cadmiumgehalte gering.

Heute werden bevorzugt phosphatarme Eisenerze aus Lagerstätten der Tropen verarbeitet. Die bei der Ver-

hüttung anfallenden Schlacken werden als „Konverterkalk“ vermarktet (Tab. 4.1.8-2). Er unterscheidet sich vom Thomasphosphat nur durch seinen niedrigeren Phosphorgehalt.

Die Düngemittelverordnung (DüMV) wurde im Dezember 2012 novelliert. Düngemittel müssen Grenzwerte bei sechswertigem Chrom von 2,5 mg/kg TM und bei Cadmium von 1,5 mg/kg TM einhalten. Düngemittel mit einem Phosphatgehalt ab 5 Gew.-% (FM) dürfen nicht mehr Cadmium als 50 mg/kg  $P_2O_5$  enthalten. Eine Kennzeichnungspflicht der Düngemittel besteht ab 1 mg Cd/kg bzw. ab 20 mg Cd/kg  $P_2O_5$  bei einem Phosphatgehalt ab 5 Gew.-% (FM) und ab 300 mg/kg bei Gesamt-Chrom. Auch für weitere Schwermetalle bestehen derartige Regelungen (Tab. 4.1.8-3)

Tab. 4.1.8-2: Schwermetallgehalte einer Auswahl von Kalkdüngemitteln (Mittelwerte)

| Kalkdünger                 | n   | Schwermetallgehalte [mg/kg TM] |         |          |        |        |       |
|----------------------------|-----|--------------------------------|---------|----------|--------|--------|-------|
|                            |     | Blei                           | Cadmium | Chrom    | Kupfer | Nickel | Zink  |
| Kohlensaurer Kalk          | 47  | 7,30                           | 0,50    | 6,90     | 8,20   | 4,60   | 58,00 |
| Kohlensaurer Mg-Kalk       | 133 | 38,00                          | 0,52    | 9,84     | 5,42   | 3,62   | 91,90 |
| Branntkalk                 | 13  | 2,80                           | < 0,10  | 19,20    | 11,10  | 6,00   | 15,80 |
| Hüttenkalk                 | 27  | 13,00                          | < 0,10  | 68,00    | 3,00   | < 0,90 | 7,00  |
| Konverterkalk (Thomaskalk) | 39  | 9,00                           | < 0,10  | 1 924,00 | 18,00  | 3,00   | 17,00 |
| Rückstandskalk             | 5   | 0,01                           | 0,10    | 3,35     | 2,00   | 15,40  | 44,60 |

n = Anzahl untersuchter Düngerproben; Quellen: Umweltbundesamt (UBA) 1992, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) 1995, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) 2008



Zur Herstellung von Kalkdüngern werden Naturkalksteine verwendet. Solche „kohlen-sauren Kalke“ ( $\text{CaCO}_3$ ) werden fein vermahlen und bei ca. 900 °C zu Branntkalk ( $\text{CaO}$ ) verarbeitet. Die Schwermetallgehalte der kohlen-sauren Kalke in Tab. 4.1.8-2 spiegeln die naturbedingte Vorbelastung der Kalksteine wider. Vor allem Blei, Cadmium und Zink können die in der Tabelle angegebenen Mittelwerte deutlich überschreiten (0,01 - 12,1 mg Cadmium/kg, 0,01 - 930 mg Blei/kg und 5,18 - 844 mg Zink/kg TM) [SMUL 2008].

Industriekalke, die in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt werden, sind Naturkalke, die bei unterschiedlichen industriellen Prozessen als Zuschlagsstoff benötigt werden und später als Neben- bzw. Abfallprodukt anfallen.

Hüttenkalk ist feingemahlene Schlacke, die im Hochofen bei der Verhüttung von Eisenerz unter Zuschlag von Koks und Naturkalk entsteht. „Erdige“ Begleitstoffe wie Silizium, die in den Eisenerzen enthalten sind, werden dabei entfernt.

Rückstandskalke sind unterschiedliche kalkhaltige Stoffe, die u. a. bei der Rauchgasentschwefelung oder in Zuckerfabriken bei der „Carbonatisierung“ von Zuckersäften anfallen [FINK 1992].

In der DüMV 2012 sind u. a. Grenzwerte und Kennzeichnungsschwellen (letztere mit maximalen Toleranzen in Prozent [%] des gekennzeichneten Werts) für Schadstoffe angegeben (Tab. 4.1.8-3).

#### Wirtschaftseigene Dünger (Stallmist, Gülle)

Schwermetalle aus dem Wirtschaftskreislauf viehhaltender Betriebe gelangen mit Stallmist oder Gülle auf Acker und Grünland (Tab. 4.1.8-4) [UBA 2004]. Zink und Kupfer sind als essenzielle Spurenelemente bei der Tierernährung von Bedeutung.

Um eine ausreichende Spurenelement-Versorgung der Tiere zu gewährleisten, werden kupfer- und zinkhaltige Mineralfutter bzw. mineralisierte Ergänzungsfuttermittel verabreicht. Die Futtermittel weisen dabei oft Kupfer- und Zinkgehalte über den Versorgungsempfehlungen auf.

Tab. 4.1.8-3: Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für Schadstoffe (DüMV 2012)

| Nebenbestandteil                                                                            | Kennzeichnung ab<br>... mg/kg TM<br><small>oder andere angegebene Einheit</small> | Grenzwert<br>mg/kg TM<br><small>oder andere angegebene Einheit</small> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Arsen                                                                                       | 20                                                                                | 40                                                                     |
| Blei                                                                                        | 100                                                                               | 150                                                                    |
| Cadmium                                                                                     | 1,0                                                                               | 1,5                                                                    |
| Cadmium<br><small>für Düngemittel ab<br/>5 % <math>\text{P}_2\text{O}_5</math> (FM)</small> | 20 mg/kg $\text{P}_2\text{O}_5$                                                   | 50 mg/kg $\text{P}_2\text{O}_5$                                        |
| Chrom <sub>ges</sub>                                                                        | 300                                                                               | -                                                                      |
| Chrom <sup>VI</sup>                                                                         | 1,2                                                                               | 2                                                                      |
| Nickel                                                                                      | 40                                                                                | 80                                                                     |
| Quecksilber                                                                                 | 0,5                                                                               | 1,0                                                                    |
| Thallium                                                                                    | 0,5                                                                               | 1,0                                                                    |

Zu den vielfältigen Gründen der hohen Kupfer- und Zinkgehalte in Mineral- und Ergänzungsfuttermitteln zählen Sicherheitszuschläge wegen variierender Gehalte in den hofeigenen Futtermitteln sowie die schwierige Einschätzung der Verfügbarkeit der Spurenelemente. Außerdem soll die Kupfer- und Zinkversorgung der Nutztiere bei unterschiedlicher Leistung sowie bei Krankheit oder Stress sichergestellt werden. Hohe Kupfer- und Zinkgaben wirken im Verdauungstrakt von Schweinen und Geflügel fungizid und bakterizid, was letztlich zur besseren Futterausnutzung und höheren Gewichtszunahme führt [SCHENKEL 2002; ROTH ET AL. 2002].



Abb. 4.1.8-1: Verzinkte Inneneinrichtung eines Abferkelstalls; Bild: J. Neumaier

Tab. 4.1.8-4: Schwermetallgehalte einer Auswahl an wirtschaftseigenen Düngern (gew. Mittelwerte mehrerer Quellen)

| Wirtschaftsdünger | n   | Schwermetallgehalte in mg/kg TM |         |       |          |        |          |
|-------------------|-----|---------------------------------|---------|-------|----------|--------|----------|
|                   |     | Blei                            | Cadmium | Chrom | Kupfer   | Nickel | Zink     |
| Rindergülle       | 222 | 5,48                            | 0,34    | 7,22  | 46,43    | 6,29   | 225,92   |
| Hühnermist        | 21  | 6,11                            | 0,22    | 10,23 | 55,36    | 7,76   | 457,40   |
| Putenmist         | 28  | 2,10                            | 0,25    | 8,58  | 146,50   | 7,61   | 339,90   |
| Schweinegülle     | 99  | 4,35                            | 0,39    | 7,80  | 453,85   | 12,79  | 1 318,21 |
| Ferkelgülle       | 7   | 3,40                            | 0,40    | 7,10  | 1 170,00 | 16,00  | 1 880,00 |

n = Anzahl untersuchter Düngerproben; Quellen: Umweltbundesamt (UBA) 1992, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg) 2001, LUFA Oldenburg 2001, IEP Bonn 2001, UHLEIN 2001, MÜLLER et al. 1993

Beide Schwermetalle sind darüber hinaus in Tierarznei- und Desinfektionsmitteln enthalten (Durchfallbehandlung, -prophylaxe, Klauenpflege) [HAPKE 2002; KTBL 2005; PECHER, MELOSCH 2002].

Die Zinkgehalte der Wirtschaftsdünger stammen z.T. aus verzinkten Stalleinrichtungen, die durch Kot, Harn, Futterreste, Reinigungs- und Desinfektionsmittel verstärkt korrodiert werden (Abb. 4.1.8-1).

Gülle aus der Schweinemast und Ferkelaufzucht weist hohe Kupfer- und Zinkgehalte auf (Tab. 4.1.8-4).

#### 4.1.9 Kupfereinträge durch Fungizideinsatz

Kupferhaltige Fungizide wurden und werden verbreitet im Wein- und Obstbau eingesetzt. Die fungizide Wirkung der früher verwendeten „Bordeauxbrühe“, einem Gemisch aus Kupfervitriol und gelöschtem Kalk ( $[\text{Ca}(\text{OH})_2]_3 \cdot \text{CuSO}_4$ ) zur Bekämpfung des Falschen Mehltaus, wurde bereits in den Jahren nach 1880 erkannt [HEITEFUSS 1987] (Abb. 4.1.9-1). Heute sind im Weinbau die Wirkstoffe Kupferoktanoat, Kupferhydroxid und -oxychlorid zugelassen.

Je nach eingesetztem Präparat werden im konventionellen Weinbau zwischen 0,29 - 1,8 kg Kupfer pro Hektar und Jahr ausgebracht.

In der Vergangenheit lagen die aufgewendeten Kupfermengen im Bereich von 1,0 - 3,6 kg/ha/a und wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch verbesserte Ausbringungstechniken und geringere Anwendungskonzentration deutlich reduziert. Im konventionellen Weinbau wird Kupfer hauptsächlich aus Belangen der Kellerwirtschaft einmalig zur Abschlussbehandlung verwendet, um den Ausbau von reintonigen Weinen zu fördern und die Bockserbildung zu verringern.



Abb. 4.1.9-1: Falscher Mehltau der Rebe (*Plasmopara viticola*, *Rebenperonospora*); Bild: M. Müller

Im ökologischen Weinbau ist der Kupfereintrag auf jährlich 3 kg/ha im fünfjährigen Betriebsdurchschnitt beschränkt. Der Kupfereintrag ist hier oft höher als im konventionellen Weinbau, da keine organisch-synthetischen Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden dürfen und nur kupferhaltige Fungizide zugelassen sind.

Durch den langjährigen Einsatz kupferhaltiger Fungizide sind Kupferanreicherungen in den Böden zahlreicher Weinbaugebiete in Europa bekannt. Im Ortenaukreis hat das Landratsamt im Jahr 1998 eigene Untersuchungen zu der Thematik durchgeführt. Sowohl im Oberboden als auch im Hauptwurzelsraum der Reben wurden zum Teil deutliche Kupferanreicherungen festgestellt (Kap. A.4.1.9).

Im Obstbau werden Kupferpräparate nur im Bedarfsfall zur Bekämpfung zahlreicher Pilzkrankheiten verwendet, wie z.B.:

- Kernobst: Obstbaumkrebs, (Apfel-)Schorf, Feuerbrand, Kragenfäule
- Steinobst: Schrotschusskrankheit, Valsakrankheit, Kräuselkrankheit bei Pfirsich
- Himbeerrutenkrankheit, Brombeerrankenkrankheit
- Rot- und Weißfleckenkrankheit bei Erdbeeren.

#### **4.1.10 Abschätzung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzten Böden**

Schwermetalle werden mit Klärschlämmen, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln in landwirtschaftliche Böden eingetragen (Kap. 4.1.6 - 4.1.9). Um die Größenordnung der Schwermetalleinträge abzuschätzen, wurden die Einträge für das Jahr 2001 überschlägig berechnet. Damals sind noch 2 265 t TM an kreiseigenem Klärschlamm landwirtschaftlich verwertet worden (Tab. 4.1.10-1). Dazu ist für die einzelnen Gemeindegebiete eine Wirtschaftsdüngerbilanz im Rahmen des MEKA (Feld-Stallbilanz) erstellt worden.

Grundlage sind statistische Daten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung aus dem Jahr 2001 wie Kulturarten, Erntemengen, Viehbesatz und Flächenstilllegungen. Auf den Nährstoffbedarf angebauter Nutzpflanzen

(Acker- und Grünland) werden zunächst die Nährstoffe aus anfallenden Wirtschaftsdüngern (Gülle) angerechnet. Der darüber hinaus verbleibende Nährstoffbedarf muss für eine ausgeglichene Nährstoffbilanz in der Regel über Mineraldünger zugeführt werden. Die Vorgehensweise bei der Abschätzung des Nährstoffbedarfs entspricht den Vorgaben der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft [DÜV 2007].

Aufbauend auf den gemeindespezifisch errechneten Nährstoffbedarf wurden die Mengen an Mineraldünger kalkuliert, die zur Deckung des Nährstoffbedarfs erforderlich sind. Dabei sind nur Mineraldüngertypen berücksichtigt worden, die nach Auskunft von örtlichen Landhändlern und Genossenschaften im Ortenaukreis überwiegend eingesetzt werden (bei Stickstoffdüngern z.B. Kalkammonsalpeter).

Die Schwermetalleinträge aus Mineral- und Wirtschaftsdünger wurden anhand von Literaturangaben über Schwermetallgehalte entsprechender Düngerarten errechnet (Kap. 4.1.8). Die Prämissen bei der Erstellung der Berechnungsgrundlage werden in Kap. A.4.1.10 erläutert.

Tab. 4.1.10-1 zeigt die Ergebnisse der Bilanzierung der Schwermetalleinträge für das Jahr 2001. Unterschieden werden Einträge über Klärschlamm, Gülle, Mineraldünger und kupferhaltige Fungizide. Betrachtet man die Eintragsmengen, überwiegen die Einträge an Zink mit annähernd 10 t, gefolgt von Kupfer mit bis zu 7 t vor den anderen Schwermetallen.

An den Zink- und Kupfereinträgen hat die Ausbringung von Schweine- und Rindergülle einen großen Anteil. Im Kreisgebiet fällt Gülle jährlich in einer Größenordnung von etwa 21 000 t Trockenmasse an. Die damit verbundenen Zink- und Kupfereinträge sind auf Mineral- und Ergänzungsfuttermittel zurückzuführen (Kap. 4.1.8). Im Landkreis fällt insgesamt mehr Rindergülle als Schweinegülle an.

Je nach verwendeter Spritztechnik und Aufwandmenge (Kap. 4.1.9) ergibt sich beim Kupfereintrag in Weinbergböden durch die Abschlussbehandlung mit kupferhal-



Tab. 4.1.10-1: *Überschlägige Bilanz der Schwermetalleinträge durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung und Klärschlammverwertung im Jahr 2001 (Angaben in kg/a); Quelle: Landratsamt Ortenaukreis*

| Schwermetalle                  | Schwermetallgehalte [mg/kg TM] |         |       |               |        |       |
|--------------------------------|--------------------------------|---------|-------|---------------|--------|-------|
|                                | Blei                           | Cadmium | Chrom | Kupfer        | Nickel | Zink  |
| <b>Klärschlamm</b>             | 76                             | 1,6     | 46    | 600           | 33     | 960   |
| <b>Gülle</b>                   |                                |         |       |               |        |       |
| Schweinegülle                  | 10                             | 0,9     | 21    | 1 136         | 32     | 3 212 |
| Rindergülle                    | 102                            | 6,4     | 135   | 867           | 117    | 4 218 |
| <b>Mineraldünger</b>           |                                |         |       |               |        |       |
| Ackerflächen                   | 69                             | 25,4    | 394   | 63            | 94     | 693   |
| Grünlandflächen                | 54                             | 48,0    | 582   | 149           | 142    | 802   |
| Kernobstflächen                | 6                              | 2,2     | 31    | 8             | 8      | 52    |
| Rebflächen                     | 2                              | 1,0     | 11    | 3             | 3      | 18    |
| <b>Kupferhaltige Fungizide</b> |                                |         |       |               |        |       |
| Rebflächen                     |                                |         |       | 670 - 4 155   |        |       |
| <b>Einträge</b>                |                                |         |       |               |        |       |
| Landwirtschaft                 | 243                            | 83,9    | 1 174 | 2 896 - 6 381 | 396    | 8 995 |
| Landwirtschaft + Klärschlamm   | 319                            | 85,5    | 1 220 | 3 496 - 6 981 | 429    | 9 955 |

\* für Quecksilber sind die Daten zu Gehalten in Düngemitteln nicht ausreichend

tigen Fungiziden eine breite Spanne. Im Jahr 2001 sind etwa 670 - 4 155 kg Kupfer in die Ortenauer Weinbergböden gelangt.

Im Jahr 2001 sind mit Mineraldüngern ca. 1,2 t Chrom, 0,4 t Nickel und 84 kg Cadmium in landwirtschaftlich genutzte Böden eingetragen worden. Sie stammen überwiegend aus phosphathaltigen Mineraldüngemitteln (Kap. 4.1.8). Die für Grünlandflächen geschätzten Zahlen sind eventuell niedriger, da besonders auf Grünlandflächen im Schwarzwald weniger Mineraldünger eingesetzt wird.

Mit dem im Jahr 2001 landwirtschaftlich verwerteten Klärschlamm (2 265 t TM) war ein Eintrag von etwa 76 kg Blei, 600 kg Kupfer und 960 kg Zink verbunden.

Im Jahr 1997 ist mit der noch intensiveren Klärschlammverwertung die 5-fache Menge an Kupfer, fast die 7-fache Menge an Zink und fast die 8-fache Menge an Blei in die Ortenauer Ackerböden eingetragen worden (Tab. 4.1.10-2).

Vergleicht man die Schwermetalleinträge aus landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen im Jahr 2001 mit denen der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung im Jahr 1997, wird deutlich, dass mit dem Verzicht auf die Klärschlammverwertung der Schwermetalleintrag erheblich verringert worden ist. Deutlich wird die Abnahme bei Zink, Kupfer, Blei, Nickel und Chrom. Bei Cadmium war der Eintrag durch Phosphatdüngemittel bereits im Jahr 1997 höher als der Eintrag durch landwirtschaftliche Klärschlammverwertung.

Tab. 4.1.10-2: *Überschlägige Schwermetallfracht auf Ackerflächen 1997 und 2001 (Angaben in kg/a); Quelle: Landratsamt Ortenaukreis*

| Jahr | Blei | Cadmium | Chrom | Kupfer | Nickel | Zink  |
|------|------|---------|-------|--------|--------|-------|
| 1997 | 585  | 10,0    | 327   | 3 043  | 234    | 6 560 |
| 2001 | 76   | 1,6     | 46    | 600    | 33     | 960   |

## 4.2 Anorganische und organische Schadstoffe

### 4.2.1 Bewertungsmaßstäbe der BBodSchV

Grundlage für die Beurteilung von Schadstoffgehalten in Böden ist die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung [BBodSchV 1999]. Die Verordnung enthält Prüf-, Maßnahmen- und Vorsorgewerte für Böden. Ergänzend können Hintergrundwerte für Böden zur Beurteilung herangezogen werden [LABO 2003].

Vorsorgewerte grenzen den Bereich unbedenklicher Schadstoffgehalte im Boden nach oben ab. Unterschreitet ein Schadstoffgehalt den Vorsorgewert, ist in der Regel davon auszugehen, dass Schutzgüter (Menschen, Pflanzen, Wasser) nicht gefährdet sind. Wird ein Vorsorgewert überschritten, ist zu besorgen, dass Schutzgüter beeinträchtigt werden können (Abb. 4.2.1-1) [UBA 2012a].

Für die Bodenartenhauptgruppen Sand, Lehm/Schluff und Ton wurden bei den Schwermetallen gestufte Vorsorgewerte festgelegt. Bei Blei, Cadmium, Nickel und Zink unterscheiden sie sich auch abhängig vom Boden-pH-Wert. Bei den organischen Schadstoffen PAK und PCB gelten nach dem Humusgehalt ( $\leq$  bzw.  $> 8$  Gew.-%) gestufte Vorsorgewerte.

Die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV wurden nutzungs- und schutzgutbezogen für unterschiedliche Wirkungspfade festgelegt. Prüfwerte sind Schwellenwerte, bei deren Überschreitung weitere Sachverhalts-

ermittlungen durchzuführen sind. Maßnahmenwerte kennzeichnen die Gefahrenschwelle, bei deren Überschreitung eine Gefahr für Schutzgüter ausgeht und Sanierungs- und/oder Schutz- bzw. Beschränkungsmaßnahmen erforderlich werden (Abb. 4.2.1-1).

Prüf- und Maßnahmenwerte kennzeichnen eine unterschiedliche Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts.

Bei der Beurteilung von Schadstoffgehalten in Böden lassen sich drei Risikobereiche unterscheiden (Abb. 4.2.1-1):

- Bereich des unvermeidbaren, nie völlig auszuschließenden Restrisikos (grün). Beispiel: in einem Einzelfall wurde im Brotweizen Cadmium trotz unterschrittenem Vorsorgewert im Boden nachgewiesen (Kap. 4.2.4)
- Bereich des unerwünschten Risikos (orange) über den Vorsorgewerten mit einer Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung bzw. des Eintritts eines Schadens
- Gefahrenbegründetes, nicht hinnehmbares Risiko (rot) bei Erreichen oder Überschreiten festgelegter Prüf- oder Maßnahmenwerte.

Die BBodSchV wird derzeit überarbeitet und künftig in eine Mantelverordnung Grundwasser/Ersatzbaustoffe/Bodenschutz integriert werden. In diesem Zusammenhang werden die Referenzwerte der BBodSchV überarbeitet bzw. neu gefasst.

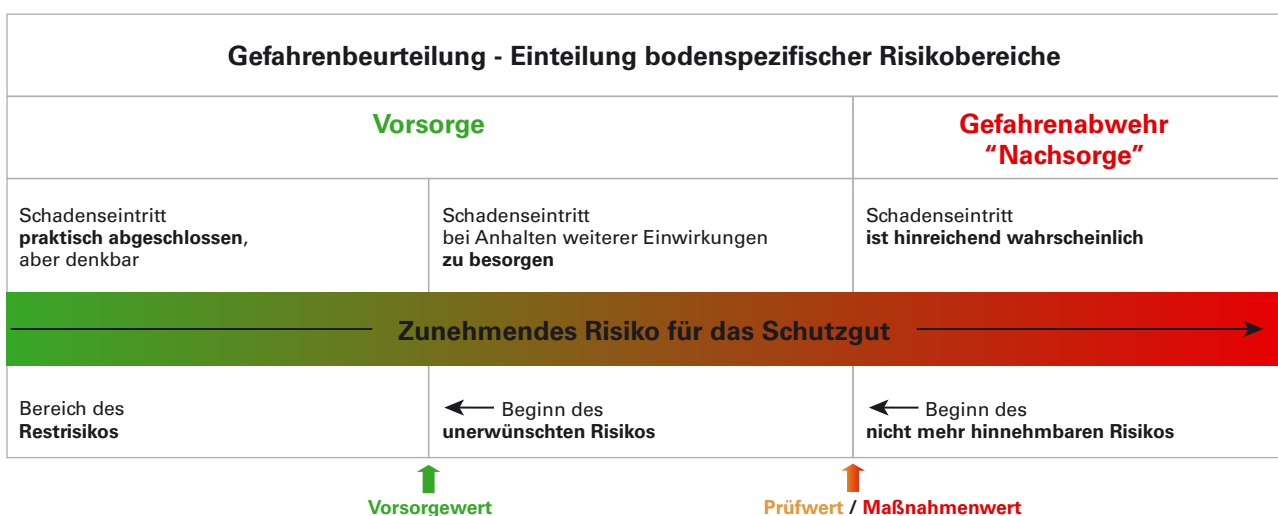


Abb. 4.2.1-1: Einteilung bodenspezifischer Risikobereiche; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Zur Bedeutung der Prüf- und Maßnahmenwerte für Böden gibt es umfangreiche Erläuterungen, so z.B. UBA 2012b.

„Prüfwerte“ sind Werte, bei deren Überschreitung in Abhängigkeit von der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen ist. Bei dieser Prüfung wird festgestellt, ob eine schädliche Bodenveränderung oder eine Altlast vorliegt. Die Werte ergeben sich aus dem betroffenen Wirkungspfad, der nach BBodSchV als der Verlagerungsweg eines Schadstoffes von der Quelle bis zu der möglichen Wirkung auf ein Schutzgut ist.

Folgende Wirkungspfade werden unterschieden:

- Boden - Mensch
- Boden - Nutzpflanze
- Boden - Grundwasser
- Boden - Bodenorganismen.

Der Wirkungspfad Boden - Mensch ist gegeben bei einem direkten Kontakt von Menschen mit Boden durch orale oder inhalative Aufnahme von Bodenmaterial. Dies betrifft in erster Linie im Freien spielende Kinder oder den Kontakt mit Boden bei der Gartenarbeit. Je nach Nutzungstyp (Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park-/Freizeitanlagen, Industrie-/Gewerbegrundstücke) werden unterschiedliche Prüfwerte berücksichtigt.

Indirekte Wirkungen sind über den Pfad Boden - Pflanze möglich, wenn sich Bodenschadstoffe in Nahrungs- und Futterpflanzen anreichern und von Menschen oder Tieren aufgenommen werden. Die landwirtschaftliche Nutzung ehemaliger Rieselfelder oder die gartenbauliche Nutzung ehemaliger Gewerbestandorte können potenzielle Gefahrenquellen sein.

Der Pfad Boden - Grundwasser betrifft die Mobilisierung im Boden gebundener Stoffe, die mit dem Sickerwasser in das Grundwasser gelangen. Das Ausmaß dieser Belastung ist von der Menge des Schadstoffs, von seiner Wasserlöslichkeit und von der Bindungsstärke im Boden abhängig. Wird das betroffene Grundwasser als Trinkwasser genutzt, besteht ein wesentlicher Sanierungsgrund.

Bestehen Anhaltspunkte, allgemeine oder konkrete Hinweise auf das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung

oder Altlast, wird die Fläche nach der Erfassung zunächst einer orientierenden Untersuchung unterzogen. Werden dabei die Prüfwerte unterschritten, ist der Verdacht des Vorliegens einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast insoweit ausgeräumt und es sind keine weiteren Untersuchungen im Hinblick auf die Wirkungspfade erforderlich. Die untersuchten Flächen werden weiter im Fachinformationssystem Bodenschutz der zuständigen Behörde geführt.

Werden dagegen die Prüfwerte im Rahmen der orientierenden Untersuchung überschritten, wird eine Detailuntersuchung durchgeführt. Sie erfolgt für alle betroffenen Wirkungspfade zur detaillierten Gefährdungsabschätzung.

Die Bewertung der Ergebnisse der Detailuntersuchung erfolgt anhand der Maßnahmenwerte und anhand von Empfehlungen der Landesumweltämter. Im Wirkungspfad Boden - Mensch enthält die BBodSchV Maßnahmenwerte für den Direktpfad lediglich für die Stoffgruppe der Dioxine und Furane. Bei den anorganischen Schadstoffen soll sich die Bewertung nach den für Menschen resorptionsverfügbaren Anteilen richten. Bestimmungsmethoden dafür wurden entwickelt (DIN 19738).

Wenn ein Maßnahmenwert überschritten wird, entscheidet die vor Ort zuständige Umweltbehörde über Art und Ausmaß von Sanierungsmaßnahmen.

Der Hintergrundgehalt eines Bodens setzt sich zusammen aus dem geogenen Grundgehalt (Kap. 4.1.1) sowie aus dem ggfs. anthropogen ubiquitär verbreiteten Schadstoffanteil. Hintergrundwerte sind repräsentative Werte für allgemein verbreitete Hintergrundgehalte. Schadstoffgehalte im Bereich der Hintergrundgehalte sind in den meisten Fällen unbedenklich [LABO 2003].

Im Anhang finden sich Erläuterungen zur Bindung und Mobilisierung anorganischer und organischer Schadstoffe in Böden, zu den Untersuchungen (einschließlich Untersuchungsmethoden), die im Ortenaukreis durchgeführt worden sind, um die Sorptionsverhältnisse von Schadstoffen im Boden detailliert und sachgerecht beurteilen zu können (Kap. A.4.2.1.1) sowie zu den natürlichen Vorkommen und den wirtschaftlichen Hauptverwendungen von Schwermetall- und Arsen-Verbindungen (Kap. A.4.2.1.2).



## 4.2.2 Arsen

### 4.2.2.1 Gehalte der Böden

In Oberböden wurden Arsengehalte von 0,39 bis 2780 mg/kg gemessen. Einen Überblick über die Verteilung der festgestellten Arsengehalte gibt Tab. 4.2.2.1-1 und Kap. A.4.2.2.1. Die Belastungsschwerpunkte liegen in nahezu allen Bergbaugebieten und an den ehemaligen Verhüttungsstandorten (Kap. 4.1.2).

Geogen erhöhte Arsengehalte finden sich in den Böden, wo im Untergrund Erzgänge (z.B. südöstlich von Haslach) oder arsenführende Gesteine anstehen (z.B. Rhyolith, Kap. 4.1.1).

Andere Bereiche mit erhöhten Gehalten liegen westlich von Lahr und Schutterwald. In den dort auftretenden sauerstofffreien Grundwässern ist Arsen in deutlichen Konzentrationen enthalten, das zusammen mit Eisen bei Luftkontakt in den Böden ausgefällt und in den Eisenoxiden der Go-Horizonte angereichert wird (Kap. 4.1.1).

Außerhalb dieser Belastungsschwerpunkte liegen die Arsengehalte im Ortenaukreis im Bereich der landesweiten Hintergrundwerte.

### 4.2.2.2 Wirkung erhöhter Arsengehalte auf Schutzgüter

Arsengehalte über den Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV (Tab. 4.2.2.2-1) liegen vor allem in den Oberböden ehemaliger Bergbaureviere und im Bereich mit pedogenen Arsenanreicherungen der Ortenauer

Rheinebene vor. Das Landratsamt hat an diesen Standorten weitere Untersuchungen zur Klärung möglicher Beeinträchtigungen von Schutzgütern durchgeführt.

#### Menschen

In den Böden der Siedlungsbereiche von Biberach, Lahr, Haslach und Hausach liegen u.a. bergbau- und verhüttungsbedingt erhöhte Arsengehalte über den Prüfwerten der BBodSchV für Kinderspielflächen und Wohngebiete vor (Tab. 4.2.2.2-1). In solchen Bereichen wurde die potenzielle Resorptionsverfügbarkeit mit der dafür entwickelten Labormethode DIN 19738 (Kap. A.4.2.1.3) untersucht.

Danach liegt die Resorptionsverfügbarkeit von Arsen im menschlichen Verdauungstrakt in einer großen Spanne von 1 - 25 % vom Gesamtgehalt im Boden [LANDRATSAMT ORTENAUKEIS 2004]. Die Prüfwerte der BBodSchV hängen geben Arsengesamtgehalte wieder. Sie sind unter der Annahme abgeleitet worden, dass aus Böden aufgenommenes Arsen im menschlichen Verdauungstrakt vollständig resorbiert wird und stellen somit den worst-case dar.

Darüber hinaus ergeben sich die tatsächlichen Expositionsbedingungen durch die konkreten Standortverhältnisse im Bereich der Probennahmeflächen (geschlossene Grasbedeckung des Bodens, keine Bereiche mit freiliegendem, d.h. nicht von Aufwuchs bedecktem Boden). Bei den Ortsbegehungen der entsprechenden Standorte hat sich ergeben, dass eine gesundheitliche Beeinträchtigung spielender Kinder durch Arsen nicht zu besorgen ist.

Tab. 4.2.2.1-1: Statistische Kennwerte für Arsen in Oberböden, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min | Max   | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|-----|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 109         | 5,3       | 14,4                  | 58,0      | 2,0 | 256   | 12                               | 24                               |
| Grünland             | 385         | 8,1       | 20,0                  | 219,8     | 1,4 | 2 780 | 12                               | 17                               |
| Wald                 | 181         | 6,0       | 16,0                  | 125,0     | 0,4 | 1 314 | 9                                | 12                               |
| Siedlungsbereich     | 158         | 6,2       | 13,0                  | 47,8      | 1,5 | 2 159 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.2.2-1: Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen der BBodSchV (1999)

|               | Wirkungspfad                         | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert   |
|---------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|--------|
| Prüfwerte     | Boden-Mensch                         | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 25     |
|               |                                      |           |                        | Wohngebiete                       | 50     |
|               |                                      |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 125    |
|               |                                      |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 140    |
|               | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Ackerbau, Nutzgarten              | 200*** |
|               | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenwachstum) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerbau                          | 0,4    |
|               | Boden-Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 10     |
| Maßnahmenwert | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland                          | 50     |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion

\*\* AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

\*\*\* 200 = bei Böden mit zeitweise reduzierenden Bedingungen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg Trockenmasse

### Pflanzen

In den ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten sowie in der Rheinebene sind von erhöht arsenhaltigen Flächen zahlreiche Pflanzenproben entnommen und auf Arsen untersucht worden, wenn im Boden der Prüf- oder der Maßnahmenwert der BBodSchV überschritten war. Ein neu veröffentlichter Leitfaden gibt Hinweise zum Anbau von Nutzpflanzen auf naturbedingt arsenbelasteten Böden [LABO 2012].

Analysen von Gemüseproben aus privaten Nutzgärten ergaben mit < 0,1 mg Arsen/kg Frischmasse (FM) keine erhöhten Arsengehalte. In untersuchten Mais-, Weizen- und Rapskörnern waren die Arsengehalte sehr gering und lagen selten über der analytischen Bestimmungsgrenze.

Auf Grünlandstandorten mit früherem Erzbergbau- und/oder ehemaliger Verhüttung wurden über mehrere Vegetationsperioden die Arsengehalte der Pflanzen untersucht. Höchstgehalte der EU-Richtlinie 2002/32 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung wurden dabei nur auf Flächen mit hoch anstehendem Grundwasserspiegel (Bodentyp: Auengley, Nassgley) und während oder kurz nach Beweidung überschritten. Es ist anzunehmen, dass die Pflanzen auf den wenig trittfesten Böden hauptsächlich durch Verschmutzung mit schadstoffhaltigen Bodenpartikeln und nicht durch systemische Aufnahme des Arsens über die Pflanzenwurzel kontaminiert worden sind.

In betroffenen Grünlandbereichen sollten deshalb verschmutzungsarme Techniken bei der Futterernte angewendet und Überweidung vermieden werden (Abb. 4.2.3.2-1). Ein Teil der Grünlandfläche ist zwischenzeitlich aus der landwirtschaftlichen Nutzung herausgenommen worden (aktuelle Nutzung als Golfplatz).

Um den möglichen Arsentransfer vom Boden und aus der Grünlandvegetation ehemaliger Bergbauggebiete in Lebensmittel genauer zu prüfen, wurde an zwei Standorten Milch und Blut bzw. Fleisch und Innereien dort weidender Kühe bzw. Ziegen untersucht. In beiden vom Landratsamt Ortenaukreis durchgeführten Probenentnahmen von gezielt ausgewählten Tieren hat das Chemische und Veterinäruntersuchungsamt (CVUA) Freiburg weder in der Milch noch im Blut Spuren von Arsen nachgewiesen. In Proben von Leber, Nieren und Fleisch der Ziegen liegen die Arsengehalte unter 0,14 mg/kg Frischgewicht. Arsenkonzentrationen < 0,40 mg/kg Frischgewicht sind in Lebern und Nieren von Wiederkäuern normal [BfR 2004].

Auf Auenböden der Rheinebene mit erhöhten Arsengehalten wurden bisher nur wenige Grünlandpflanzen untersucht. Überschreitungen der Höchstgehalte der EU-Richtlinie 2002/32 bei Arsen waren nicht festzustellen.

Pflanzenuntersuchungen auf den betroffenen Grünlandflächen sollen künftig noch verdichtet werden, da

neuere Literatur darauf hinweist, dass der Arsengehalt in Grünlandaufwuchs u.a. von der Artenzusammensetzung der Vegetation bestimmt wird. Kräuter nehmen mehr Arsen über die Wurzeln aus dem Boden auf als Gräser [SMUL 2006].

Außerdem haben Untersuchungen an Bodenmaterial aus der Ortenauer Rheinebene bestätigt, dass Arsen in den grundwasserbeeinflussten Böden aus Eisenoxiden leicht herausgelöst wird, wenn ein sauerstoffarmes Milieu vorliegt (Kap. 4.1.1) [LABO 2008]. Es ist nicht auszuschließen, dass Grünlandpflanzen unter diesen Voraussetzungen zu viel Arsen aufnehmen können, z.B. bei langfristig hoch anstehendem Grundwasser oder langen regenreichen Witterungsperioden.

#### Grundwasser

Arsenkonzentrationen im Wasser über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung [TrinkwV 2011] von (0,01 mg/l) sind hauptsächlich aus den Bereichen der Rheinebene bekannt, in denen im Grundwasserleiter sauerstoffarme bis -freie Milieubedingungen herrschen (Abb. 4.3.4-3 u. Kap. 4.1.1).

Arsenhaltige Grundwässer werden z.B. im Wasserschutzgebiet „Neuried-Dundenheimer Wald“ vor der Abgabe als Trinkwasser an die Verbraucher aufbereitet. Dazu werden dem geförderten und belüfteten Grundwasser Eisensalze zugesetzt. Das Eisen fällt als Eisenoxid aus und adsorbiert das im Wasser gelöste Arsen [OBERACKER 2002]. Bei der Aufbereitung von arsenhaltigen Grundwässern werden dieselben geochemischen Reaktionen genutzt, die zur Arsenanreicherung in den Auenböden geführt haben (Kap. 4.1.1). Die entstehenden hoch arsenhaltigen Eisenschlämme („Wasserwerksschlamm“) werden gesammelt und deponiert (Abb. 4.2.2.2-1).

Mit Ausnahme vergleichsweise kleinräumiger Auenbereiche sind die Böden der ehemaligen Bergbauggebiete gut durchlüftet, es herrscht ein dauerhaft sauerstoffreiches Milieu vor. Eine Fällung von Arsen ist hier nicht erforderlich, weil das Arsen im Boden stabil in und an Eisenoxide gebunden ist. Verwittern arsenhaltige Minerale wie Arsenkies (FeSAs) unter Sauerstoffeinwirkung, wird das freigesetzte Arsen im Boden bereits im Mikrometerbereich von



Abb. 4.2.2.2-1: Hoch arsenhaltiger Eisenschlamm am Wasserwerk des WSG „Neuried - Dundenheimer Wald“; Bild: R. Olschewski

Eisenoxiden fixiert, die sich aus dem Eisengehalt (Fe) der verwitternden Minerale bilden [RÜDE 1996].

Untersuchungen an Standorten mit erhöhten Arsengehalten aus dem früheren Erzbergbau und der Verhüttung haben bestätigt, dass eine Arsenfreisetzung und Verlagerung in den tieferen Untergrund auszuschließen ist.

Im Rahmen eines vom Umweltministerium Baden-Württemberg finanzierten Forschungsprojekts wurden in Zusammenarbeit zwischen dem Landratsamt, einem Ingenieurbüro und dem Regierungspräsidium Freiburg (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, LGRB) Bergbau- und Rückstandshalden auf der Gemarkung Biberach im Hinblick auf eine eventuelle Grundwassergefährdung modellhaft erkundet [solum; LANDRATSAMT ORTENAUKEIS; REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, Abt. 9 (LGRB) 2004]. Bei hohen Arsengehalten im Haldenmaterial (140 - 330 mg/kg) wurden in den gefassten Sickerwässern sehr geringe Arsenkonzentrationen festgestellt, die mehrheitlich unter oder nur ganz wenig über der analytischen Bestimmungsgrenze lagen.



### 4.2.3 Blei

#### 4.2.3.1 Gehalte der Böden

Die Oberböden weisen Bleigehalte in einer großen Spannweite von 4 bis 26 300 mg/kg auf. Darin eingeschlossen sind natürliche unbelastete und anthropogen kontaminierte Standorte. Die Median- und 90. Perzentilwerte für Grünland und Wald sind höher als bei Acker- und Siedlungsbereichen, weil viele Ergebnisse aus ehemaligen Bergbaugebieten enthalten sind (Tab. 4.2.3.1-1).

Belastungsschwerpunkte liegen in den Bergbau- und Verhüttungsgebieten des Schwarzwalds (Abb. 4.2.3.1-1). Die Karte zeigt auch, dass Rückstände aus der Aufbereitung teils über große Strecken flussabwärts verschwemmt worden sind (Kap. 4.1.2). In den ehemaligen Schwemmfächern der Kinzig zwischen Offenburg und Kehl und der Schutter zwischen Lahr und Friesenheim liegen die Bleigehalte der Böden in einzelnen Fällen über 200 mg/kg.

In der Gutachau ist das Blei in den Böden auf frühere Einleitungen gewerblicher Abwässer zurückzuführen (Kap. 4.2.7).

Hohe Bleigehalte liegen darüber hinaus an zwei Standorten südwestlich von Offenburg und bei Rheinau durch jahrzehntelangen Schießbetrieb mit Bleischroten vor.

#### 4.2.3.2 Wirkung erhöhter Bleigehalte auf Schutzgüter

In Bergbaugebieten und im Umfeld der ehemaligen Verhüttungsstandorte weisen die Böden Bleigehalte auf, die die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV teilweise deutlich überschreiten (Tab. 4.2.3.2-1).

#### Menschen

Die Böden der Siedlungsflächen mit nahe gelegenen alten Bergwerken oder Verhüttungsplätzen haben in der Regel hohe Bleigehalte. Das Landratsamt hat deshalb an vier ausgewählten Standorten die Resorptionsverfügbarkeit des Bleis im Boden prüfen lassen (Kap. A.4.2.1.3). Danach sind bis zu 20 % des Gesamtgehalts im Boden resorptionsverfügbar, wobei Unterschiede zwischen den einzelnen Bergbaugebieten bestehen.

Im unteren Hauserbachtal sowie größtenteils in Prinzbach ist die Resorptionsverfügbarkeit des Bleis im Boden mit deutlich unter 10 % auffällig gering. Möglicherweise hängt dies damit zusammen, dass die früher geförderten silberhaltigen Bleierze hier nur mechanisch aufbereitet worden sind (waschen, mahlen) und der überwiegende Teil des Bleis stabil im Boden gebunden ist (Tab. 4.2.3.2-2). Wegen der niedrigen Resorptionsverfügbarkeit ist bei den gegebenen Expositionsbedingungen keine Gefährdung für im Freien auf solchen Böden spielende Kinder zu besorgen.

Dennoch kann es im Einzelfall angezeigt sein, den humosen Oberboden vorsorglich auszutauschen, wenn die aktuell bestehende Bodennutzung geändert wird. Dies betrifft beispielsweise einen Standort in Biberach, falls künftig z. B. eine Wohnbebauung in Frage kommt.

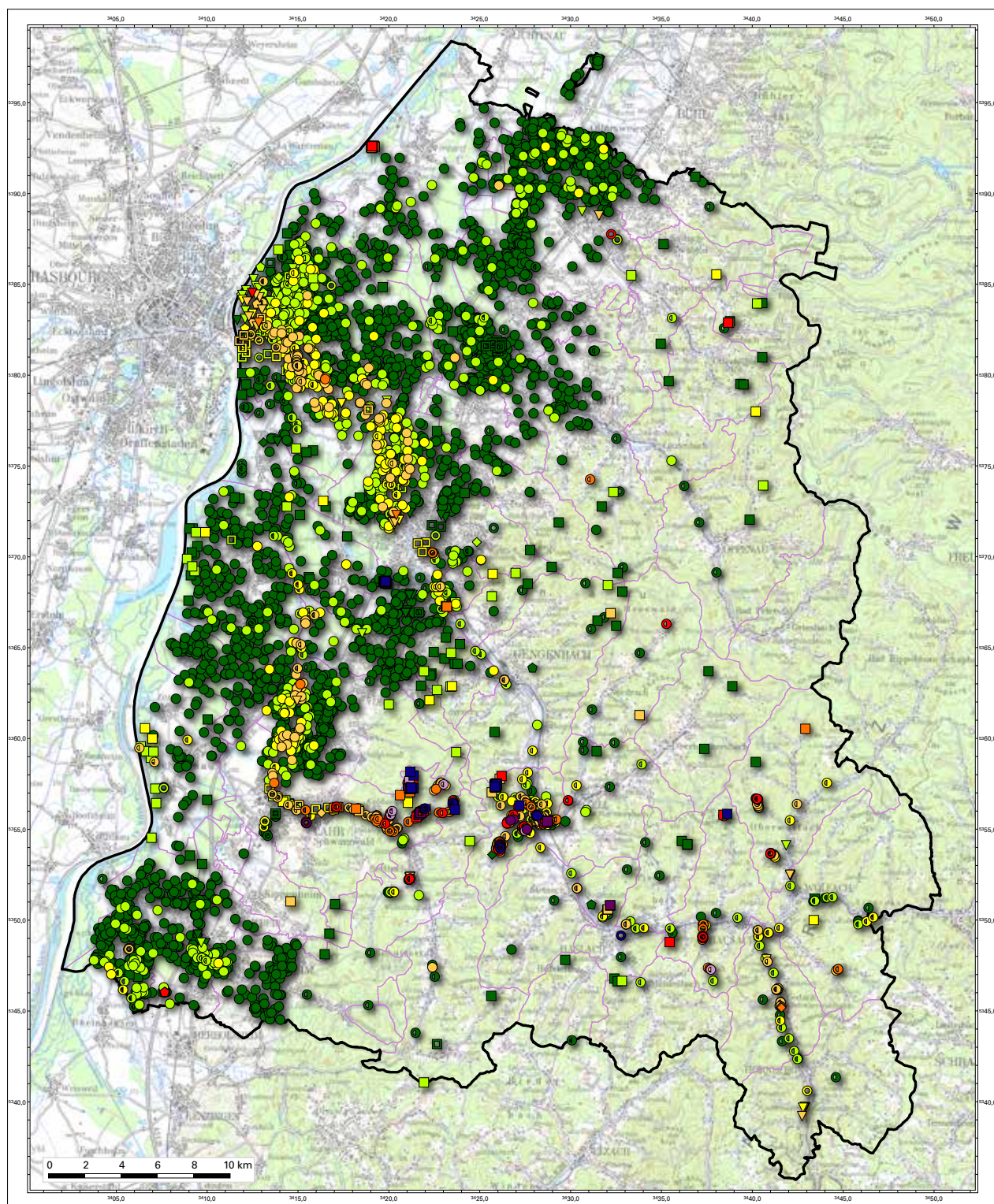
#### Pflanzen

Bei Boden-pH-Werten  $\geq 5,4$  - 7,0 sind die mobilen Bleigehalte im Boden meist gering (s. Definition in Kap. A.4.2.1). Sie nehmen mit fortschreitender Bodenversauerung zu (Tab. A.4.2.1.1-1).

Tab. 4.2.3.1-1: Statistische Kennwerte für Blei in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min  | Max    | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|------|--------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 3 871       | 20,0      | 28,0                  | 58,0      | 4,0  | 3 270  | 27                               | 44                               |
| Grünland             | 452         | 27,6      | 72,1                  | 330,0     | 6,0  | 8 180  | 38                               | 73                               |
| Wald                 | 219         | 21,0      | 54,4                  | 2 787,0   | 7,5  | 12 650 | 35                               | 65                               |
| Siedlungsbereich     | 347         | 28,8      | 87,0                  | 451,6     | 11,1 | 26 300 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)



## Bleigehalte

| Bodennutzung                                         | Blei [mg/kg] im Oberboden |          |           |            |            |             |              |              |       |                   |
|------------------------------------------------------|---------------------------|----------|-----------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------------------|
|                                                      | bis 40                    | >40 - 70 | >70 - 100 | >100 - 200 | >200 - 400 | >400 - 1000 | >1000 - 1200 | >1200 - 2000 | >2000 |                   |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | ●                         | ●        | ●         | ●          | ●          | ●           | ●            | ●            | ●     |                   |
| Grünland                                             | ○                         | ○        | ○         | ○          | ○          | ○           | ○            | ○            | ○     |                   |
| Wald                                                 | ■                         | ■        | ■         | ■          | ■          | ■           | ■            | ■            | ■     |                   |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | ◆                         | ◆        | ◆         | ◆          | ◆          | ◆           | ◆            | ◆            | ◆     |                   |
| Kinderspielflächen                                   | ◇                         | ◇        | ◇         | ◇          | ◇          | ◇           | ◇            | ◇            | ◇     |                   |
| Haus- und Kleingärten                                | ◎                         | ◎        | ◎         | ◎          | ◎          | ◎           | ◎            | ◎            | ◎     |                   |
| Park- und Freizeitanlagen                            | ◻                         | ◻        | ◻         | ◻          | ◻          | ◻           | ◻            | ◻            | ◻     |                   |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | ▼                         | ▼        | ▼         | ▼          | ▼          | ▼           | ▼            | ▼            | ▼     | — nicht enthalten |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)

Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 285.19-1/19

Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 4.2.3.1-1: Bleigehalte in den Böden des Ortenaukreises



Tab. 4.2.3.2-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Blei der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                        | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert  |
|---------------|----------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|-------|
| Vorsorgewerte | -                                      | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                              | 40    |
|               |                                        |           |                        | Lehm/Schluff                      | 70    |
|               |                                        |           |                        | Ton                               | 100   |
| Prüfwerte     | Boden - Mensch                         | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 200   |
|               |                                        |           |                        | Wohngebiete                       | 400   |
|               |                                        |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 1 000 |
|               |                                        |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 2 000 |
|               | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerbau, Nutzgarten              | 0,1   |
|               | Boden - Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 25    |
| Maßnahmenwert | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland                          | 1 200 |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion; \*\* AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

In den ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten finden sich überwiegend saure Böden, d.h. das Blei liegt im Boden pflanzenverfügbar vor. Der Prüfwert der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Nutzpflanze von 0,1 mg Pb/kg (Gehalt im Ammoniumnitratextrakt) wird in vielen Fällen überschritten. Das Landratsamt hat deshalb an den Standorten mit bergbau- und verhüttungsbedingt erhöhten Bleigehalten im Boden auch zahlreiche Pflanzenproben entnommen und untersuchen lassen. In Gemüse, vor allem in Möhren, wurden vereinzelt die Höchstgehalte für Lebensmittel überschritten. Überschrittene Pflanzen-Höchstgehalte fanden sich meist in Hausgärten mit hohen Bleigesamtgehalten im Boden. Die seit längerem bestehende Empfehlung des Landratsamts an die Gartennutzer, den pH-Wert der Gartenböden durch regelmäßige Kalkgaben im optimalen Bereich um pH 7 zu halten, um den Transfer von Blei in Nahrungspflanzen zu minimieren, wird deswegen weiter beibehalten.

Tab. 4.2.3.2-2: Resorptionsverfügbarkeit von Blei in Böden des Ortenaukreises; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis 2004

| Standorte        | Resorptionsverfügbarkeit vom Gesamtgehalt [%] |
|------------------|-----------------------------------------------|
| Biberach         | 12,1 - 17,4                                   |
| Prinzbach        | 3,2 - 11,1                                    |
| Hauserbachtal    | 6,7 - 8,8                                     |
| Lahr/Reichenbach | 12,2 - 19,2                                   |

In Biberach wurde an einem stark versauerten Ackerstandort (pH 4,2) mit hohen Bleigehalten in Brotweizen einmalig eine Überschreitung des Höchstgehalts von 0,2 mg Blei/kg Frischmasse festgestellt. Proben von Futtermais und Futtergetreide waren dagegen nicht zu beanstanden.

Bei Grünlandflächen sind hohe Bleigehalte vor allem dann problematisch, wenn die Flächen beweidet werden und die Böden wegen starker Vernässung nicht ausreichend trittfest sind. Es kommt dann zur Verletzung der Grasnarbe und zur vermehrten Verschmutzung der Pflanzen durch anhaftende bleihaltige Bodenpartikel (Abb. 4.2.3.2-1). Überschreitungen der Höchstgehalte in Futtermitteln sind z.T. die Folge.



Abb. 4.2.3.2-1: Verletzung der Grasnarbe durch lange Standzeiten der Tiere auf Grünlandflächen und Verschmutzung von Futterpflanzen durch anhaftende Bodenpartikel, Gemeindegebiet Seelbach; Bild: R. Olschewski



Bleigehalte über 100 mg/kg TM (bezogen auf 88 % Trockenmasse), die in Experimenten bei Milchkühen zur Veränderung des Blutbilds führten [HEESCHEN, BLÜTHGEN 1981], waren in den zahlreichen Vegetationsproben jedoch nicht festzustellen.

Um die Bleigehalte der Böden und Pflanzen besser einstuft zu können, wurden an zwei besonders betroffenen Grünlandstandorten Milch und Blut dort weidender Kühe sowie die Innereien und Muskelfleisch von Ziegen untersucht. In der Milch lagen die Bleigehalte mit 0,016 mg/kg Frischmasse unter dem Höchstgehalt von 0,020 mg/kg Frischmasse. Bleikonzentrationen in der gemessenen Höhe sind im Vergleich mit denen aus langjährigen Untersuchungen an Kuhmilch (0,015 mg/kg Frischmasse) [HEESCHEN, BLÜTHGEN 1981] als unauffällig einzustufen. Kühe eines Betriebs mit Bleigehalten im Boden über dem Durchschnitt zeigten jedoch tendenziell höhere Blutbleiwerte. Ein größeres vormaliges Weide-Areal des Betriebs wird zwischenzeitlich als Golfplatz genutzt.

Im Muskelfleisch und in Innereien von Ziegen ergab lediglich eine Nierenprobe eine Überschreitung des Höchstgehalts für Schlachtnieberzeugnisse von 0,5 mg Blei/kg Frischmasse.

#### Grundwasser

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass in den Gebieten mit großflächig erhöhten Gehalten Blei mit zunehmender Bodentiefe abnimmt. Nur an wenigen, stark kontaminierten und versauerten Standorten sind hohe mobile Bleigehalte im Boden festgestellt worden. Eine Bleiverlagerung in den Untergrund kann hier nicht ausgeschlossen werden.

Im Rahmen einer Pilotuntersuchung an verhüttungsbedingt erhöht bleihaltigem Erdaushub waren in Sickerwässern kaum Bleikonzentrationen über dem Prüfwert der BBodSchV von 0,025 mg Blei/l festgestellt worden [LANDRATSAMT ORTENAUKEIS 2002], (Kap. A.5.3.1).

In einem Forschungsprojekt zur modellhaften Erkundung von Rückstandshalden ehemaliger Bergbau- und Verhüttungsgebiete waren auf Gemarkung Biberach (Abb. 4.2.3.2-2), trotz sehr hoher Bleigehalte im Halden-

material (16 500 mg/kg), im Boden direkt darunter nur geringe Sickerwasserkonzentrationen festzustellen. Die Konzentrationen lagen bei maximal 13 µg Blei/l [solum; LANDRATSAMT ORTENAUKEIS; REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, Abt. 9 (LGRB) 2004].



Abb. 4.2.3.2-2: Standort der modellhaften Erkundung von Bergbaurückstandshalden, Haldenfeld „Teufelswald“, Gemarkung Biberach; Bild: R. Olschewski

Die Untersuchungsergebnisse belegen die starke Adsorption von Blei an die Bodenpartikel (Kap. A.5.3.1) und die langsame bzw. geringfügige Verlagerung in den Untergrund. In ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten sind weder im Trinkwasser von Einzelwasserversorgungen noch in gefassten und genutzten Quellwässern (z.B. Wasserschutzgebiet „Sägeweiherquelle“, Lahr-Reichenbach) Überschreitungen des Grenzwerts der Trinkwasserverordnung von 10 µg Blei/l festgestellt worden.

## 4.2.4 Cadmium

### 4.2.4.1 Gehalte der Böden

Cadmium-Konzentrationen in den Oberböden variieren von nicht nachweisbar bis zu 415 mg/kg (Tab. 4.2.4.1-1). In Unterböden kontaminierter Flächen wurden > 1 000 mg/kg teilweise überschritten.

Gehalte > 1 mg/kg liegen in Böden früherer Bergbaureviere bei Biberach und Lahr und in künstlich aufgeschütteten Bereichen im Hafengebiet Kehl vor (Kap. A.4.2.4.1). Bei Ortenberg ist eine größere Fläche durch frühere Einleitungen gewerblicher Abwässer und Ablagerungen von Farbabfällen mit Cadmium kontaminiert worden (Abb. 4.2.6.2-1). Überschwemmungen und Gewässerunterhaltungsmaßnahmen haben zur Verfrachtung der Kontamination in die Fläche beigetragen. Zum Schutz des Grundwassers wurden schon vor längerer Zeit Böden und Sedimente mit höheren Cadmiumgehalten abgetragen.

Außerhalb der Belastungsschwerpunkte liegen die mittleren Cadmiumgehalte der Oberböden auf dem Niveau landesweiter Hintergrundwerte.

### 4.2.4.2 Wirkung erhöhter Cadmiumgehalte auf Schutzgüter

Cadmium ist in schwach sauren Böden bereits leicht verfügbar. Mobile Cadmiumgehalte überschreiten oft schon bei Boden-pH-Werten um 6,5 die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Schadstoffübergang Boden - Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgarten im Hinblick auf die Pflanzenqualität (Tab. 4.2.4.2-1). Der Wirkungspfad Boden - Grundwasser kann ebenso betroffen sein.

#### Menschen

Nach der BBodSchV ist bei Haus- und Kleingärten, die einerseits als Aufenthaltsbereiche für Kinder, andererseits für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden, bei Cadmium der Wert von 2,0 mg/kg TM als Prüfwert anzuwenden (Tab. 4.2.4.2-1). In Oberböden von Wohngebieten sind Cadmiumgehalte  $\geq 2$  mg/kg TM vereinzelt festgestellt worden. Aufgrund der gegebenen Expositionsbedingungen (keine Spielflächennutzung, eingezäunte Gemüsebeete) waren keine Maßnahmen erforderlich. Untersuchungen der Resorptionsverfügbarkeit haben gezeigt, dass im Gebiet von Prinzbach weniger als 30 % des Cadmiums aus dem Boden resorptionsverfügbar sind.

#### Pflanzen

In Gemüseproben aus Hausgärten in ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten sind bisher in wenigen Fällen Cadmiumgehalte über den lebensmittelrechtlich zulässigen Höchstgehalten festgestellt worden. Dies ist vermutlich darin begründet, dass die Gartennutzer regelmäßig Kalk in ihre Böden einarbeiten und durch die damit verbundene Anhebung des Boden-pH-Werts die Mobilität des Cadmiums im Boden verringern. Auch die hohen Zinkgehalte in diesen Böden können dazu beitragen, dass die Mobilität von Cadmium herabgesetzt wird (Kap. 4.2.10) [WELCH, NORVELL 1999].

Für einen Bereich bei Ortenberg wurde dennoch wegen den z.T. sehr hohen Cadmiumgehalten in den Böden vom Gemüseanbau in Schrebergärten abgeraten. Kalkungsmaßnahmen würden hier die mobilen „pflanzenverfügbaren“ Cadmiumanteile im Boden nicht wesentlich verringern. Die Gärten wurden inzwischen aufgegeben. Weizen nimmt im Vergleich zu Gerste und Roggen vermehrt Cadmium aus dem Boden auf. In Brotweizen, der auf bergbau- und verhüttungsbedingt erhöht cadmiumhaltigen Ackerflächen nahe Biberach angebaut

Tab. 4.2.4.1-1: Statistische Kennwerte für Cadmium in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min    | Max   | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|--------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 3 803       | < 0,05    | 0,20                  | 0,41      | < 0,05 | 18,5  | 0,2                              | 0,7                              |
| Grünland             | 389         | 0,10      | 0,26                  | 1,17      | < 0,05 | 368,0 | 0,3                              | 0,7                              |
| Wald                 | 172         | < 0,05    | 0,20                  | 1,60      | < 0,05 | 151,0 | 0,1                              | 0,2                              |
| Siedlungsbereich     | 257         | 0,08      | 0,30                  | 1,20      | < 0,05 | 415,0 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm), Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.4.2-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Cadmium der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad   |                                        | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert                     |
|----------------|----------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Vorsorgewerte  | -                                      | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                              | 0,4                      |
|                |                                        |           |                        | Lehm/Schluff                      | 1                        |
|                |                                        |           |                        | Ton                               | 1,5                      |
| Prüfwerte      | Boden - Mensch                         | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 10 <sup>1)</sup>         |
|                |                                        |           |                        | Wohngebiete                       | 20 <sup>1)</sup>         |
|                |                                        |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 50                       |
|                |                                        |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 60                       |
|                | Boden - Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 5                        |
| Maßnahmenwerte | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerbau                          | 0,04 / 0,1 <sup>2)</sup> |
|                | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland                          | 20                       |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion

\*\* AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

1) In Haus- und Kleingärten, die sowohl als Aufenthaltsbereiche für Kinder als auch für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden, ist für Cadmium der Wert von 2,0 mg/kg TM als Prüfwert anzuwenden

2) Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium anreichernder Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg TM; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg/kg TM

wurde, war der lebensmittelrechtliche Höchstgehalt (0,10 mg Cadmium/kg Frischgewicht) in einigen Fällen überschritten.

Beispielsweise auf einer stark versauerten Ackerfläche (pH 4,2; Kap. 4.2.1) war der Höchstgehalt im Brotweizen (0,10 mg/kg FM) überschritten, obwohl der Cadmiumgehalt im Boden mit 0,32 mg/kg unter dem Vorsorgewert der BBodSchV (0,40 mg/kg) lag. Das Beispiel verdeutlicht, dass unter bestimmten Voraussetzungen sogar bei unterschrittenen Vorsorgewerten kritische Pflanzengehalte erreicht werden können.

Die betroffenen Ackerflächen werden inzwischen ausschließlich für den Anbau von Futtergetreide und Futtermais genutzt. In diesen Kulturpflanzen ist der Cadmiumgehalt unkritisch. Cadmiumgehalte über dem Maßnahmenwert der BBodSchV für Grünlandflächen von 20 mg/kg Boden sind nur im Bereich einer nicht beweideten Mähwiese bei Ortenberg festgestellt worden. Das zusammen mit dem Aufwuchs angrenzender Wiesenflächen geerntete Grünfutter hält die Anforderungen der EU-Richtlinie 2002/32 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung hinsichtlich Cadmium ein (< 1 mg Cd/kg 88 % TM).

#### Grundwasser

Wegen der verglichen mit anderen Schwermetallen geringeren Sorption wird Cadmium leichter in den Unter-

grund verlagert und ggfs. in das Grundwasser eingetragen (Kap. A.4.2.1, Abb. A.4.2.1.1-1). Die Bodenkontamination bei Ortenberg war mit einem Cadmiumeintrag in das Grundwasser verbunden. Nach der Sanierung liegen in begrenzten Flächenbereichen noch erhöhte Cadmiumgehalte vor. Aufgrund der fortschreitenden Flächenversiegelung und der einhergehenden unsensiblen Bodennutzung wurde die verbliebene Restbelastung nach Abwägung im vorliegenden Fall als tolerabel eingestuft, da hiervon keine Wirkungen mehr auf Schutzgüter ausgehen.

In ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten sind im Trinkwasser zentraler Wasserversorgungen und privat genutzter Quellen keine Cadmiumgehalte über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung (5 µg/l) festgestellt worden.

Aus belasteten Bergbaurückstandshalden kann Cadmium vermehrt mit dem Sickerwasser ausgetragen werden, obwohl die im abgelagerten Gangmaterial enthaltenen Carbonate durch Pufferreaktionen die Einstellung mäßig bzw. stark saurer Verhältnisse (pH < 5,4) im Haldenkörper verhindern. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden im Boden unter dem Haldenmaterial Sickerwasserkonzentrationen festgestellt, die den Grenzwert der TrinkwV um ein Mehrfaches überschreiten [solum; LANDRATSAMT ORTENAUKEIS; REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, Abt. 9 (LGRB) 2004].



## 4.2.5 Chrom

### 4.2.5.1 Gehalte der Böden

In den Oberböden können die Chromgehalte in einzelnen Fällen 700 mg/kg überschreiten (Karte Kap. A.4.2.5.1 und Tab. 4.2.5.1-1).

Hohe Chromgehalte liegen in den unmittelbar an die Schutter angrenzenden, vereinzelt im rheinnahen Mündungsgebiet des Schutterentlastungskanals vor. Ursache sind ehemalige Abwassereinleitungen aus dem Lahrer Ledergewerbe.

Auch im früher mit unterschiedlichen anthropogenen Materialien aufgefüllten Kehler Hafengebiet sind höhere Chromgehalte zu verzeichnen. Kleinere Bergbau-Rückstandshalden z.B. aus dem Eisenerzabbau bei Offenburg-Zunsweier enthalten z.T. sehr viel Chrom.

Geogenen Ursprungs sind die teilweise hohen Chromgehalte in den Oberböden über hornblendereichen Gesteinen, die kleinräumig im Schuttertal („Serpentin von Höfen“) oder mehr in der Fläche verbreitet am Ausgang des Kinzigtals anstehen (Durbachit zwischen Hohberg-Diersburg und Durbach-Gebirg; Kap. 4.1.1).

### 4.2.5.2 Wirkung erhöhter Chromgehalte auf Schutzgüter

Für Chrom in Böden enthält die BBodSchV nur wenige Referenzwerte, weil die Wirkung des im Boden normalerweise dreiwertigen Chroms auf Schutzgüter allgemein als gering angenommen wird.

Tab. 4.2.5.1-1: Statistische Kennwerte für Chrom in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM) \*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min   | Max   | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 3 680       | 20,0      | 28,0                  | 43,0      | 2,0   | 280,0 | 36                               | 60                               |
| Grünland             | 253         | 22,0      | 33,1                  | 67,0      | 2,3   | 530,0 | 42                               | 60                               |
| Wald                 | 156         | 5,4       | 31,0                  | 96,2      | < 1,0 | 759,3 | 19                               | 31                               |
| Siedlungsbereich     | 184         | 26,0      | 37,0                  | 60,4      | 5,0   | 334,0 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.5.2-1: Vorsorge- und Prüfwerte für Chrom der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                   | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert  |
|---------------|-------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|-------|
| Vorsorgewerte | -                 | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                              | 30    |
|               |                   |           |                        | Lehm/Schluff                      | 60    |
|               |                   |           |                        | Ton                               | 100   |
| Prüfwerte     | Boden-Mensch      | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 200   |
|               |                   |           |                        | Wohngebiete                       | 400   |
|               |                   |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 1 000 |
|               |                   |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 1 000 |
|               | Boden-Grundwasser | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 50**  |
|               |                   |           |                        | 8***                              |       |

\* KW Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion; \*\* Chrom (gesamt); \*\*\* Chromat (6-wertiges Chrom)

## Menschen und Pflanzen

Weder in Böden von Wohngebieten noch an Kinderspielflächen sind Chromgehalte über den Prüfwerten der BBodSchV festgestellt worden (Tab. 4.2.5.2-1).

Aufgrund der starken Bindung in und an Eisenoxide können Pflanzen das Schwermetall nicht in nennenswertem Umfang aus dem Boden aufnehmen (Abb. A.4.2.1.1-2). Für Nutzpflanzen sind daher keine Prüf- oder Maßnahmenwerte festgelegt worden (Tab. 4.2.5.2-1). Die allgemein niedrigen Chromgehalte in Pflanzen belegen die sehr geringe Verfügbarkeit des Chroms im Boden [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002]. In der Literatur wurden auffällige Chromgehalte in Kulturpflanzen nur im Zusammenhang mit extrem hohen Gehalten in Ackerböden berichtet (4800 - 5700 mg/kg TM), die durch intensive Ausbringung von chromhaltigen Gerbereischlämmen verursacht waren [HAMANN 1990].

## Grundwasser

Chrom wird aufgrund der starken Fixierung in und an Eisenoxiden in aller Regel nicht in gefährdungsrelevantem Umfang mit dem Sickerwasser aus Böden ausgewaschen. Kontaminationen durch sechswertiges Chromat im Grundwasser sind von bestimmten Schadensfällen berichtet worden, z. B. bei Galvanikbetrieben oder Holzimprägnierwerken, wo stark chromhaltige Flüssigkeiten in den Untergrund oder direkt in das Grundwasser gelangten [z.B. LUDWIG 1996]. Im Ortsaukreis sind solche Schadensfälle nicht bekannt.

Chromhaltige Elektroofenschlacke (EOS) aus der Stahlproduktion der Badischen Stahlwerke kann auf Grundlage unterschiedlicher Untersuchungsergebnisse im Wege- und Grundbau verwertet werden, ohne dass eine Gefährdung des Grundwassers zu besorgen ist.

## 4.2.6 Kobalt

### 4.2.6.1 Gehalte der Böden

Bodenuntersuchungen auf Kobalt wurden nur an wenigen Standorten durchgeführt. In den Oberböden lagen die Gehalte im Bereich von 0,3 bis 258 mg/kg.

Einen Überblick über die Verteilung der Werte gibt Tab. 4.2.6.1-1 und Karte Kap. A.4.2.6.1. Anthropogen erhöhte Kobaltkonzentrationen im Boden sind in unmittelbarer Nähe ehemaliger Bergbaustollen bei Lahr-Reichenbach und Biberach sowie in vereinzelt Ablagerungen von Gewerbeabfällen festgestellt worden (Abb. 4.2.6.2-1).

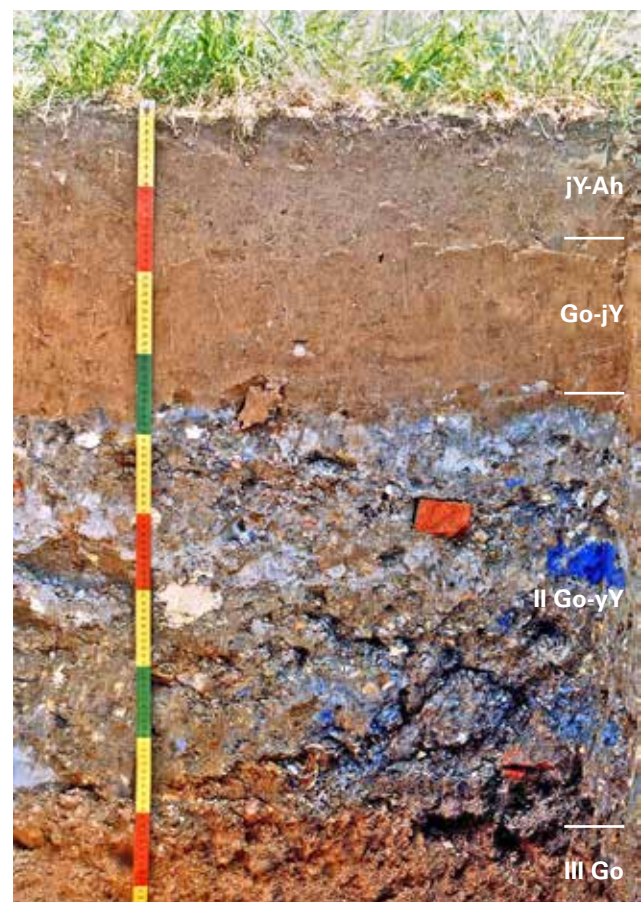


Abb. 4.2.6.2-1: Mit Farbabfällen (z. B. „Kobaltblau“) verfüllte Sandgrube bei Ortenberg; Bild: G. Glomb

Höhere geogene Kobalt- und Nickelkonzentrationen sind in Oberböden über olivin- und biotitreichen Gesteinen zu beobachten. Neben dem kleinräumigen Serpentinivorkommen bei Schuttertal-Höfen zählt dazu hauptsächlich der Migmatit-Komplex (Durbachit) am Ausgang des Kinzigtals nahe Ohlsbach und Offenburg-Zunsweier (Kap. 4.1.1).

Tab. 4.2.6.1-1: Statistische Kennwerte für Kobalt in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min | Max   | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|-----|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 33          | 5,6       | 7,2                   | 8,8       | 4,8 | 11,8  | -                                | -                                |
| Grünland             | 88          | 5,4       | 8,2                   | 11,2      | 1,3 | 46,0  | -                                | -                                |
| Wald                 | 40          | 1,4       | 7,1                   | 17,9      | 0,3 | 258,0 | -                                | -                                |
| Siedlungsbereich     | 39          | 5,5       | 6,8                   | 8,3       | 4,0 | 17,0  | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm), Extraktion mit Königswasser (KW)

Im größten Teil der Fläche des Ortenaukreises liegen die Kobaltgehalte im Bereich der landesweiten Hintergrundwerte.

#### 4.2.6.2 Wirkung erhöhter Kobaltgehalte auf Schutzgüter

##### Menschen und Pflanzen

Als Bestandteil des Vitamins B<sub>12</sub> ist Kobalt für Menschen und Tiere essenziell. Die Synthese von Vitamin B<sub>12</sub> erfolgt durch bestimmte Mikroorganismen, z.B. Hefen und Bakterien im Verdauungstrakt.

Humantoxikologisch relevant sind kobalthaltige Stäube beim Einatmen, z.B. an bestimmten exponierten Arbeitsplätzen. Hinweise auf eine gesundheitliche Gefährdung durch die orale Aufnahme erhöht kobalthaltiger Bodenpartikel gibt es dagegen nicht [MERIAN ET AL. 2004].

Hohe Kobaltgehalte im Boden sind für Pflanzen in sehr seltenen Fällen toxisch. Eine ausreichende Kobaltversorgung aus dem Boden ist für Futterpflanzen im Hinblick auf die Tierernährung bzw. für bestimmte Bodenbakterien weit bedeutender. Bakterien, die Stickstoff aus der Atmosphäre binden, sind auf Kobalt angewiesen. Leguminosen wie Klee oder Luzerne (Abb. 4.3.1-2), die mit solchen Bakterien in Symbiose leben, reagieren bei Kobaltmangel mit geringeren Ernteerträgen [MARSCHNER 1995].

Früher führten geringe Kobaltgehalte in Futterpflanzen für Rinder mitunter zu dem Problem, dass die Pansen-

flora zu wenig Vitamin B<sub>12</sub> synthetisierte. Die Hirschkrankheit war vor 1960 eine im Schwarzwald regional häufig zu beobachtende Kobaltmangelerscheinung. Als Ursache wurde der geringe Kobaltgehalt von Böden aus biotitarmen Gesteinen wie dem Triberger Granit (Kap. 2.2.3) identifiziert [SCHOLL 1959]. Heute ist die Kobaltversorgung der Nutztiere durch die obligatorische Zugabe von Mineralfuttermittel sichergestellt.

Die BBodSchV enthält keine Prüf-, Maßnahmen- oder Vorsorgewerte für Kobalt in Böden.

##### Grundwasser

Für den Schadstoffübergang in das Bodensickerwasser zur Beurteilung des Wirkungspfads Boden - Grundwasser ist ein Prüfwert von 50 µg/l enthalten.

Die Trinkwasserverordnung enthält in den Fassungen ab 2001 aufgrund der vernachlässigbaren toxischen Relevanz von gelöstem Kobalt im Wasser keinen Grenzwert mehr [TrinkwV 2011].

Im Ortenaukreis sind trotz einzelner erhöhter Kobaltgehalte in Ablagerungen gewerblicher Abfälle keine über den Prüfwert der BBodSchV erhöhten Sicker- oder Grundwasserkonzentrationen festgestellt worden. Kobalt ist in diesen Materialien im Gegensatz zum Cadmium sehr fest gebunden (Kap. A.4.2.6.1).



## 4.2.7 Kupfer

### 4.2.7.1 Gehalte der Böden

In den Oberböden variieren die Kupfergehalte bei 0,3 bis 2 264 mg/kg (Tab. 4.2.7.1-1).

Die höchsten Kupfergehalte haben Halden und Auffüllungen mit Bergbaurückständen (z.B. „Silberbrünne“ bei Gengenbach). Erhöhte Bodengehalte liegen in nahezu allen alten Bergbaurevieren vor. Sie sind dort überwiegend auf kleine Areale beschränkt (Karte Kap. A.4.2.7.1).

Hohe Kupfergehalte liegen verbreitet in der Aue des Gutachts vor. Vorwiegende Ursache sind die früheren Abwasserreinleitungen metallverarbeitender Betriebe am Oberlauf der Gutach. Überschwemmungen und Wiesenwässerungen haben dazu beigetragen, die Kontaminationen in weiten Auenbereichen zu verteilen.

Gewerbliche Abwässer haben erhöhte Kupfergehalte im Mündungsbereich des Schutterentlastungskanals nahe dem Rhein verursacht.

Der Einsatz kupferhaltiger Fungizide im Weinbau hat zu höheren Kupfergehalten in Weinbergböden geführt (Kap. 4.1.9, Karte Kap. A.4.2.7.1).

### 4.2.7.2 Wirkung erhöhter Kupfergehalte auf Schutzgüter

#### Menschen

Kupfer und Zink sind im pflanzlichen und tierischen Stoffwechsel essenzielle Spurenelemente. Gesundheitliche Beeinträchtigungen für Menschen können bei hohen Kupferkonzentrationen in der Atemluft (Arbeitsplatz) oder im

Trinkwasser auftreten [MERIAN ET AL. 2004].

Erhöhte Kupfergehalte von Böden sind dagegen humantoxikologisch nicht von Bedeutung. In der BBodSchV wurden deshalb keine Prüfwerte festgelegt.

#### Pflanzen

Ein Überangebot pflanzenverfügbarer Kupfergehalte > 1 mg/kg TM kann die Zellmembranen in Pflanzenwurzeln zerstören und das Längenwachstum einschränken. Weil dadurch die Eisenaufnahme behindert wird, zeigen sich die Schäden oberirdisch als Eisenmangelerscheinung, z.B. streifenartige Gelbverfärbungen oder Chlorosen an jungen Blättern. Kupfergehalte von > 20 - 30 mg/kg TM in oberirdischen Pflanzenteilen werden je nach Pflanzenart als kritisch eingestuft [BERGMANN 1993; MARSCHNER 1995].

Auf einer ehemaligen Ackerfläche in Seelbach wurde der Prüfwert der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Pflanzen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen überschritten (Tab. 4.2.7.2-1). Wachstumsbeeinträchtigungen wurden hier bereits zuvor beobachtet. Der Boden weist darüber hinaus höhere Zinkgehalte auf, was sich möglicherweise zusätzlich negativ auf das Pflanzenwachstum ausgewirkt hat (Abb. 4.2.10.2-1).

In Grünlandböden der Gutachaue sind mobile Kupfergehalte von mehr als 1 mg/kg TM festgestellt worden, jedoch ohne offensichtliche Wachstumsbeeinträchtigungen der Grünlandvegetation. Untersuchte Pflanzenproben enthielten 8,8 - 15,6 mg Kupfer/kg, die den

Tab. 4.2.7.1-1: Statistische Kennwerte für Kupfer in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min  | Max   | Hintergrundwerte<br>BW 50. Perz. | Hintergrundwerte<br>BW 90. Perz. |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 3 800       | 10,0      | 15,0                  | 23,0      | 3,0  | 255   | 19                               | 28                               |
| Weinbau                  | 38          | 25,2      | 72,6                  | 143,1     | 12,9 | 188   | 19                               | 28                               |
| Grünland/Krautvegetation | 367         | 13,5      | 25,0                  | 78,7      | 2,8  | 587   | 20                               | 31                               |
| Wald                     | 160         | 3,9       | 19,4                  | 64,0      | 0,3  | 2 264 | 7                                | 17                               |
| Siedlungsbereich         | 232         | 14,0      | 28,0                  | 75,8      | 6,6  | 460   | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm), Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.72-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Kupfer der BBodSchV (1999)

|               | Wirkungspfad                         | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart | Wert                |
|---------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| Vorsorgewerte | -                                    | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                  | 20                  |
|               |                                      |           |                        | Lehm/Schluff          | 40                  |
|               |                                      |           |                        | Ton                   | 60                  |
| Prüfwerte     | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenwachstum) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerland             | 1                   |
|               | Boden-Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                       | 50                  |
| Maßnahmenwert | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland              | 1 300 <sup>1)</sup> |

1) Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt als Maßnahmenwert 200 mg/kg Trockenmasse

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion

\*\* AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

früher diskutierten Hinweiswert für Alleinfuttermittel für empfindliche Schafrassen von 10 mg/kg TM teilweise überschritten [PETERSEN 2002]. In die EU-Richtlinie über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung (Kap. 4.2.2.2) ist für Kupfer kein Höchstgehalt aufgenommen worden.

Im Boden einer Grünlandfläche im Kirnbachtal bei Wolfach wird der Maßnahmenwert dagegen überschritten. Vor mehr als zwei Jahrzehnten wurden hier Rückstände aus der Erzaufbereitung aufgetragen und eingebnet. Im Grünlandaufwuchs wurden Kupfergehalte zwischen 8,1 und 17,5 mg/kg TM festgestellt. Andauernde Schafhaltung darf dort nicht stattfinden.

Bei der Anwendung kupferhaltiger Fungizide wird Kupfer im Oberboden angereichert (Kap. A.4.2.7.1). Die Hauptwurzelmasse erwachsener Reben liegt in 20 - 60 cm Bodentiefe, d.h. unterhalb der Schicht mit den höchsten Kupfergehalten [CURRLE ET AL. 1983].

Beeinträchtigungen des Rebwachstums sind im Ortenaukreis nicht bekannt geworden. Solche Erscheinungen hat man in Deutschland vereinzelt an Rebsetzlingen beobachtet [MOHR 1985]. Das Ergebnis stichprobenartiger Untersuchungen von Rebböden mit der sequenziellen Extraktion, um die im Boden unterschiedlich mobilen Anteile des Kupfers zu erfassen, zeigt Abb. A.4.1.9-1.

### Grundwasser

In den kontaminierten Auenböden des Gutachtals ist Kupfer zusammen mit anderen Schwermetallen in die meist sandigen und mehr oder weniger stark versauerten Unterböden (pH 4,4 - 5,4) verlagert worden. Handelt es

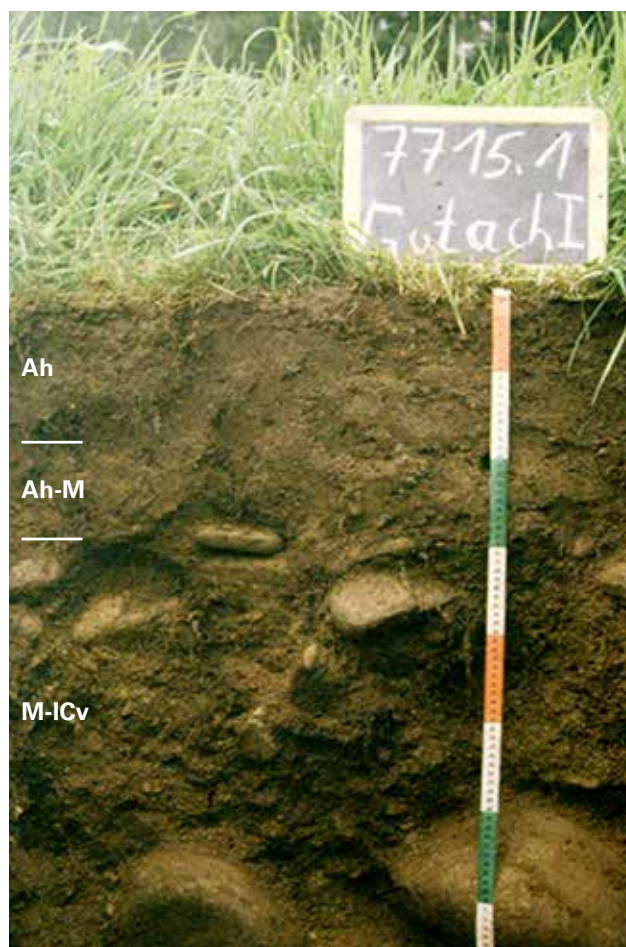


Abb. 4.2.72-1: Auengley-Brauner Auenboden mit Schwermetallkontaminationen, Gemarkung Gutach; Bild: LGRB.

sich um flachgründige Auenböden (Abb. 4.2.7.2-1), können die Kupfergehalte im gesamten Bodenkörper die Vorsorgewerte der BBodSchV überschreiten.

Kupfereinträge, die zu einer Kupferbelastung des Grundwassers führen, sind jedoch nicht zu erwarten. Einerseits sind die wasserlöslichen Kupferanteile in den Böden gering, d. h. der Prüfwert der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser (50 µg/l) wird unterschritten. Andererseits werden geringe Kupfereinträge im Grundwasser zusätzlich verdünnt.

Die Häuser in der Gutachau sind an das öffentliche Wasserversorgungsnetz angeschlossen. In der Gutachau sind keine Wasserschutzgebiete ausgewiesen.

Bodenuntersuchungen bestätigten, dass von den bergbau- und verhüttungsbedingt erhöhten Kupfergehalten keine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität ausgeht (Kap. A.5.3.1). Die Kupfergehalte nehmen i. d. R. nach wenigen Dezimetern Tiefe bis auf das Niveau der natürlichen Hintergrundgehalte ab.

In Weinbergsböden mit erhöhten Kupfergehalten nimmt Kupfer unter einer Bodentiefe von 20 cm kontinuierlich ab. Wenn die Rebflächen nicht intensiv umgestaltet wurden (z. B. Terrassierungen), sind ab 1 m Bodentiefe keine erhöhten Kupfergehalte mehr zu erwarten.

## **4.2.8 Nickel**

### **4.2.8.1 Gehalte der Böden**

In den Oberböden variieren die Nickelgehalte von < 1 bis 1 011 mg/kg (Tab. 4.2.8.1-1).

Die höchsten anthropogenen Nickelgehalte liegen kleinflächig in Böden bei Ortenberg vor (Karte Kap. A.4.2.8.1). Nickel ist dort durch ehemalige Abwassereinleitungen und Ablagerungen von Farbabfällen in die Böden eingetragen worden (Abb. 4.2.6.2-1). Auch kleine Halden des ehemaligen Eisenbergbaus in den Wäldern südlich von Offenburg-Zunsweier weisen höhere Nickelgehalte auf.

Geogenen Ursprungs sind die hohen Nickelgehalte in den Oberböden über hornblende- und olivinreichen Gesteinen, die kleinräumig im Schuttetal („Serpentin von Höfen“) oder etwas weiter verbreitet am Ausgang des Kinzigtals anstehen (Durbachit zwischen Hohberg-Diersburg und Durbach-Gebirg; Kap. 4.1.1). Die Böden zeichnen sich zusätzlich durch erhöhte Chromgehalte aus (Kap. 4.2.5).

### **4.2.8.2 Wirkung erhöhter Nickelgehalte auf Schutzgüter**

#### **Menschen und Pflanzen**

Weder auf Kinderspielflächen noch in Böden von Wohngebieten wurden Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Mensch überschritten. Gleiches gilt für Industrie- und Gewerbeflächen.

Nickel ist ein für Pflanzen und Bakterien essenzieller Mikronährstoff. Wie bei Cadmium und Zink steigen bei fortschreitender Bodenversauerung die pflanzenverfügbaren Nickelgehalte.

Für Nickel wird ein Grenz-pH-Wert von 5,5 angegeben (Tab. A.4.2.1.1-1), darunter nimmt die Löslichkeit im Boden stark zu. Bei hohen Nickelgehalten in sauren Böden kann der pflanzenverfügbare Nickelanteil toxisch auf das Wurzelwachstum von Kulturpflanzen wirken [MARSCHNER 1995].



Tab. 4.2.8.1-1: Statistische Kennwerte für Nickel in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung              | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min   | Max     | Hintergrundwert<br>50. Perz. | Hintergrundwert<br>90. Perz. |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|-------|---------|------------------------------|------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen | 3 673       | 12,9      | 19,7                  | 29,2      | < 1,0 | 68,5    | 27                           | 48                           |
| Grünland             | 269         | 13,0      | 20,0                  | 33,0      | < 1,0 | 741,0   | 26                           | 50                           |
| Wald                 | 156         | 5,3       | 19,1                  | 43,7      | < 1,0 | 151,2   | 12                           | 19                           |
| Siedlungsbereich     | 187         | 16,0      | 21,0                  | 33,0      | 11,0  | 1 011,0 | -                            | -                            |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion <2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.8.2-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Nickel der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                      | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert  |
|---------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|-------|
| Vorsorgewerte | -                                    | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                              | 15    |
|               |                                      |           |                        | Lehm/Schluff                      | 50    |
|               |                                      |           |                        | Ton                               | 70    |
| Prüfwerte     | Boden-Mensch                         | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 70    |
|               |                                      |           |                        | Wohngebiete                       | 140   |
|               |                                      |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 350   |
|               |                                      |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 900   |
|               | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenwachstum) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerbau                          | 1,5   |
|               | Boden-Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 50    |
| Maßnahmenwert | Boden-Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland                          | 1 900 |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion

\*\* AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

Für ackerbaulich genutzte Böden wurde ein Prüfwert von 1,5 mg/kg festgelegt (Tab. 4.2.8.2-1). Dieser Wert wird bzw. wurde im Ortenaukreis in einzelnen Fällen überschritten:

- bei Ortenberg; hier ist der kontaminierte, gewässer-nahe Flächenbereich bereits vor Jahren durch Bodenabtragung saniert worden
- im Schuttertal; hier handelt es sich um Boden über einem kleinräumig anstehenden Gesteinstyp mit hohen Chrom- und Nickelgehalten (Kap. 4.1.1, „Serpentinit von Höfen“). Mit 3,6 mg/kg wurde dort der höchste pflanzenverfügbare Nickelgehalt im Ortenaukreis gemessen. An der Grasvegetation sind Toxizitätssymptome anhand von streifenartigen

Gelbverfärbungen oder Chlorosen zu beobachten, ähnlich wie bei einem Kupferüberangebot und Eisenmangel.

Die Böden mit erhöhtem Nickelgehalt zwischen Diersburg und Durbach-Gebirg werden überwiegend forstwirtschaftlich genutzt. Der Maßnahmenwert für Grünlandnutzung (1 900 mg/kg) wird nicht überschritten.

#### Grundwasser

Beeinträchtigungen des Grundwassers durch Einträge von Nickel aus belasteten Böden und Halden sind im Ortenaukreis nicht bekannt.

## 4.2.9 Quecksilber

### 4.2.9.1 Gehalte der Böden

In den Oberböden liegen die Quecksilbergehalte zwischen < 0,01 und 2,2 mg/kg (Tab. 4.2.9.1-1).

In Überschwemmungsflächen des Rheins sind z.T. erhöhte Quecksilbergehalte anzutreffen (Karte Kap. A.4.2.9.1). Ursache sind vermutlich ehemalige Einleitungen von Produktionsabwässern der chemischen Industrie am Oberlauf des Rheins.

Höhere Quecksilbergehalte sind in Böden von Kehl, Lahr und Offenburg festgestellt worden. Größtenteils handelt es sich um kontaminierte Oberböden über verschiedenen Altablagerungen. Einträge in Siedlungsflächen können durch die Verbrennung fossiler Energieträger oder durch Emissionen aus metallverarbeitenden Betrieben verursacht worden sein.

In Rückstandshalden aus dem mittelalterlichen Erzbergbau und in Ablagerungen von Abgängen der gegenwärtig noch stattfindenden Erzaufbereitung werden vereinzelt höhere Quecksilbergehalte vorgefunden.

### 4.2.9.2 Wirkung erhöhter Quecksilbergehalte auf Schutzgüter

#### Menschen und Pflanzen

Im Ortenaukreis sind keine Überschreitungen der Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Mensch zu verzeichnen.

In Böden zählt Quecksilber zu den immobil anorganischen Schadstoffen (Tab. A.4.2.1.1-1). Es wird so stark an organische Substanz gebunden, dass das Metall aus dem Boden nur in einem äußerst geringen Maß ausdampfen kann. Auch in der

Tab. 4.2.9.1-1: Statistische Kennwerte für Quecksilber in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min    | Max  | Hintergrundwerte BW<br>50. Perz. | Hintergrundwerte BW<br>90. Perz. |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|--------|------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 3 654       | 0,05      | 0,08                  | 0,14      | < 0,01 | 0,90 | 0,1                              | 0,1                              |
| Grünland/Krautvegetation | 213         | 0,06      | 0,14                  | 0,28      | 0,02   | 1,10 | 0,1                              | 0,1                              |
| Wald                     | 138         | 0,05      | 0,14                  | 0,74      | 0,02   | 1,50 | 0,1                              | 0,2                              |
| Siedlungsbereich         | 186         | 0,05      | 0,14                  | 0,70      | 0,02   | 2,21 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.9.2-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Quecksilber der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                        | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart             | Wert |
|---------------|----------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|------|
| Vorsorgewerte | -                                      | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                              | 0,1  |
|               |                                        |           |                        | Lehm/Schluff                      | 0,5  |
|               |                                        |           |                        | Ton                               | 1    |
| Prüfwerte     | Boden - Mensch                         | mg/kg TM  | KW*                    | Kinderspielflächen                | 10   |
|               |                                        |           |                        | Wohngebiete                       | 20   |
|               |                                        |           |                        | Park- und Freizeitanlagen         | 50   |
|               |                                        |           |                        | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 80   |
|               | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Ackerbau                          | 5    |
|               | Boden - Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                                   | 1    |
| Maßnahmenwert | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | KW*                    | Grünland                          | 2    |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion

Bodenlösung sind nur außerordentlich geringe Gehalte festzustellen [SCHUSTER 1991; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002]. Pflanzenkontaminationen sind nur bei Verschmutzung mit quecksilberhaltigen Bodenpartikeln zu erwarten. Die Prüf- und Maßnahmenwerte beziehen sich auf den Gesamtgehalt im Boden (Tab. 4.2.9.2-1) [UBA 1999].

Im Ortenaukreis sind weder auf landwirtschaftlich noch auf gärtnerisch genutzten Böden Überschreitungen der Prüf- und Maßnahmenwerte festgestellt worden.

#### **Grundwasser**

Erhöhte Quecksilberkonzentrationen im Grundwasser wurden im Ortenaukreis nicht gemessen.

## **4.2.10 Zink**

### **4.2.10.1 Gehalte der Böden**

In den Oberböden wurden Zinkgehalte von 2,3 bis 3 446 mg/kg TM gemessen (Tab. 4.2.10.1-1).

Hohe Zinkgehalte sind in vielen Böden ehemaliger Bergbau- und Verhüttungsgebiete charakteristisch. In einer mittelalterlichen Bergbau-Rückstandshalde bei Biberach-Erzbach wurde mit maximal 5000 mg/kg ein besonders hoher Zinkgehalt vorgefunden. Die Einleitung von Abwässern hat zu flächenhaften Zinkkontaminationen in der Gutachau, entlang der Schutter bei Lahr und im Mündungsbereich des Schutterentlastungskanals geführt (Karte Kap. A.4.2.10.1; Kap. 4.1.5).

In Kehl sind die Böden im gewerblich geprägten Hafen, aber auch teilweise im Stadtgebiet, durch frühere Ablagerungen unterschiedlichster Materialien stark mit Zink belastet. Auch in den Oberböden einzelner Acker- und Rebflächen in eher ländlich geprägten Bereichen sind höhere Zinkgehalte festgestellt worden. Sie sind vermutlich auf einen intensiven Auftrag von Klärschlamm vor Inkrafttreten der Klärschlammverordnung 1982 zurückzuführen.

### **4.2.10.2 Wirkung erhöhter Zinkgehalte auf Schutzgüter**

#### **Menschen und Pflanzen**

Für Menschen, Tiere und Pflanzen sind Zink und Kupfer essenzielle Spurenelemente. Für den Wirkungspfad Boden - Mensch sind keine Prüfwerte in der BBodSchV festgelegt worden.

Zu hohe pflanzenverfügbare Zinkgehalte in Ackerböden können auf Kulturpflanzen toxisch wirken. Wie beim Kupfer wird das Längenwachstum der Wurzeln beeinträchtigt und Eisenmangel induziert. Die Gelbverfärbungen (Chlorosen) beschränken sich nicht nur auf junge Blätter. Weiter wurden gestauchtes Wachstum und blaugrüne Verfärbungen beobachtet [MARSCHNER 1995; BERGMANN 1993].

Im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Ackerflächen gilt als mobiler Zinkgehalt der Prüfwert von 2 mg/kg (Ammoniumnitratextraktion; Tab. 4.2.10.2-1). Gehalte in dieser Höhe wurden nur auf zwei Ackerflächen an ehemaligen Verhüttungsstandorten in Biberach und Seelbach nachgewiesen. Beeinträchtigungen des Pflanzenwachstums waren jedoch nur an Kulturpflanzen in Seelbach zu beobachten (Abb. 4.2.10.2-1).



Tab. 4.2.10.1-1: Statistische Kennwerte für Zink in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min  | Max   | Hintergrundwerte BW<br>50. Perz. | Hintergrundwerte BW<br>90. Perz. |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 3 830       | 45,0      | 63,0                  | 97,0      | 6,2  | 531   | 60                               | 107                              |
| Grünland/Krautvegetation | 377         | 58,0      | 94,0                  | 184,0     | 13,0 | 1 180 | 72                               | 108                              |
| Wald                     | 176         | 24,0      | 83,4                  | 260,0     | 2,3  | 3 446 | 37                               | 64                               |
| Siedlungsbereich         | 250         | 59,7      | 124,9                 | 305,1     | 25,0 | 1 132 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion <2 mm); Extraktion mit Königswasser (KW)

Tab. 4.2.10.2-1: Vorsorge- und Prüfwerte für Zink der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                        | Dimension | Methode                | Nutzung bzw. Bodenart | Wert |
|---------------|----------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|------|
| Vorsorgewerte | -                                      | mg/kg TM  | KW*                    | Sand                  | 60   |
|               |                                        |           |                        | Lehm/Schluff          | 150  |
|               |                                        |           |                        | Ton                   | 200  |
| Prüfwerte     | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenwachstum) | mg/kg TM  | AN**                   | Ackerbau              | 2    |
|               | Boden - Grundwasser                    | µg/l      | H <sub>2</sub> O-Eluat |                       | 500  |

\* KW = Gesamtgehalte nach Königswasserextraktion; \*\*AN = „mobile“ Gehalte nach Ammoniumnitratextraktion

In den Bodenproben des mittlerweile überdeckten und als Weide genutzten ehemaligen Ackers wurden mobile Zinkgehalte bis zu > 10 mg/kg gemessen. Für die beobachtete Wachstumsdepression dürften darüber hinaus hohe mobile Kupfergehalte mit ursächlich sein („Mischtoxizität“, Kap. 4.2.7).

Mit 10 - 16 mg Zink/kg sind sehr hohe mobile Zinkgehalte wiederholt in kontaminierten Böden von Grünlandflächen der Gutachau festgestellt worden. Wachstumsbeeinträchtigungen sind dort nicht zu beobachten. Pflanzenproben enthielten bis zu 130 mg Zn/kg. Toxische Zn-Wirkungen treten bei verschiedenen Pflanzen ab etwa 200 - 400 mg Zn/kg Pflanzensubstanz (TS) auf. Die Grenzkonzentration in Nährlösungen für beginnende Zn-Toxizität liegt bei 2 mg Zn/l. Eine vorübergehende Schädigung der Mikroorganismenaktivität im Boden kann ab 1 mg Zn/l eintreten [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002].

Solch hohe mobile Zinkgehalte sind in kontaminierten, stark versauerten Böden anzutreffen (pH-Werte < 5,0). Bei fortschreitender Bodenversauerung unter einem pH-Wertbereich von 6,0 - 5,5 nimmt die Mobilisierbarkeit von Zink exponentiell zu (Tab. A.4.2.1.1-1).

Pflanzenverfügbares Zink kann in landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden von Vorteil sein, wenn Cadmium stark erhöht ist. Hohe Gehalte an ammoniumnitrat-extrahierbarem Zink im Boden > 5 mg/kg TM unterdrücken die Aufnahme der Pflanzen von Cadmium aus dem Boden über die Wurzeln [GRANT ET AL. 1999; 3. VwV UM 1993b]. Der Effekt wirkt sich wahrscheinlich in bergbaubeeinflussten Böden des Landkreises aus (Kap. 4.2.4). Zinkmangel tritt dort in den Ackerböden kaum auf, weil die Boden-pH-Werte oft im schwach sauren Bereich liegen.

In Ackerböden der lössbedeckten Vorbergzone kann sich nach wiederholten Erosionsereignissen und intensivem Abtrag von humosem Bodenmaterial bei einem Boden-pH-Wert > 7,2 ein Defizit in der Zinkversorgung der Pflanzen einstellen (Kap. 4.6.3).

#### Grundwasser

Stichprobenartige Untersuchungen in ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten sowie in der Gutachau haben gezeigt, dass die Zinkgehalte im Unterboden mit der Bodentiefe i.d.R. deutlich abnehmen. Es stellte sich



Abb. 4.2.10.2-1: Wachstumsdepressionen an einem ehemaligen Verhüttungsstandort in Seelbach; Bild: G. Goldenberg

heraus, dass ein großer Teil des Zinks fest an Eisenoxide und Tonminerale gebunden ist und keine erhöhten wasserlöslichen Zinkkonzentrationen vorliegen. Untersuchungen des Sickerwassers in bergbaubedingt erhöht schadstoffhaltigem Erdaushub kamen zum selben Ergebnis (Kap. 5.3.1). Lediglich bei der modellhaften Erkundung einer Bergbauhalde war nachzuweisen, dass Zink vermehrt mit dem Sickerwasser aus bestimmten Haldenbereichen ausgetragen wird.

Im aufgefüllten Kehler Hafengebiet sind erhöhte Zinkkonzentrationen im Bodensickerwasser häufig festgestellt worden. Flächenhaft erhöhte Zinkkonzentrationen im Grundwasser sind jedoch nicht nachzuweisen.

Die Trinkwasserverordnung gibt für Zink keinen Grenzwert an [TrinkwV 2011].

## 4.2.11 PAK - Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

### 4.2.11.1 Gehalte der Böden

Oberböden wurden bisher nur in begrenztem Umfang auf PAK untersucht. Dabei sind Gehalte von  $< 0,02$  bis  $38 \text{ mg/kg}$  festgestellt worden (Tab. 4.2.11.1-1).

Punktuellen Untersuchungen in Kehl, Lahr und Offenburg bestätigten, dass die diffusen Emissionen in größeren Siedlungsgebieten höhere PAK-Gehalte in den dortigen Oberböden zur Folge haben. Dies gilt auch für die Böden im Randbereich stark frequentierter Verkehrsstraßen (z.B. BAB A5, Kap. 4.1.4).

Einleitungen von Oberflächenwasser haben zu den erhöhten PAK-Gehalten entlang aller größeren Fließgewässer des Landkreises geführt (Karte Kap. A.4.2.11.1, Kap. 4.1.5). Auffällig sind hauptsächlich die Vorländer und die Sedimente eingedeichter Gewässerabschnitte wie z.B. an der Kinzig (Abb. 4.2.11.1-1).



Abb. 4.2.11.1-1: Eingedeichtes Vorland an der Kinzig nördlich von Offenburg mit bis zu  $8,3 \text{ mg PAK/kg}$ ; Bild R. Olschewski

Eindeutig erhöhte PAK-Gehalte weisen die Rückstandshalden aus dem ehemaligen Kohlebergbau bei Berghaupten auf. Die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe sind bei der Entstehung der Kohle im Lauf geologischer Zeiträume gebildet worden, d.h. sie sind auf natürliche Weise entstanden (Abb. A.4.2.1.1-3)

Tab. 4.2.11.1-1: Statistische Kennwerte für PAK in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in mg/kg TM)\*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min     | Max   | Hintergrundwerte BW<br>50. Perz. | Hintergrundwerte BW<br>90. Perz. |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|---------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 25          | 0,025     | 0,19                  | 2,25      | < 0,025 | 22,00 | 0,19                             | 0,54                             |
| Grünland/Krautvegetation | 100         | 0,524     | 2,39                  | 8,33      | < 0,025 | 23,68 | 0,26                             | 0,53                             |
| Wald                     | 33          | 1,080     | 3,40                  | 13,74     | 0,440   | 27,80 | 0,25                             | 1,99                             |
| Siedlungsbereich         | 61          | 0,110     | 1,50                  | 4,70      | < 0,025 | 38,17 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion < 2 mm)

Tab. 4.2.11.2-1: Vorsorge- und Prüfwerte für PAK und Benzo-a-pyren der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                        | Dimension | Humusgehalt/Nutzung               | Wert      |
|---------------|----------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| Vorsorgewerte | -                                      | mg/kg TM  | Humusgehalt ≤ 8 %                 | 0,3 (3)*  |
|               |                                        |           | Humusgehalt > 8 %                 | 1 (10)*   |
| Prüfwerte     | Boden - Mensch                         | mg/kg TM  | Kinderspielflächen                | 2         |
|               |                                        |           | Wohngebiete                       | 4         |
|               |                                        |           | Park- und Freizeitanlagen         | 10        |
|               |                                        |           | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 12        |
|               | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | mg/kg TM  | Ackerbau, Nutzgarten              | 1         |
|               | Boden - Grundwasser                    | µg/l      |                                   | 2**(0,2)* |

\* Wert in Klammern gilt für den Summenparameter PAK; \*\* Wert gilt für den Einzelparameter Naphthalin

#### 4.2.11.2 Wirkung erhöhter PAK-Gehalte auf Schutzgüter

##### Menschen

Als Bewertungsgrundlage im Wirkungspfad Boden - Mensch enthält die BBodSchV nach Nutzungsszenarien gestufte Prüfwerte für die Einzelsubstanz Benzo-a-pyren (BaP). Überschritten wurde der Prüfwert für Wohngebiete im Oberboden eines Wohngrundstücks in Lahr (4,5 mg BaP/kg; Tab. 4.2.11.2-1). Die betroffene Fläche in einem nicht öffentlich zugänglichen Hinterhof ist flächendeckend begrünt (Rasen, Baumbestand). Die Möglichkeit, dass spielende Kinder dort Bodenmaterial oral aufnehmen ist durch den dichten Bewuchs minimiert.

##### Pflanzen

Bewertungsgrundlage ist wiederum der BaP-Gehalt. Weder in Acker- noch in Gartenböden, die zum Gemüsebau genutzt werden, war der Prüfwert der BBodSchV von 1 mg/BaP kg Boden überschritten.

##### Grundwasser

Ausgehend von flächig erhöhten PAK-Gehalten entlang von Straßen oder Fließgewässern (Belastungselemente) können keine Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität festgestellt werden. In der Regel nehmen die Gehalte unterhalb des Oberbodens in wenigen Dezimetern Tiefe stark ab. Nur in geringmächtigen Böden über dem Kiesaquifer (Abb. 4.2.7.2-1) sind im gesamten Bodenkörper PAK-Gehalte über den Vorsorgewerten anzutreffen. Es ergeben sich jedoch keine Anhaltspunkte für den Eintrag relevanter PAK-Mengen in das Grundwasser.

Eine Beeinträchtigung des Grundwassers durch geogen erhöhte PAK-Gehalte in den Rückstandshalden des Kohlebergbaus ist ebenfalls auszuschließen. Die PAK sind dort fest und dauerhaft an und in die Kohlepartikel eingebunden (Abb. A.4.2.1.1-5 u. -6).



## 4.2.12 PCB - Polychlorierte Biphenyle

### 4.2.12.1 Gehalte der Böden

Für Oberböden liegen 96 Untersuchungsergebnisse vor. Die Gehalte umfassen einen Wertebereich von unter der analytischen Bestimmungsgrenze ( $< 0,001 \text{ mg/kg}$ ) bis max.  $0,17 \text{ mg/kg}$  (Tab. 4.2.12.1-1). PCB-Gehalte über dem landesweiten Hintergrundwert (Grünland;  $0,004 \text{ mg/kg TM}$ ) finden sich in Überschwemmungsflächen am Rhein bzw. im Mündungsbereich des Schutterentlastungskanals (Karte Kap. A.4.2.12.1). Mit maximal  $0,17 \text{ mg PCB/kg}$  wird der Vorsorgewert der BBodSchV für Böden mit einem Humusgehalt  $< 8 \%$  ( $0,05 \text{ mg PCB/kg}$ ) überschritten. PCB-Gehalte  $> 0,05 \text{ mg/kg}$  sind vereinzelt in Kehl und in einem Fall direkt an der Kinzig östlich von Wolfach gemessen worden.

Unter Wald und auf landwirtschaftlichen Nutzflächen außerhalb der Überschwemmungsgebiete sowie abseits von Siedlungsbereichen liegen die PCB-Gehalte im Bereich der landesweiten Hintergrundwerte (Tab. 4.2.12.2-1).

### 4.2.12.2 Wirkung erhöhter PCB-Gehalte auf Schutzgüter

#### Menschen und Pflanzen

Sieben untersuchte Bodenproben wiesen PCB-Gehalte über dem Vorsorgewert der BBodSchV von  $0,05 \text{ mg/kg}$  auf. Mit max.  $0,17 \text{ mg/kg}$  werden jedoch die Prüfwerte für die Wirkungspfade Boden - Nutzpflanze und Boden - Mensch unterschritten (Tab. 4.2.12.2-1).

Im Ortenaukreis ergaben sich keine Anhaltspunkte für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung durch PCB im Sinn der BBodSchV.

#### Grundwasser

Die erhöhten PCB-Gehalte der Böden in Überschwemmungsflächen sind auf den humosen Oberboden beschränkt. Darunter nehmen die Gehalte auf Werte kleiner der analytischen Bestimmungsgrenze ab. Ein PCB-Eintrag in das Grundwasser ist auszuschließen.

Tab. 4.2.12.1-1: Statistische Kennwerte für PCB in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in  $\text{mg/kg TM}$ ) \*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz.  | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min       | Max   | Hintergrundwerte BW<br>50. Perz. | Hintergrundwerte BW<br>90. Perz. |
|--------------------------|-------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 22          | $< 0,0010$ | 0,0015                | 0,0100    | $< 0,001$ | 0,019 | $< 0,001$                        | 0,007                            |
| Grünland/Krautvegetation | 38          | 0,0012     | 0,0024                | 0,0100    | $< 0,001$ | 0,067 | $< 0,001$                        | 0,004                            |
| Wald                     | 20          | 0,0028     | 0,0180                | 0,0824    | $< 0,001$ | 0,170 | 0,002                            | 0,024                            |
| Siedlungsbereich         | 16          | 0,0031     | 0,0100                | 0,0395    | $< 0,001$ | 0,165 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion  $< 2 \text{ mm}$ )

Tab. 4.2.12.2-1: Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für PCB der BBodSchV (1999)

| Wirkungspfad  |                                        | Dimension         | Humusgehalt/Nutzung               | Wert  |
|---------------|----------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------|
| Vorsorgewerte | -                                      | $\text{mg/kg TM}$ | Humusgehalt $\leq 8 \%$           | 0,05  |
|               |                                        |                   | Humusgehalt $> 8 \%$              | 0,10  |
| Prüfwerte     | Boden - Mensch                         | $\text{mg/kg TM}$ | Kinderspielflächen                | 0,40  |
|               |                                        |                   | Wohngebiete                       | 0,80  |
|               |                                        |                   | Park- und Freizeitanlagen         | 2,00  |
|               |                                        |                   | Industrie- und Gewerbegrundstücke | 40,00 |
|               | Boden - Grundwasser                    | $\mu\text{g/l}$   |                                   | 0,05  |
| Maßnahmenwert | Boden - Nutzpflanze (Pflanzenqualität) | $\text{mg/kg TM}$ | Grünland                          | 0,20  |

## 4.2.13 Dioxine/Furane (PCDD/F)

### 4.2.13.1 Gehalte der Böden

Die PCDD/F-Gehalte landwirtschaftlicher Böden liegen in der Regel unter 5 ng I-TEQ/kg (1 ng = 0,000 000 001 g). In Oberböden des Ortenaukreises wurden PCDD/F-Gehalte von 0,2 bis 66 ng I-TEQ/kg gemessen (Tab. 4.2.13.1-1).

Die geringe Anzahl der Bodenuntersuchungen ist überwiegend auf das Umfeld potenzieller Emittenten und auf wenige Stichproben in Überschwemmungsgebieten beschränkt (Karte Kap. A.4.2.13.1). Land- und forstwirtschaftliche Böden wurden im Rahmen landesweiter Erhebungen der PCDD/F-Hintergrundbelastung Ende der 1980er Jahre im Auftrag der LUBW untersucht.

Erhöhte PCDD/F-Gehalte sind in den anthropogen überprägten Flächen des Stadt- und Hafengebiets von Kehl und im Umfeld festgestellt worden. Die Verteilung der PCDD/F-Homologen, d.h. derjenigen Einzelverbindungen mit gleicher Anzahl an Chloratomen, lassen für den Außen- und den Siedlungsbereich von Kehl auf einen diffusen Eintrag von PCDD/F schließen, der für städtische Böden typisch ist. Lediglich im Nordosten des Hafengebiets weist die unterschiedliche Homologenverteilung auf eine andere Herkunft der PCDD/F hin [UM 1995c].

Der bei landesweiten Erhebungen der Hintergrundbelastung auf der Hornisgrinde angetroffene PCDD/F-Gehalt von 56 ng I-TEQ/kg ist möglicherweise durch „wilde“ Abfallverbrennung im Verlauf der langjährigen militärischen Nutzung der betreffenden Fläche verursacht worden.

### 4.2.13.2 Wirkung erhöhter PCDD/F-Gehalte auf Schutzgüter

#### Menschen und Pflanzen

Im Ortenaukreis sind keine Überschreitungen der nutzungsbezogenen Maßnahmenwerte der BBodSchV festgestellt worden.

Für den Wirkungspfad Boden - Nutzpflanzen enthält die BBodSchV keine Prüfwerte. Zur Orientierung kann auf Richtwerte zurückgegriffen werden, die 1991 von der Bund-/Länder-Arbeitsgruppe DIOXINE vorgeschlagen worden sind (Tab. 4.2.13.2-1). Bei Gehalten von 5 - 40 ng I-TEQ/kg wurde empfohlen, eventuelle Quellen und den Schadstofftransfer aus dem Boden zu prüfen.

Ab Bodengehalten > 40 ng I-TEQ/kg sollten bestimmte landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzungen eingeschränkt werden. Bei einem minimalen Dioxintransfer sollte in solchen Fällen eine uneingeschränkte Bodennutzung jedoch möglich bleiben. Die PCDD/F-Gehalte von landwirtschaftlichen Böden im Landkreis liegen unter 5 ng I-TEQ/kg. Anhaltspunkte für PCDD/F-kontaminierte Nutzpflanzen durch belastete Böden liegen nicht vor. Im Jahr 1994 untersuchtes Gemüse aus Eckartsweier und Kehl-Bodersweier war nicht zu beanstanden [CLUA 1994]. Böden unter Krautvegetation, in denen wie am Ortsrand von Kehl-Auenheim zu Beginn der 1990er Jahre höhere PCDD/F-Gehalte festgestellt wurden, werden nicht landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzt.

Weidetiere können PCDD/F-haltiges Bodenmaterial direkt oder über verschmutzte Pflanzenteile aufnehmen. Erhöhte PCDD/F-Gehalte im Fleisch, in Milch und Eiern

Tab. 4.2.13.1-1: Statistische Kennwerte für PCDD/F in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013 (Angaben in ng I-TEQ/kg TM)\*

| Nutzung                  | Anzahl<br>n | 10. Perz. | 50. Perz.<br>(Median) | 90. Perz. | Min | Max  | Hintergrundwerte BW<br>50. Perz. | Hintergrundwerte BW<br>90. Perz. |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|-----|------|----------------------------------|----------------------------------|
| Acker/Sonderkulturen     | 10          | 0,6       | 1,9                   | 2,9       | 0,3 | 5,0  | 1,0                              | 5                                |
| Grünland/Krautvegetation | 25          | 1,5       | 2,2                   | 17,2      | 0,5 | 66,1 | 0,5                              | 2                                |
| Wald                     | 12          | 0,2       | 3,6                   | 50,4      | 0,2 | 56,5 | 4,0                              | 37                               |
| Siedlungsbereich         | 23          | 1,5       | 2,3                   | 13,7      | 0,2 | 48,8 | -                                | -                                |

\* Konzentrationen bezogen auf ein Kilogramm Trockenmasse (Fraktion <2 mm)

Tab. 4.2.13.2-1: Maßnahmenwerte für PCDD/F der BBodSchV (1999) und Richtwerte der Bund/Länder-Arbeitsgruppe DIOXIN (BGA) 1993

| Wirkungspfad                                     |                                     | Nutzung                                  | Wert [ng I-TEQ/kg TM] |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|
| Maßnahmenwerte                                   | Boden-Mensch                        | Kinderspielflächen                       | 100                   |
|                                                  |                                     | Wohngebiete                              | 1 000                 |
|                                                  |                                     | Park- und Freizeitanlagen                | 1 000                 |
|                                                  |                                     | Industrie- und Gewerbegrundstücke        | 10 000                |
| Richtwert für nähere Prüfung                     | Boden-Nutzpflanze<br>Boden-Nutztier | Landwirtschaftliche/gärtnerische Nutzung | 5 - 40                |
| Richtwert für Einschränkung bestimmter Nutzungen |                                     |                                          | > 40                  |

können die Folge sein. Andere mögliche Dioxinquellen sind Aschen, die im Auslauf von Hühnern verstreut wurden, verunreinigte Futtermittel oder PCB-haltige Anstriche von Futtersilos [LUA 1995; MLR 2005].

Untersuchungen von Milchproben aus dem Raum Kehl im Jahr 2004 ergaben keine Überschreitung des PCDD/F-Höchstgehalts (3 pg/g Fett; 1 pg = 0,000 000 000 001 g). In Hühnereiern aus Betrieben mit Freilandhaltung wurden jedoch mehrmals Überschreitungen registriert, obwohl der Boden der Auslaufflächen PCDD/F-Gehalte unter 5 ng I-TEQ/kg aufwies. Die Dioxingehalte in Eiern sind somit auf die allgemeine ubiquitäre Hintergrundbelastung und auf betriebsspezifische Parameter zurückzuführen.

Die Untersuchungen zeigten auch, dass es bei der Freilandhaltung von Legehennen in einem Ballungsraum möglich ist, die zulässigen Höchstgehalte einzuhalten [CVUA 2005, 2006].

Nach einer Aussage des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) besteht keine Gesundheitsgefahr beim gelegentlichen Verzehr von Eiern, in denen die zulässigen Höchstgehalte bei PCDD/F nur wenig überschritten werden [MLR 2005; BfR 2010].

#### Exkurs Toxizitätsäquivalente

PCDD/F treten als Gemische einer Vielzahl verschiedener Einzelverbindungen auf, die sich in ihrer Toxizität unterscheiden. Um das Gefährdungspotenzial von PCDD/F-Gemischen besser abschätzen zu können, wurde das System der Toxizitätsäquivalente (TEQ) entwickelt.

Die Toxizität einer Einzelverbindung wird dabei durch den Toxizitätsäquivalenzfaktor (TEF) ausgedrückt. Der TEF gibt die Toxizität einer Einzelverbindung im Verhältnis zur Toxizität des „Seveso-Dioxins“ (2,3,7,8 Tetrachlordibenzodioxin) an. Das 1976 bei der Seveso-Katastrophe ausgetretene Dioxin gilt als giftigste PCDD/F-Verbindung, der ein TEF von 1 zugeordnet wird. Die anderen Verbindungen erhalten entsprechend ihrer geringeren Giftigkeit kleinere Faktoren. Sie reichen von 0,0001 bis 1. Eine Verbindung mit einem TEF von 0,5 wird halb so toxisch wie das „Seveso-Dioxin“ eingestuft.

Die TEF werden bei neueren Erkenntnissen aktualisiert. Daher gibt es verschiedene Listen dieser Faktoren, was beim Vergleich von Daten berücksichtigt werden muss. Am häufigsten wird in rechtlichen Regelungen im Umweltbereich die I-TEF-Liste von 1988 verwendet (I-TEF, auch TEF nach NATO/CCMS).

Eine Weiterentwicklung dieser Liste stellen die von der WHO aufgestellten TEF-Werte dar. In dieses TEF-Konzept sind die 12 dioxinähnlichen PCB (dl-PCB) einbezogen worden, die wie die PCDD/F toxisch wirken und zur Gesamtbelastung durch dioxinähnliche Verbindungen beitragen. In den rechtlichen Regelungen für Lebensmittel werden die WHO-Faktoren zugrunde gelegt [UBA 2012c].

Über den Gehalt und den TEF einer Einzelverbindung wird das Toxizitätsäquivalent (TEQ) errechnet. Die Summe der TEQ aller Einzelverbindungen (Toxizitätsäquivalentsumme) ergibt die Gesamtoxizität des Gemischs.



## 4.3 Stickstoff und Pflanzenschutzmittel

### 4.3.1 Stickstoff - Quellen und Bedeutung

Stickstoff, Kalium und Phosphor gehören zu den Hauptnährstoffen für Pflanzen und Bodenorganismen. Der Stickstoffbedarf der Pflanzen übersteigt deutlich den Bedarf an anderen Nährstoffen. In Gesteinen und Mineralen ist Stickstoff nur ausnahmsweise und nur in sehr geringen Mengen enthalten. Die Vegetation ist daher auf atmosphärischen Stickstoff und auf den Stickstoffvorrat in der organischen Bodensubstanz angewiesen. Aus dem Stickstoff der Atmosphäre werden Stickoxide z.B. bei Blitzentladungen und Verbrennungsvorgängen (u.a. im Straßenverkehr) gebildet. Sie gelangen mit den Niederschlägen in die Böden (Kap. 4.1.3).

Aus der organischen Substanz wird Stickstoff durch Bodenmikroorganismen als Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) freigesetzt. In gut durchlüfteten Böden wird Ammonium in Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) umgewandelt. Der mikrobielle Prozess ist die Mineralisation, Ammonium und Nitrat bilden den Mineralstickstoff ( $\text{N}_{\text{min}}$ ), den Pflanzen über die Wurzeln aufnehmen können. Einen schematischen Überblick über den Stickstoffkreislauf im Boden gibt Abb. 4.3.1-1.

Mit zunehmender Bodentemperatur, steigendem Humusgehalt und verbesserter Durchlüftung des Bodens nehmen die

Aktivität der Bodenorganismen und die Stickstoffmineralisation zu [ROWELL 1997]. Voraussetzung für die Freisetzung von Mineralstickstoff ist ein enges C/N-Verhältnis (Exkurs: C/N-Verhältnis; Kap. 4.3.1).

Knöllchenbakterien können Luftstickstoff biologisch fixieren. Sie leben z.T. in Symbiose mit bestimmten Pflanzenarten (z.B. Leguminosen, Erlen; Abb. 4.3.1-2).



Abb. 4.3.1-2: Knöllchenbakterien an der Wurzel der Zaunwicke (*Vicia sepium*); Quelle: Wikipedia Enzyklopädie, Bildautor Frank Vincentz, 2007

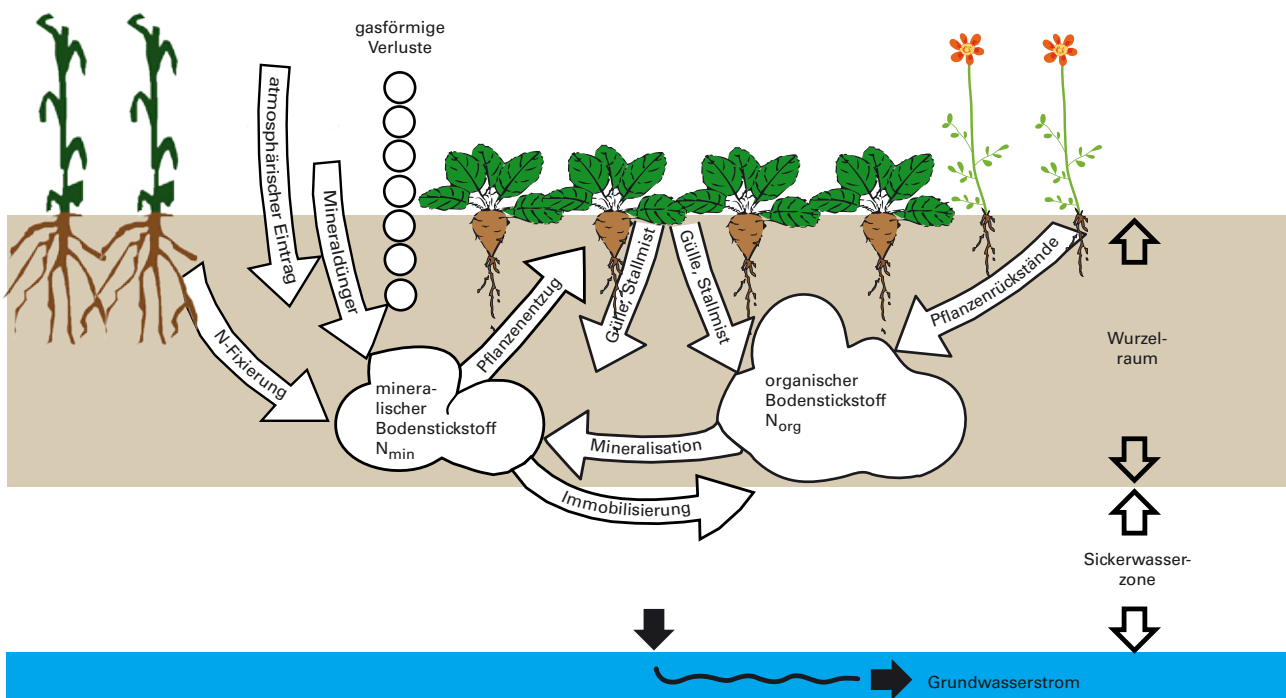


Abb. 4.3.1-1: Stickstoffkreislauf im Boden; Quelle: Frede, Dabbert 1998

Die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion nutzt diese Stickstoffquellen. Um optimale Ernteerträge zu erzielen, muss der Stickstoffbedarf der Kulturpflanzen zusätzlich mit organischen oder mineralischen Düngemitteln gedeckt werden. Der vermehrte Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern ist einer der Hauptgründe für die hohe Steigerung der Ernteerträge in den vergangenen 50 Jahren.

Eine Stickstoffübersorgung ist aus pflanzenbaulichen Gründen sowie zum Schutz des Grundwassers zu vermeiden. Erfolgt sie zur Sicherung des betrieblichen Ertrags, können sich dennoch Defizite einstellen. Eine zu hohe Stickstoffversorgung ist mit starkem vegetativem Wachstum verbunden. Mais wird anfälliger für Trockenstress. Bei Weizen und Gerste wird die Entwicklung von Schadpilzen (z.B. Getreiderost, Blatt- und Ährenmehltau) gefördert. Getreide kann aufgrund schlechter Standfestigkeit der Halme „ins Lager gehen“, was bis zum vollständigen Ernteausfall führen kann (Abb. 4.3.1-3).



Abb. 4.3.1-3: Beeinträchtigung der Standfestigkeit von Getreide bei zu hoher Stickstoffdüngung; Bild: R. Olschewski

Während Ammonium stark an die Bodenbestandteile sorbiert wird, verbleibt Nitrat gelöst im Bodenwasser. Bei zu hoher Stickstoffversorgung besteht ein erhöhtes Auswaschungsrisiko, was vielerorts zu erhöhten Nitratkonzentrationen im Grundwasser geführt hat. Wird der Grenzwert von 50 mg Nitrat/l überschritten, darf Grundwasser nicht unmittelbar für die Trinkwasserversorgung verwendet werden [TrinkwV 2011].

#### Exkurs: C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis bezieht sich auf das Verhältnis von organisch gebundenem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und insgesamt vorhandenen Stickstoff ( $N_t$ ). Es gibt u.a. Hinweise auf den für Kulturpflanzen verfügbaren Mineralstickstoff.

Bei einem C/N-Verhältnis  $< 20$  steht den Kulturpflanzen i.d.R. Mineralstickstoff aus der organischen Substanz zur Verfügung. Bei einem weiten C/N-Verhältnis  $> 20$  wird Mineralstickstoff weitgehend von Bodenmikroorganismen zum Aufbau zelleigener Substanz verbraucht und immobilisiert.

Enthält das in den Boden eingearbeitete organische Material ein weites C/N-Verhältnis (z.B. Getreidestroh,  $C/N \sim 100$ ), muss zur Ertragssicherung eine Stickstoff-Ausgleichsdüngung erfolgen. Pflanzenmaterial mit einem engen C/N-Verhältnis (z.B. Gemüse), kann dagegen durch Mineralisation zur Stickstoffübersorgung führen, wenn der Einsatz von Stickstoffdüngern nicht verringert wird [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002].

### 4.3.2 Einfluss des Bodens auf die Nitrat- auswaschung

Das Bodenwasser ist der Zwischenspeicher für Nitrat. An Standorten mit positiver Klimatischer Wasserbilanz und jährlicher Grundwasserneubildung (Kap. 2.4) besteht beim Austausch des Bodenwassers im Jahresverlauf das Risiko der Nitrat-Auswaschung.

In der Ortenauer Rheinebene trägt Regenwasser hauptsächlich im Winterhalbjahr zur Grundwasserneubildung bei. Übersteigt je nach Boden der Mineralstickstoff-Vorrat ( $N_{\min}$ ) in 0 - 90 cm Tiefe 45 - 90 kg N/ha, wird Nitrat zunehmend in das Grundwasser verlagert [SchALVO 2001].

Unabhängig von bewirtschaftungsbedingten Einflüssen ist das Auswaschungsrisiko am größten, wenn die jährliche Grundwasserneubildungsrate die im Wurzelraum des Bodens für Pflanzen nutzbare Wassermenge ( $nFK_{We}$ ) deutlich übersteigt [DBG 1992].

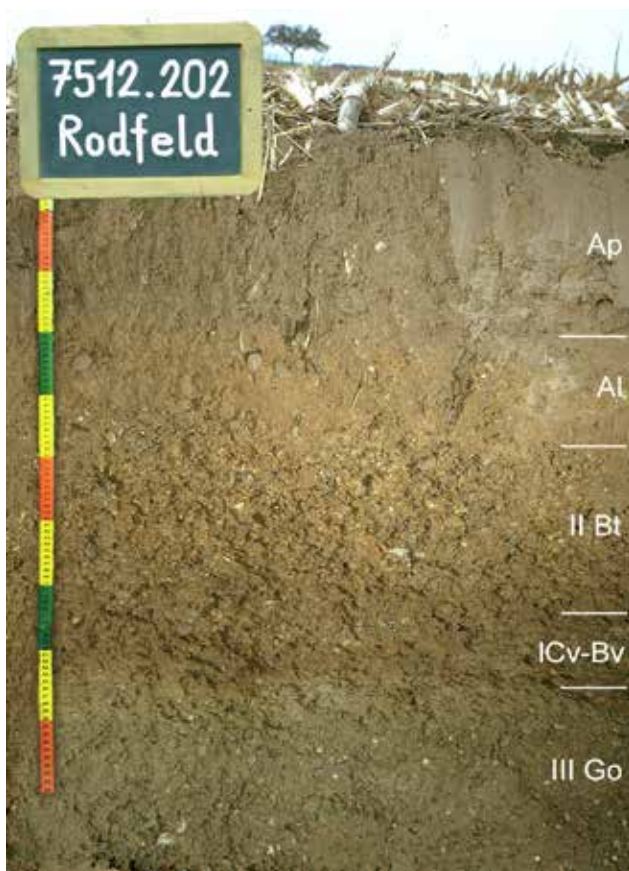
Dies ist u. a. der Fall in

- sandigen,
- flachgründigen (< 60 cm Tiefe),
- im Unterboden eingeschränkt durchwurzelbaren

Böden. Sie werden als auswaschungsgefährdet eingestuft (A-Böden nach SchALVO 2001).

Abb. 4.3.2-1 zeigt eine mäßig tiefe Parabraunerde auf Gemarkung Ichenheim. In dem sandigen, teilweise sehr stark kiesigen Boden reicht der effektive Wurzelraum ( $We$ ) bis in 85 cm Tiefe. Je  $m^2$  können in dem Bodenvolumen bis zu 100 l Wasser pflanzenverfügbar gespeichert werden ( $nFK_{We} = 99,7 \text{ l/m}^2$ ).

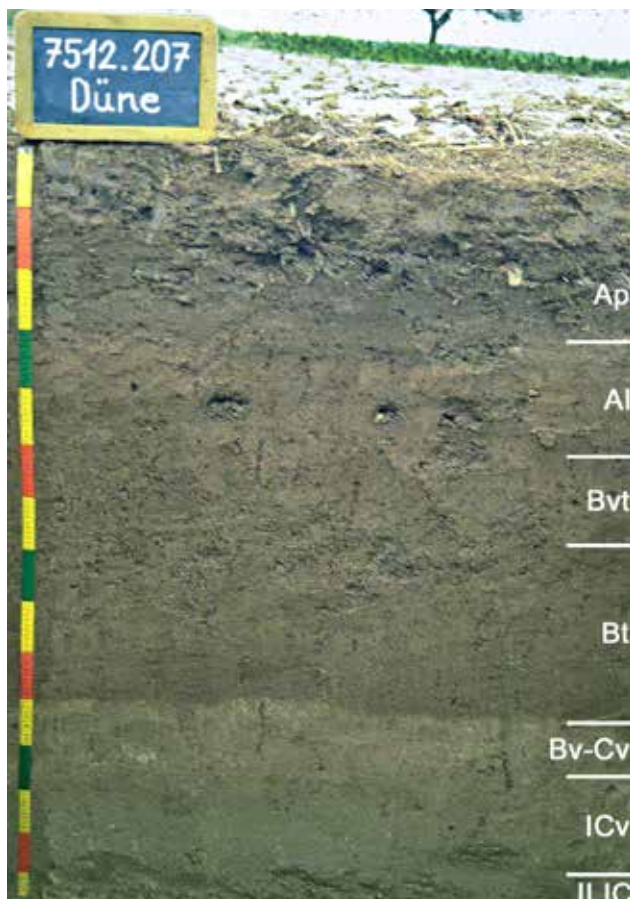
Bei einer Grundwasserneubildung in diesem Bereich der Ortenauer Rheinebene von etwa 150 mm/a (= 150  $l/m^2$ ) wird die für Pflanzen nutzbar zwischengespeicherte Was-



| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | Organische Substanz        |                                  |      |
|---------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------|
|               |                                 | C <sub>org</sub><br>[mg/g] | N <sub>t</sub><br>[mg/kg]        | C/N  |
| - 29          | 6,2                             | 11,6                       | 32                               | 11   |
| - 38          | 6,3                             | 6,4                        | 15                               | 8    |
| - 73          | 6,3                             | 4,7                        | 9                                | 9    |
| - 85          | 7,1                             | 2,9                        | 6                                | 7    |
| - 100         | 7,3                             | 0,6                        | 2                                | 6    |
| Tiefe<br>[cm] | Bodenart                        | Grobboden<br>[Gew.-%]      | Porenraum<br>[l/m <sup>2</sup> ] |      |
|               |                                 |                            | LK                               | nFK  |
| - 29          | Slu                             | 10                         | 20,3                             | 60,9 |
| - 38          | Slu                             | 8                          | 10,8                             | 16,2 |
| - 73          | St3                             | 69                         | 12,6                             | 16,8 |
| - 85          | St3                             | 69                         | 4,3                              | 5,8  |
| - 100         | Ss                              | 75                         | $\Sigma nFK_{We}$                | 99,7 |

Abb. 4.3.2-1: Mäßig tiefe Parabraunerde aus Sandlöss (Decklage) über Niederterrassenschotter, Gewinn Rodfeld, Gemarkung Ichenheim; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB





| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | Organische Substanz        |                           |     |
|---------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----|
|               |                                 | C <sub>org</sub><br>[mg/g] | N <sub>t</sub><br>[mg/kg] | C/N |
| - 30          | 6,7                             | 12,8                       | 1,5                       | 9   |
| - 45          | 6,8                             | 6,4                        | 0,9                       | 7   |
| - 65          | 6,9                             | 5,2                        | 0,7                       | 7   |
| - 98          | 7,2                             | 4,7                        | 0,7                       | 7   |
| - 115         | 7,6                             | 2,3                        | 0,4                       | 6   |
| - 142         | 7,5                             | 1,7                        | 0,3                       | 6   |

| Tiefe<br>[cm] | Bodenart | Grobboden<br>[Gew.-%] | Porenraum<br>[l/m <sup>2</sup> ] |       |
|---------------|----------|-----------------------|----------------------------------|-------|
|               |          |                       | LK                               | nFK   |
| - 30          | Ls2      | 1                     | 75,0                             | 84,0  |
| - 45          | Ls2      | 0                     | 21,0                             | 25,5  |
| - 65          | Lt2      | 0                     | 16,0                             | 14,0  |
| - 98          | Lt3      | 0                     | 23,1                             | 33,0  |
| - 115         | Slu      | 0                     | 17,0                             | 39,1  |
| - 142         | Su3      | 2                     | Σ nFK <sub>We</sub>              | 195,6 |

Abb. 4.3.2-2: Parabraunerde aus wärmzeitlichem Sandlöss über sandig-kiesigem Niederterrassenschotter, Gewinn Muttershöfen, Gemarkung Meißenheim; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB

sermenge 1,5-mal im Jahr ausgetauscht. Verglichen damit ist das Nitratauswaschungsrisiko an dem Standort auf Gemarkung Meißenheim (Abb. 4.3.2-2) geringer.

In der Parabraunerde wird wegen des kiesfreien und lehmigen Bodenmaterials deutlich mehr pflanzenverfügbares Wasser gespeichert. Der Wurzelraum reicht tiefer in den Unterboden (bis 115 cm). Je m<sup>2</sup> können bis zu 200 l Wasser pflanzenverfügbar gespeichert werden (nFK<sub>We</sub> = 195,6 l/m<sup>2</sup>).

Bei einer Grundwasserneubildung von etwa 150 l/a wird die für Pflanzen nutzbar gespeicherte Wassermenge nur 0,8-mal im Jahr ausgetauscht. Gegenüber dem Ichenheimer Standort ist das Auswaschungsrisiko trotz der wesentlich größeren Menge an pflanzenverfügbar gespeichertem Wasser nur etwa halb so hoch.

### 4.3.3 Einfluss der Bodenbewirtschaftung auf die Nitratauswaschung

Das Nitratauswaschungsrisiko hängt ab von

- der Art, Umfang und dem Zeitpunkt der Stickstoffdüngung,
- der Intensität der Bodenbearbeitung,
- den angebauten Kulturpflanzenarten,
- der Größe des Viehbestands.

Lockernde und wendende Bodenbearbeitung fördert die Stickstofffreisetzung aus Humus und Pflanzenresten. Mit der verbesserten Sauerstoffversorgung wird die Aktivität der Bodenmikroorganismen stimuliert. Je häufiger der Boden im Jahresverlauf bearbeitet wird, umso mehr Stickstoff wird mineralisiert. Der Umbruch von Grünland in Acker ist in den ersten Folgejahren mit einem hohen Auswaschungsrisiko verbunden [ROWELL 1997].

Auf vegetationsfreien Ackerflächen (Schwarzbrache) ist das Auswaschungsrisiko am höchsten, weil nach der Ernte noch im Boden vorhandener Mineralstickstoff nicht mehr von Pflanzen aufgenommen wird und die Niederschläge zur Grundwasserneubildung führen. Durch Anbau geeigneter Zwischenfrüchte kann das Auswaschungsrisiko wirksam gemindert werden (z.B. Ölrettich, Senf) (Abb. 4.3.3-1).



Abb. 4.3.3-1: Überwiegender Anbau von Senf im Herbst als Zwischenfrucht; Bild: R. Olschewski

Auch der Anbau von Kulturarten mit einem der frühen Entwicklungsphase einer Schwarzbrache nahekommenden Pflanzenbestand ist mit einem erhöhten Auswaschungsrisiko verbunden. Dazu zählen Sonderkulturen wie Spargel Gemüse, Tabak oder Erdbeeren. Die Bestände benötigen im Frühjahr geraume Zeit bis das Wurzelwerk den Boden erschlossen hat, um vorhandenen Mineralstickstoff aufzunehmen (Abb. 4.3.3-2).

Ein hohes Auswaschungsrisiko besteht bei landwirtschaftlichen Betrieben mit großen Viehbeständen, bei denen die Stickstoffmenge der Wirtschaftsdünger (Stallmist, Gülle) den Stickstoffbedarf der auf der Betriebsfläche angebauten Kulturpflanzen übersteigt.



Abb. 4.3.3-2: Der Anbau von Spargel ähnelt im frühen Entwicklungsstadium der Schwarzbrache, Gemarkung Ringsheim; Bild: R. Olschewski

In der Vergangenheit waren unzureichende Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger (z.B. Güllegruben) häufige Ursache eines erhöhten Auswaschungsrisikos. Dünger wurde deswegen ohne pflanzenbauliche Notwendigkeit ausgebracht.

Die Forderung der EU-Kommission von Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger über mindestens sechs Monate wurde in Baden-Württemberg im November 2005 umgesetzt [VAwS 2005]. Die Übergangsfrist zur Anpassung der Lagerkapazität für sechs Monate ist am 31.12.2008 ausgelaufen.

Mit der Neufassung der Düngeverordnung seit 2007 sind darüber hinaus Spielräume bei der Ausbringung von Düngemitteln eingeschränkt worden (Kap. A.4.3.1) [DüV 2007].

#### 4.3.4 Nitrat im Grundwasser

Grundwasser mit einem Nitratgehalt über dem Grenzwert von 50 mg/l darf aus hygienisch-toxikologischen Gründen nicht als Trinkwasser genutzt werden [TrinkwV 2011]. Im menschlichen Organismus kann Nitrat in Nitrit umgewandelt werden und die Sauerstoffversorgung von Organen und des Gewebes beeinträchtigen. Berichtet wurden unspezifische Beschwerden bis hin zur Säuglingssterblichkeit. Nitrit kann auch mit Aminen aus dem menschlichen Körper oder aus Lebensmitteln reagieren und krebserregende Nitrosamine bilden [KÖLLE 2001; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002].

Abb. 4.3.4-1 gibt einen Überblick über die Nitratgehalte im Grund- und Trinkwasser des Ortenaukreises. In den Trinkwasserschutzgebieten im Schwarzwald sind keine auffälligen Nitratkonzentrationen zu beobachten ( $< 10 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ). Der jahrzehntelange Eintrag von Stickstoffverbindungen über die Atmosphäre war hinsichtlich der Trinkwassernutzung offensichtlich unproblematisch, obwohl der Stickstoffbedarf der Forstökosysteme auch heute immer noch überschritten wird (Kap. 4.4.3.2).

In der Rheinebene und in der Vorbergzone hat der landwirtschaftliche Düngereinsatz dagegen zu Nitratkonzentrationen im Grundwasser geführt, die in einigen Gebieten den Grenzwert der Trinkwasserverordnung deutlich übersteigen.

Auf den Gemarkungsflächen der Gemeinden Neuried und Meißenheim werden seit Jahren Nitratgehalte über 50 mg/l gemessen. Ein durchgängig abnehmender Trend von Nitrat im Grundwasser ist nicht zu erkennen (Abb. 4.3.4-2). Drei kleinere Wasserschutzgebiete nahe Altenheim, Dundenheim und Ichenheim wurden deshalb aufgegeben. Bei Ettenheimweiler und Durbach wurden zwei kleinere Wassergewinnungen ebenfalls eingestellt.

Grundwasser mit Nitratkonzentrationen zwischen 25 - 40 mg/l wird aktuell in Wasserschutzgebieten bei Achern und Kippenheim gewonnen. Die betroffenen Wasserschutzgebiete werden nach der SchALVO 2001 als Nitratproblemgebiete eingestuft. Gleiches gilt für das Wasserschutzgebiet „Friesenheim-Schämigraben“, wo Nitratkonzentrationen im Grundwasser  $> 25 \text{ mg/l}$

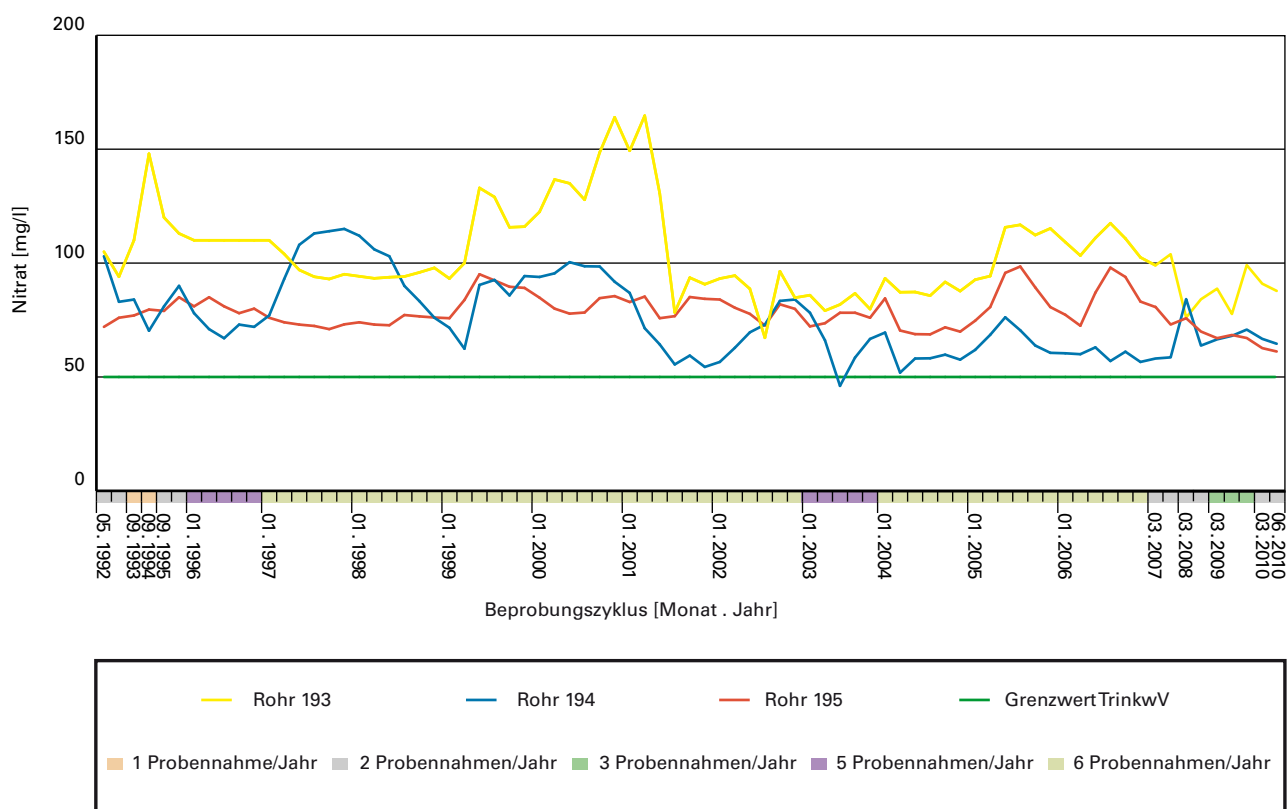
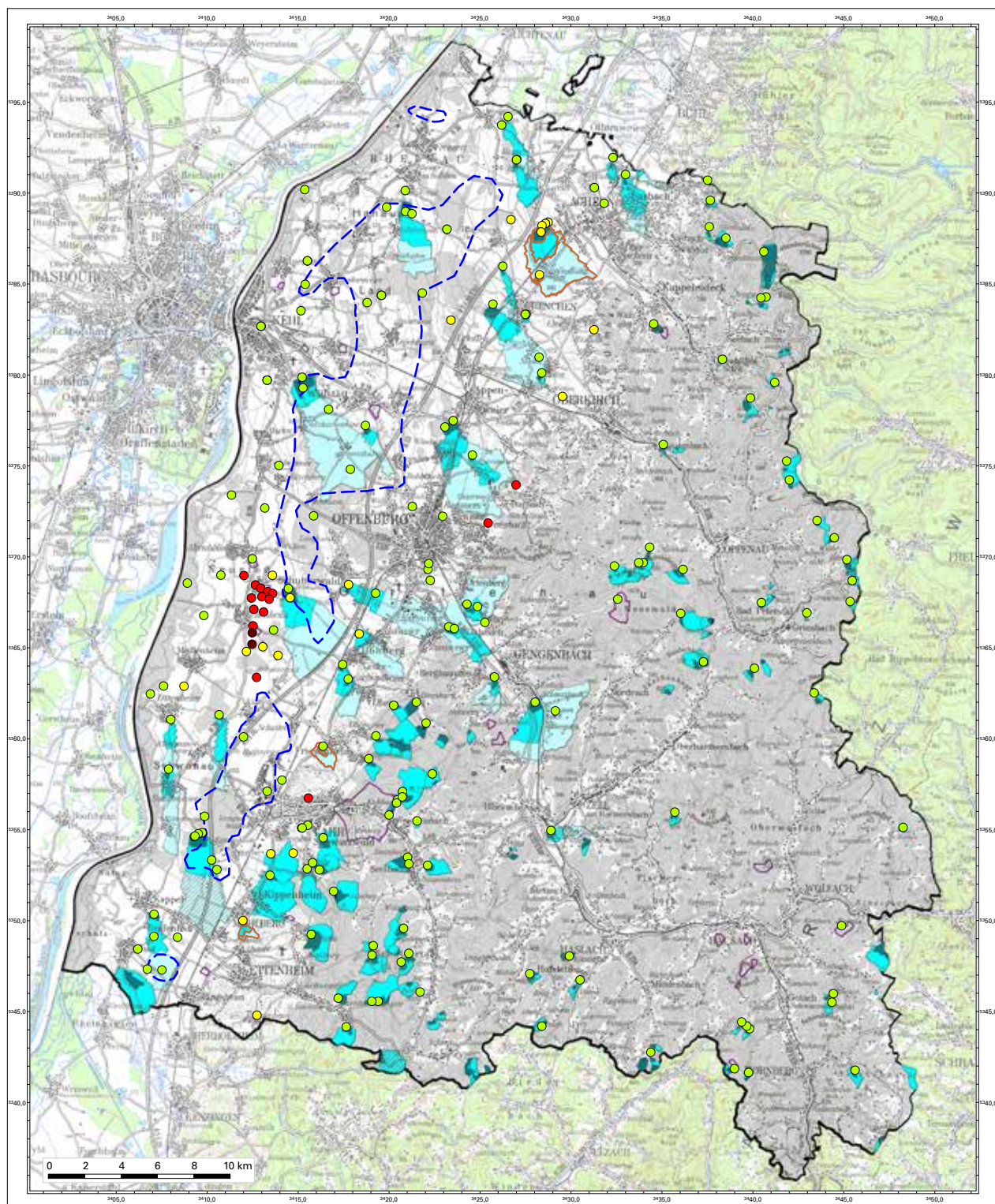


Abb. 4.3.4-1: Verlauf der Nitratkonzentrationen in drei Grundwassermessstellen südöstlich des ehemaligen WSG „Neuried-Dundenheim“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





# **Wasserschutzgebiete und Nitratgehalte** im oberen Grundwasserleiter (bis 30 m) im Ortenaukreis

## **Wasserschutzgebietszone**

| Zone          | Status                   |
|---------------|--------------------------|
| Zone I        | festgesetzt              |
| Zone II/IIA   | im Verfahren/            |
| Zone II/IIIB  | fachtechnisch abgegrenzt |
| Zone III/IIIA | aufgehoben/              |
| Zone III/IIIB | Verfahren eingestellt    |

## **Nitratanalyse**

| Nitratgehalt (mg/l)      |
|--------------------------|
| ≤ 25                     |
| > 25 - 50                |
| > 50 - 100               |
| > 100                    |
| Nitratproblemgebiet      |
| Grundwasser - nitratfrei |

— Landkreisgrenze

Kartengrundlage:  
Wasserschutzgebietszonen aus dem Räumlichen Informations- und Planungssystem  
Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200)  
© Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

Kartographie:  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 4.3.4-2: Wasserschutzgebiete und Nitratgehalte im Grundwasser, Ortenaukreis; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



auftreten, da dem Brunnen bei ununterbrochenem Pumpenbetrieb nitratreiches Grundwasser aus der Vorbergzone zuströmt. In Nitratproblemgebieten gelten nach der SchALVO allgemeine und besondere Schutzbestimmungen, die die ordnungsgemäße Landwirtschaft betreffen (Kap. A.4.3.1). Im Fall behördlicher Auflagen werden Ausgleichszahlungen gewährt.

Die Gemeinde Neuried gewinnt ihr Grundwasser seit 2001 aus dem Wasserschutzgebiet „Neuried-Dundenheimer Wald“, wo ein sauerstoffarmes bis sauerstofffreies, reduzierendes Milieu im Grundwasserleiter herrscht ( $< 5 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ). Bakterien veratmen unter diesen Bedingungen Nitrat und setzen gasförmig entweichenden Stickstoff frei (Nitratatmung, Denitrifikation). Der Nitratabbau schreitet soweit fort bis kein Nitrat mehr nachweisbar ist. In Böden und Grundwasserleitern werden dann Eisenoxide stärker gelöst und Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) mit dem Grundwasserstrom verlagert.

Abb. 4.3.4-2 zeigt die Gebiete im Ortenaukreis, wo aufgrund des nitratarmen bis nitratfreien Grundwassers ein reduzierendes Milieu in den Grundwasserleitern anzunehmen ist [MEINKEN 1999].

Die Gebiete erstrecken sich über große Bereiche des Hanauer Lands, zwischen Kehl, Willstätt und Offenburg und entlang der Schutter nach Süden bis Lahr. In Entwässerungsgräben sind oft rostrote Ausfällungen von Eisenoxiden zu sehen, wenn gelöstes Eisen mit Luftsauerstoff in Kontakt kommt (Abb. 4.3.4-3).

In nitratarmen bis nitratfreien Grundwässern südwestlich von Lahr könnte die positive Korrelation von gelöstem Sulfat mit Eisen auf die Gegenwart von *Thiobacillus denitrificans* hinweisen. Das Bakterium gewinnt durch die Oxidation schwefelhaltiger Verbindungen wie Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) Energie und reduziert Nitrat zu Stickstoff. Das Vorliegen von Pyrit wird in den Resten des Niedermoors nahe Nonnenweiler südwestlich von Lahr sowie in den dortigen Auenböden vermutet [MEINKEN 1999]. Die Unterböden enthalten oft humose Schichten, die wahrscheinlich Pyrit führen (Abb. 2.3-1).



Abb. 4.3.4-3: Eisenausfällungen in einem Entwässerungsgraben nördlich von Kippenheimweiler; Bild: R. Olschewski

#### 4.3.5 Pflanzenschutzmittel - Allgemeines

In Deutschland werden je nach Witterung jährlich 35 000 t Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe ausgebracht. Der größte Teil (ca. 45 %) dient der Unkrautbekämpfung (Herbizide), gefolgt von Fungiziden (27 %) und Insektiziden (17 %). Etwa 80 % der abgesetzten Wirkstoffmenge kommt in der Landwirtschaft und im Erwerbsgartenbau zum Einsatz. Herbizide werden auch im Bereich von Siedlungs- und Verkehrsflächen eingesetzt.

In der Forstwirtschaft werden Pflanzenschutzmittel (PSM) nur punktuell angewendet, z.B. Insektizide an geschlagenem Holz (Borkenkäfer) sowie Fungizide und Herbizide in Baumschulen [AKKAN ET AL. 2003].

Rückstandsprobleme bei Nutzpflanzen ergeben sich, wenn Anwendungsvorschriften nicht beachtet werden, beispielsweise bei zu hohen Einsatzmengen oder bei Nichteinhaltung der für den Wirkstoffabbau erforderlichen Wartezeiten zwischen Einsatz- und Erntetermin.

Allgemein sind Rückstandsprobleme bisher ausschließlich für PSM-Wirkstoffe von Fungiziden und Insektizi-

den sowie ihre Abbauprodukte bekannt geworden, nicht für Herbizid-Wirkstoffe [HAIDER, SCHÄFFER 2000; AKKAN ET AL. 2003].

Forschungsergebnisse zeigen, dass bei Einhaltung der Aufwandsmengen von keinen Rückstandsproblemen in Nahrungs- und Futterpflanzen durch Aufnahme von PSM-Wirkstoffen oder Abbauprodukten aus dem Boden auszu-gehen ist.

#### 4.3.6 Verhalten von PSM im Boden

Beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln gelangen Wirkstoffe auf und in den Boden, entweder bestimmungsge-mäß, wie etwa bei „bodennaher“ Anwendung von Her- biziden oder unbeabsichtigt durch Verdunsten und Ab- drift während des Ausbringens bzw. durch Abwaschen von den Pflanzen bei nachfolgendem Niederschlag.

Das Verhalten von PSM-Wirkstoffen im Boden wird von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Substan- zen und von der Beschaffenheit des Bodens bestimmt. Bezüglich der Mobilität der PSM-Wirkstoffe sind die Wasserlöslichkeit und Neigung zur Sorption an die orga- nische Bodensubstanz maßgeblich. Fungizide und insek- tizide Wirkstoffe haben meist eine geringere Wasserlös- lichkeit als die von Herbiziden.

Die Sorptionsneigung der Wirkstoffe an die organi- sche Substanz wird mit  $K_{oc}$ -Werten beschrieben. Hohe  $K_{oc}$ -Werte weisen auf starke Sorption, geringe auf das Risiko einer Verlagerung in das Grundwasser hin (Tab. A.4.1.1-4).

Die Sorption von PSM-Wirkstoffen wird im Boden we- sentlich vom Humusgehalt bestimmt. Die Mehrzahl der Wirkstoffe und ihre Abbauprodukte (Metabolite) verbleiben deshalb in der Krume landwirtschaftlicher Nutzflächen. Der Humusgehalt beeinflusst das Verhal- ten von PSM- Wirkstoffen auch indirekt. Je höher der Humusgehalt, desto größer ist die Population und die Aktivität der Bodenmikroorganismen. Zum Abbau von Wirkstoffen tragen vorwiegend auf den Oberflächen von Bodenbestandteilen lebende Bodenbakterien bei. We- gen ihrer Größe (0,8 - 3  $\mu\text{m}$ ) können Bodenbakterien

Poren mit Durchmessern  $< 2 \mu\text{m}$  schwer besiedeln. Des- halb treten die Einzeller nicht gleichmäßig im Boden- raum verteilt auf [BLUME 1990; HAIDER, SCHÄFFER 2000].

In tieferen Mineralbodenschichten nimmt mit dem Hu- mus der Mikroorganismenbesatz i.d.R. ab. Zur Tiefe verlagerte PSM-Wirkstoffe werden verzögert abgebaut und können leichter in das Grundwasser gelangen.

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann die Arten- zusammensetzung und die Aktivität von Bodenorganis- men verändern. In Einzelfällen können Fungizide Bo- denpilze beeinträchtigen und den Streuabbau hemmen. Insektizide beeinträchtigen die Bodenfauna. Moderne PSM-Wirkstoffe entfalten aufgrund ihrer selektiven Wir- kung weniger Nebenwirkungen als ältere Wirkstoffe [HAIDER, SCHÄFFER 2000; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002].

Der Einsatz von kupferhaltigen Fungiziden z.B. in Reb- anlagen kann über die Jahre zu einer Kupferanreiche- rung in den Böden führen (Kap. 4.1.9 und Kap. 4.2.7).

#### 4.3.7 Anwendung von PSM

Der Eintrag von PSM-Wirkstoffen in den Boden wird von der aufgewendeten Menge je Hektar, der Anwendungs- häufigkeit und der Fläche des Kulturpflanzenanbaus be- stimmt. Darüber hinaus hat die einzelbetrieblich verwen- dete Applikationstechnik eine Bedeutung (Abb. 4.3.7-1).



Abb. 4.3.7-1: Tunnelspritzgeräte reduzieren im Weinbau PSM-Aufwandmengen; Quelle: LIPCO GmbH, Land- und Kommunaltechnik, Sasbach; [www.lipco.com](http://www.lipco.com)



Der Hauptanwendungsbereich von Herbiziden liegt im Ackerbau. Dort werden sie i.d.R. einmal je Vegetationsperiode eingesetzt, dafür aber auf fast allen Ackerflächen. Fungizide werden am häufigsten im Weinbau- und Kernobstbau eingesetzt. Während der Vegetationsperiode sind mehr als 10 Applikationen üblich. Im Erwerbsgemüsebau bei Freilandkulturen wie Kopfsalat werden Fungizide wiederholt ausgebracht.

Insektizide werden mit 2 - 5 Spritzungen am häufigsten im Obstbau und bei Gemüsekulturen verwendet. Im Ackerbau werden sie seltener angewendet. Ein Indikator für die tatsächliche Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft ist der „Normierte Behandlungsindex“. In den Jahren 1999 und 2000 hat die ehemalige Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) begonnen, ein „Netzwerk zur Ermittlung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in unterschiedlichen, landwirtschaftlich relevanten Naturräumen Deutschlands (NEPTUN)“ einzurichten.

Dazu wurde bundesweit der tatsächliche Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ausgewählter Betriebe erhoben und getrennt nach Anbauregion und Kultur ausgewertet. Der aus diesen Daten abgeleitete Behandlungsindex stellt die Anzahl aller PSM-Anwendungen auf einer betrieblichen Fläche bzw. einer Kultur dar [BBA 2002 ff].

Der Ortenaukreis hat einen hohen Anteil intensiv genutzter landwirtschaftlicher Flächen. Obwohl sich der Umfang der gesamten Nutzflächen zwischen 1979 und 2005 kaum verändert hat, haben Obst- und Rebanlagen stark zugenommen (Kap. 2.3). Zudem werden auf Ackerland vermehrt Sonderkulturen wie Spargel, Erdbeeren und Gemüse angebaut.

In der süddeutschen Klimaregion liegt der Behandlungsindex im Wein- und Obstbau bei ca. 12 PSM-Applikationen pro Vegetationsperiode, bei Gemüsearten zwischen 2,3 (Spinat) und 12,2 (Salat). Für Spargel und Erdbeeren wird der Behandlungsindex mit 7,85 bzw. 6,9 angegeben. Bei Getreide und Mais fallen die Behandlungsindizes mit etwa 3 bzw. 1 - 2 Anwendungen geringer aus. Verknüpft man die gesamte Anbaufläche einzelner Kulturarten mit den pflanzenspezifischen Behandlungs-

indizes, kann auf Landkreisebene abgeschätzt werden, in welchen Gemeinden PSM vermehrt eingesetzt werden.

Im Ortenaukreis sind dies hauptsächlich Gemeinden mit hohem Anteil an Obst- und Weinbauflächen, wie Achern, Oberkirch und Durbach (Abb. 4.3.7-2).

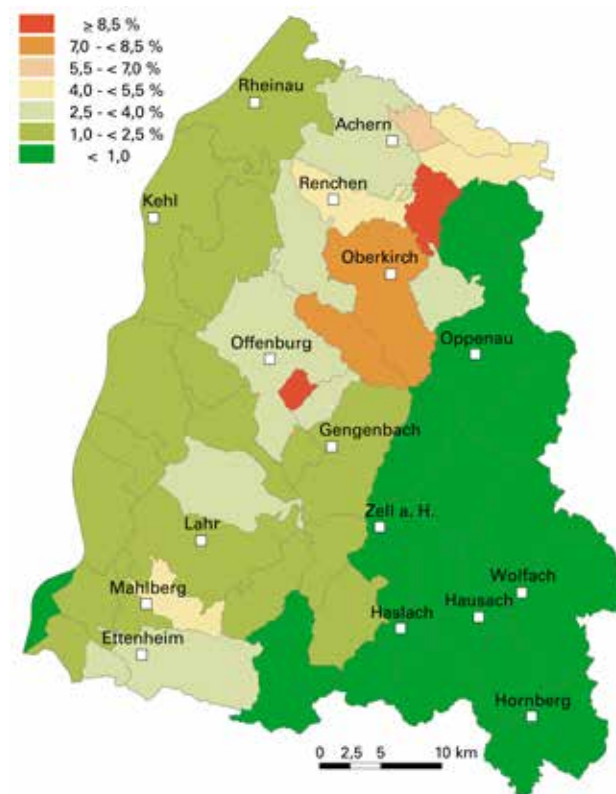


Abb. 4.3.7-2: Relative Einsatzintensität von Pflanzenschutzmitteln in den Gemeinden des Ortenaukreises; NEPTUN Erhebungen 2001 bis 2007, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2005

In den ackerbaulich geprägten Gemeindegebieten der Rheinebene werden weniger PSM angewendet. Besonders gering ist die Einsatzintensität wegen des vergleichsweise hohen Grünlandanteils in den Schwarzwaldgemeinden.

#### 4.3.8 Folgen des PSM-Einsatzes

PSM-Wirkstoffe und Abbauprodukte in den Böden sind im Hinblick auf das Grundwasser relevant. Waren vor Jahren in gefördertem Grundwasser noch Überschreitungen beim Herbizidwirkstoff Atrazin (Abbauprodukt: Desethylatrazin) festzustellen, so überschreiten aktuell die Konzentrationen dreier PSM-Abbauprodukte den Grenzwert der TrinkwV (1 µg/l):

- Chloridazon-Desphenyl, Abbauprodukt des Herbizidwirkstoffes Chloridazon (Rübenanbau)
- N,N-Dimethylsulfamid (DMS), Abbauprodukt des Fungizidwirkstoffes Tolyfluanid (Wein- und Obstbau, Kleingärten)
- 2,6-Dichlorbenzamid (DCBA), Abbauprodukt der Herbizidwirkstoffe Chlorthiamid und Dichlobenil (Wein- und Obstbau, Siedlungs- und Verkehrsflächen).

Die Abbauprodukte Chloridazon-Desphenyl und N,N-Dimethylsulfamid haben keine toxikologischen Eigenschaften [MLR 2006]. Konzentrationen > 1 µg/l sind nach Informationen des Umweltbundesamtes und der

obersten Trinkwasserüberwachungsbehörde des Landes gesundheitlich unbedenklich. Betroffene Wasserversorger wurden daher mit Ausnahmegenehmigung berechtigt, die Abgabe von Trinkwasser an die Kunden fortzusetzen. Tolyfluanid darf dennoch nicht mehr in Wasserschutzgebieten angewendet werden.

Vertrieb und Anwendung des PSM-Wirkstoffs Dichlobenil wurde 2004 endgültig verboten. Für Chlorthiamid war die Verlängerung der Zulassung bereits in den 1990er Jahren nicht mehr beantragt worden. Die Anwendung beider Wirkstoffe war in Wasserschutzgebieten schon früher verboten.

Abb. 4.3.8-1 zeigt den Rückgang der 2,6-Dichlorbenzamid-Konzentration im gefördertem Grundwasser des Wasserschutzgebiets „Sasbach-Mättich“. Lediglich im Wasserschutzgebiet „Ortenberg-Ohlsbach“ werden seit Jahren gleichbleibend hohe DCBA-Konzentrationen gefunden. Das Trinkwasser wird mit einer Aktivkohleanlage aufbereitet. Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung wird damit eingehalten.



Abb. 4.3.8-1: 2,6-Dichlorbenzamid-Konzentration im gefördertem Grundwasser des WSG „Sasbach-Mättich“;  
Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

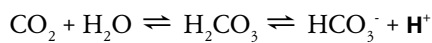
## 4.4 Bodenversauerung

### 4.4.1 Ursachen der Bodenversauerung

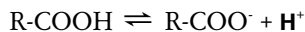
Bei der Bodenversauerung werden mehr Protonen im Boden freigesetzt als durch Pufferreaktionen neutralisiert werden.

Zu den natürlichen Quellen zählen:

- die Bildung und Dissoziation von Kohlensäure im Bodenwasser aus Kohlendioxid, das bei der Atmung von Pflanzenwurzeln und Bodenmikroorganismen freigesetzt wird



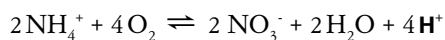
- die Bildung und Dissoziation organischer Säuren als Zwischenprodukt des Abbaus organischer Pflanzenrückstände



- die Abgabe von  $\text{H}^+$ -Ionen über die Pflanzenwurzeln bei der Nährstoffaufnahme.

Anthropogene Quellen von Wasserstoffionen sind [UBA 1996]:

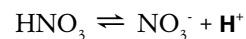
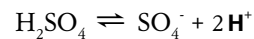
- der Einsatz von ammoniumhaltigen Stickstoffdüngern (Mineraldünger, Gülle). Bei der Umwandlung von Ammonium in Nitrat im Boden werden Protonen freigesetzt (Kap. 4.3.1)



- Ammoniakemissionen aus der Nutztierhaltung. Durch Umsetzung der ausgeschiedenen Stickstoffverbindungen kommt es zur Bildung von leicht flüchtigem Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). In Gebieten mit Nutztierhaltung können Einträge in den Boden zur Bodenversauerung beitragen. In der Atmosphäre wird Ammoniak zu Ammonium, in Böden wird es zum Nitrat umgewandelt

- Jahrhundertelanger Holzeinschlag und Streunutzung (Kap. 2.3). Der damit verbundene Nährstoffentzug ist heute noch in den Böden nachweisbar. Untersuchungen im Südschwarzwald und in den Vogesen haben ergeben, dass sich Waldböden, die in früheren Jahrhunderten nach Rodung als Acker oder Wiesen genutzt und gedüngt wurden, durch eine höhere Basensättigung (Kap. 4.4.2) auszeichnen als Waldböden, denen durch Weide-, Streu- und Holznutzung Nährstoffe entzogen wurden [BÜRGER 2004]

- Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen aus fossilen Brennstoffen. Sie werden in der Atmosphäre schrittweise zu Schwefelsäure und Salpetersäure umgesetzt („Saurer Regen“), die in den Wolkentröpfchen dissoziieren:



*(Der Schwefel stammt aus den Brennstoffen. Beim Stickstoff handelt es sich um oxidierten Luftstickstoff).*

Einen Überblick über die Entwicklung der Gesamtsäureinträge sowie der pH-Werte im Niederschlagswasser an der Depositionsmessfläche „Gengenbach“ (Bestand und Freiland) gibt der Exkurs „Versauerungsstatus an der Depositionsmessfläche Gengenbach“.

Die Kenngrößen in den Abbildungen 4.4.2-1, 4.4.2-3 bis 4.4.2-5 sowie A.4.4.2-1 und A.4.4.2-2 (pH-Wert, Kationenaustauschkapazität  $\text{KAK}_{\text{eff}}$ , Basensättigung) werden in Kap. A.4.4.5 erläutert.



### Exkurs: Versauerungsstatus an der Depositionsmessfläche Gengenbach

Seit 1983/84 werden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA), Freiburg, die mit den Niederschlägen verbundenen Gesamtsäureeinträge und die pH-Werte der Niederschläge gemessen. Die Depositionsmessfläche „Gengenbach“ ist eine von aktuell 23 Stationen in Baden-Württemberg (Abb. 4.4.1-1).

Einen Überblick über die Entwicklung der Gesamtsäureeinträge (Säure\_GD) und pH-Werte, der an der Messstation „Gengenbach“ gesammelten Niederschläge gibt Abb. 4.4.1-2. Aufgrund von Auskämmeffekten nasser Depositionen (z.B. Nebel) im Kronendach wurden im Fichtenbestand der Station bis etwa 2005/2006 niedrigere pH-Werte gemessen als auf der ebenfalls zu der Messstation gehörenden Freifläche, die zum Vergleich mit den Messungen im Bestand herangezogen wird (pH Freiland bzw. pH Fichte).

Seit Beginn der Aufzeichnungen haben die Gesamtsäureeinträge landesweit um 25 - 50 % abgenommen. Gleichzeitig sind die pH-Werte der Niederschläge gestiegen. Dennoch sind weitere Anstrengungen zur Minimierung der Deposi-



Abb. 4.4.1-1: Sammelgefäße für das Niederschlagswasser im Fichtenbestand der Depositionsmessfläche „Gengenbach“; Bild: R. Olschewski

tionsbelastung notwendig, da die aktuellen Stickstoffeinträge den Stickstoffbedarf von Waldökosystemen immer noch übersteigen (Kap. 4.4.3.2).

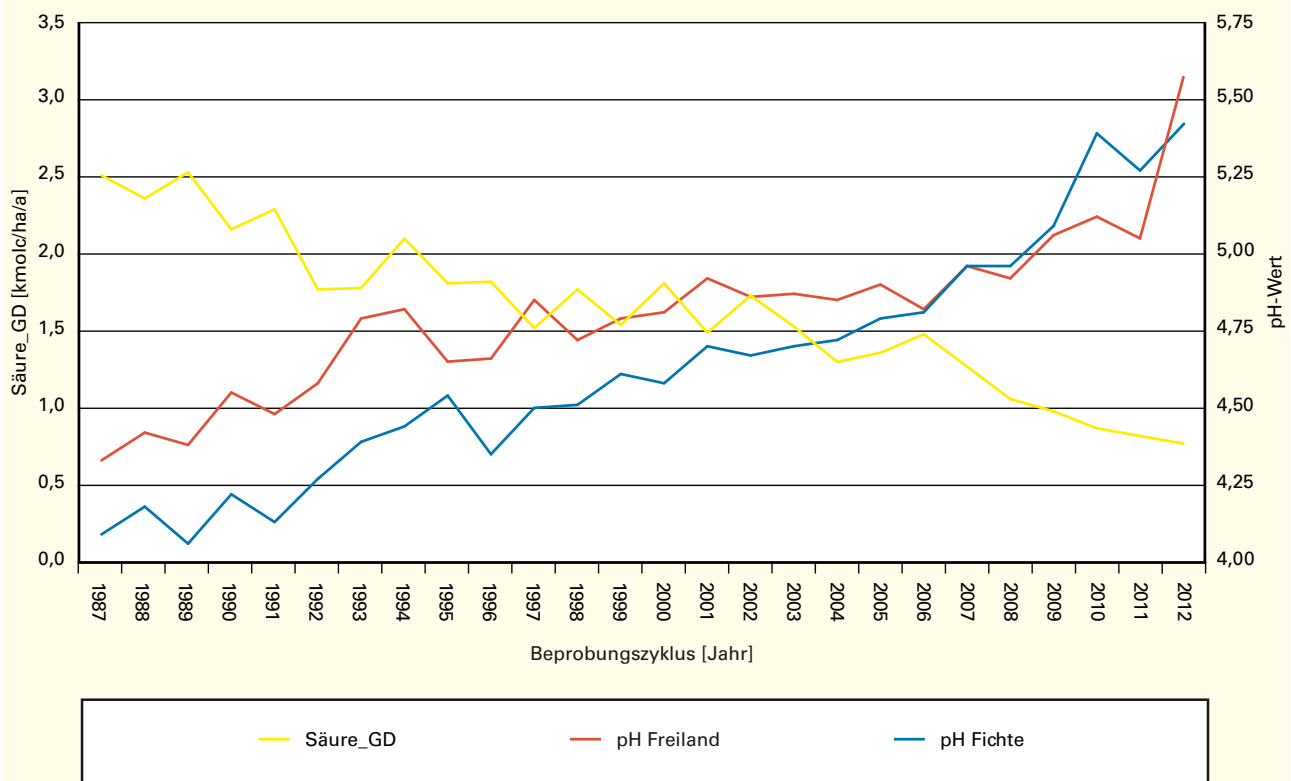


Abb. 4.4.1-2: Versauerungsstatus der Niederschläge am Dauerbeobachtungsstandort Gengenbach; Quelle: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

#### 4.4.2 Bodenversauerung im Ortenaukreis

Einen Überblick über den Säurestatus der Böden im Ortenaukreis gibt Abb. 4.4.2-2. Innerhalb der unterschiedenen Bodengesellschaften weisen die Böden annähernd gleiche Kennwerte der Bodenversauerung auf. Vier Bodengesellschaften sind wegen ihrer flächigen Verbreitung im Landkreis besonders bedeutend (in Abb. 4.4.2-2 rot, rosa, orange, grün).

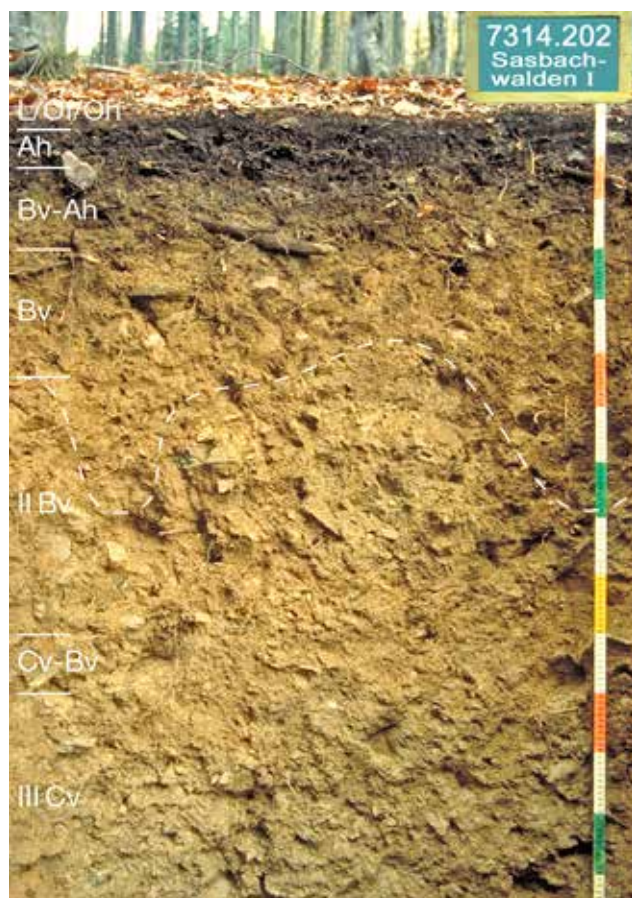
Bodengesellschaften mit stark versauerten Böden (rot), deren Basensättigungswerte im Ober- und Unterboden oft unter 10 % liegen, werden ausschließlich im Schwarzwald angetroffen.

Die charakteristischen Bodentypen sind Braunerden aus Granit oder Gneis sowie Podsole aus Buntsandstein. In den Braunerden sind die Sorptionsverhältnisse durch hohe Aluminiumanteile an der Kationenaustauschkapazität gekennzeichnet ( $\geq 80$  % der KAK). Die in den humosen Oberböden etwas höheren Nährstoffanteile stammen aus den jährlichen Vegetationsrückständen (Abb. 4.4.2-1).

In den Podsohlen ist die Versauerung so weit fortgeschritten, dass in den oberen Bodenhorizonten Eisen- und Aluminiumoxide gelöst werden. Diese Bodenschichten sind deutlich gebleicht („Sauerbleichung“; Abb. 4.4.2-3 und Kap. 3.1.2). Neben Aluminium- dominieren höhere Anteile an Wasserstoff-, Eisen- und Mangan-Ionen die Sorptionsverhältnisse in den überwiegend sehr sandigen Podsohlen. Die Bodenversauerung wirkt an diesen Standorten nachteilig sowohl auf die Waldvegetation als auch auf die Beschaffenheit des Grund- und Quellwassers (Kap. 4.4.3).

In den Bodengesellschaften mit stark versauerten Böden neben schwach versauerten Böden (rosa) liegen die Basensättigungswerte i. d. R. zwischen 20 - 50 %, im Unterboden z. T. > 50 %.

In den stark sauren oberen Bodenschichten werden die Sorptionsverhältnisse an den Austauschern von Aluminium dominiert. Im Unterboden sind dagegen höhere bis sehr hohe Anteile an Nährstoffen vorhanden.



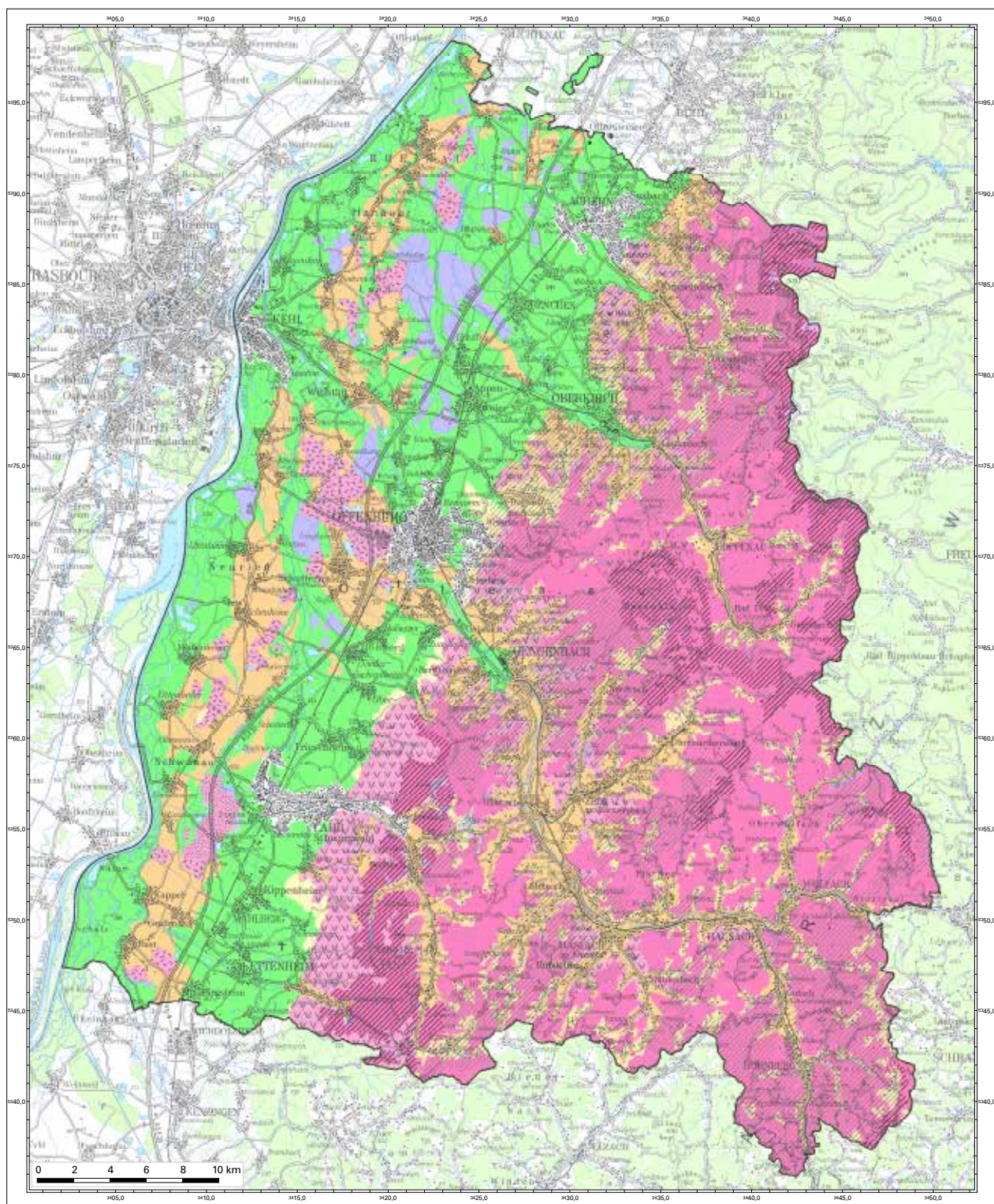
| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>eff</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| -9         | Lt2      | 3,8                          | 135                                        | 11                 |
| -24        | Ls2      | 4,1                          | 108                                        | 6                  |
| -50        | Slu      | 4,3                          | 83                                         | 11                 |
| -90        | Ls2      | 4,2                          | 81                                         | 13                 |
| -105       | Slu      | 4,4                          | 70                                         | 18                 |

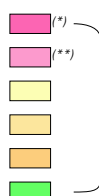
| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>eff</sub> ]<br>austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                              | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| -9         | 2,6                                                                         | 79,2             | 4,3              | 2,8              | 3,3              | 6,3              | 1,1            | 0,5             |
| -24        | 0,7                                                                         | 89,0             | 1,5              | 2,8              | 2,7              | 0,5              | 2,4            | 0,4             |
| -50        | 0,7                                                                         | 85,2             | 1,1              | 2,0              | 3,9              | 3,4              | 3,1            | 0,6             |
| -90        | 0,7                                                                         | 83,7             | 0,9              | 1,7              | 4,4              | 5,0              | 3,3            | 0,3             |
| -105       | 0,6                                                                         | 79,9             | 0,4              | 1,1              | 6,4              | 7,4              | 4,0            | 0,2             |

Abb. 4.4.2-1: Tief entwickelte Braunerde aus lösslehmhaltiger Fließerde mit Granitschutt; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB





#### Bodenversauerung und Aluminiummobilität in Böden



Erläuterung im Text, Kap. 4.4.2

#### typische pH-Werte

| 0 - 6 dm          | 6 - 12 dm    |
|-------------------|--------------|
| 3,8 bis 4,2       | 3,8 bis 4,2  |
| 3,8 bis 4,2       | 4,2 bis 7    |
| 3,8 bis 4,2       | 3,8 bis 5    |
| > 4,2 bis 5       | 4,2 bis 7    |
| > 4,2 bis 5 (> 5) | 4,2 bis 5    |
| 4,2 bis 5         | 4,2 bis 5    |
| u. > 5 bis 7      | u. > 5 bis 7 |
| 5 bis 7           | 5 bis 7      |

#### typische Basensättigungswerte

| 0 - 6 dm           | 6 - 12 dm |
|--------------------|-----------|
| < 10%              | < 10%     |
| < 20%              | < 20%     |
| 20% bis 50%        | > 50%     |
| 10% bis 20%        | > 50%     |
| > 50%              | > 50%     |
| geringe Datenbasis |           |
| geringe Datenbasis |           |
| > 50%              | > 50%     |

#### Puffervermögen des Untergrunds



Kartengrundlage: © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

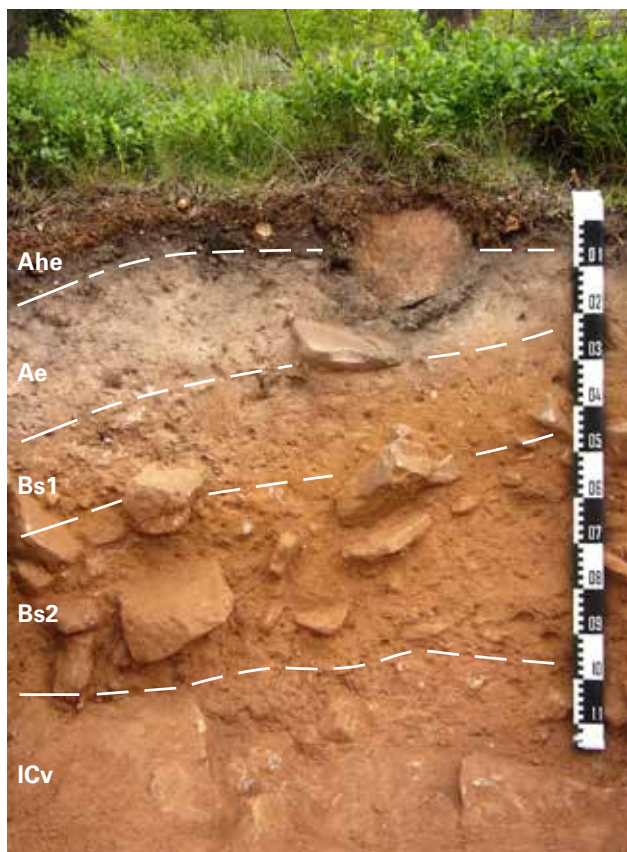
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

(\*) Al-Eintrag in flach zirkulierendes Wasser bei geringer Kontaktzeit; bei gering pufferndem Untergrund teilw. auch in tief zirkulierendes Wasser

(\*\*) Al-Eintrag in flach zirkulierendes Deckschichtenwasser stellenweise möglich

Abb. 4.4.2-2: Bodenversauerung, Ortenaukreis





| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>eff</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| ~ 5        | mSgs     | 3,08                         | 49,7                                       | 17,1               |
| ~ 30       | mSgs     | 3,32                         | 32,0                                       | 4,1                |
| ~ 45       | mSgs     | 3,77                         | 42,3                                       | 2,4                |
| ~ 95       | St2      | 4,19                         | 31,0                                       | 3,2                |
| ~ 115      | St2      | 4,41                         | 17,3                                       | 4,6                |

| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>eff</sub> ] austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                           | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| ~ 5        | 40,0                                                                     | 31,6             | 10,7             | 0,6              | 6,9              | 5,8              | 3,2            | 1,2             |
| ~ 30       | 22,3                                                                     | 61,1             | 12,2             | 0,3              | 0,4              | 1,9              | 1,2            | 0,6             |
| ~ 45       | 3,8                                                                      | 83,2             | 6,6              | 4,0              | 0,6              | 0,9              | 0,9            | 0,0             |
| ~ 95       | 0,1                                                                      | 88,7             | 4,3              | 3,7              | 0,6              | 0,7              | 1,9            | 0,0             |
| ~ 115      | 0,1                                                                      | 83,2             | 6,3              | 5,8              | 0,0              | 0,6              | 4,0            | 0,0             |

Abb. 4.4.2-3: Podsol aus Sandstein-Hangschutt (Mittlerer Buntsandstein), „WSG Durbach“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski

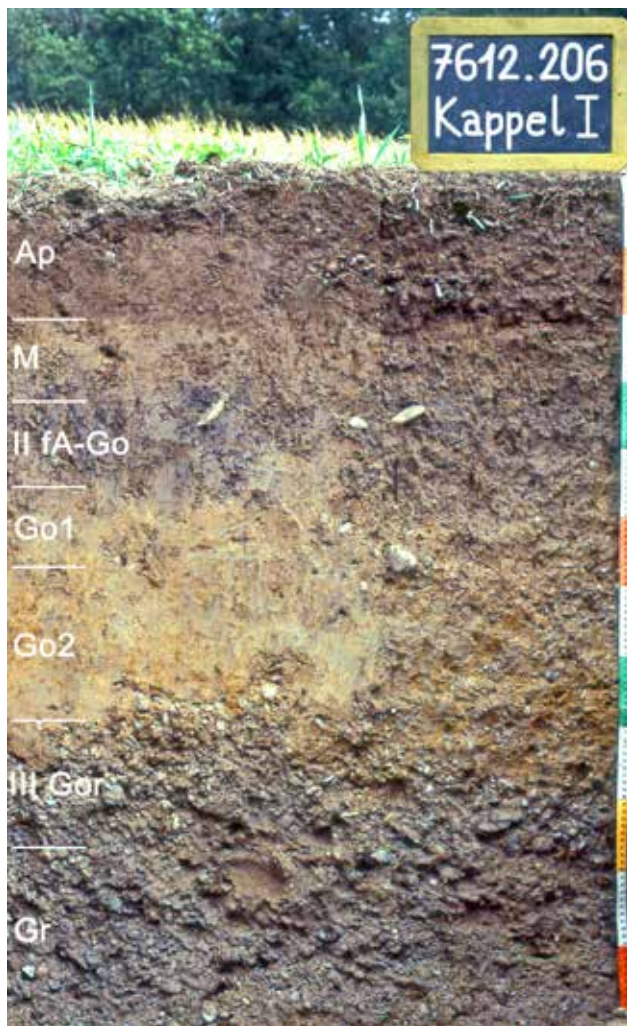


| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>eff</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| ~ 10       | Ut4      | 3,83                         | 78,5                                       | 13,6               |
| ~ 30       | Ut4      | 3,81                         | 67,2                                       | 6,0                |
| ~ 60       | Tu4      | 3,84                         | 117,2                                      | 26,8               |
| ~ 100      | Tu3      | 3,88                         | 112,7                                      | 41,8               |
| ~ 130      | Lu       | 4,00                         | 75,4                                       | 53,2               |

| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>eff</sub> ] austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                           | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| ~ 10       | 2,7                                                                      | 61,9             | 0,4              | 21,4             | 8,2              | 2,9              | 2,5            | 0,0             |
| ~ 30       | 2,8                                                                      | 76,8             | 0,1              | 14,3             | 2,4              | 1,5              | 2,1            | 0,0             |
| ~ 60       | 2,0                                                                      | 67,9             | 0,0              | 3,3              | 14,3             | 10,3             | 2,2            | 0,0             |
| ~ 100      | 0,9                                                                      | 55,6             | 0,0              | 1,7              | 19,9             | 18,6             | 3,3            | 0,0             |
| ~ 130      | 1,6                                                                      | 41,0             | 0,0              | 4,2              | 27,5             | 21,9             | 3,8            | 0,0             |

Abb. 4.4.2-4: Pseudogley-Parabraunerde aus umgelagertem Lösslehm über Tonfließerde und verwittertem Mergelstein des Unteren Muschelkalks (> 100 cm Tiefe), Zone III, WSG „Kippenheim-Schmieheim“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>pot</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| - 24       | Lu       | 5,8                          | 247                                        | 67                 |
| - 33       | Lt2      | 6,0                          | 248                                        | 69                 |
| - 45       | Lt2      | 6,2                          | 223                                        | 74                 |
| - 57       | Uls      | 7,2                          | 174                                        | 100                |
| - 78       | Slu      | 7,5                          | 168                                        | 100                |

| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>pot</sub> ]<br>austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                              | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| - 24       | -                                                                           | -                | -                | -                | 57,9             | 7,7              | 0,9            | 0,5             |
| - 33       | -                                                                           | -                | -                | -                | 59,0             | 7,8              | 0,9            | 1,3             |
| - 45       | -                                                                           | -                | -                | -                | 65,0             | 8,3              | 0,4            | 0,3             |
| - 57       | -                                                                           | -                | -                | -                | 89,3             | 9,9              | 0,7            | 0,1             |
| - 78       | -                                                                           | -                | -                | -                | 91,2             | 8,0              | 0,8            | 0,0             |

Abb. 4.4.2-5: Brauner Auenboden-Auengley aus Auenlehm über spätwürmzeitlichem Hochflutsediment auf Niederterrassenschotter; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB

An diesen Standorten ist in erster Linie die Waldvegetation, weniger das Grundwasser von den Auswirkungen der Bodenversauerung betroffen. Die Bodengesellschaft fasst überwiegend forstlich genutzte Böden aus tief entkalkten Hochflutlehm oder sandigen und lehmigen Auensedimenten der Rheinebene zusammen. Auch Waldböden aus Lösslehm der Talflanken und Verebnungsflächen des Schwarzwalds sowie aus Fließerden über Buntsandstein und Muschelkalk am Schwarzwaldrand zählen dazu. Charakteristisch sind z.B. Braunerde-Pseudogleye und ähnliche Übergangsformen in den Schwarzwaldrandlagen nördlich und südlich von Lahr (Abb. 4.4.2-4) sowie die Pseudogley-Parabraunerden und weitere Leitböden aus Hochflutlehm der Rheinebene (Abb. A.4.4.2-1).

Bodengesellschaften mit versauerten Böden und Böden mit hoher bis sehr hoher Basensättigung (orange). Dazu zählen die Böden der zuvor genannten Bodengesellschaften. Der Unterschied besteht in der überwiegend landwirtschaftlichen Nut-

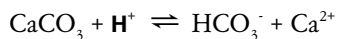
zung. Zu den charakteristischen Bodentypen gehören Auenböden im Schwarzwald und in der Rheinebene (Abb. 4.4.2-5). Unterbleiben Ausgleichskalkungen auf den landwirtschaftlich genutzten Böden, kann bei fortschreitender Bodenversauerung (pH 4,7 - 5,5) das pflanzenbauliche Ertragspotenzial nicht optimal ausgeschöpft werden (Kap. 4.4.4.2).

Bodengesellschaften mit Böden hoher bis sehr hoher Basensättigung (grün). Darunter werden alle Böden zusammengefasst, die aus kalkhaltigen Substraten entstanden sind. Im Ortenaukreis wichtig sind die aus der Verwitterung von Löss hervorgegangenen Böden der Vorbergzone. Dazu zählt die Parabraunerde wie sie beispielsweise in Kap. 3.1.2 dargestellt ist. Basensättigungswerte von deutlich über 50 % sind für die Böden dieser Bodengesellschaften typisch (Abb. A.4.4.2-2). Versauerungsvorgänge sind in diesen Gebieten vernachlässigbar und haben keine nachteiligen Wirkungen.



#### 4.4.3 Auswirkung der Bodenversauerung

Wie schnell die Versauerung voranschreitet hängt maßgeblich von den Puffersubstanzen der Böden und Gesteine ab. Pufferung bezeichnet vereinfacht die chemische Neutralisation zugeführter  $\text{H}^+$ -Ionen, z.B. bei der Neutralisation von Calciumcarbonat:



Die Puffersubstanzen werden bei der Neutralisation verbraucht. Die wichtigsten Pufferreaktionen und -substanzen sind in Tab. A.4.4.5-2 dargestellt. Sie sind in unterschiedlichen pH-Bereichen aktiv, der Eisenpuffer beispielsweise erst bei sehr geringer Basensättigung unter pH 3,2. Die bei Neutralisationsreaktionen entstehenden Produkte beeinflussen die Vegetation und die Beschaffenheit von Quell- und Oberflächenwasser. Bei pH-Werten < 5,0 werden Aluminium, Eisen und Mangan freigesetzt. Sie können in das Bodenwasser und in Pflanzenwurzeln gelangen oder in Quell- und Grundwasser ausgewaschen werden.

##### 4.4.3.1 Quell- und Oberflächenwässer

In Gebieten mit Bodengesellschaften aus vorherrschend stark sauren Böden sowie geringem bis sehr geringem Puffervermögen im Untergrund (Abb. 4.4.2-2) weisen Quellwässer in der Regel pH-Werte < 6,5 auf. In Quellwässern der Gneis- und Granitgebiete werden meist pH-Werte von 5,5 - 6,5 gemessen.

In den Hochlagen mit Podsolen über anstehendem Unteren und Mittleren Buntsandstein kann der pH-Wert von Quellwässern < 5,5 liegen; bei geringer Zirkulationstiefe, etwa in Hanglagen, sogar < 4,0, (z.B. „Lotharquelle“ am Edelmannskopf, Gemarkung Oberkirch-Ödsbach). Werden Quellwässer mit pH-Werten < 6,5 zur Wasserversorgung genutzt, müssen sie gemäß TrinkwV bei der Aufbereitung entsäuert werden. Als allgemeine Ziele der Entsäuerung werden die Begünstigung nachgeschalteter Aufbereitungsprozesse und/oder die Verbesserung der korrosionschemischen Eigenschaften des Wassers gegenüber metallischen und zementgebundenen Werkstoffen genannt.

In den Braunerden der Schwarzwaldlagen werden die Sorptionsverhältnisse an den Austauschern bis

in den Unterboden von Aluminiumionen dominiert (Abb. 4.4.2-1), die vermehrt ausgewaschen werden können. Quell- und Oberflächenwässer enthalten deshalb oft höhere Aluminiumkonzentrationen. Auch Mangan ist in stark sauren Böden sehr mobil. Überschreitungen der Trinkwassergrenzwerte (0,2 mg Al/l; 0,05 mg Mn/l) in gefassten Quellwässern sind nicht selten. Die Festlegung dieser Grenzwerte hat wie beim Eisen hauptsächlich ästhetische Gründe, weil hohe Gehalte eine Trübung des Wassers bewirken [KÖLLE 2001]. Die Wässer werden vor der Abgabe ins Versorgungsnetz aufbereitet.

In den Schwarzwaldhochlagen mit Podsolen über anstehendem Buntsandstein ist die Versauerung so weit fortgeschritten, dass der Eisenpuffer in den oberen Bodenschichten weitgehend ausgeschöpft ist (Tab. A.4.4.5-2 pH < 3,2). In diesen Schichten verdrängen die bei der Neutralisation frei werdenden Eisenionen zusammen mit Wasserstoffionen das sorbierte Aluminium von den Austauscherpätzen (Kap. A.4.4.5).

Die Aktivierung des Eisenpuffers in diesen niederschlagsreichen Gebieten macht sich im Quellwasser durch gelegentliche Überschreitung des Trinkwassergrenzwerts für Eisen bemerkbar (0,2 mg Eisen/l).

Abb. 4.4.3.1-1 zeigt den Verlauf der Konzentrationen an gelöstem Aluminium, die von Mai bis Oktober 2001 in Quell- und Sickerwässern des Wasserschutzgebiets „Busterbachquelle“ zwischen Seebach und Hornisgrinde gemessen wurden. Die Konzentrationen variierten in diesem Zeitraum deutlich. Ab August 2001 waren infolge geringer Niederschlagsmengen im Wasser aus dem Quellbereich eines kleinen Bachs (blaue Linie), schwächer ausgeprägt auch im Bodensickerwasser (braune und rote Linien), im Mittel etwas höhere Aluminiumkonzentrationen als im Zeitraum davor festzustellen. Im Quellwasser lagen sie ab August im Gegensatz zum vorherigen Quartal stets > 0,1 mg Al/l.

Saisonbedingte Schwankungen der Aluminiumgehalte sind auch in anderen Waldgebieten mit versauerten Böden beobachtet worden [THIES 1995; MEESENBURG 1995].



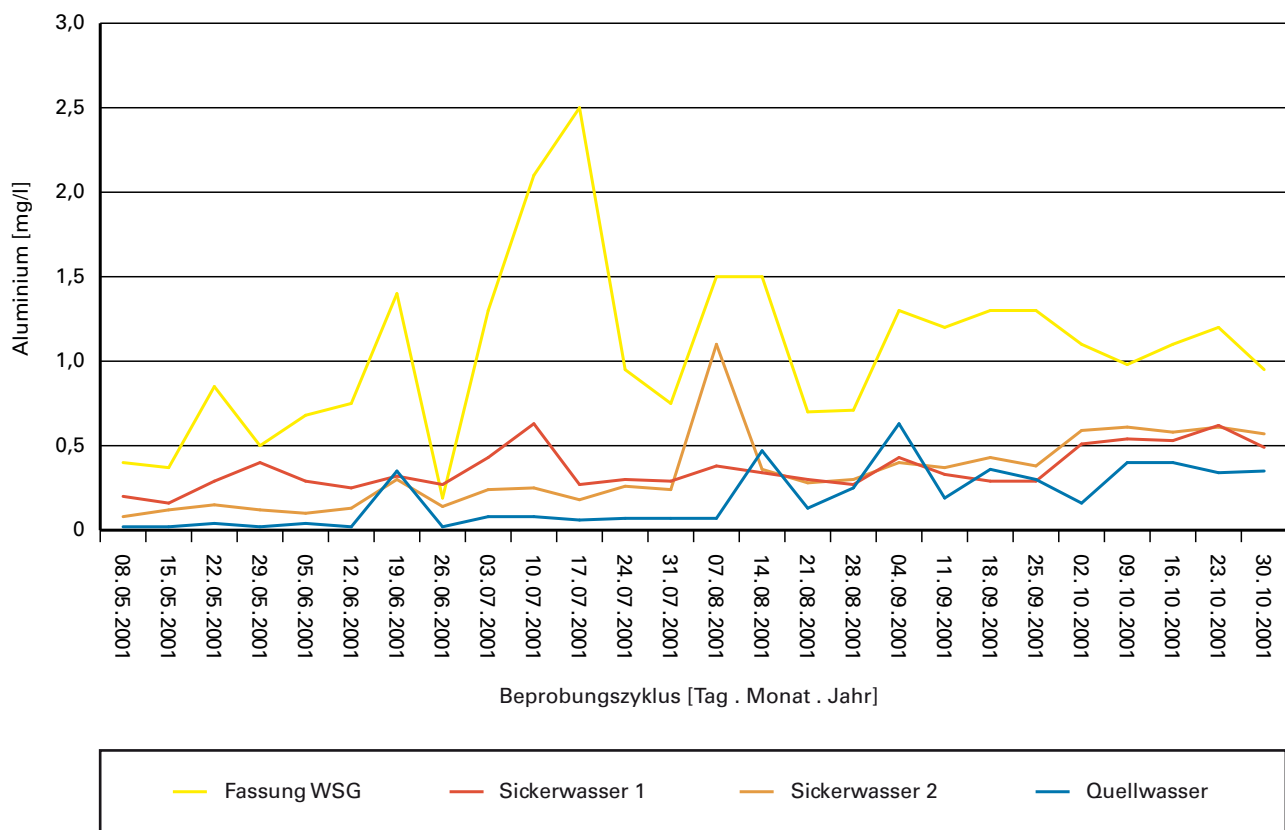


Abb. 4.4.3.1-1: Aluminiumkonzentrationen in Quell- und Sickerwasser im WSG „Busterbachquelle“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

Im Wasserschutzgebiet „Busterbachquelle“ enthielt das gefasste, unaufbereitete Wasser stets die höchsten Aluminiumgehalte (Fassung Wasserschutzgebiet, Abb. 4.4.3.1-1), die wiederholt den TVO-Grenzwert überschritten (Ausnahme: 2. Junihälfte). Die geringeren Konzentrationen in Quell- und Sickerwasser sind bedingt durch die geringere Zirkulationstiefe und Sickerzeit des Regenwassers. Das im Bereich der Fassung in dem Wasserschutzgebiet gesammelte Wasser wird dagegen aus tiefen Klüften des anstehenden Gesteins gespeist (Granit und Buntsandstein).

Aluminiumkonzentrationen  $> 0,1$  mg/l können in Bachoberläufen bzw. im unmittelbaren Quellgebiet Bachforellenbestände schädigen. Schädigungen bei gleichzeitigem Säurestress (niedrige pH-Werte) sind in den 1980er Jahren zum Beispiel bei Bachforellenbeständen im Brandbach auf dem Gebiet der Gemeinde Sasbachwalden beobachtet worden [GEBHARDT 1995]. Jüngere Untersuchungen deuten eine zwischenzeitliche Erholung der Bestände an [LUBW 2010b].

Vor allem in Buntsandsteinlagen des Schwarzwalds führten die mit Annäherung an die Quellbereiche abnehmenden

pH-Werte der Bachwässer zur Gefährdung aquatischer Lebensgemeinschaften. Allgemein war in den Bachoberläufen ein Rückgang der Artenvielfalt, der Biomasse und der Individuenzahlen zu beobachten. Es fehlten insbesondere säureempfindliche Arten von Moosen, Schnecken und Kieselalgen [BRAUKMANN 1995; HIMMLER 1995]. Die Situation scheint sich auch hier gebessert zu haben. Die im Vergleich zu 1995 vielerorts beobachtete Zunahme säureempfindlicher Arten lässt auf eine verringerte Säurebelastung der Fließgewässer schließen [LUBW 2010b].

#### 4.4.3.2 Forstwirtschaft

Eine fortschreitende Versauerung von Waldböden wirkt sich auf den Baumbestand nachteilig aus. Besonders betroffen sind Waldflächen mit stark versauerten und sehr basenarmen Böden ( $\text{pH} < 4,2$ ; Basensättigung  $< 10$  %). Werden im Bodenwasser Aluminiumgehalte von 10 - 20 mg/l erreicht oder überschritten, können Aluminiumionen auf die bei der Nährstoff- und Wasseraufnahme wichtigen Feinwurzeln der Bäume toxisch wirken.

Wurzelschäden sind ebenso möglich, wenn im Bodenwasser z.B. das Verhältnis von Calcium zu Aluminium auf  $< 1$  sinkt. Das Überangebot an Aluminium schränkt dann die Wurzelaufnahme von Calcium stark ein [MARSCHNER 1995; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2010]. Neben niedrigen Basensättigungswerten ist die Höhe der Kationenaustauschkapazität entscheidend. In sehr stark sauren Sandböden ist die effektive Kationenaustauschkapazität geringer als in sehr stark sauren Lehm- und Schluffböden (Abb. 4.4.2-3 u. 4.4.2-4). In Sandböden tritt bei vergleichbar niedrigen Basensättigungswerten wie in Lehm- und Schluffböden ein Versorgungsdefizit der Bäume mit Calcium und Magnesium früher ein.

Bei den flachwurzelnden Fichten ist das Versorgungsdefizit durch Magnesiummangelsymptome erkennbar. Die Anzeichen reichen von gelben Chlorosen an älteren Nadeln (Gelb- oder Goldspitzigkeit) bis zum Nekrotisieren der Nadeln und vollständigen Nadelverlust (Abb. 4.4.3.2-1).

Der aktuelle Eintrag an Stickstoffverbindungen aus der Atmosphäre begünstigt Mangelerscheinungen zusätzlich, da der Stickstoffüberschuss das Baumwachstum steigert



Abb. 4.4.3.2-1: Nadeln einer gesunden Fichte (links) und Magnesiummangelsymptome (Mitte und rechts); Quelle: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

und das Versorgungsdefizit mit Calcium und Magnesium verschärft. Die Stickstoff-Übersversorgung fördert das Sprosswachstum der Waldbäume stärker als das Wurzelwachstum.

Wüchsige Fichtenökosysteme benötigen pro Jahr etwa 12 - 15 kg N/ha; Laubwälder maximal 20 kg N/ha. Im Fichtenbestand an der Depositionsmessfläche „Gengenbach“ ist trotz des rückläufigen Trends bei den Nitratreinträgen in den vergangenen Jahren nach wie vor ein zu hoher Eintrag von Stickstoff zu verzeichnen (Abb. 4.4.3.2-2).

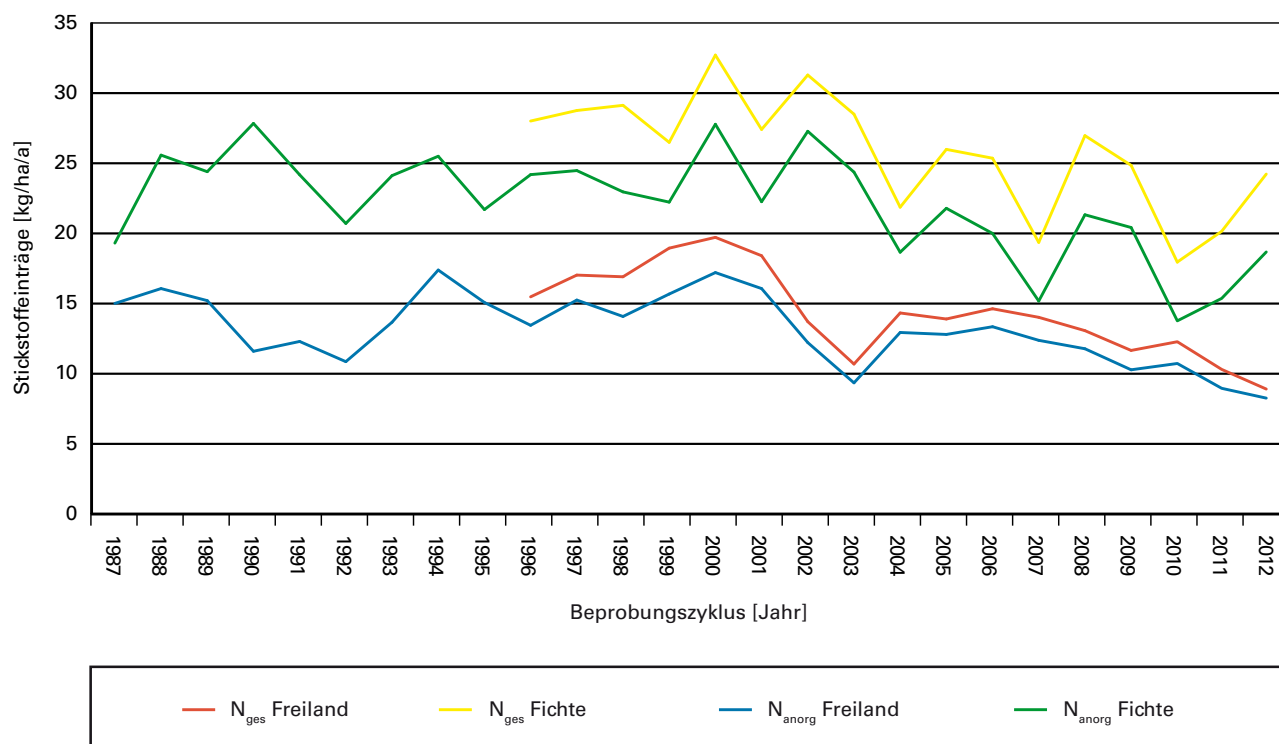


Abb. 4.4.3.2-2: Stickstoffeinträge an der Depositionsmessfläche „Gengenbach“; Quelle: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Lagen die gesamten Stickstoffeinträge zwischen 1996 und 2003 bei 22,5 - 33 kg N/kg, sind sie seit 2007 tendenziell rückläufig ( $N_{\text{ges}}$  Fichte). Den maßgeblichen Anteil haben Nitrat und Ammonium ( $N_{\text{anorg}}$  Fichte). Auf der Freifläche der Depositionsmessstation werden geringere Stickstoffeinträge gemessen, da hier Nebel oder Wolkentröpfchen nicht „ausgekämmt“ werden ( $N_{\text{ges}}$  Freiland,  $N_{\text{anorg}}$  Freiland in Abb. 4.4.3.2-2).

Das Zusammenspiel von erhöhten Aluminiumgehalten im Wurzelraum und defizitärer Nährstoffversorgung auf stark versauerten Waldstandorten führt zu einer erhöhten Anfälligkeit der Bäume gegenüber Frost- und Trockenstress sowie zu Pilz- und Insektenbefall. Nach längeren Kälte- oder Trockenperioden ist wie bei Krankheitsbefall eine deutliche Zunahme von Baumschäden zu beobachten.

Aus forstwirtschaftlicher Sicht werden auf stark versauerten Waldstandorten Meliorationskalkungen erforderlich. Sie werden vorzugsweise mit Dolomitkalk durchgeführt ( $\text{CaCO}_3$  bzw.  $\text{MgCO}_3$ ; Abb. 4.4.3.2-3).



Abb. 4.4.3.2-3: Kalkausbringung im Forst durch Verblasen;  
Quelle: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Die FVA (2000) unterscheidet dabei entsprechend den Versauerungskennwerten im Oberboden (0 - 20 cm Tiefe):

- dringend meliorationsbedürftig: bei pH-Wert < 3,0 und Basensättigung < 5 %
- meliorationsbedürftig: bei pH-Wert < 3,8 und Basensättigung < 15 %

#### 4.4.3.3 Landwirtschaft

Landwirtschaftliche Böden sollten im Hinblick auf einen bestmöglichen Ertrag und eine gute Qualität der pflanzlichen Produkte einen optimalen pH-Wert aufweisen. Er hängt ab vom jeweiligen Ton- und Humusgehalt des Bodens sowie von der örtlichen Nutzung.

Um das Ertragspotenzial bei Ackerböden voll auszuschöpfen, sind bei tonarmen Sandböden pH-Werte von 5,4 - 5,8 optimal. Bei Lehm Böden sollte der pH-Wert zwischen 6,1 und 7,0 liegen. Die idealen pH-Bereiche der humoseren Grünlandböden liegen im Oberboden tonarmer Sandböden bei 4,7 - 5,2, in Lehm Böden bei 5,4 - 6,3 [DLG-LLFG 2007].

Während bei Boden-pH-Werten > 7 die Verfügbarkeit der Spurennährstoffe Eisen, Mangan, Kupfer und Zink für Pflanzen abnimmt, trifft dies für die Verfügbarkeit von Phosphat bei pH-Werten < 5,5 zu. Phosphat wird dann im Boden stark an Eisenoxide sorbiert. Darüber hinaus kann die Versorgung mit Calcium und Magnesium eingeschränkt sein, was besonders im Obstbau zu Mangelercheinungen führen kann.

Bei stark sauren Bodenverhältnissen ( $\text{pH} < 4,5$ ) kann gelöstes Aluminium zu Wurzelschäden bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen führen. Beeinträchtigungen sind bei Aluminiumkonzentrationen im Bodenwasser ab 0,1 - 0,5 mg/l zu beobachten [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2010]. Stark versauerte Ackerböden mit pH-Werten von 3,9 - 5,0 kommen im Ortenaukreis vor allem in den Tallagen des Schwarzwalds vor. Zur Optimierung der Ernteerträge ist eine Aufkalkung notwendig (Abb. 4.4.3.3-1).



Abb. 4.4.3.3-1: Frisch gekalkte Ackerfläche bei Niederschopfheim; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



#### 4.4.4 Bodenschutzkalkung im Forst

##### 4.4.4.1 Beobachtung und Entwicklung des chemischen Zustands von Waldböden

Dr. K. v. Wilpert (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) & D. Zirlewagen, Kensingen

Waldböden sind erheblichen Belastungen ausgesetzt. Im Mittelpunkt stehen dabei u.a. anthropogene Stoffeinträge, die entscheidend zur Bodenversauerung beigetragen haben (Kap. 4.4.1). Diese Belastungen beeinträchtigen auf großer Fläche die Erfüllung der zahlreichen Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen des Walds. Sie gefährden auf lange Sicht die Funktionsfähigkeit dieser Ökosysteme.

Vor diesem Hintergrund wurde in den Jahren 1989 bis 1992 erstmals im Forst die Bodenzustandserhebung (BZE) durchgeführt [BUBERL ET AL. 1994]. Sie liefert flächenrepräsentative Informationen über den chemischen Zustand der Waldböden. In einem Grundraster von  $8 \times 8$  km wurden an 308 Messpunkten nach einem bundeseinheitlichen Aufnahmeverfahren Aufbau und chemischer Zustand der Böden untersucht.

Eine Wiederholung der Bodenzustandserhebung wurde im Zeitraum von 2005 bis 2008 durchgeführt. Die Forstverwaltung hat in vergangenen Jahrzehnten ein großräumiges Kalkungsprogramm zur Kompensation von Säureeinträgen durchgeführt (Abb. 4.4.4.2 bis 4.4.4.5) und eine konsequente waldbauliche Umsteuerung in Richtung des vermehrten Anbaus standortsgemäßer Laubholzarten eingeleitet.

Die Bodenzustandserfassung ist mit ihrem Instrumentarium nicht nur geeignet, depositionsbedingte Umweltveränderungen in ihren Auswirkungen auf die Bodenökologie zu bewerten, sondern ebenso die stabilisierende Wirkung der genannten forstbetrieblichen Maßnahmen aufzuzeigen. Sie dient hier der „ökologischen Erfolgskontrolle“.

Die Flächen der Buntsandsteinsubstrate im Nördlichen Schwarzwald und im Odenwald weisen auf großer Fläche niedrige pH-Werte und folglich niedrigste Filter- und Pufferkapazitäten auf.

Diese großflächige Nivellierung ist erklärbar durch:

- die schwache Ausstattung der Ausgangsgesteine mit verfügbaren Basen,
- den jahrzehntelangen Säureeintrag,
- die natürliche und nutzungsbedingte Versauerung.

Abb. 4.4.4.1-1 zeigt einen „historischen Vergleich“ von pH-Werten ( $H_2O$ ) aus den Jahren 1927 und 1992. Die Werte von 1927 stammen aus einer Arbeit von FRANK (1927); für 1992 wurden Daten der Bodenzustandserfassung (BZE) herangezogen. Beide Datenkollektive stammen von Buntsandsteinarealen aus 0 - 5 cm Bodentiefe. Es zeigt sich einerseits, dass die Variation der pH-Werte 1927 sehr viel breiter war, als die schmale Verteilung 65 Jahre später. Andererseits ist in dieser für die Bodenentwicklung kurzen Zeit der pH-Wert in 0 - 5 cm Tiefe im Schnitt um zwei pH-Stufen abgesunken [v. WILPERT, HILDEBRAND 1994]. Auch die Kristallinbereiche im Mittleren und Südlichen Schwarzwald sind trotz nicht unerheblicher Unterschiede in der geogenen Ausstattung der Ausgangssubstrate (z.B. „basenreiche“ Paragneise und „basenarme“ Granite) weitgehend nivelliert.

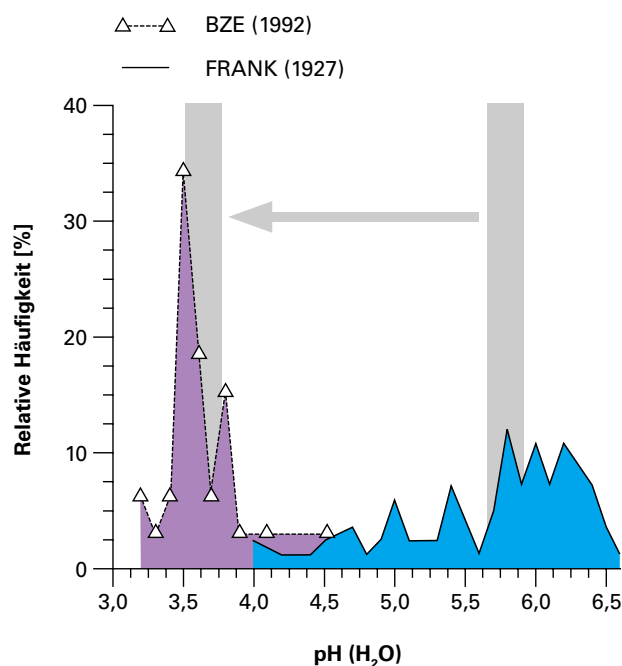


Abb. 4.4.4.1-1: Entwicklung der Häufigkeitsverteilung von pH-Werten ( $H_2O$ ) im Mineralboden (0 - 5 cm) auf Buntsandstein zwischen den Jahren 1927 und 1992 (Frank 1927)

Neben der Bodenversauerung durch die Säureeinträge und der damit verbundenen Verschlechterung bzw. Zerstörung der Lebensbedingungen für Bodenlebewesen werden aus den betroffenen Böden die für die Waldernährung essenziellen basischen Nährelemente ausgewaschen.

Die Böden verlieren ihre Fruchtbarkeit und Qualität. Damit sinken die Puffervorräte gegenüber Säureeinträgen und die pflanzenverfügbaren Vorräte von essenziellen Makronährelementen wie z.B. Magnesium (Kap. 4.4.3).

Das Ergebnis dieser Bodenverarmung ist wie bei den Versauerungsgraden (pH-Werte) eine Nivellierung der Basensättigung auf sehr niedrigem Niveau von < 5 - 10 %.

Die Geschwindigkeit der Bodenversauerung und die Intensität der Basenverarmung begrenzen die Möglichkeiten waldbaulicher Maßnahmen und machen Kompensationsmaßnahmen in Form von Kalkungen notwendig.

#### 4.4.4.2 Ableitung des langfristigen Kalkungsbedarfs

Bodenschutzkalkungen werden zur Kompensation von Säureeinträgen seit Beginn der 1980er Jahre in Baden-Württemberg mit einem durchschnittlichen jährlichen Flächenumfang von etwa 15 000 ha und einer durchschnittlichen Dosierung von 3 t/ha durchgeführt. Auf diese Weise wurden bislang etwas mehr als die Hälfte aller stark versauerten und entbasten, d.h. kalkungsbedürftigen Standorte, behandelt.

Angesichts der Tatsache, dass seit Beginn der 1980er Jahre die Säurebelastung durch Luftreinhaltemaßnahmen um etwa die Hälfte reduziert werden konnte und sich mittlerweile auf zunehmenden Flächenanteilen in der Nähe der ökologischen Belastungsgrenze befindet, muss die Frage gestellt werden, wie ein langfristiges Kalkungsprogramm ausgestaltet sein muss, das die Regeneration der natürlichen chemischen Ausstattung der Waldböden anstrebt.

Grundlage für die Ableitung eines an der natürlichen Basenausstattung von Waldstandorten orientierten Kalkungskonzepts ist die Definition eines Sollzustands. Es liegt

nahe, als Sollzustand die Basensättigung solcher Böden anzusetzen, die von Säureeinträgen weitgehend verschont geblieben sind und einen vorindustriellen Zustand repräsentieren. Hierfür waren die von FRANK im Jahr 1927 im Schwarzwald gemessenen pH-Werte die empirische Grundlage (Abb. 4.4.4.1-1).

Für die Ableitung des Kalkungsbedarfs mussten diese pH-Werte in Basensättigungswerte umgerechnet werden. Als Basis diente die Beziehung zwischen pH-Werten ( $H_2O$ ) und Calciumsättigung nach HILDEBRAND ET AL. 1996 (Abb. 4.4.4.2-1). Den Umrechnungen liegt ferner die Annahme zugrunde, dass Calciumionen zu 100 % die Basensättigung bestimmen.

Die Daten von FRANK aus dem Jahr 1927 wurden zunächst digitalisiert. Darauf aufbauend wurde der bodenchemische Soll-Zustand stufenweise mit einem Geographischen Informationssystem definiert. In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der Geologie auf die Basensättigung der Böden berücksichtigt. Hierzu waren aus der Arbeit von FRANK historische Vergleichsmessungen für Böden aus Granit, Gneis und Buntsandstein verfügbar.

In einem zweiten Schritt wurde die systematische Zunahme der Basensättigung zwischen Oberhangbereich und Hangfuß einbezogen. In Tab. 4.4.4.2-1 sind die mittleren pH-Werte aus FRANK (1927) für zwei Tiefenstufen differenziert nach dem Ausgangsgestein der Bodenbildung und

Tab. 4.4.4.2-1: Mittlere pH-Werte der Tiefenstufen 5 und 15 cm, differenziert nach Bodenausgangsgestein und Hangposition; die Werte wurden zur Berechnung des bodenchemischen Sollzustands in der 2. Modellstufe herangezogen

| Hangposition   | pH-Wert    |       |        |             |       |        |
|----------------|------------|-------|--------|-------------|-------|--------|
|                | 5 cm Tiefe |       |        | 15 cm Tiefe |       |        |
|                | Granit     | Gneis | BSand* | Granit      | Gneis | BSand* |
| 1 (Rücken)     | 3,2        | 4,0   | 4,7    | 3,5         | 4,0   | 4,7    |
| 2 (Oberhang)   | 3,5        | 4,5   | 5,2    | 3,8         | 4,5   | 5,2    |
| 3 (Mittelhang) | 3,7        | 5,0   | 5,7    | 4,0         | 5,0   | 5,7    |
| 4 (Flachhang)  | 3,7        | 5,0   | 5,7    | 4,0         | 5,0   | 5,7    |
| 5 (Unterhang)  | 4,2        | 5,5   | 6,0    | 4,4         | 5,5   | 6,0    |
| 6 (Tal)        | 4,7        | 6,0   | 6,5    | 4,8         | 6,0   | 6,5    |

\* BSand = Buntsandstein

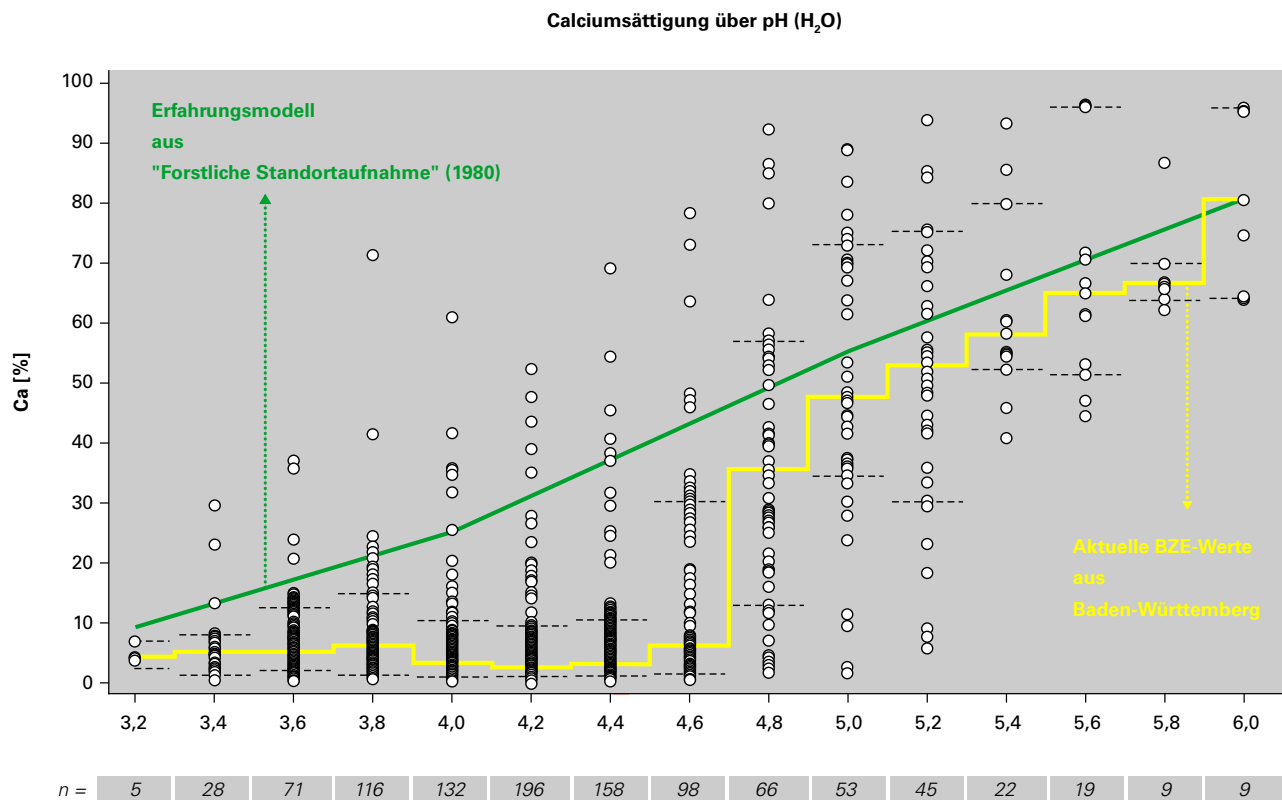


Abb. 4.4.4.2-1: Beziehung zwischen Bodenreaktion und Calciumsättigung im Probenkollektiv der BZE von Baden-Württemberg nach Hildebrand et al. 1996

der Hangposition dargestellt. Aus den pH-Werten wurde anhand der Beziehung in Abb. 4.4.4.2-1 die Basensättigung der betreffenden Böden abgeleitet.

Das Ergebnis der regionalisierten Sollausstattung von Böden mit Basen für die drei im Schwarzwald maßgeblich vorkommenden geologischen Substratgruppen (Gneis, *Simonswald, Landkreis Emmendingen*; Buntsandstein *bei Lahr, Ortenaukreis* und Granit, *Schluchsee, Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald*) wird anhand von Landschaftsbeispielen besonders ausgeprägter Geländemorphologie und damit ausgeprägter kleinräumiger Differenzierung der Basensättigung in Abb. 4.4.4.2-2 gezeigt. Sie spiegelt den quasi vorindustriellen Zustand der Basensättigung wider.

Im Oberboden (0 - 5 cm Tiefe) von Gneis- und Buntsandsteinsubstraten lag sie demnach vermutlich zwischen 30 und 50 %, im Bereich der Talböden teils noch deutlich höher. Dies ist der Bereich, den ULRICH bereits 1994 auf Basis theoretischer Überlegungen für die natürliche Basenausstattung mitteleuropäischer Waldböden angenommen hat [ULRICH 1995].

Die Oberböden auf grobkörnigen Granitsubstraten sind bereits im natürlichen Zustand mit durchschnittlichen Basensättigungen um 10 % deutlich stärker entbast. Dies lässt sich auf die Wirkung organischer Säuren in den podsoligen Böden zurückführen, die jedoch nur wenige Dezimeter in den Boden hineinreicht.

Unterhalb von 30 - 50 cm Bodentiefe sind diese organischen Säuren nicht aktiv, weshalb dort die Basensättigung natürlicherweise stark ansteigt. In zwei Modellschritten wurde wiederum auf der Basis der Arbeit von FRANK (1927) der Einfluss der

- Meereshöhe durch einen Zu-/Abschlag von 0,2-0,3 pH-Stufen für Höhenlagen unter bzw. über 700 m üNN,
- Einfluss der Baumartenzusammensetzung durch einen Abschlag von 0,1 pH-Stufen für reine Nadelholzbestände

berücksichtigt.



Auf der Basis der Messungen aus der Bodenzustandserfassung 1992 wurde ein Geländemodell der heutigen Basensättigung gefertigt. Dabei wird unterschieden zwischen den im Mittleren Schwarzwald versauerten Graniten und den weniger versauerten Gneisen.

Die Darstellung ist in Tiefenstufen gegliedert:

- 0 - 5 cm (Oberboden)
- 30 - 60 cm (Hauptwurzelraum)
- 60 - 90 cm (Unterboden).

Sie zeigt, dass im Hauptwurzelraum auf beiden geologischen Substraten (Granit und Gneis) eine weitgehende Nivellierung der Basensättigungen auf niedrigstem Niveau eingetreten ist. Die Basensättigung liegt hier bis auf kleinräumige Ausnahmen unter 10 %, oft sogar unter 5 %. Im Oberboden sind die Basensättigungen aufgrund der Freisetzung von Basen aus der Laub-/Nadelstreu durch Mineralisierung erhöht. Sowohl auf Granit als auch auf Gneis kann im Geländemodell eine nicht hypotekenkonforme Verteilung der Basensättigungen mit maxi-

malen Werten in Oberhang- und Rückenlagen und minimalen Werten an den Unterhängen beobachtet werden. Durch die Wirkung von hangabwärts gerichteten Transportgradienten sind entsprechend dem Hang-Catena-Konzept [MCKENZIE, RYAN 1999] umgekehrte Geländegradienten der Basensättigungen zu erwarten. Eine plausible Erklärung für das in 0 - 5 cm Tiefe erkennbar inverse Muster ergibt die in den dargestellten Gebieten nahezu vollflächig durchgeführte Bodenschutzkalkung.

Das Muster ergibt sich aus der Tatsache, dass die auf die Horizontale bezogene Dosierung der Kalkung mit zunehmender Hangneigung abnimmt und zusätzlich in Bereich der exponierten und geschädigten Hochlagen intensiver gekalkt wurde.

Im Unterboden ist das Niveau der Basensättigung bei Gneis und Granit deutlich höher als in den anderen Tiefenstufen. Hier wirkt sich die Basennachlieferung aus dem Ausgangsgestein aus. Deshalb entsprechen die Geländegradienten der Basensättigung sehr ausgeprägt dem Hang-Catena-Modell.

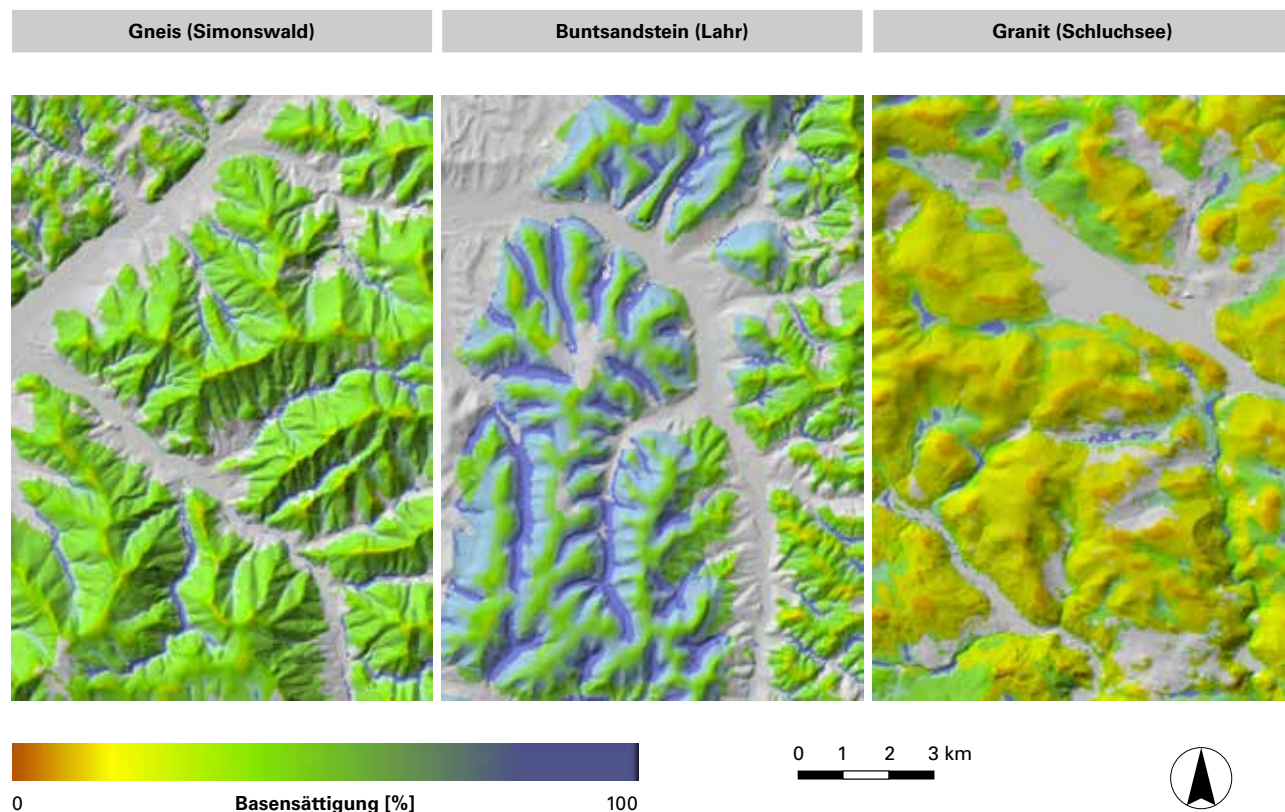


Abb. 4.4.4.2-2: Soll-Zustand der Basensättigung in 0 - 5 cm Tiefe (Modellstufe 2)

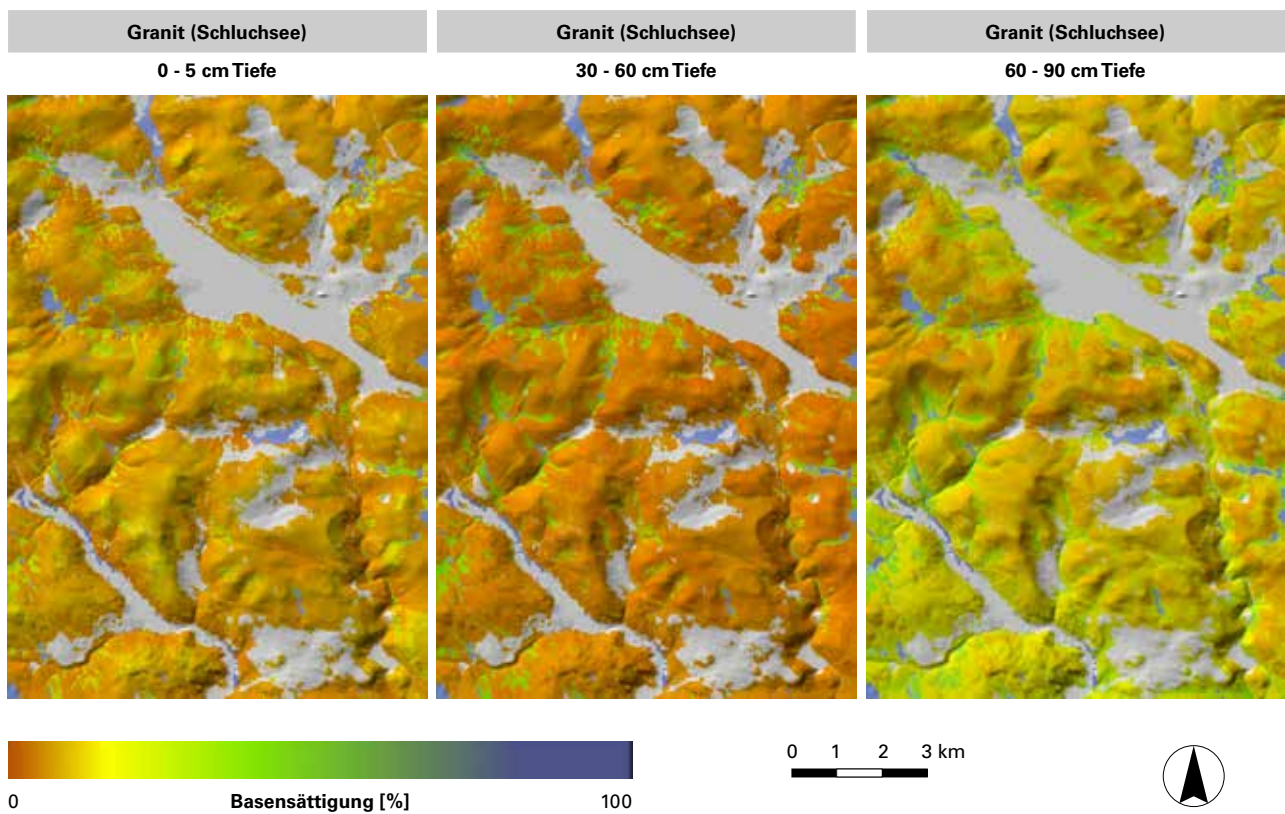
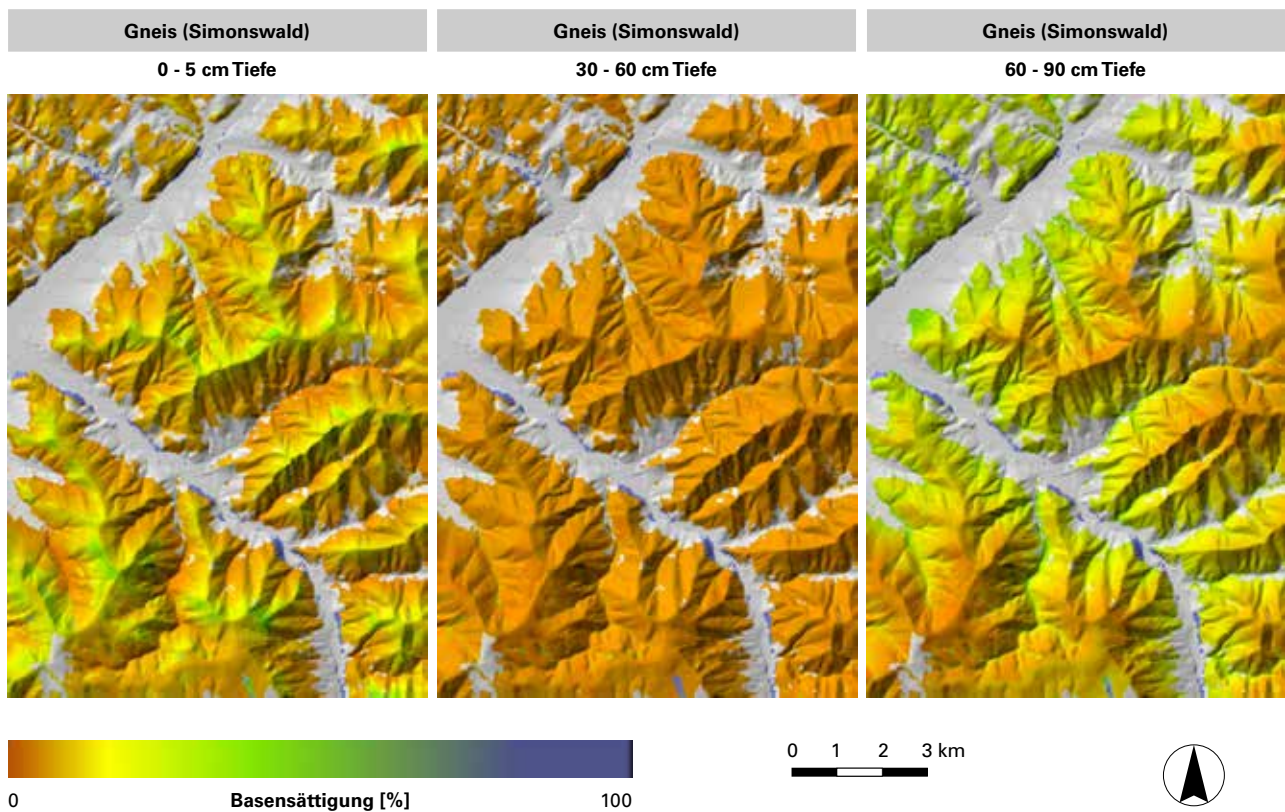


Abb. 4.4.4.2-3: Ist-Zustand der Basensättigung in 0 - 5 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm Tiefe für Böden aus Gneis und Granit (Zirlewagen 2003; Zirlewagen, v. Wilpert 2004)



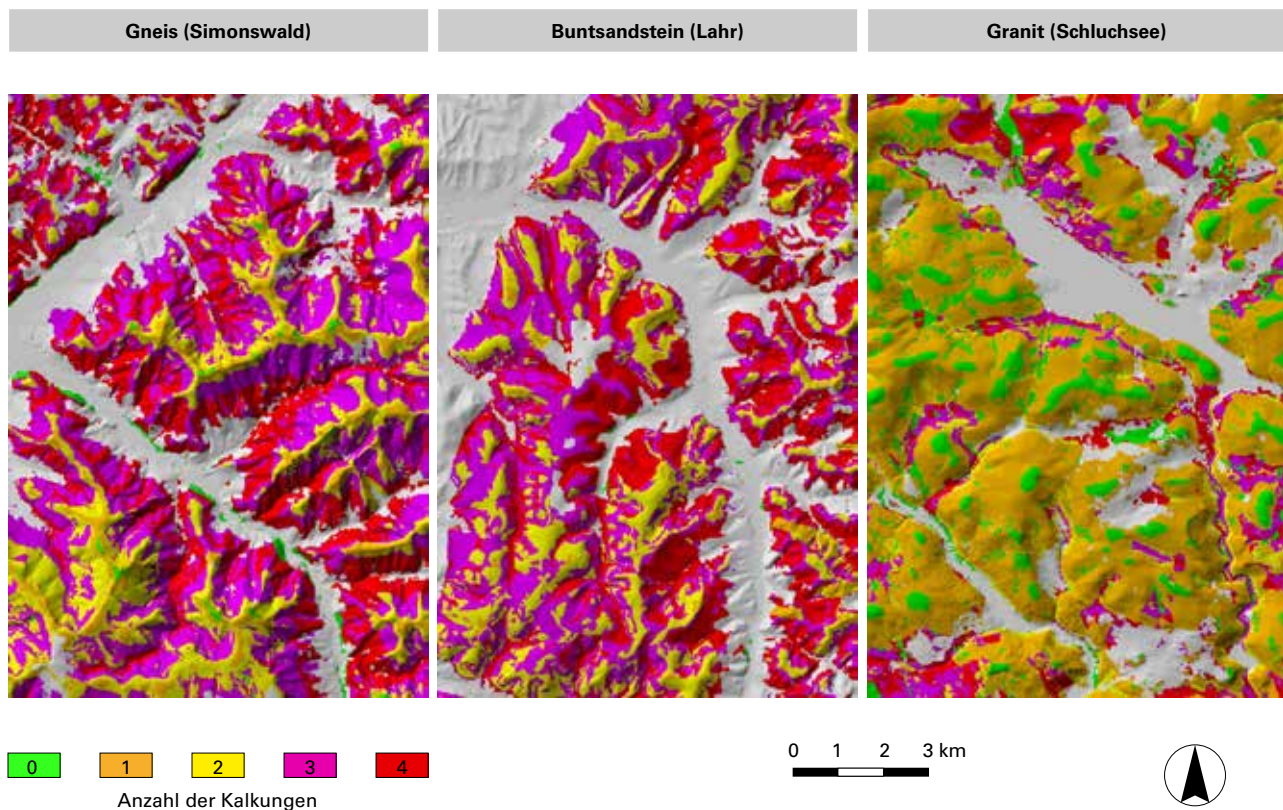


Abb. 4.4.4.2-4: Kalkungsbedarf in 0 - 5 cm Tiefe, Anzahl der Kalkungen bis zum Erreichen des Sollzustands

Im Vergleich der Abb. 4.4.4.2-2 u. 4.4.4.2-3 sieht man die massive Absenkung der Basensättigungswerte seit 1927. Die Differenz zwischen den aktuellen und im Sollzustand rekonstruierten Basensättigungswerten wird als langfristiger Kalkungsbedarf aufgefasst. Wird dieses Basensättigungsdefizit in Kalkäquivalente umgerechnet, ergibt sich im Geländemodell ein flächendifferenzierter Kalkungsbedarf, der unter der Annahme einer durchschnittlichen Dosierung von 3 t/ha je Kalkungsmaßnahme zur Erreichung eines „vorindustriellen“ Bodenzustands als Anzahl von Kalkungsmaßnahmen ausgedrückt werden kann (Abb. 4.4.4.2-4).

Man erkennt, dass Waldböden der geogen gut ausgestatteten Substrate im Vergleich zur natürlichen Bodenentwicklung und bedingt durch die Versauerungsgeschichte der rückliegenden Jahrzehnte stärker in Mitleidenschaft gezogen worden sind, als Waldböden auf dem von Natur aus armen Ausgangsgestein Granit, auf dem schon im „vorindustriellen“ Zustand die Oberböden versauert waren. Abhängig von der Geländedeposition lässt sich eine deutliche Systematik beim Kalkungsbedarf erkennen. Um einen naturnahen Bodenzustand im Oberboden (0 - 5 cm Tiefe)

zu erreichen ist der Kalkungsbedarf in allen Substraten an den Hangfüßen am höchsten und im Bereich der Kuppen und Oberhänge am geringsten. In diesen exponierten Geländeteilen befinden sich die natürlich höchsten Versauerungsintensitäten.

Einen Überblick über den Kalkungsbedarf für die betrachteten Gebiete im Schwarzwald gibt Abb. 4.4.4.2-4.

Entsprechend dem Bodenzustand in 5 cm Bodentiefe sind im Schwarzwald durchschnittlich 3 Bodenschutzkalkungen mit einer Dosierung von 3 t/ha notwendig, um einen „vorindustriellen“ Bodenzustand wiederherzustellen. In 15 cm Bodentiefe ist im Durchschnitt eine Kalkungsmaßnahme weniger erforderlich.

Der Kalkungsbedarf fällt entsprechend der landschaftlichen Großgliederung unterschiedlich aus. In der Vorbergzone sind 1 - 3 Kalkungskampagnen notwendig, im Kristallinschwarzwald 2 - 4. In der Auswertung wurde der aktuelle chemische Bodenzustand als Szenario ohne Waldkalkungen berechnet. Aus dem in Abb. 4.4.4.2-3 dargestellten Geländemodell wurde der durch die bisherigen



Bodenschutzkalkungen erreichte bodenchemische Effekt (einer höheren Ca- und Mg-Sättigung und einer niedrigeren Al-Sättigung) herausgerechnet. Dies war möglich, da bei der Herleitung des Basensättigungsmodells die Bodenschutzkalkung als signifikante Einflussgröße identifiziert worden ist. Der Kalkungsbedarf (Abb. 4.4.4.2-4) ist demnach um die Menge der bei den in der Vergangenheit durchgeführten Bodenschutzkalkungen zu verringern.

Die Fläche der kalkungsbedürftigen Areale im Schwarzwald wurde von den seit Beginn der 1980er Jahre durchgeführten Kalkungskampagnen flächenmäßig gut abgedeckt. Am vollständigsten sind die Flächen im Kristallinbereich beiderseits des Renchtals und in den Hochlagen entlang der B 500 gekalkt. In der Vorbergzone ist etwa die Hälfte der kalkungsbedürftigen Waldflächen bisher schon einmal gekalkt worden. Deutlich am schlechtesten ist die Flächendeckung der bisherigen Kalkungen im Bereich des Kinzigtals, wo große zusammenhängende Areale seit den 1980er Jahren noch nie gekalkt worden sind.

Der Überblicksdarstellung in Abb. 4.4.4.2-5 liegt eine Datenbank zugrunde, die Informationen wie Zeitpunkt und Dosierung der jeweiligen Kalkungsmaßnahmen enthält. Auf dieser Basis können künftige Maßnahmen exakt geplant werden. Dies betrifft sowohl das langfristige Konzept (Zahl notwendiger Kalkungen) als auch die technischen Einzelheiten künftiger Kampagnen.

Die durch jahrzehntelange Einträge von Säurebildnern über die Luft verursachte flächige Degradation der Waldböden stellt ein gesellschaftliches und umweltpolitisches „Generationenproblem“ dar. Auf den meisten Waldflächen im Ortenaukreis wären künftig etwa 1 - 3 Bodenschutzkalkungen im Abstand von 10 - 15 Jahren notwendig, um den Ausgangszustand der Böden zu erreichen. Ein derart langfristiges Kalkungsprogramm für den Erhalt der Waldböden in dieser Region würde eine politische Festlegung auf bis zu 30 Jahre erfordern.

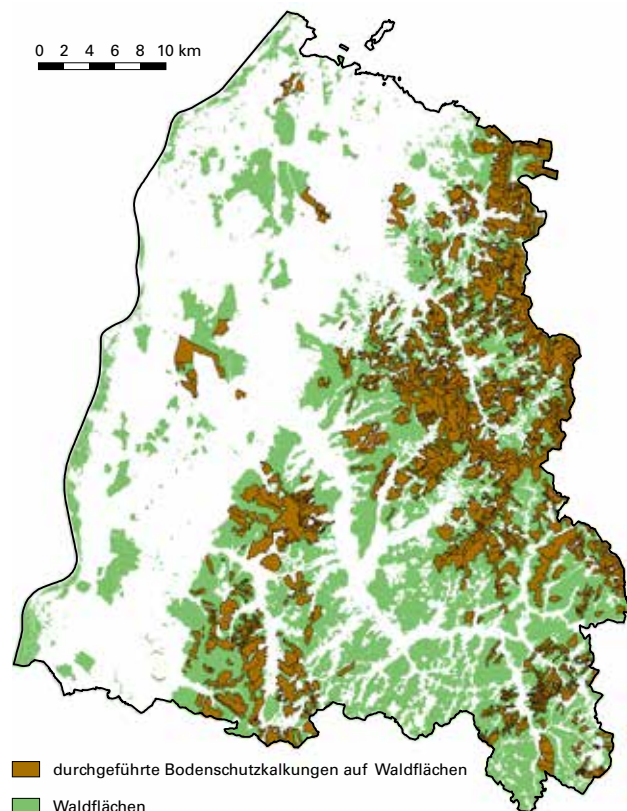


Abb. 4.4.4.2-5: Im Ortenaukreis seit Beginn der 1980er Jahre durchgeführte Bodenschutzkalkungen (braun), Waldfläche grün hinterlegt (FVA 2005)

## 4.5 Flächeninanspruchnahme

Durch Flächeninanspruchnahme wird naturnahe oder land- und forstwirtschaftlich genutzte Fläche in Siedlungs- und Verkehrsfläche umgewandelt oder Flächen werden für den Rohstoffabbau benötigt. Bei Abgrabungen oder der Bodenversiegelung gehen die natürlichen Bodenfunktionen verloren oder sie werden nachhaltig beeinträchtigt.

Im Jahr 2000 lag der landesweite Flächenverbrauch bei 12 ha/Tag und ging in den Jahren 2004 und 2005 auf durchschnittlich 8,8 ha/Tag zurück. Ab 2006 war wieder ein leichter Anstieg zu verzeichnen, der im Jahr 2007 auf 10,3 ha/Tag gestiegen ist. In den Folgejahren ergab sich ein kontinuierlicher Rückgang bis auf 6,6 ha/Tag im Jahr 2010. Seit 1992 bis 2010 ist der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen in Baden-Württemberg von 12,3 % auf ca. 14,1 % gestiegen.

Im Ortenaukreis ist im selben Zeitraum der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen am gesamten Kreisgebiet von 10,2 % (18 833 ha) auf 11,6 % (21 550 ha) gestiegen, wobei der tägliche Flächenverbrauch innerhalb der 2-Jahreszeiträume zwischen 1992 - 2008 mit durchschnittlich

0,45 ha/Tag zu beziffern war. Bis 2010 ist er allerdings auf 0,25 ha/Tag zurückgegangen (Abb. 4.5-1).

Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an den Gemeindeflächen variiert im Kreisgebiet beträchtlich. In vielen Schwarzwaldgemeinden liegt er unter 5 %. Bei Städten und Gemeinden in der Rheinebene und Vorbergzone fällt er dagegen höher aus; er liegt dort zwischen 10 und 20 % (Abb. 4.5-2). Die höchsten Siedlungs- und Verkehrsflächenanteile haben die größeren Städte (Achern: 22,04 %, Kehl: 22,61 %, Lahr: 28,34 %, Offenburg: 28,29 %).

Von 1992 bis 2008 haben die Siedlungs- und Verkehrsflächen am stärksten im Nordwesten des Landkreises zugenommen. Die absolute Zunahme lag in den meisten Schwarzwaldgemeinden unter 50 ha. Am höchsten war sie in Kehl (171 ha), Offenburg (178 ha) und Achern (205 ha). Abb. 4.5-3 zeigt die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Überblick. Anteilig am stärksten zugenommen haben die Siedlungs- und Verkehrsflächen in kleineren Gemeinden, z.B. in Biberach um 32,9 %, in Ohlsbach um 41,2 % und in Rust um 63,9 %.

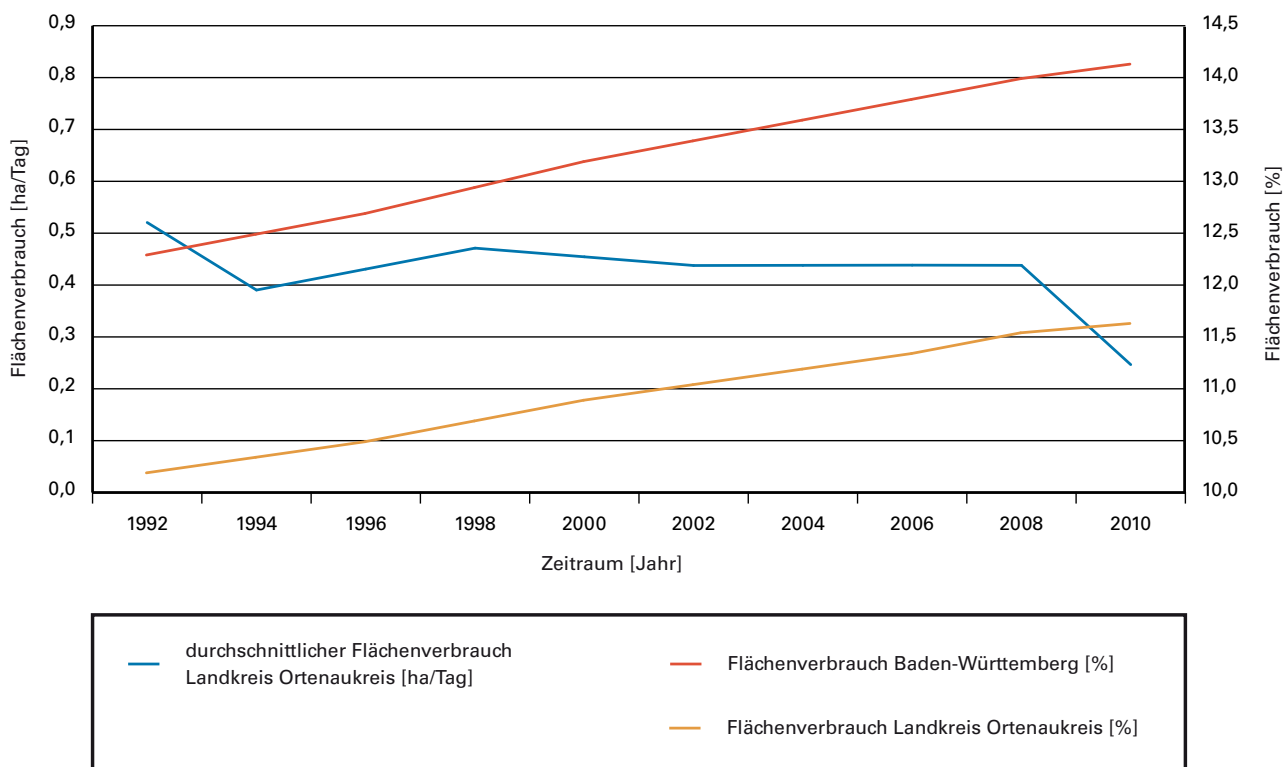


Abb. 4.5-1: Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche [%] landesweit und im Ortenaukreis sowie täglicher durchschnittlicher Flächenverbrauch im Ortenaukreis [ha/Tag] zwischen 1992 und 2010; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

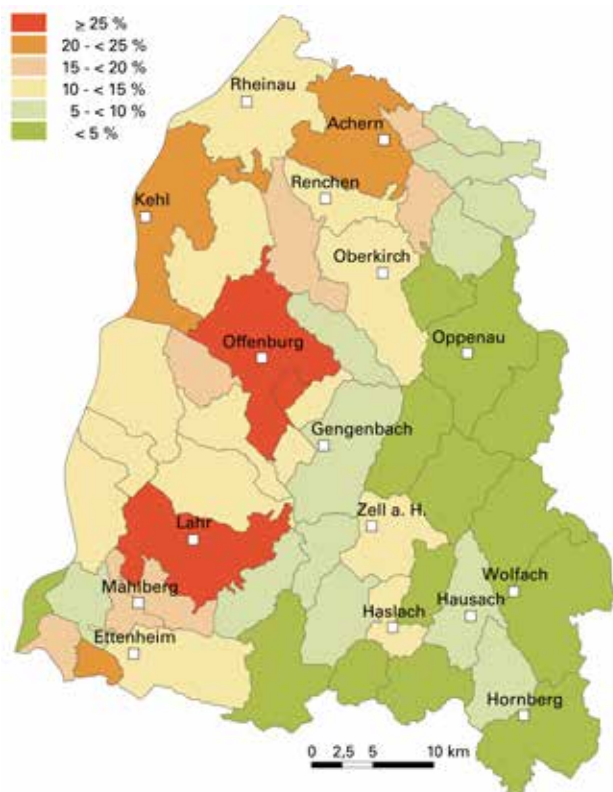


Abb. 4.5-2: Siedlungs- und Verkehrsflächenanteile an den Gemeindeflächen 2010 [%]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

Demgegenüber lag die Zunahme in Lahr bei nur 4,43 %, was auf die Umnutzung früherer militärischer Liegenschaften zurückzuführen ist, die vor 1992 nicht statistisch erfasst worden sind (Abb. 4.5-4).

Zunehmende Siedlungs- und Verkehrsflächen gehen hauptsächlich zulasten landwirtschaftlich genutzter Flächen. Der absolute Rückgang landwirtschaftlicher Nutzflächen ist in einigen Gemeinde- und Stadtgebieten bedingt durch Rohstoffabbau (Kiesgruben u.a.) und Aufforstung höher ausgefallen als es die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen auf den ersten Blick erwarten lässt.

Abb. 4.5-5 zeigt das Verhältnis von Siedlungsfläche zur Einwohnerzahl, welches ein Indikator für den relativen Siedlungsanspruch bildet (Flächeneinsatz in m<sup>2</sup> je Einwohner). Im Jahr 2010 lag der Landkreisdurchschnitt bei 351,2 m<sup>2</sup> Siedlungsfläche je Einwohner. Gemessen daran ist der Flächeneinsatz in Haslach mit 251 m<sup>2</sup> je Einwohner am geringsten. Am höchsten ist er in Sasbachwalden (459 m<sup>2</sup>), Rheinau (463 m<sup>2</sup>), Nordrach (476 m<sup>2</sup>) und Kippenheim (505 m<sup>2</sup>). Die Einwohnerzahl einiger Schwarz-

waldgemeinden wie Oppenau, Bad Peterstal-Griesbach oder Seelbach hat seit 2000 abgenommen. Bei gleichzeitiger Zunahme der Siedlungsfläche fällt der Flächeneinsatz in m<sup>2</sup> je Einwohner höher aus.

Der Anteil der Erholungsflächen (z.B. Freizeitanlagen) an den Siedlungsflächen lag im Jahr 2010 in Gengenbach bei 10,12 %, in Berghaupten bei 11,9 % und in Bad Peterstal-Griesbach bei 14,55 %, d.h. deutlich über dem Kreisdurchschnitt von 6,15 % (Abb. 4.5-6).

Die Effizienz der Flächennutzung in Wohngebieten wird durch das Verhältnis von Wohnfläche in m<sup>2</sup> und Wohngebiet in Hektar wiedergegeben (Wohnflächendichte). Der landkreisweite Durchschnitt lag im Jahr 2004 bei 2 533,25 m<sup>2</sup>/ha. Gemessen daran war die Wohnflächendichte vier Jahre später in Mühlenbach mit 3 725 m<sup>2</sup>/ha, Offenburg (3 511 m<sup>2</sup>/ha), Lahr (3 379 m<sup>2</sup>/ha) und Hausach (3 321 m<sup>2</sup>/ha) am höchsten und in Neuried (1 792 m<sup>2</sup>/ha), Schwanau (1 647 m<sup>2</sup>/ha) und Meißenheim (1 643 m<sup>2</sup>/ha) am geringsten (Abb. 4.5-7). Im selben Jahr lag der Durchschnitt im ländlichen Raum landesweit bei 2 272 m<sup>2</sup>/ha.

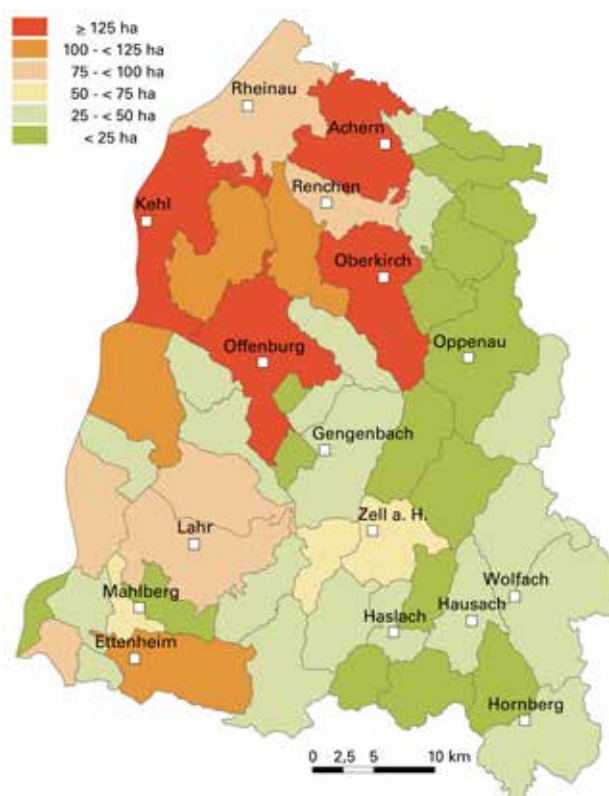


Abb. 4.5-3: Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Zeitraum von 1992 bis 2010 [ha]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011



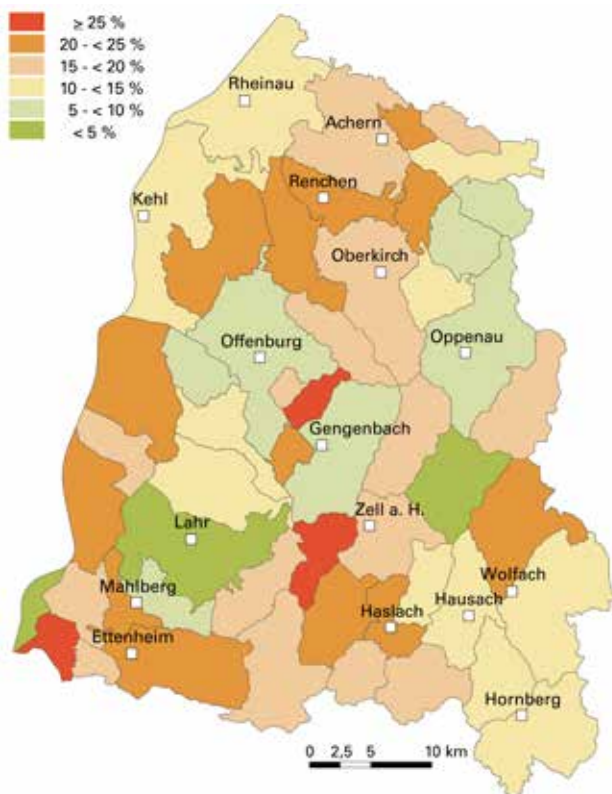


Abb. 4.5-4: Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Zeitraum von 1992 bis 2010 [%]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

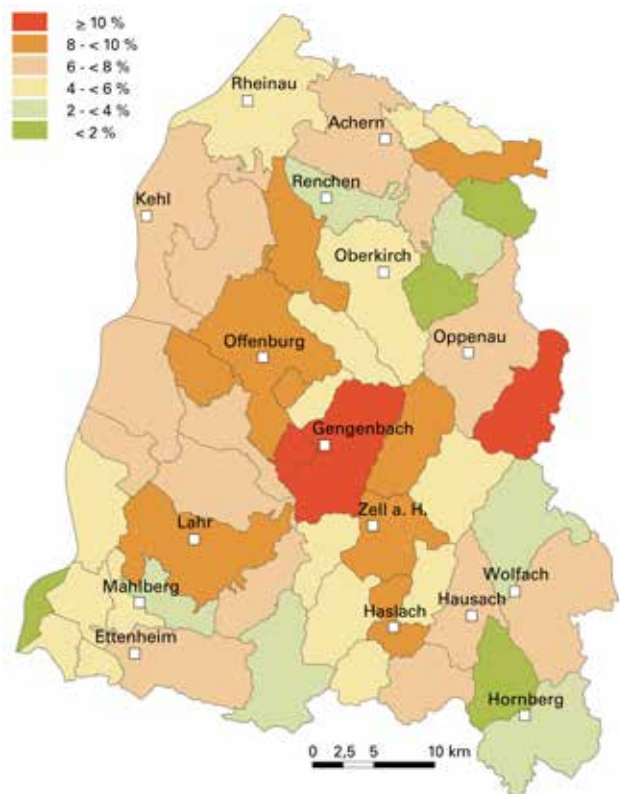


Abb. 4.5-6: Anteil der Erholungsfläche an der Siedlungsfläche im Jahr 2010 [%]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

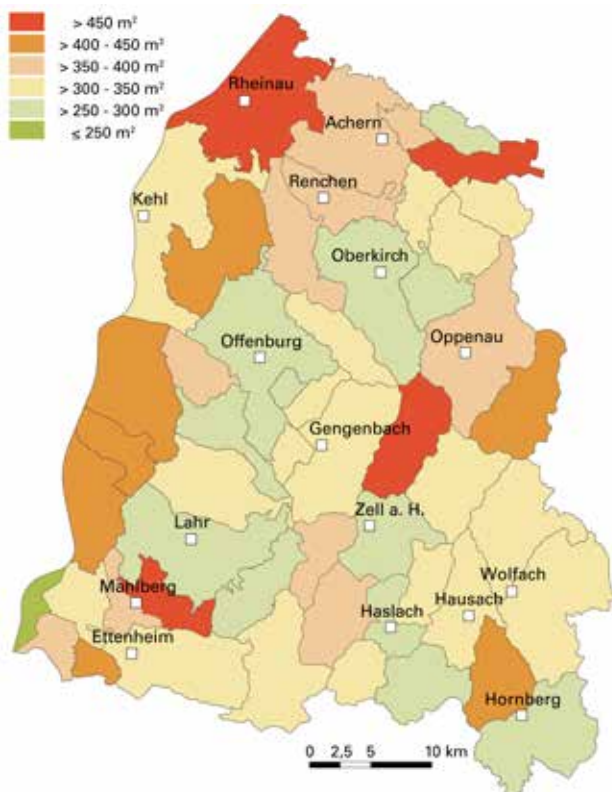


Abb. 4.5-5: Siedlungsfläche je Einwohner im Jahr 2010 [m²/Einwohner]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

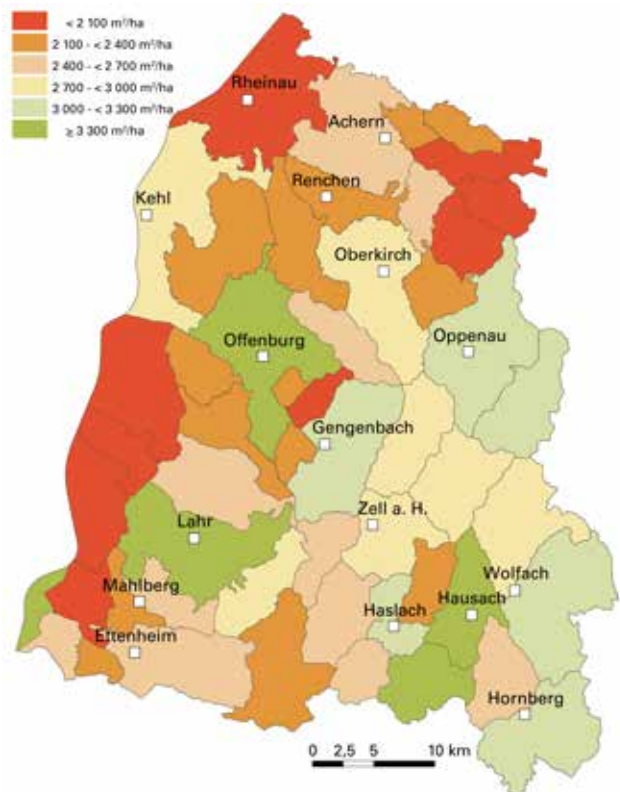


Abb. 4.5-7: Wohnflächendichte im Jahr 2008 [m³/ha]; Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2011

## 4.6 Bodenerosion

### 4.6.1 Allgemeines

Bodenerosion ist der Abtrag von Bodenmaterial durch Wasser und Wind und die Ablagerung an anderer Stelle (Abb. 4.6.1-1). Die Bodenerosion wird wesentlich beeinflusst durch Eingriffe der Menschen.

Schon mit Beginn des frühgeschichtlichen Ackerbaus vor 3 000 Jahren wurden Wälder abgeholzt, um Ackerland zu gewinnen und dadurch Erosionsvorgänge gefördert. Durch die Jahrhunderte andauernde Ackernutzung hat der Bodenabtrag die Landschaft erheblich verändert. Davon zeugen die Kolluvien in Talmulden und an Hangfußbereichen der lössbedeckten Vorbergzone aus z. T. mehrere Meter mächtigen Lagen umgelagerten Lössmaterials oder die überdeckten Auenlagen in den nahe gelegenen Randbereichen der Rheinebene (Kap. 3.1. u. Abb. 4.6.3-2).

Um die Erosion durch landwirtschaftliche Nutzung in der Vorbergzone zu verringern, hat man früher Terrassen und Feldraine angelegt. Trotzdem sind Erosionsvorgänge immer noch von Bedeutung (Kap. 4.6.5).

Im Weinbau sind die Folgen u.a. wegen der seit Jahrzehnten üblichen Begrünung der Rebflächen nicht mehr so augenfällig. Aufmerksamkeit finden sie heute meist



Abb. 4.6.1-2: Durch erodierten Lössboden verschlammter Wirtschaftsweg; Bild: R. Olschewski

dann, wenn Hauskeller verschlammte oder Straßen und Wege unpassierbar werden (Abb. 4.6.1-2). Im Ortenaukreis werden Erosionsvorgänge ausschließlich durch Wasser hervorgerufen.

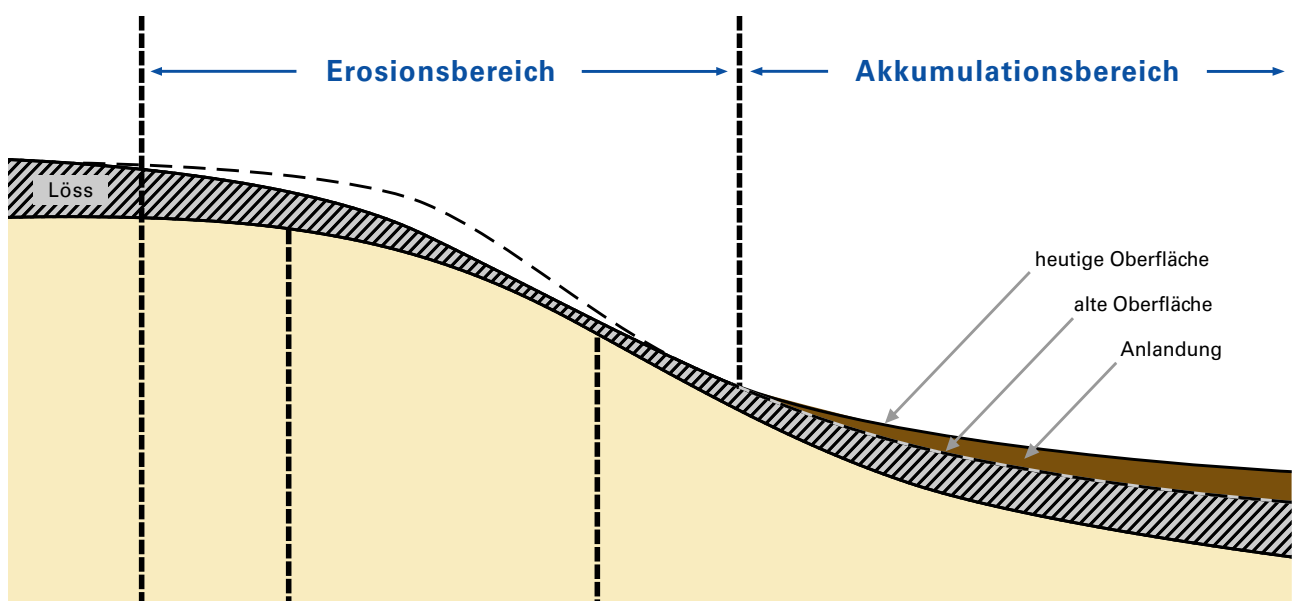


Abb. 4.6.1-1: Schema der Bodenerosion; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

#### 4.6.2 Die Faktoren der Erosion

Die den Bodenabtrag  $A$  maßgeblich beeinflussenden Faktoren sind in der „Allgemeine(n) Bodenabtragsgleichung“ (ABAG) zusammengefasst. Sie ermöglicht, den jährlichen mittleren Bodenabtrag in t/ha zu bestimmen [DIN 19708; SCHWERTMANN ET AL. 1987]:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

##### **R = Regen- und Oberflächenabfluss**

Die Erosivität der Niederschläge ( $R$ ) wird von der Niederschlagsenergie und -intensität bestimmt. Erosive Niederschläge erbringen mindestens 10 mm (10 l/m<sup>2</sup>) oder eine 30-minütige Intensität von mehr als 10 mm/h. Durch die Regentropfen werden die Bodenaggregate zerkleinert und können leichter vom oberflächlich abfließenden Wasser verlagert werden.

##### **K = Erodierbarkeit des Bodens**

Die Anfälligkeit des Bodens gegenüber Bodenerosion wird primär von der Korngrößenzusammensetzung bestimmt. Je höher der Anteil an Schluff (Ø 0,002 - 0,063 mm) und Feinsand (Ø 0,063 - 0,125 mm) ist, desto erosionsanfälliger ist der Boden. Ein hoher Sandanteil gewährleistet dagegen eine gute Versickerung des Niederschlagswassers, während ein hoher Tonanteil häufig eine höhere Stabilität des Bodengefüges mit sich bringt. Auch ein geringer Humusgehalt (< 4 Gew.-%) begünstigt die Erosionsanfälligkeit, weil Humus die Stabilität des Bodengefüges verbessert. Zu den besonders erosionsanfälligen Böden der Ortenau zählen die aus der Verwitterung von Löss entstandenen Böden der Vorbergzone. Dort bilden Schluff und Feinsand oft mehr als 80 % des humusarmen Bodenmaterials.

##### **L = Hanglänge und S = Hangneigung**

Der Bodenabtrag bei einem Erosionsereignis nimmt mit der Hangneigung und der Hanglänge zu. Je steiler die Hangneigung, desto eher kommt es bei erosiven Niederschlägen zu Oberflächenabfluss, der je nach Fließgeschwindigkeit Bodenmaterial mit sich führt.

##### **C = Bodenbedeckung und -bearbeitung**

Die Intensität der Bodenerosion wird beim Anbau bestimmter Kulturpflanzen in unterschiedlicher Weise beeinflusst. Einerseits wird der Boden bei einem hohen

Bedeckungsgrad durch das Blattwerk bzw. durch Pflanzenrückstände vor aufprallenden Regentropfen geschützt. Andererseits wird durch intensive Bodenbearbeitung, z.B. Vorbereitung des Saatbetts, mehr oder weniger feines und lockeres Bodenmaterial erzeugt, das leichter vom Oberflächenabfluss verschwemmt wird.

Bodenabtrag durch Wassererosion wird begünstigt, wo nach der Ernte durch wendende Bodenbearbeitung (z.B. Pflügen) keine Pflanzenrückstände auf der Ackeroberfläche verbleiben und der Boden in der Zeit mit hohen erosiven Niederschlägen (Mai und Juni) vom Blattwerk der Kulturpflanzen unzureichend bedeckt wird (z.B. bei Mais).

##### **P = Erosionsschutzmaßnahmen**

Dazu zählen Maßnahmen wie die Anlage von Terrassen oder Grünstreifen sowie die Konturnutzung (Bearbeitung und Saat parallel zu den Höhenlinien).

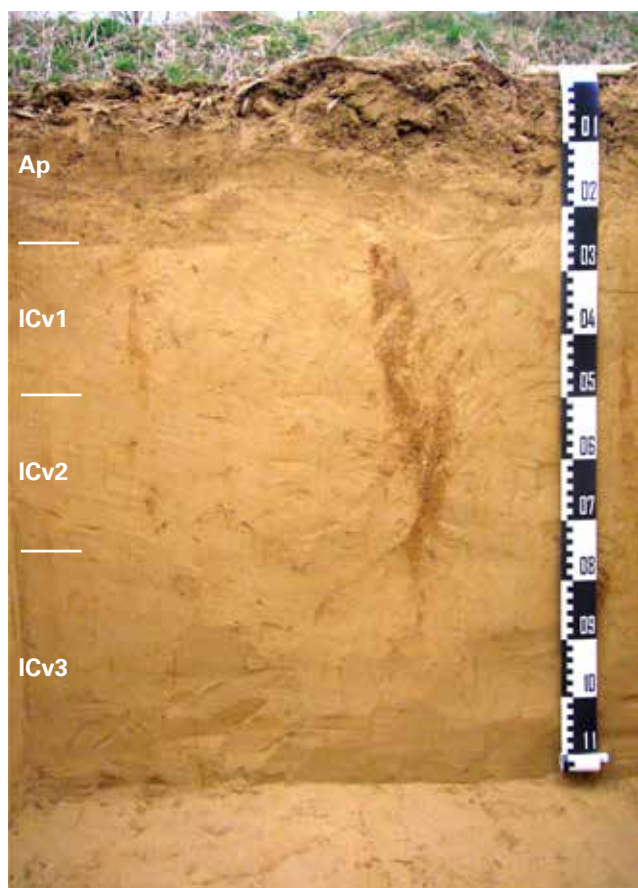
#### 4.6.3 Folgen der Bodenerosion

Bodenerosion ist auf den Abtragsflächen immer mit dem Verlust von humosem Oberboden (Mutterboden) und den darin enthaltenen Nährstoffen verbunden. Wiederkehrende Erosionsereignisse führen langfristig zur erheblichen Verringerung der Speicherkapazität des Bodens an Nährstoffen und bei felsigem Untergrund zum Mangel an Wasser. Die Folge ist eine nachhaltige Beeinträchtigung der Bodenfunktionen „Standort für Kulturpflanzen“ und „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ (Kap. 3.2).

Als Beispiel dienen zwei Standorte aus dem Einzugsgebiet „Schlossberg - Maiertal“ bei Oberschopfheim, deren Böden horizontweise auf Nährstoff- und Humusgehalte untersucht wurden. Bodenabträge am Hang stehen häufig mit anstehenden Pararendzinen im Zusammenhang (Abb. 4.6.3-1). Im Akkumulationsbereich am Hangfuß bildet das abgeschwemmte, humosere Bodenmaterial Kolluvien (Abb. 4.6.3-2).

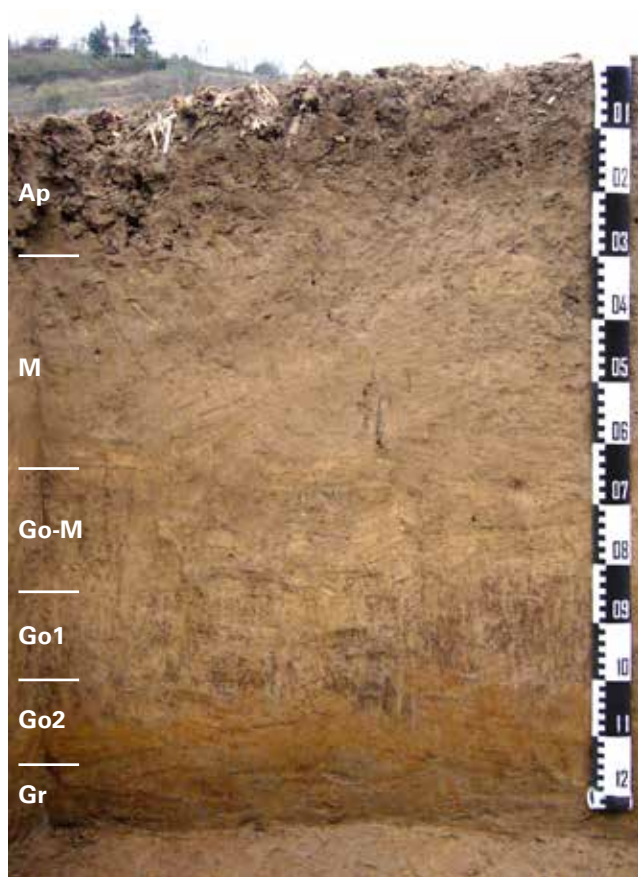
Der gepflügte, schwach humose Oberboden der Pararendzina (0 - 25 cm Tiefe) enthält im Vergleich zum Kolluvium geringere pflanzenverfügbare Gehalte an Haupt- und Spurennährstoffen. Die Gehalte an Phosphor [LTZ 2011],





| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | Hauptnährstoffe [mg/100g]     |                           |      |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|
|               |                                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O          | MgO  |
| -25           | 7,63                            | 2,70                          | 9,3                       | 5,1  |
| -50           | 7,66                            | 0,39                          | 3,0                       | 4,7  |
| -75           | 7,67                            | 0,55                          | 2,2                       | 4,6  |
| -100          | 7,68                            | 0,62                          | 1,5                       | 4,5  |
| Tiefe<br>[cm] | Karbonat<br>[Gew.-%]            | Organische Substanz           |                           |      |
|               |                                 | C <sub>org</sub><br>[Gew.-%]  | N <sub>t</sub><br>[mg/kg] | C/N  |
| -25           | 19,5                            | 0,58                          | 530                       | 10,9 |
| -50           | 18,5                            | 0,42                          | 180                       | 23,3 |
| -75           | 18,1                            | 0,15                          | 170                       | 8,8  |
| -100          | 18,8                            | 0,15                          | 140                       | 10,7 |
| Tiefe<br>[cm] | Spurennährstoffe [mg/kg]        |                               |                           |      |
|               | Bor                             | Kupfer                        | Mangan                    | Zink |
| -25           | 0,53                            | 0,3                           | 11,5                      | 0,54 |
| -50           | 0,47                            | 0,2                           | 9,4                       | 0,28 |
| -75           | 0,15                            | 0,2                           | 7,5                       | 0,26 |
| -100          | 0,31                            | 0,2                           | 7,6                       | 0,34 |

Abb. 4.6.3-1: Pararendzina aus weitgehend unverwittertem Löss im Abtragsbereich, Einzugsgebiet „Schlossberg-Maiertal“; IC Horizonte aus mergeligem Ausgangsmaterial (e); Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



| Tiefe<br>[cm] | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | Hauptnährstoffe [mg/100 g]    |                           |      |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|
|               |                                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O          | MgO  |
| -30           | 7,38                            | 31,40                         | 26,5                      | 6,5  |
| -65           | 7,38                            | 13,00                         | 13,7                      | 7,3  |
| -85           | 7,53                            | 2,30                          | 6,9                       | 7,8  |
| -100          | 7,24                            | 0,77                          | 2,4                       | 7,9  |
| Tiefe<br>[cm] | Karbonat<br>[Gew.-%]            | Organische Substanz           |                           |      |
|               |                                 | C <sub>org</sub><br>[Gew.-%]  | N <sub>t</sub><br>[mg/kg] | C/N  |
| -30           | 2,2                             | 1,30                          | 1320                      | 9,8  |
| -65           | 1,5                             | 1,10                          | 1080                      | 10,2 |
| -85           | < 0,5                           | 0,87                          | 780                       | 11,2 |
| -100          | < 0,5                           | 0,58                          | 570                       | 10,2 |
| Tiefe<br>[cm] | Spurennährstoffe [mg/kg]        |                               |                           |      |
|               | Bor                             | Kupfer                        | Mangan                    | Zink |
| -30           | 1,6                             | 3,1                           | 53,1                      | 2,74 |
| -65           | 0,9                             | 3,5                           | 62,9                      | 2,48 |
| -85           | 0,6                             | 2,0                           | 79,9                      | 1,04 |
| -100          | 1,2                             | 1,6                           | 748,0                     | 0,62 |

Abb. 4.6.3-2: Kolluvium im Akkumulationsbereich, Einzugsgebiet „Schlossberg-Maiertal“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski

Kupfer, Mangan und Zink [VDLUFA 2006] sind so niedrig, dass ohne eine intensivere Düngung keine vollen Erträge erzielt werden (Gehaltsklasse A). Um einen ausreichend hohen Ernteertrag zu erzielen, muss die Düngung die Nährstoffabfuhr mit der Ernte deutlich übersteigen.

Im bearbeiteten, humusreicheren Oberboden des Kolluviums (0 - 30 cm Tiefe) ist die Versorgung der Nährstoffe dagegen optimal bis sehr hoch (Gehaltsklasse C bis D). Volle Erträge können erzielt werden, wenn Düngegaben zu 50 - 100 % die Nährstoffabfuhr der Erntegüter ausgleichen. Ebenso weist der Unterboden des Kolluviums hohe Nährstoffgehalte auf, die von den angebauten Pflanzen wegen der günstigen Nährstoffversorgung im Oberboden jedoch kaum genutzt werden. Für den Bewirtschafter stellen sie einen Verlust dar.

Der erosionsbedingt etwa um die Hälfte geringere Humusgehalt der Pararendzina ( $C_{org} \approx 58$  Gew.-% des Humusgehalts) wirkt sich nachteilig auf die Standorteigenschaften aus. Neben der verminderten Nährstoffspeicherfähigkeit führt der fehlende Humusgehalt zu einer Destabilisierung des Bodengefüges und erhöht die ohnehin hohe Erosionsanfälligkeit der Pararendzina am Hang zusätzlich. Um den ursprünglichen Humusgehalt wieder herzustellen, müssten bei 25 cm Bearbeitungstiefe und Annahme einer Lagerungsdichte des Bodens von  $1,4 \text{ g/cm}^3$  etwa 25 t organischer Kohlenstoff pro Hektar und Jahr aufgebracht werden.

Ein Humusersatz in dieser Höhe ist über Jahrzehnte nur möglich, wenn wie beim Anbau von Körnermais große Mengen an Pflanzenrückständen auf den Ackerflächen zurückbleiben und keine neuen Erosionsereignisse auftreten.

Zur Gewährleistung der uneingeschränkten Ertragsfähigkeit wäre im selben Zeitraum für ein bleibend optimales C/N-Verhältnis von 10 der Gesamtstickstoffgehalt  $N_t$  um 2,3 t pro Hektar und Jahr zu erhöhen (Exkurs: C/N-Verhältnis; Kap. 4.3.1). Bei viehlosen Landwirtschaftsbetrieben wird dies nur durch Mineraldüngereinsatz im Rahmen der Düngeverordnung erfolgen können (Kap. A.4.3.1). Der dafür notwendige finanzielle Mehraufwand fällt wegen den in den vergangenen Jahren gestiegenen Düngerpreisen langfristig umso mehr ins Gewicht.

Das Beispiel zeigt, welche nachteiligen Auswirkungen die Erosion von wertvollem Bodenmaterial auf die Bodenfruchtbarkeit und auf das Ertragspotenzial an den betroffenen Standorten hat. Langfristig ist dies mit betriebs- und volkswirtschaftlichen Verlusten verbunden.

#### 4.6.4 Maßnahmen zur Erosionsminderung

Intensive Niederschläge können auf ackerbaulich genutzten Flächen zu beträchtlichen Bodenverlusten führen. Erosionsvorbeugende Maßnahmen sind besonders in Lössgebieten wichtig, zumal in Fachkreisen von einer Zunahme der Starkniederschläge im Zug des Klimawandels ausgegangen wird (Kap. 2.4).

Anhand der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (Kap. 4.6.2) ergibt sich, dass wirksame Maßnahmen auf die Faktoren der Bodenabtragsgleichung  $L$  = Hanglänge und  $C$  = Bodenbedeckung/-bearbeitung abzielen sollten.

Um die Hanglänge zu verringern, können Ackerflächen in mehrere getrennt bewirtschaftete Teilflächen unterteilt werden, auf denen die Bodenbearbeitung und die Ansaat möglichst quer zum Hanggefälle erfolgen soll. Bei steileren Hangneigungen kann dies jedoch wirkungslos bleiben, da



Abb. 4.6.4-1: Erosionserscheinungen auf einem Maisfeld trotz Bearbeitung quer zum Hanggefälle; Bild; R. Olschewski

sich bei Starkregen in Furchen und Fahrspuren Wasser sammelt und schließlich durchbricht (Abb. 4.6.4-1).

Allerdings schränken Form und Größe der bestehenden Ackerflächen die Möglichkeiten, diese Maßnahmen umzusetzen, ebenso ein wie die Eigentums- und Besitzverhältnisse. Sind mehrere Bewirtschafter involviert, erfordern Maßnahmen eine hohe Kooperationsbereitschaft unter den Landwirten bei eingeschränkter Möglichkeit, individuell über den jährlichen Anbau zu entscheiden.

Erosionsbedingter Bodenabtrag wird durch wenige Meter breite Grünstreifen verringert („grassed waterways; begrünte Wasserwege“). Je nach Topografie können Grünstreifen entlang von Ackerändern, als Querstreifen innerhalb von größeren Ackerflächen oder der Tiefenlinie folgend angelegt werden. Als mehrjähriges Grünland oder als einjähriger Gras- oder Getreidestreifen lassen sie sich gut in die Bewirtschaftungsroutine bei Milchbetrieben integrieren, wenn bereits bestehendes Grünland bewirtschaftet wird.

Im Lösshügelland der Ortenauer Vorbergzone wirtschaften jedoch hauptsächlich reine Ackerbaubetriebe. Die Herausnahme von Flächen aus der Produktion ist dort immer mit Einnahmeverlusten verbunden und findet deswegen bei den Landwirten, die aus betriebswirtschaftlichen Gründen die oft kleinparzellierten (Pacht-) Grundstücke zu größeren Bewirtschaftungseinheiten zusammenlegen, wenig Akzeptanz.

Zu den erosionsmindernden Bewirtschaftungsmaßnahmen zählen Mulchsaatverfahren. Damit werden Anbauverfahren zusammengefasst, die flach arbeitende, nichtwendende Bodenbearbeitungsgeräte einsetzen. Die Verfahren werden pfluglose oder konservierende Bodenbearbeitung genannt. Bei Mulchsaat werden die Kulturpflanzen in den mit Ernteresten der Vorkultur mehr oder weniger bedeckten Boden eingesät. Die Bodenbearbeitung erfolgt zeitnah zur Aussaat und möglichst nur bis zur Saattiefe. Auf oder nahe der Bodenoberfläche verbleibende Pflanzenreste schützen das Bodengefüge vor der Einwirkung intensiver Niederschläge und schaffen eine raue Oberfläche, die die Geschwindigkeit von abfließendem Wasser herabsetzt (Abb. 4.6.4-2). Im Lauf der Jahre werden der Humusgehalt des Oberbodens und die Besiedlungsdichte mit Regenwürmern erhöht. Insgesamt wird so die Kapazität des Bodens zur Wasseraufnahme gesteigert.



Abb. 4.6.4-2: Oberflächennah eingearbeitete Pflanzenrückstände bei Mulchsaat im Einzugsgebiet „Schlossberg - Maier-tal“; Bild: R. Olschewski

Mulchsaat kann häufig mit herkömmlichen Bodenbearbeitungsgeräten und Saatmaschinen ausgeführt werden. Aufwändige und zeitraubende Pflugarbeit entfällt. Ein Mehraufwand an Pflanzenschutzmitteln kann jedoch durch Schneckenbefall z.B. bei Raps oder durch erhöhten Unkraut- und Ungrasdruck entstehen [LAP 2003].

Die in der Vorbergzone verbreiteten Terrassen tragen direkt zum Erosionsschutz bei. Sie bilden in gewisser Weise eine historische Erosionsschutzmaßnahme (Hintergrund in Abb. 4.6.4-2). Wo solche Geländeabschnitte aus Bewirtschaftungsgründen umgestaltet werden, sollte die Erosionsvorsorge von Anfang an eingeplant werden. Die Terrassen können ausgebaut oder neu hergestellt werden, etwa im Rahmen von naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen für die Inanspruchnahme an anderer Stelle von Böden (Kap. 5.2.3.4).

In der lössbedeckten Vorbergzone kann darüber hinaus der Auftrag von humosem Oberboden auf erosionsbedingt verkürzten Bodenprofilen als Ausgleichsmaßnahme anerkannt werden, wenn das Bodenmaterial der Kolluvien verwendet wird, beispielsweise im Rahmen der Erschließung von Baugebieten auf Acker- oder Grünlandflächen in den Bereichen, in denen das Bodenmaterial der erodierten Flächen abgelagert worden ist (Kap. 5.2.3.3).

Zusammenfassend bieten die Faktoren Bodenbedeckung und -bearbeitung in der Ortenau die besten Ansatzpunkte, um Erosionsschutzmaßnahmen umzusetzen.



#### 4.6.5 Einzugsgebiet „Schlossberg - Maiertal“

Starkniederschläge haben im Mai 2004 in dem 62 ha großen Gebiet südlich von Oberschopfheim zu gravierenden Erosionsschäden geführt. Betroffen waren nicht nur Maisbestände wie in anderen Gemarkungsteilen und Jahren (Abb. 4.6.5-1), sondern auch tiefer gelegene Siedlungs- und Verkehrsflächen. Unter anderem wurde Bodenmaterial in Keller gespült. Die Bundesstraße B3 war wegen Verschlammung vorübergehend gesperrt. Bereits im Mai 2000 kam es zu vergleichbaren Schäden durch Starkregen, so dass die Verpflichtung der Verantwortlichen zur Gefahrenabwehr nach § 8 BBodSchV bestand.



Abb. 4.6.5-1: Im Jahr 2007 durch abgeschwemmten Lössboden verschlammte Ackerfläche; Bild: R. Olschewski

Vor diesem Hintergrund beschlossen die Gemeindeverwaltung Friesenheim, die Untere Bodenschutzbehörde und die Landwirtschaftsbehörde des Landratsamts zunächst, das mit der bisherigen Bodenbearbeitung verbundene Erosionspotenzial zu bewerten und verschiedene Maßnahmen zur Erosionsvermeidung bzw. -minimierung auf Effektivität und Machbarkeit zu prüfen. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Pflanzenbau (LAP) eine computergestützte Simulation des Erosionspotenzials mit dem Programm EROSION-3D in Auftrag gegeben [CESARZ ET AL. 2006].

Im Einzugsgebiet herrschte Maisanbau mit herkömmlicher Bodenbearbeitung (Pflug) vor. Die Größe der Schläge hat sich unter den gewandelten ökonomischen Bedingungen der vergangenen Jahrzehnte durch Kauf und Zupachtung im ehemals klein parzellierten Raum entwickelt. Für die Erosions-Modellierung wurden die bestehende Flurstruktur, die aktuelle Landnutzung und die Bodeneigenschaften mit den topographischen Daten verknüpft.

Simuliert wurde ein 14-stündiger Landregen mit insgesamt 63,5 mm und ein Starkregenereignis von 28 mm innerhalb von 60 Minuten. Verglichen wurden herkömmliche Bodenbearbeitung (Pflug) und das Mulchsaatverfahren mit und ohne Grünstreifen („grassed-waterways“) in den Tiefenlinien des Einzugsgebiets.

Im Modell-Vergleich ergibt sich beim 14-stündigen Niederschlag bei herkömmlicher Bodenbearbeitung mit dem Pflug ein gesamter Oberflächenabfluss von 3 610 m<sup>3</sup> und eine durchschnittliche Nettoerosion von etwa 15 t/ha. Bei Mulchsaat und einem Oberflächenabfluss von 324 m<sup>3</sup> war die auf den Ackerflächen modellierte Nettoerosion mit durchschnittlich 0,01 t/ha sehr gering. Eine zusätzliche Anlage von „grassed waterways“ (GWW) ergab folglich keine nennenswerte weitere Reduktion der Nettoerosion (Tab. 4.6.5-1).

Die erosionsminimierende Wirkung von Mulchsaatverfahren wird besonders bei der Simulation des Starkregens von 28 mm/h deutlich. Im Schnitt fällt die Nettoerosion auf den Ackerflächen bei Mulchsaat mit 4,8 t/ha um 96 % geringer aus als bei herkömmlicher Pflugbearbeitung (Tab. 4.6.5-2).

Abb. 4.6.5-2 zeigt die Verteilung der Flächen mit hoher Nettoerosion auf Ackerflächen unter Pflug gegenüber Mulchsaatverfahren.

Die computergestützten Simulationen zeigen, dass die Umstellung auf Mulchsaatverfahren im Einzugsgebiet zu einer deutlichen Verringerung des Bodenabtrags führt. Mit Hilfe der Erosionssimulationen ist es gelungen, die Bewirtschaftungsweise der Ackerflächen im Einzugsgebiet auf Mulchsaatverfahren umzustellen und die Umstellung in einem öffentlich-rechtlichen Vertrag zwischen den Bewirtschaftern und dem Landratsamt Ortenaukreis zu vereinbaren.

Tab. 4.6.5-1: Ergebnis der Simulation mit EROSION-3D für einen gewöhnlichen Landregen

| Niederschlagsereignis 14 h mit 63,5 mm |                                     | Niederschlagsvolumen [m³] = 39 338 |                              |                               |
|----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Bodenbearbeitung/Bodenbedeckung        | Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet |                                    | Nettoerosion<br>Ackerflächen | Bodenaustrag<br>Einzugsgebiet |
|                                        |                                     | Niederschlag                       |                              |                               |
|                                        | [m³]                                | [%]                                | [t/ha]                       | [t]                           |
| Pflug                                  | 3 610                               | 9,2                                | 15,1                         | 926                           |
| Pflug + GWW                            | 870                                 | 2,2                                | 2,6                          | 161                           |
| Mulchsaat                              | 324                                 | 0,8                                | 0,01                         | 0,5                           |
| Mulchsaat + GWW                        | 307                                 | 0,8                                | 0,00                         | 0,02                          |

Tab. 4.6.5-2: Ergebnis der Simulation mit EROSION-3D für ein Starkregenereignis

| Niederschlagsereignis 1 h mit 28 mm |                                     | Niederschlagsvolumen [m³] = 17 346 |                              |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Bodenbearbeitung/Bodenbedeckung     | Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet |                                    | Nettoerosion<br>Ackerflächen | Bodenaustrag<br>Einzugsgebiet |
|                                     |                                     | Niederschlag                       |                              |                               |
|                                     | [m³]                                | [%]                                | [t/ha]                       | [t]                           |
| Pflug                               | 9 906                               | 57,1                               | 133,3                        | 8 221                         |
| Pflug + GWW                         | 8 107                               | 46,7                               | 69,3                         | 4 272                         |
| Mulchsaat                           | 8 705                               | 50,2                               | 4,8                          | 297                           |
| Mulchsaat + GWW                     | 7 275                               | 41,9                               | 2,9                          | 177                           |

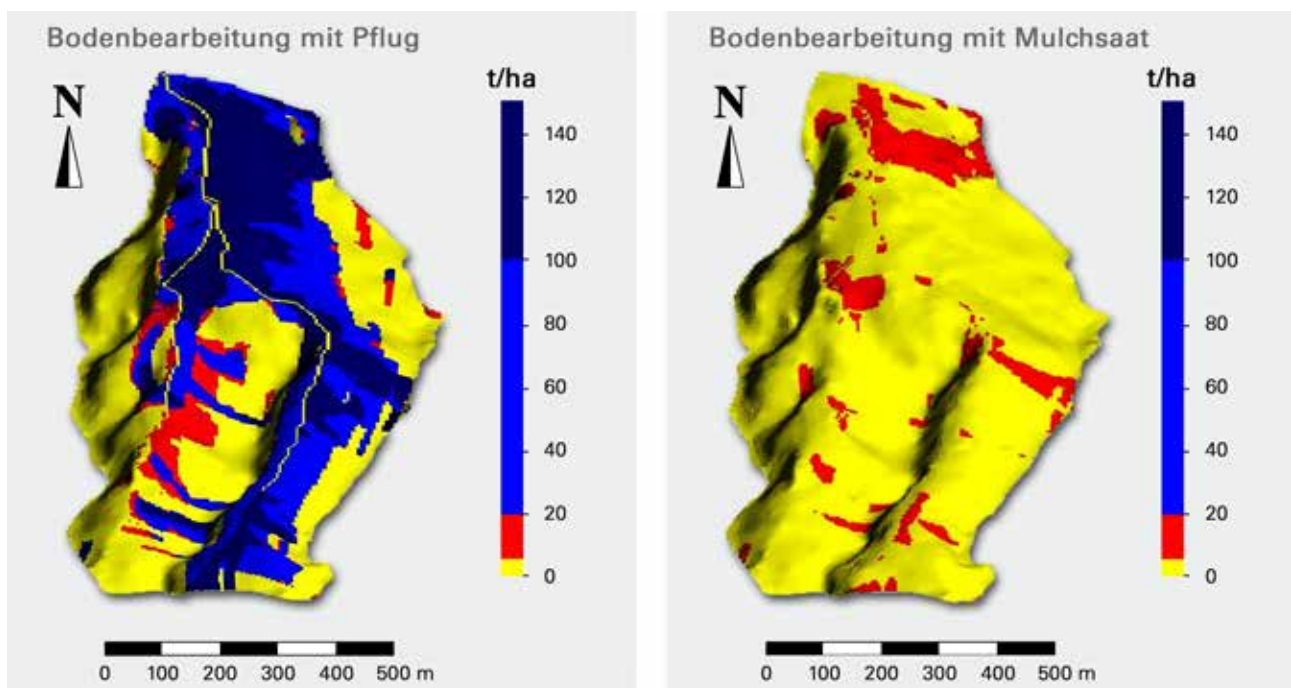


Abb. 4.6.5-2: Verteilung der Flächen mit hohem Nettobodenabtrag [t/ha] im Einzugsgebiet beim simulierten Starkregenereignis [28 mm/h] für Bodenbearbeitung mit Pflug (links) und Mulchsaat (rechts); Quelle: Cesarz et al. 2006

# 5 Das Schutzgut Boden in der Planung

## 5.1 Bodenschutz in Planungsverfahren

### 5.1.1 Allgemeines

Böden unterliegen vielfältigen Nutzungen. In der Land- und Forstwirtschaft dienen die Böden zur Erzeugung von Lebensmitteln und pflanzlichen Rohstoffen. Böden werden für Siedlungs- und Verkehrsflächen oder zur Gewinnung mineralischer Rohstoffe in Anspruch genommen. Dabei werden sie überbaut, versiegelt oder abgegraben.

Den konkurrierenden Nutzungsansprüchen steht die zentrale Stellung der Böden im Naturhaushalt gegenüber (Kap. 3.2). Die Ressource Boden ist nicht vermehrbar und damit ein wertvolles Sachgut. Eine nachhaltige Bewirtschaftung unserer Böden ist daher erforderlich.

Bereits 1998 hat das Bundesumweltministerium angesichts des anhaltend hohen Flächenverbrauchs von damals 120 ha/Tag die Rückführung auf 30 ha/Tag bis 2020 als Ziel formuliert. Die Landesregierung initiierte im Umweltplan Baden-Württemberg 2007 - 2012 die Rückführung und Lenkung der Inanspruchnahme von Flächen für Siedlung und Verkehr auf weniger wertvolle Böden zugunsten einer kommunalen Innenentwicklung und des Schutzes freier Landschaften.

Der 2002 eingerichtete Nachhaltigkeitsbeirat der Landesregierung empfahl, den Flächenverbrauch in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2020 auf maximal 3 ha/Tag zurückzuführen (2011 noch bei 6,3 ha/Tag). Dabei sind die für die Bauleitplanung zuständigen Kommunen gefordert.

In der Ortenau liegt der Flächenverbrauch seit Jahren zwischen 0,39 - 0,48 ha/Tag (Kap. 4.5). Im Sinn eines nachhaltigen Umgangs mit der Ressource Boden kommt dem vorsorgenden Bodenschutz im Rahmen der Bauleitplanung eine hohe Bedeutung zu (Kap. 5.2.1). Hervorgehobenes Planungsziel muss es dabei sein, ökologische und weitere - beispielsweise ökonomische, soziale oder auch private - Belange im Entscheidungsprozess in einen Ausgleich zu bringen.

Schon in der Planungsphase müssen Eingriffe in die Böden auf das unvermeidbare Maß beschränkt und hochwertige Bö-

den erhalten werden. Unvermeidbare Eingriffe in Böden sind durch geeignete bodenbezogene Kompensationsmaßnahmen auszugleichen (Kap. 5.2).

Zum vorsorgenden Bodenschutz zählt weiter ein fachgerechtes Bodenmanagement bei der Inanspruchnahme von Flächen für Baumaßnahmen. Bodenaushub ist ökologisch sinnvoll zu verwerten. Eine Verwertung außerhalb der Baumaßnahme muss gewährleisten, dass am Verwertungsort die Ertragsfähigkeit des Bodens und die natürlichen Bodenfunktionen nachhaltig gesichert und nicht dauerhaft beeinträchtigt werden (Kap. 5.3).

Auch bei der Planung von Anlagen zur naturnahen Versickerung von Niederschlagswasser sind bodenkundliche Kenntnisse eine Voraussetzung, um den Boden mit seinen Eigenschaften im Sinn des zuvor genannten Optimierungsgebots angemessen zu nutzen und Eingriffe auf das unvermeidbare Maß zu beschränken (Kap. 5.4).

### 5.1.2 Rechtliche Grundlagen

Grundsätze und Ziele des vorsorgenden Bodenschutzes sind in einer Reihe von Gesetzen des Bundes und des Landes Baden-Württemberg verankert:

#### **Raumordnungsgesetz (ROG, Fassung vom 31.07.2009)**

**§ 1 Abs. 2** Leitvorstellung ist eine nachhaltige Raumentwicklung, die soziale und wirtschaftliche Ansprüche mit ökologischen Funktionen in Einklang bringt.

**§ 2 Abs. 2 Nr. 6** nennt als Grundsatz u.a. die Funktionsfähigkeit der Böden zu entwickeln, zu sichern oder wiederherzustellen. Naturgüter sind sparsam und schonend in Anspruch zu nehmen. Die erstmalige Inanspruchnahme von Freiflächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke ist zu vermindern, die Wiedernutzung von Flächen und die Nachverdichtung ist zu fördern.

**§ 2 Abs. 2 Nr. 2 u. Nr. 6** erklären den Freiraum- und Bodenschutz zum Grundsatz der Raumordnung.



**Bundes-Naturschutzgesetz (BNatSchG, Fassung vom 21.01.2013)**

**§ 1 Abs. 1 Nr. 2** nennt als Ziele die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes sowie die Regenerationsfähigkeit und nachhaltige Nutzungsfähigkeit der Naturgüter auf Dauer zu sichern.

**§ 1 Abs. 3 Nr. 2** bestimmt den Bodenschutz zu einem grundsätzlichen Ziel des Naturschutzes. Böden sind so zu erhalten, dass sie ihre Funktionen im Naturhaushalt erfüllen können.

**§ 1 Abs. 5** bestimmt den Schutz unbebauter Bereiche in der dafür erforderlichen Größe und Beschaffenheit zu einem grundsätzlichen Ziel des Naturschutzes.

**§ 1 Abs. 3 Nr. 2** formuliert, dass nicht mehr benötigte versiegelte Flächen soweit möglich renaturiert werden sollen.

**Baugesetzbuch (BauGB, Fassung vom 22.07.2011)**

**§ 1 (5)** verankert als grundsätzliche Ziele der Bauleitplanung u.a. eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung sowie den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen, zu denen auch der Boden zählt.

**§ 1 (6) Nr. 7** verpflichtet dazu, bei der Aufstellung von Bauleitplänen Belange des Umweltschutzes, u.a. die Auswirkungen der Maßnahme auf den Boden, zu berücksichtigen.

**§ 1a (2)** fordert den sparsamen und schonenden Umgang mit Grund und Boden. Dabei sind zur Verringerung der zusätzlichen Inanspruchnahme von Flächen für bauliche Nutzungen die Möglichkeiten der Entwicklung der Gemeinden insbesondere durch Wiedernutzbarmachung von Flächen, Nachverdichtung und andere Maßnahmen zur Innenentwicklung zu nutzen sowie Bodenversiegelungen auf das notwendige Maß zu begrenzen.

**§ 2a Abs. 4** schreibt vor, dass für die Belange des Umweltschutzes nach § 1 Abs. 6 Nr. 7 und § 1a eine Umweltprüfung durchzuführen ist, in der die voraussichtlichen erheblichen Umweltauswirkungen ermittelt und in einem Umweltbericht entsprechend Anlage 1 BauGB beschrieben und bewertet werden müssen. Das Ergebnis der Umweltprüfung ist in der Abwägung zu berücksichtigen.

**§ 176 Abs. 1 und 2 in Verbindung mit § 200 Abs. 3 (Baulandkataster)** ermöglicht den Gemeinden, Eigentümer von unbebauten Grundstücken in Bebauungsplangebieten bzw. in bebauten Ortsteilen zu verpflichten, innerhalb einer zu bestimmenden Frist ihre Grundstücke einer baulichen Nutzung zuzuführen.

**Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG, Fassung vom 24.02.2012)**

**§ 1** führt als Grundsatz ein, dass bei Einwirkungen auf den Boden Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte soweit wie möglich vermieden werden sollen.

**Landesplanungsgesetz Baden-Württemberg (LPlG, Fassung vom 22.05.2012)**

**§ 2 Abs. 1** formuliert die Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung, die soziale und wirtschaftliche Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang bringt.

**§ 11 Abs. 3 Nr. 7 sowie Abs. 7** bestimmen, dass im Regionalplan Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für besondere Nutzungen festzulegen sind. Dazu gehören regionale Grünzüge und Grünzäsuren sowie Gebiete für besondere Nutzungen im Freiraum, vor allem für Naturschutz und Landschaftspflege, für die Bodenerhaltung, für die Landwirtschaft, für die Forstwirtschaft und für Waldfunktionen sowie für Erholung.

**Landesnaturschutzgesetz Baden-Württemberg (NatSchG, Fassung vom 17.12.2009)**

**§ 1 Abs. 1 Nr. 2** legt fest, dass die Regenerationsfähigkeit und die nachhaltige Nutzungsfähigkeit der Naturgüter (Boden, Wasser, Luft, Klima, Tier- und Pflanzenwelt) im Sinne einer nachhaltigen umweltgerechten Entwicklung auf Dauer gesichert werden.

**§ 2 Abs. 1 Nr. 4 u. Nr. 17** erläutert die Grundsätze des Naturschutzes. Demnach sind Böden so zu erhalten, zu schützen und nur so zu nutzen, dass sie ihre Funktionen im Naturhaushalt erfüllen können und ein Verlust oder eine Beeinträchtigung ihrer Fruchtbarkeit vermieden wird. Für die landwirtschaftliche Nutzung gut geeignete Böden sollen dieser Nutzungsart vorbehalten bleiben.

Grundsätzlich ist mit Boden sparsam, schonend und haushälterisch umzugehen. Die erneute Inanspruchnahme bereits bebauter Flächen sowie der Bebauung innerörtlicher unbebauter Flächen ist Vorrang vor der Inanspruchnahme von Freiflächen im Außenbereich einzuräumen.

#### **Landesbodenschutz- und Altlastengesetz Baden-Württemberg (LBodSchAG, Fassung vom 17.12.2009)**

**§ 1 Abs. 1** legt fest, dass die Bodenschutzbehörden auf den sparsamen, schonenden und haushälterischen Umgang mit Boden und Fläche hinzuwirken haben.

**§ 2 Abs. 1** verpflichtet Behörden des Landes sowie die Körperschaften, Anstalten und Stiftungen des öffentlichen Rechts bei der Planung und Ausführung eigener Baumaßnahmen die Belange des Bodenschutzes in besonderem Maße zu berücksichtigen.

Bei der geplanten Inanspruchnahme von nicht versiegelten, nicht baulich veränderten oder unbebauten Flächen ist zu prüfen, ob die Flächeninanspruchnahme bedarfsgerecht ist und ob eine Realisierung des Projektes mit einer geringeren Flächeninanspruchnahme, eine Wiedernutzung von bereits versiegelten, sanierten, baulich veränderten und bebauten Flächen, eine Nutzung von Baulücken oder durch die Inanspruchnahme weniger wertvoller Böden möglich ist.

**§ 2 Abs. 2** verpflichtet die zuständigen Behörden bei der planerischen Abwägung im Rahmen von Planfeststellungsverfahren und Plangenehmigungen zur Prüfung der Gesichtspunkte nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 bis 4 vor der Inanspruchnahme von nicht versiegelten, nicht baulich veränderten oder unbebauten Flächen.

### **5.1.3 Bodenkundliche Fachgrundlagen**

Um den gesetzlichen Bestimmungen Rechnung zu tragen sind

- detaillierte Kenntnisse über die Bodeneigenschaften und ihre räumliche Verbreitung einschließlich messbarer Kenngrößen,
- einheitliche Kriterien für die Bewertung der Ausprägung der einzelnen Bodenfunktionen erforderlich.

So lassen sich hochwertige Böden bereits in der Planungsphase schützen und Eingriffe z.B. bei Baumaßnahmen auf weniger wertvolle Böden lenken. Sind bauliche Eingriffe unvermeidbar, können damit die erforderlichen Kompensationsmaßnahmen quantifiziert werden (Kap. 5.2).

#### **5.1.3.1 Bodendaten**

Als Quellen für Bodendaten dienen in Baden-Württemberg die amtlichen Bodenkarten und die Daten der Bodenschätzung.

##### **Bodenkarte Baden-Württemberg 1 : 50 000 (BK 50)**

Das Kartenwerk wird vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg auf Grundlage eigener Felderhebungen erstellt (BK 50). Die Beschreibung der Böden sowie die Ableitung wichtiger bodenphysikalischer und -chemischer Kenngrößen basiert auf den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung [AG BODEN, 2005].

In der BK 50 werden Bodeneinheiten mit ähnlicher Entstehung und vergleichbaren Bodeneigenschaften in Kartiereinheiten zusammengefasst. Es dominiert ein Hauptbodentyp, der mit untergeordnet vorkommenden Böden vergesellschaftet ist.

Im Gelände sind häufig fließende Übergänge zwischen verschiedenen Bodentypen zu beobachten, deren Abgrenzung in den Karten eine bestmögliche Annäherung an die Realität darstellt. Die Genauigkeit der kartographischen Darstellung solcher Übergänge hängt vom Kartenmaßstab ab. Bei der Verwendung und Interpretation der als Anlage beigefügten Auszüge der BK 50 bzw. den daraus abgeleiteten Bewertungskarten ist dies zu berücksichtigen (Abb. A.3.1.2-1).

Eine Maßstabsvergrößerung ist bis in den Bereich von 1:25 000 möglich. Eine darüber hinaus gehende Vergrößerung kann leicht dazu führen, dass die Genauigkeit der Kartengrundlagen überinterpretiert wird. Daher sollten insbesondere bei auf Einzelflächen bezogenen Fragestellungen zusätzlich Daten der Bodenschätzung oder aus gesonderten bodenkundlichen Erhebungen im Gelände zur Bewertung herangezogen werden.

Die Bodenfunktionsbewertung stellt nur einen Anwendungsbereich der BK 50 dar. Die Beschreibung und Dokumentation der Daten ist breit angelegt. Neben allgemeinen Angaben wie etwa zum Bodentyp oder zum geologischen Ausgangssubstrat sind u.a. bodenkundliche Kenngrößen wie z.B. nutzbare Feldkapazität oder Wasserdurchlässigkeit aufgeführt.

Die Daten der BK 50 können nicht nur für die Bauleitplanung, sondern z.B. auch zur Einschätzung der Nitratauswaschungs- und Erosionsgefährdung (Kap. 4.3.2, 4.3.3 u. 4.6), der Eignung von Böden zur naturnahen Versickerung von Niederschlagsabflüssen (Kap. 5.4) oder bei der Suche geeigneter Standorte für bodenbezogene Kompensationsmaßnahmen herangezogen werden (Kap. 5.2.3).

#### **Bodenschätzungsdaten**

1934 wurde in Deutschland das Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens erlassen, das bis heute zur Erfassung und zur steuerlichen Bewertung von Acker- und Grünlandflächen im Hinblick auf ihre Ertragsfähigkeit dient. Die Erhebungen durch die Finanzbehörden waren bis auf Nachschätzungen in den 1950er Jahren überwiegend abgeschlossen. Obwohl die Bodenschätzung besonders auf die Ertragsfähigkeit der Böden abhebt, bildet sie gleichzeitig eine wertvolle Grundlage für den vorsorgenden Bodenschutz bei heutigen Planungsvorhaben.

Die für Äcker und Grünland flächendeckend flurstücksbezogen bereitgestellte Datenbasis wird u.a. für Fragen der Bodenfunktionsbewertung oder der Genehmigungsfähigkeit von Geländeauffüllungen genutzt (Kap. 5.3.2.2). Bei den Erhebungen wurden landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzte Böden nach Acker- und Grünland getrennt geschätzt, indem in Abständen von maximal 50 m Bodenbeprobungen durch Einstiche i.d.R. bis 0,7 m Tiefe erfolgten.

Flächen mit gleichartigen Boden- und Ertragsverhältnissen sind anschließend unabhängig von der Grundstücksstruktur zusammengefasst und mit Klassenzeichen bzw. Wertzahlen von 7 bis 100 beschrieben und bewertet worden (Kap. A.5.1.3.1). Auf Forst- und Rebflächen sowie in Ortslagen wurden keine Bodenschätzungsdaten erhoben.

Die aufbereiteten Schätzungsdaten für den Ortenaukreis stehen digital auf der Grundlage der Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) und des Automatisierten Liegenschaftsbuchs (ALB) des Landesamts für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg (LGL) zur Verfügung. Mit wenigen Ausnahmen können sie vom Landratsamt zur Verfügung gestellt werden. Die Interpretation der Daten setzt bodenkundlichen Sachverstand voraus.

#### **5.1.3.2 Bodenbewertung**

1995 hat das Umweltministerium Baden-Württemberg einen Leitfaden herausgegeben, um Böden z.B. im Rahmen von Planungs- und Gestattungsverfahren nach ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten. Nach 14-jähriger Anwendungspraxis ist dieser Leitfaden überarbeitet und angepasst worden (Abb. 5.1.3.2-1).



Abb. 5.1.3.2-1: Leitfaden zur Bodenfunktionsbewertung; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) 2010a



Die Bodenfunktionen werden anhand der Bodenschätzungsdaten oder der Daten aus der bodenkundlichen Landesaufnahme des LGRB bewertet. Können Bodenschätzungsdaten herangezogen werden, stützt sich das Bewertungsverfahren auf die Interpretation der Klassenzeichen und auf die Wertzahlen. Daten aus Geländeerhebungen werden anhand von mess- und nachvollziehbaren Kenngrößen und Kriterien bewertet (Kap. 3.2).

Neben einem Überblick über die Methoden und ihrer Erläuterung veranschaulicht der Leitfaden anhand von Beispielen die Vorgehensweise und Bewertungsgrundsätze. Die Bodenfunktionen „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“, „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ sowie „Filter und Puffer für Schadstoffe“ werden entsprechend ihrer Ausprägung einer Bewertungsklasse von 0 bis 4 zugeteilt.

Bei der Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ werden nur die Bewertungsklassen 3 und 4 vergeben, da nur extreme Standorteigenschaften wertgebend sind (Kap. 3.2.2).

Die Gesamtbewertung der Böden erfolgt in Wertstufen, die wiederum von 0 bis 4 beziffert werden. Dabei werden zwei Fälle unterschieden:

- Erreicht die Bodenfunktion Sonderstandort für naturnahe Vegetation die Bewertungsklasse 4 (sehr hoch) wird der Boden insgesamt mit der Wertstufe 4 bewertet.
- In allen anderen Fällen wird die Wertstufe des Bodens durch die Bildung des arithmetischen Mittelwerts aus den Einzelwerten für die drei weiteren Bodenfunktionen ermittelt (Tab. 5.1.3.2-1).

Die 1. Spalte der Tabelle zeigt beispielhaft Kombinationen der Bewertungsklassen der Bodenfunktionen „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“, „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ sowie „Filter und Puffer für Schadstoffe“. Die Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ bleibt dabei unberücksichtigt.

Je nach Planungsmaßstab sind, abhängig von den verwendeten Bodendaten, Fehlinterpretationen möglich (Kap. 5.1.3.1). Hierzu bietet der Leitfaden mit einem

Tab. 5.1.3.2-1: Gesamtbewertung der Böden

| Bewertungsklassen<br>für die Bodenfunktionen | Wertstufe<br>(Gesamtbewertung) |
|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 0 - 0 - 0                                    | 0                              |
| 0 - 1 - 0                                    | 0,333                          |
| 1 - 1 - 1                                    | 1                              |
| 1 - 1 - 2                                    | 1,333                          |
| 1 - 2 - 2                                    | 1,666                          |
| 1 - 2,5 - 2                                  | 1,833                          |
| 2 - 2 - 2,5                                  | 2,166                          |
| 2 - 2 - 3                                    | 2,333                          |
| 2 - 3 - 3                                    | 2,666                          |
| 3 - 3 - 3                                    | 3                              |
| 3 - 3 - 3,5                                  | 3,166                          |
| 3 - 3 - 4                                    | 3,333                          |
| 3 - 4 - 4                                    | 3,666                          |
| 4 - 4 - 4                                    | 4                              |

Schema zur Kombination der Ergebnisse beider Bewertungsverfahren eine Lösungsmöglichkeit.

**Die Bewertungsergebnisse sind stets auf Plausibilität zu prüfen und nicht nur, wenn sich die Gesamtbewertungen nach der BK 50 deutlich von denjenigen nach den Daten der Bodenschätzung unterscheiden. Das Landratsamt Ortenaukreis kann dabei Hilfestellung leisten.**

#### 5.1.4 Das Schutzgut Boden in der Umweltprüfung

Um bei Planungen den Belangen des Bodenschutzes Rechnung zu tragen, muss das Schutzgut Boden in Umweltprüfungen umfassend abgehandelt werden.

Bewertungen und Beschreibungen müssen Aussagen enthalten über:

- die Böden vor dem geplanten Eingriff
- Auswirkungen des Eingriffs
- Vermeidungs-/Minimierungsmaßnahmen
- Kompensationsmaßnahmen.

## Bodenschutz in der Umweltprüfung nach BauGB

Leitfaden für die Praxis der Bodenschutzbehörden  
in der Bauleitplanung



Abb. 5.1.4-1: Bodenschutz in der Umweltprüfung nach BauGB; Quelle: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) 2009

Die Grundlagen dazu werden in Kap. 5.1.2 u. 5.2.2 behandelt. Bei Maßnahmen, die mit großflächigen Bodenabträgen verbunden sind (z.B. Rohstoffabbau), ist dem Landratsamt eine Darstellung der Verwertbarkeit des anfallenden Bodenmaterials anhand einer Bodenkartierung vorzulegen (Kap. 5.3.2.4 u. 5.3.2.5).

Die Umweltprüfung in der Bauleitplanung sollte bei Flächennutzungs- und Bebauungsplänen unterschiedliche Schwerpunkte setzen.

Im Flächennutzungsplan werden die künftigen Standorte der baulichen Nutzung festgelegt. Daher sollte der Fokus auf der räumlichen alternativen Prüfung und der ausführlichen Begründung der Eingriffsnotwendigkeit liegen. Gemäß § 5 Abs. 2 Nr. 6, 9 und 10 BauGB können z.B. Flächen mit landwirtschaftlich hochwertigen Böden dargestellt werden, die vor Überbauung geschützt werden sollen.

Im Bebauungsplan sollte der Blick dagegen auf die Beschreibung der konkreten Eingriffe und die Festlegung notwendiger Maßnahmen zur Minimierung und zur Kompensation von Eingriffen gerichtet werden.

Im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz wurde ein Leitfaden für Kommunalverwaltungen und Fachplaner erarbeitet (Abb. 5.1.4-1) [LABO 2009]. Er enthält Hinweise, in welchem Umfang und Detaillierungsgrad der Boden in der bauleitplanerischen Umweltprüfung abzuhandeln ist. Der Leitfaden umfasst Mustergliederungen und Prüfkataloge. Darüber hinaus wird anhand dreier Fallbeispiele veranschaulicht, wie Mehrfachprüfungen bei zeitlich aufeinander folgenden Verfahren vermieden werden.

### 5.1.4.1 Eingriffe und Auswirkungen

Zu den häufigsten Eingriffen in den Boden zählen:

- Versiegelung (Verkehrsflächen, Gebäude)
- Abgrabung (Rohstoffabbau, technische Bauwerke)
- Bodenauftrag (Lärmschutzwälle)
- Bodenverdichtung während der Bauphase.

Mit Versiegelungen ist i.d.R. ein vollständiger Verlust aller natürlichen Bodenfunktionen verbunden. Entsprechend haben die Bodenfunktionen unter versiegelten Flächen keine Bedeutung (Tab. 5.1.3.2-1).

Bei Abgrabungen wird i.d.R. der leistungsfähigste Teil des Bodenkörpers entfernt. Das Ausmaß der Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfunktionen hängt vom verbleibenden „Restboden“ ab. Bei entstehenden Baggerseen wurden der überlagernde Boden und der Rohstoff selbst abgegraben. Der See selbst weist jedoch ein Wasserrückhaltevermögen auf, das der Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ eingeschränkt entspricht. Für die Wasserfläche wird daher die Bewertungsklasse 1 angesetzt (LUBW 2012).

Bei Bodenaufträgen, z.B. beim Bau von Lärmschutzwällen, wird das verwendete Bodenmaterial stark verdichtet, was bis zum vollständigen Verlust der Bodenfunktionen führen kann. Der Funktionsverlust wird

durch den Auftrag einer durchwurzelbaren, funktionsfähigen Bodenschicht minimiert.

Vermeidbare Bodenverdichtungen sind meist Folge von Einbaufehlern, z.B. bei Baustelleneinrichtungen oder bei Aufschüttungen bis zum Höhenniveau von Erschließungsstraßen. Dadurch können die natürlichen Bodenfunktionen „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ und „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ erheblich und nachhaltig beeinträchtigt werden (Kap. 5.3.2.3). Auswirkungen auf einzelne Bodenfunktionen sind bei Eingriffen zu quantifizieren. Die Grundsätze dabei werden in Kap. 5.2.2 behandelt.

#### 5.1.4.2 Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen

In der Planungsphase zielen Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen darauf ab, die benötigte Bodenfläche so klein wie möglich zu halten und notwendige Eingriffe auf Böden mit geringer Leistungsfähigkeit zu lenken (Kap. 5.2.2).

Darüber hinaus besteht bei der Aufstellung von Bebauungsplänen die Möglichkeit,

- Bodenversiegelungen flächensparend festzulegen (Grundflächenzahl) und mit Vorgaben zur Verwendung versickerungsfähiger Beläge zu versehen, sowie
- Erdmassenbewegungen durch Anpassung der Planung an den Geländeverlauf zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Bodenaushub wird auf seine Materialeigenschaften im Hinblick auf die Kulturfähigkeit in Kombination mit einer Massenbilanz geprüft. Dies ist Voraussetzung für die fachgerechte und schadlose Verwertung in der Bauphase (Kap. 5.3.2.4). Bodenverdichtungen werden vermieden oder minimiert u.a. durch:

- Beschränken der Baustraßen auf den Verlauf geplanter Erschließungsstraßen
- Aufstellen von Bauzäunen z.B. um spätere Versickerungsflächen
- Ausbau, Um- oder Zwischenlagern von Boden nur bei trockener Witterung (Kap. 5.3.2.4)
- Abschließend fachgerechtes Lockern verdichteter Flächen (u.a. Baustraßen, Zwischenlager; Kap. 5.3.2.5).

Anlagen für die naturnahe Regenwasserversickerung sind i.d.R. mit der Abgrabung von Boden verbunden, weshalb sie nicht generell als Maßnahme zur Minimierung eines Eingriffs in die Funktion des Bodens als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf angesehen werden können. Die Eingriffsminimierung muss die Erhaltung eines ausreichend wasserspeicherfähigen Bodenkörpers zum Ziel haben (Abb. 5.4.2-1).



## 5.2 Kompensation von Eingriffen in das Schutzgut Boden

### 5.2.1 Allgemeines, Rechtsgrundlagen

Unvermeidbare Eingriffe in Natur und Landschaft, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts erheblich beeinträchtigen können, müssen gemäß § 15 Abs. 2 BNatSchG vorrangig durch Maßnahmen ausgeglichen (Ausgleichsmaßnahmen) oder in sonstiger Weise kompensiert werden (Ersatzmaßnahmen).

Eingriffe in Natur und Landschaft im Sinne des BNatSchG sind Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können (§ 20 NatSchG des Landes Baden-Württemberg in Verbindung mit § 14 Abs. 1 BNatSchG). Auch bei der Errichtung bzw. wesentlichen Änderung baulicher Anlagen oder bei ihrem Ausbau und bei der Veränderung oder Beseitigung von Gewässern kann es zu unvermeidbaren Eingriffen in den Boden kommen. Eine unvermeidbare Beeinträchtigung gilt gemäß § 15 Abs. 2 BNatSchG als ausgeglichen, wenn und sobald die beeinträchtigten Funktionen des Naturhaushalts in gleichartiger Weise wiederhergestellt worden sind. Als ersetzt gilt eine Beeinträchtigung, wenn und sobald die beeinträchtigten Funktionen des Naturhaushalts in dem betroffenen Naturraum in gleichwertiger Weise wiederhergestellt worden sind und das Landschaftsbild landschaftsgerecht neu gestaltet ist. Unvermeidbare Eingriffe in den Boden sind vorrangig durch bodenfunktionsbezogene Maßnahmen auszugleichen. Ist dies nicht möglich, sind multifunktionale bzw. schutzgutübergreifende Ersatzmaßnahmen zu ergreifen.

Durch die Aufnahme der Eingriffsregelung in das Baugesetzbuch wurde 1998 die Möglichkeit geschaffen, Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zeitlich und räumlich flexibel in die Bauleitplanung zu integrieren. Gemäß §§ 1a Abs. 3 und 135a Abs. 2 BauGB können solche Maßnahmen bereits vor und ohne Zuordnung zu spezifischen Eingriffen durchgeführt werden. Gleichzeitig wurde die Verpflichtung, den unmittelbaren räumlichen Zusammenhang zwischen Eingriff und Ausgleich zu wahren, gelockert. Die

Durchführung derartiger Maßnahmen ist auch an anderer Stelle als am Ort des Eingriffs möglich (§ 200a BauGB).

Den Kommunen als Träger der Bauleitplanung ist es damit möglich, Ausgleichsmaßnahmen bereits im Voraus zu erbringen. Die Bevorratung von vorgezogenen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen mittels Ökokonten, Flächenpools oder anderer Maßnahmen, insbesondere die Erfassung, Bewertung oder Buchung vorgezogener Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen in Ökokonten, deren Genehmigungsbedürftigkeit und Handelbarkeit sowie der Übergang der Verantwortung nach § 15 Abs. 4 BNatSchG auf Dritte, die vorgezogene Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen durchführen, richtet sich nach Landesrecht (§ 16 Abs. 2 BNatSchG).

Das Ökokonto gab es lange Zeit nur in der Bauleitplanung. Mit der Novellierung des Naturschutzgesetzes ist das Ökokonto auch für den Außenbereich eingeführt worden. Näheres regelt die Ökokonto-Verordnung [ÖKVO 2010].

### 5.2.2 Bewertung

Unvermeidbare Eingriffe in das Schutzgut Boden wurden in der Vergangenheit oftmals nicht durch bodenbezogene Maßnahmen, sondern in belebten Bereichen des Naturhaushalts ausgeglichen.

Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat deshalb im Jahr 2006 die Arbeitshilfe „Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung“ herausgegeben, die inzwischen in der 2. überarbeiteten Auflage vorliegt (Abb. 5.2.2-1).

Darin werden unterschiedliche Maßnahmen beschrieben, mit denen Eingriffe in den Bodenbestand kompensiert werden können. Zudem werden die wesentlichen Voraussetzungen genannt, die bei der Umsetzung der jeweiligen Maßnahmen eingehalten werden müssen. In der Regel handelt es sich um Maßnahmen, die mit Aufwertungen vorhandener oder der Wiederherstellung verlorengegangener Bodenfunktionen verbunden sind. Einige Maßnahmen werden in Kap. 5.2.3 dargestellt.



Abb. 5.2.2-1: Arbeitshilfe „Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung“; Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) 2012

Die anrechenbare Wirkung einzelner Kompensationsmaßnahmen bewegt sich in einem vorgegebenen Rahmen, der in Zahlen als Wertstufengewinn des betroffenen Bodens ausgedrückt wird (Tab. 5.1.3.2-1).

Dieser Rahmen erleichtert in der Praxis die Ermittlung des erforderlichen Kompensationsbedarfs (KB) und der benötigten Flächengrößen [m<sup>2</sup>] für spezifische Kompensationsmaßnahmen.

Die Berechnung des notwendigen Kompensationsbedarfs (KB) sowie die durch bestimmte Maßnahmen erzielbare Kompensationswirkung (KW) erfolgt mit Hilfe einer einfachen Berechnungsmethode. Der Kompensationsbedarf (KB) in Bodenwerteinheiten (BWE) wird durch Multiplikation der Eingriffsfläche F[m<sup>2</sup>] mit der Differenz aus der Wertstufe des Bodens vor und nach dem Eingriff (WvE bzw. WnE) ermittelt:

$$KB [BWE] = F[m^2] \times (WvE - WnE)$$

Entsprechend wird die Kompensationswirkung (KW) errechnet, indem die Maßnahmenfläche F[m<sup>2</sup>] mit der Differenz der Wertstufen des Bodens vor und nach der Maßnahme (WvM, WnM) multipliziert wird:

$$KW [BWE] = F[m^2] \times (WnM - WvM)$$

In Berechnungen zur Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ werden nur die Böden mit der Bewertungsklasse 4 berücksichtigt, da nur sie extreme Standorteigenschaften aufweisen. Darüber hinaus können in Planungskarten Böden mit der Bewertungsklasse 3 nachrichtlich ausgewiesen werden, da diese Flächen für naturschutzfachliche Ausgleichsmaßnahmen im Rahmen der Eingriffs-/Ausgleichsbewertung geeignet sein können. Eingriffe in Böden und Standorte mit besonderer Bedeutung als „Archiv für Natur- und Kulturgeschichte“ müssen im Einzelfall bewertet werden. Allgemeine Bewertungskriterien gibt es für diese Bodenfunktion nicht (Kap. 3.2.5). Eingriffe in solche Böden, die i.d.R. nur kleinräumig erfolgen, sollten grundsätzlich vermieden werden. Informationen zum Rahmen der erzielbaren Kompensationswirkung und ihre Bezifferung nach der Ökokonto-Verordnung sind der Arbeitshilfe zu entnehmen.

### 5.2.3 Maßnahmen

Für die Konzeption von Kompensationsmaßnahmen und um sie konkreten Flächen zuordnen zu können ist es vorteilhaft, potenziell geeignete Bodenflächen möglichst frühzeitig und großräumig zu erfassen. Es wird empfohlen, bereits bei der Erarbeitung eines Landschaftsplans, eines Umweltberichts zum Flächennutzungsplan oder einer Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) Flächen zu lokalisieren, die durch entsprechende Maßnahmen verbesserungsfähig sind.

Im ersten Schritt kann dies durch Auswertung und Zusammenführung von Daten- und Kartengrundlagen für Boden, Natur und Landschaft erfolgen. Werden die Ergebnisse in einem weiteren Schritt vor Ort überprüft, lassen sich verlässliche Planungskarten für potenzielle Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen erarbeiten. Beispiele maßnahmenspezifischer Karten für das Gebiet der Stadt Achern zeigen Abb. 5.2.3.3-2, 5.2.3.4-1 u. 5.2.3.7-2.

### 5.2.3.1 Entsiegelung

Der Verlust oder die Beeinträchtigung von Bodenfunktionen können am wirksamsten durch Entsiegelung von überbauten Böden und Rekultivierung kompensiert werden. Dafür kommen Straßen, Parkplätze und befestigte Zufahrtswege oder befestigte Innenbereiche in Betracht, die z.B. im Rahmen städtebaulicher Sanierungsmaßnahmen durch Entsiegelung und Begrünung umgestaltet werden können (§ 136 Abs. 4 BauGB).

Für entsiegelte Böden kann grundsätzlich die Wertstufe 4 (WnM) angesetzt werden, wobei die Wiederherstellung von möglichst leistungsfähigen Böden anzustreben ist. Maßgeblich ist, wie stark der ursprüngliche Boden durch Abgrabung, Verdichtungen und/oder Schadstoffeinträge beeinträchtigt worden ist und wie die Rekultivierung konzipiert und umgesetzt wird.

### 5.2.3.2 Rekultivierung

Dabei handelt es sich in der Regel um den Auftrag von weitgehend steinfreiem, kulturfähigem Bodenmaterial, das abschließend mit mindestens 20 cm humosem Oberboden („Mutterboden“) abgedeckt wird. Je nach Mächtigkeit und Qualität der Rekultivierung können i.d.R. Böden der Wertstufe 1 - 3, maximal der Wertstufe des ursprünglich vor Ort anstehenden Bodens wiederhergestellt werden.

Für Kompensationsmaßnahmen geeignet sind:

- aufgegebene Abbaustätten, die nicht oder mangelhaft rekultiviert worden sind
- Altablagerungen, bei denen kein Handlungsbedarf besteht
- verdichtete oder abgegrabene Flächen ehemaliger militärischer Übungsplätze.

Altablagerungen ohne Handlungsbedarf sind in den Gemeindegebieten häufig zu finden. In der Regel handelt es sich um Flächen, auf denen zwischen 1950 und 1980 überwiegend Erdaushub unterschiedlicher Qualität und Herkunft abgekippt worden ist und die häufig stark verdichtet sind (Abb. 5.2.3.2-1). Solche Ablagerungen enthalten oft Bauschutt und Hausmüll in wech-



Abb. 5.2.3.2-1: Altablagerung aus Boden und Bauschutt bei Achern-Oensbach; Bild: R. Olschewski

selnden Anteilen und sind teilweise nur mit wenigen Dezimetern Bodenmaterial abgedeckt.

Im Gebiet der Stadt Achern sind dies insbesondere Altablagerungen, auf denen heute Wald- oder Obstbäume stehen, ehemalige Abbauf Flächen und militärische Übungsplätze, bei denen Ziele des Naturschutzes zu beachten sind. In jedem Einzelfall ist zu prüfen, ob und ggfs. welche Bodenfunktionen vorrangig verbessert werden können und unter welchen Rahmenbedingungen dies zu erreichen ist.



### 5.2.3.3 Oberbodenauftrag

Durch Auftrag von humosem Oberboden („Mutterboden“) können i.d.R. Eingriffe in den Bodenbestand teilweise kompensiert werden. Es ist daher erforderlich, den bei Baumaßnahmen oder anderen Eingriffen anfallenden humosen Oberboden in nutzbarem Zustand zu erhalten und vor Vernichtung oder Vergeudung zu schützen (§ 202 BauGB).

Grundsätzlich gelten die Anforderungen wie bei Geländeauffüllungen (Kap. 5.3.2). Ein Oberbodenauftrag wird i.d.R. als Ausgleich anerkannt, wenn am Auftragsort Bodenfunktionen verbessert werden. Geeignet sind Standorte, an denen die Bodenfunktion „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ gering bis mittel zu bewerten ist (Bewertungsklassen 1 und 2; Boden- und Grünlandgrundzahl < 60). Dazu zählen z.B. die flachgründigen, kiesigen Ackerböden ohne starken Grundwassereinfluss nordöstlich von Achern-Gamshurst (Abb. 5.2.3.3-1).



Abb. 5.2.3.3-1: Flachgründiger, kiesiger Ackerstandort bei Achern-Gamshurst; Bild: R. Olschewski

Die nutzbare Feldkapazität dieser Böden beträgt oft nur 80 - 100 l/m<sup>2</sup>, so dass ein 2 - 3 dm mächtiger Oberbodenauftrag, je nach Bodenart, die pflanzenverfügbare Wassermenge um 30 - 50 l/m<sup>2</sup> erhöht. So kann auch die vorhandene Humus- und Tonmenge gesteigert werden. Westlich von Achern eignen sich ausgedehnte Flächen für Oberbodenaufträge (Abb. 5.2.3.3-2).

Nicht geeignet sind Standorte z.B. westlich von Achern beiderseits der BAB A5, an denen die Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ mit hoch bis sehr hoch zu bewerten ist (Abb. 5.2.3.7-2).

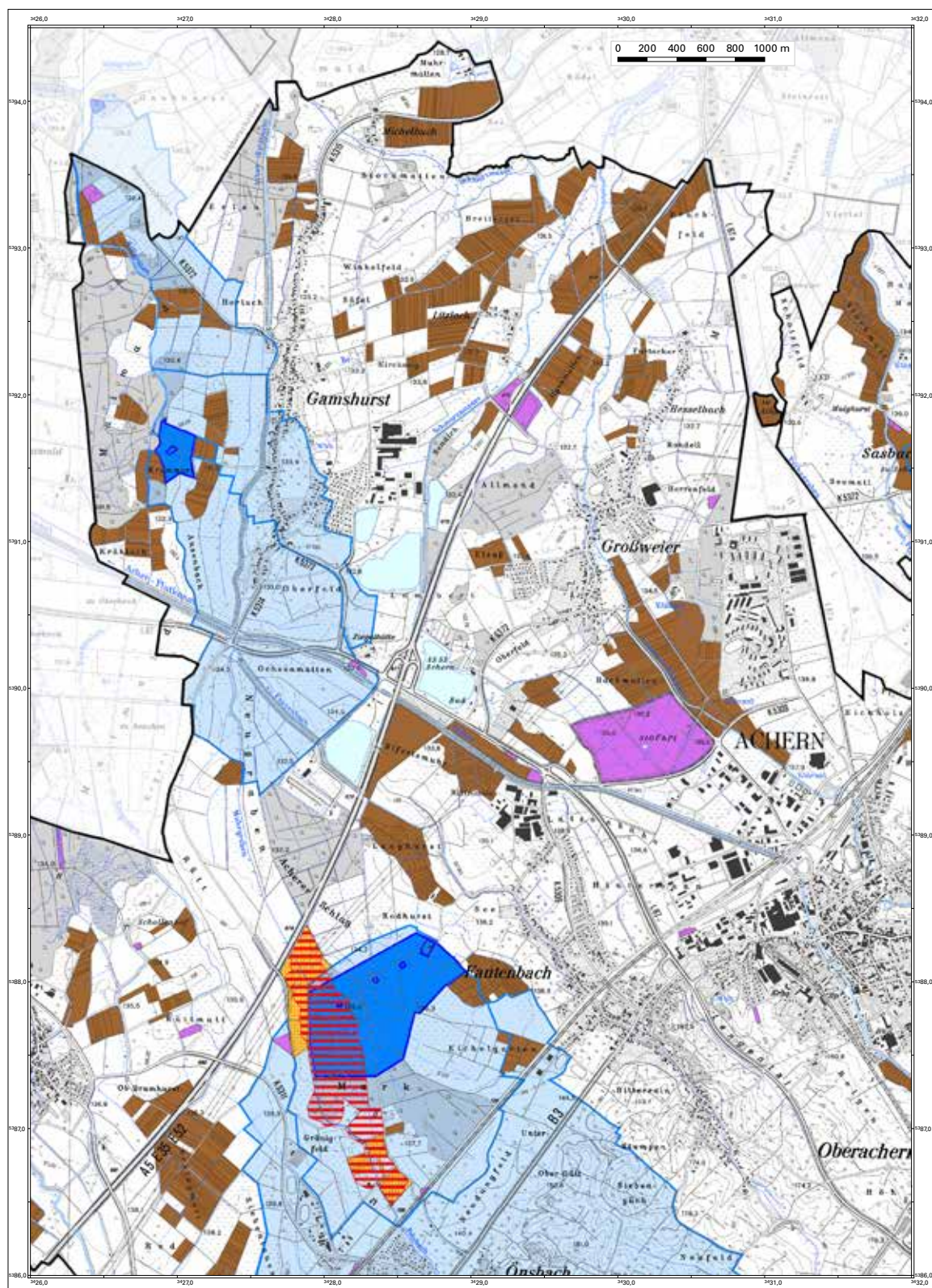
Die erzielte Aufwertung der Funktionen „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“, „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ und „Filter und Puffer für Schadstoffe“ ist i.d.R. mit einer Wertstufe zu veranschlagen. Bei schonender Ausführung der Maßnahmen kann auf den nachsorgenden Anbau von tiefwurzelnden Pflanzen und Tiefenlockerung verzichtet werden (Kap. 5.3.2.5).

Ein Oberbodenauftrag auf Ackerflächen in der lössbedeckten Vorbergzone kann als Ausgleichsmaßnahme anerkannt werden. Geeignet sind jedoch nur Standorte mit Oberböden, die in der zurückliegenden Nutzungsgeschichte durch Erosionsereignisse humusarm sind. In erster Linie sind dies die Pararendzinen (Abb. 4.6.3-1). In der Vorbergzone bei Achern kommt dieser Bodentyp zwar verbreitet vor, die Böden werden jedoch nur bei Oensbach ackerbaulich genutzt (Abb. 5.2.3.4-1).

An die Planung und Durchführung von Bodenaufträgen sind hier besonders hohe Anforderungen zu stellen, da bei Lössböden die Bodenfunktionen hoch bis sehr hoch zu bewerten und sie darüber hinaus sehr verdichtungsempfindlich sind. Hier ist nur Oberbodenmaterial zum Auftrag geeignet, das bei Baumaßnahmen in Talmulden und Senken der Lössgebiete anfällt (Abb. 4.6.1-1).

Auf Ackerflächen, die erst in der jüngeren Vergangenheit erodiert worden sind, wird ein Oberbodenauftrag nur anerkannt, wenn die Flächen bei Umsetzung geeigneter Erosionsschutzmaßnahmen nach der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung bewirtschaftet werden (Kap. 4.6.4).





**Vorrangig für Oberbodenaufträge  
geeignete Flächen**

■ Böden mit 28 - 60 Bodenpunkten

**Potenziell für Rekultivierungsmaßnahmen  
geeignete Flächen**

■ Altablagerungen und Altstandorte  
in Außenbereichen

**Überschwemmungsgebiete**

■ Überschwemmungsgebiet  
■ Nutzungsänderungen  
(z.T. stillgelegte Ackerflächen)

— Gemeindegrenze Achern

**Wasserschutzgebiete**

■ Zone I und II  
■ Zone III, IIIA und IIIB

**Gewässer (TK 25)**

■ Stehgewässer  
■ Fließgewässer

**Kartengrundlage:**

“Flächenbereiche Oberbodenaufträge / Rekultivierungs-  
maßnahmen”; “Überschwemmungsgebiete”  
Landratsamt Ortenaukreis  
“Wasserschutzgebiete”  
Räumliches Informations- und Planungssystem  
Baden-Württemberg (RIPS)  
“Topographische Karte 1 : 25.000 (TK 25)”  
© Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung  
(www.lgl-bw.de), AZ.: 2851.9-1/11

**Kartographie:**  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 5.2.3.3-2: Planungskarte Oberbodenauftrag und Rekultivierung, Gemeinde Achern

#### 5.2.3.4 Erosionsschutz, Verbesserung der Wasseraufnahme der Böden

Bei der Umsetzung von Maßnahmen, die über die gute fachliche Praxis der Bewirtschaftung von erosionsgefährdeten Ackerflächen hinausgehen, kann der Wertstufengewinn (Differenz von  $W_{nM}$  -  $W_{vM}$ ) mit maximal einer Wertstufe angerechnet werden. Als Erosionsschutzmaßnahmen kommen in Betracht:

- Verkürzung erosiver Hanglängen
- Anlage von Grünstreifen (oder Hecken) quer zum Hang mit einer Mindestbreite von 6 m (Kap. 4.6)
- Umwandlung von Acker in Grünland oder Wald.

Für Erosionsschutzmaßnahmen geeignet sind beispielsweise Ackerflächen in der lössbedeckten Vorbergzone. In einem Teilgebiet der Gemeinde Achern sind die Böden z.B. großflächig stark erosionsgefährdet (Abb. 5.2.3.4-1). Es überwiegen jedoch landwirtschaftliche Nutzungen mit permanenter Vegetationsbedeckung (Grünland, Obst- und Weinbau). Für Erosionsschutzmaßnahmen potenziell geeignete Ackerflächen liegen in Hanglagen östlich von Oensbach.

Die natürliche Erosionsgefährdung durch Wasser (Abb. 5.2.3.4-1) ist vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) entsprechend DIN 19708 anhand der Allgemeine(n) Bodenabtragsgleichung (ABAG, Kap. 4.6.2) abgeleitet worden (Exkurs: Erosionsschutzverordnung; Kap. 5.2.3.4).

Bei verschlammungsempfindlichen Böden sowie in Überschwemmungsgebieten unter Ackernutzung kann die Verschlammungsneigung der Böden durch Nutzungsänderung verringert werden (Umwandlung von Acker in Grünland oder Wald). Dadurch wird die Wasseraufnahme der Böden (Infiltration), insbesondere bei Starkniederschlägen verbessert. Die Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ kann maximal um 0,75 Wertstufe verbessert werden.

Im Gemeindegebiet Achern sind verschlammungsempfindliche Ackerböden hauptsächlich in der lössbedeckten Vorbergzone und in den westlich anschließenden, schwach geneigten Verebnungsflächen zu finden. Je nach Hangnei-

gung handelt es sich meist um Ackerflächen, die für Erosionsschutzmaßnahmen geeignet sind (Abb. 5.2.3.4-1).

Dagegen sind Überschwemmungsflächen unter Ackernutzung auf dem Gemeindegebiet Achern wenig verbreitet. Im einzigen Überschwemmungsgebiet „Acherer Schlag/Pelzbach“ westlich von Fautenbach überwiegt Forst- und Grünlandnutzung. Einige Ackerflächen wurden bereits stillgelegt (Abb. 5.2.3.3-1 bzw. 5.2.3.7-2).

Abb. 5.2.3.4-1 zeigt die natürliche Erosionsgefährdung in einem Teil des Gemeindegebiets Achern. Bei der Ableitung ist neben den Faktoren Bodenart (K) und Hangneigung (S) der Faktor Regen- und Oberflächenabfluss (R) der ABAG berücksichtigt worden. Zur besseren Differenzierung der höchsten Gefährdungsklasse wurde die Einteilung der natürlichen Erosionsgefährdung nach DIN 19708 um die Stufe „äußerst hoch“ ( $\geq 35 \text{ t/ha*a}$ ) ergänzt.

##### Exkurs: Erosionsschutzverordnung

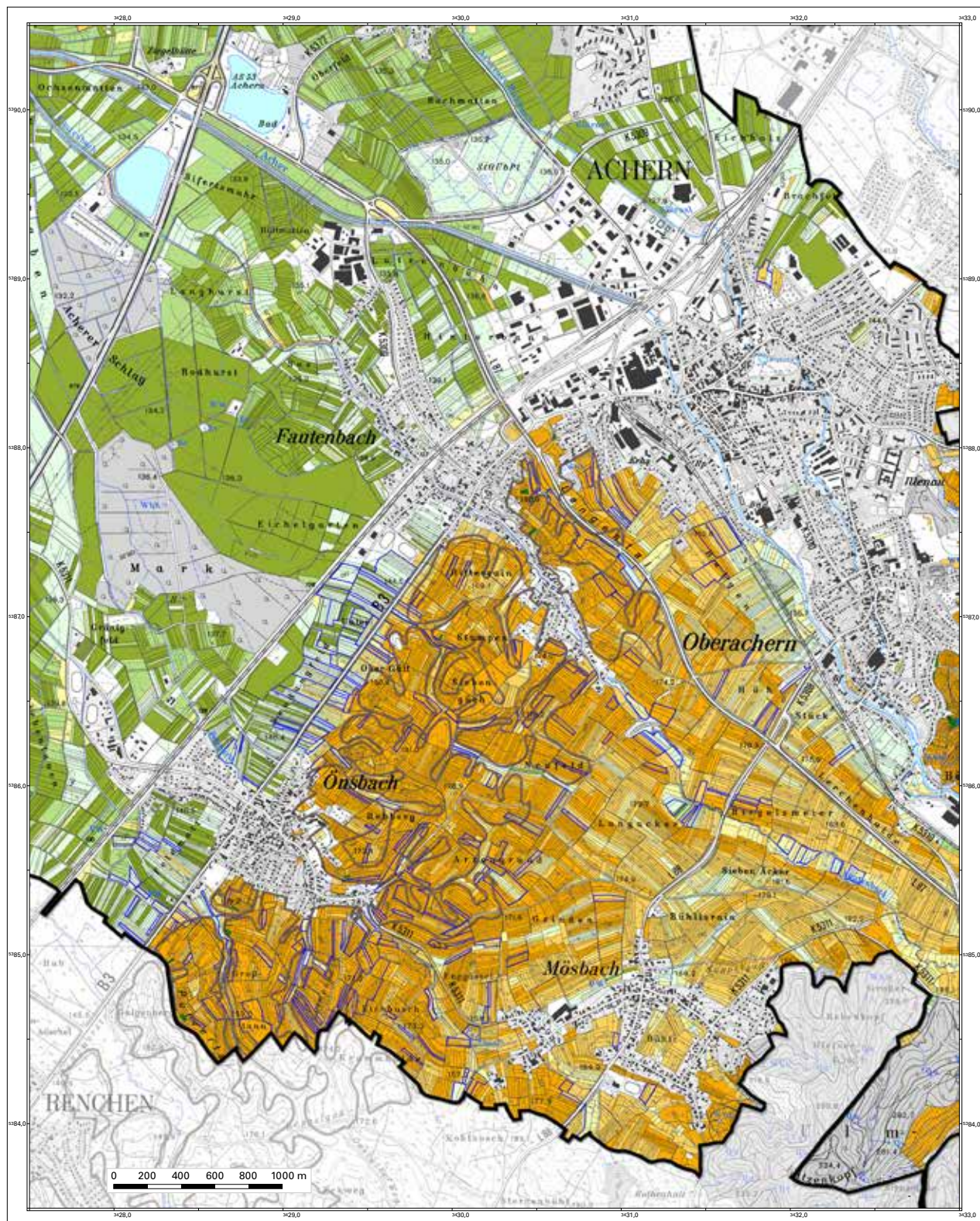
Mit der Erosionsschutzverordnung [ErosionsSchV] sind am 01.07.2010 im Land flächendeckende Mindeststandards zum Erosionsschutz auf ackerbaulich genutzten Flächen eingeführt worden. In diesem Zusammenhang wurden in einem Erosionskataster alle Ackerflächen nach dem Grad der Erosionsanfälligkeit drei Gefährdungsklassen zugeordnet:

- $CC_{Wa0}$  „keine Erosionsgefährdung“
- $CC_{Wa1}$  „Erosionsgefährdung“
- $CC_{Wa2}$  „hohe Erosionsgefährdung“

Die Verordnung beschränkt sich auf das Pflugverbot zu bestimmten Zeiten. Darüber hinaus werden keine erosionsmindernden Maßnahmen vorgeschrieben.

Kriterien für die Einteilung bei Erosionsgefährdung sind die zeitlich nicht veränderlichen Faktoren Bodenart (K) und Hangneigung (S) der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG). Die Zuordnung zu den Gefährdungsklassen  $CC_{Wa1}$  und  $CC_{Wa2}$  beginnt ab der höchsten Erosionsgefährdungsstufe nach DIN 19708 „sehr hoch“ ( $\geq 15 \text{ t/ha*a}$ ). Die Zuordnung zur Klasse  $CC_{Wa0}$  „keine Erosionsgefährdung“ gibt somit keinen Hinweis darauf, dass es auf den betreffenden Ackerflächen nicht zu Erosionsereignissen kommen kann.





**Natürliche Erosionsgefährdung landwirtschaftlicher Nutzflächen**

- keine bis sehr gering
- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch
- äußerst hoch

**Potenzielle Standorte für Erosionsschutzmaßnahmen (Ackerflächen)**

- im Raum Achern einzelne Ackerflächen, selten zu größeren Flächen zusammengefasst

**Bodentyp**

- flächenhaft verbreitete Pararendzinen

**Gewässer (TK 25)**

- Stehgewässer
- Fließgewässer

- Gemeindegrenze Achern

**Kartengrundlage:**

"Natürliche Erosionsgefährdung landwirtschaftlicher Nutzflächen"; "Bodentyp"  
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)  
"Erosionssuchräume"  
Landratsamt Ortenaukreis  
"Topographische Karte 1 : 25.000 (TK 25)"  
© Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), AZ.: 2851-9-1/11

**Kartographie:**

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 5.2.3.4-1: Planungskarte Erosionsschutz, Gemeinde Achern



Vergleicht man die Klasseneinteilung der natürlichen Erosionsgefährdung mit derjenigen nach der ErosionsSchV, wird ersichtlich, dass u.a. die Flächen zwischen Oberachern und Mösbach mit einer natürlichen Erosionsgefährdung gemäß DIN 19708 von „mittel“ ( $5,0 - < 7,5 \text{ t/ha*a}$ ) bis „äußerst hoch“ nach der ErosionsSchV nahezu ausschließlich der Gefährdungsklasse  $CC_{\text{Wd0}}$  („keine Erosionsgefährdung“) zugeordnet werden.

### 5.2.3.5 Dachbegrünung

Dachbegrünungen als Maßnahme der Regenwasserbewirtschaftung können, im Gegensatz zu Mulden- und Mulden-Rigolensystemen, für deren Errichtung und Betrieb nach § 45b Abs. 3 Wassergesetz eine gesetzliche Verpflichtung besteht, als Kompensation von Eingriffen anerkannt werden.



Abb. 5.2.3.5-1: Dachbegrünung, Stadtteil-/Familienzentrum Innenstadt, Stadt Offenburg; Bild: R. Olschewski

Gründächer können die Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ teilweise ersetzen. Maßgeblich ist die Begrünungsintensität bzw. Mächtigkeit des Dachaufbaus (Abb. 5.2.3.5-1).

Die Potenziale begrünter Dächer bei der Wasserrückhaltung sind noch nicht allgemein bekannt und werden derzeit noch wenig ausgeschöpft. Informationen enthält u.a. die von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. herausgegebene Dachbegrünungsrichtlinie [FLL 2008].

Tab. 5.2.3.5-1 gibt eine pauschale Übersicht über die Wasserrückhalte-Kapazitäten. Abhängig von der Stärke des Gründachaufbaus beschreiben Jahresabflussbeiwerte und Abflusskennzahlen C die Rückhaltung von durchschnittlichen Jahresniederschlägen bzw. von definierten Bemessungsregen. Die anrechenbare Kompensation hängt in jedem Einzelfall von der Mächtigkeit des Gründachaufbaus ab.

Tab. 5.2.3.5-1: Abflusskennzahlen und Jahresabflussbeiwerte bei unterschiedlichen Gründachaufbauhöhen (FLL 2008)

| Gründachaufbau | Abflusskennzahl C | Jahresabflussbeiwert |
|----------------|-------------------|----------------------|
| bei 0 - 5 °    |                   |                      |
| 2 - 4 cm       | 0,7               | 0,60                 |
| > 4 - 6 cm     | 0,6               | 0,55                 |
| > 6 - 10 cm    | 0,5               | 0,50                 |
| > 10 - 15 cm   | 0,4               | 0,45                 |
| > 15 - 25 cm   | 0,3               | 0,40                 |
| > 25 - 50 cm   | 0,2               | 0,30                 |
| > 50 cm        | 0,1               | 0,10                 |

### 5.2.3.6 Bodenkalkung

Nach der Ökokonto-Verordnung sind Bodenkalkungen außerhalb von Wald auf extensiv genutzten Flächen mit 0,33 Wertstufen anrechenbar. Eine Kalkung naturschutzfachlich wertvoller Flächen kann problematisch sein. Maßnahmen sind mit den zuständigen Naturschutzbehörden abzustimmen.

Die Kalkung landwirtschaftlich genutzter Böden, die im Sinne einer guten landwirtschaftlichen Praxis zur Erzielung optimaler Erträge bzw. einer guten Qualität der pflanzlichen Produkte notwendig sind (Kap. 4.4.3.3), wird nicht als Kompensationsmaßnahme anerkannt.

Durch Bodenkalkungen wird der pH-Wert stark versauerter Böden angehoben. Die Bodenfunktion „Filter und Puffer für Schadstoffe“ wird verbessert, nachteilige Auswirkungen der Bodenversauerung werden minimiert (Kap. 3.2.4 u. 4.4).

Das Landratsamt prüft derzeit im Rahmen eines Pilotprojekts fachliche Grundlagen, ob und auf welchen Waldflächen Kalkungen ebenfalls als Kompensationsmaßnahme angesehen werden könnten. Projektgrundlage ist der von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg (FVA) ermittelte langfristige Kalkungsbedarf der Waldböden im Schwarzwald. Dieses Kalkungskonzept hat zum Ziel, die pH-Werte und die Basensättigung der Waldböden wieder auf ein historisches Niveau der vor- bis frühindustriellen Zeit anzuheben (Kap. 4.4.4).

### 5.2.3.7 Nutzungsextensivierung und Wiedervernässung

Eingriffe in Böden, die die Bodenfunktion als „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ hoch bis sehr hoch erfüllen, können anderenorts ausgeglichen werden, wenn absehbar ist, dass bei einem am Ort der Ausgleichsmaßnahme vorhandenen hohen Standortpotenzial (Bewertung „hoch“ und „sehr hoch“, d.h. Bewertungsklassen 3 und 4) durch Wiedervernässung und/oder Nutzungsextensivierung eine besonders angepasste, seltene und schützenswerte Pflanzengesellschaft entwickelt werden kann.

Im Westteil der Gemarkung der Stadt Achern sind dies insbesondere Standorte mit Böden, die bis unmittelbar unter die Geländeoberfläche durch starken Grundwassereinfluss geprägt sind (Nass- und Auengleye, Tab. 3.1.2-1).

Der Abgleich mit bestehenden Feuchtbiotopen zeigt, dass sich auf stark feuchten bis nassen Böden zum Teil

schützenswerte Nasswiesen oder Feuchtgebietskomplexe entwickelt haben.

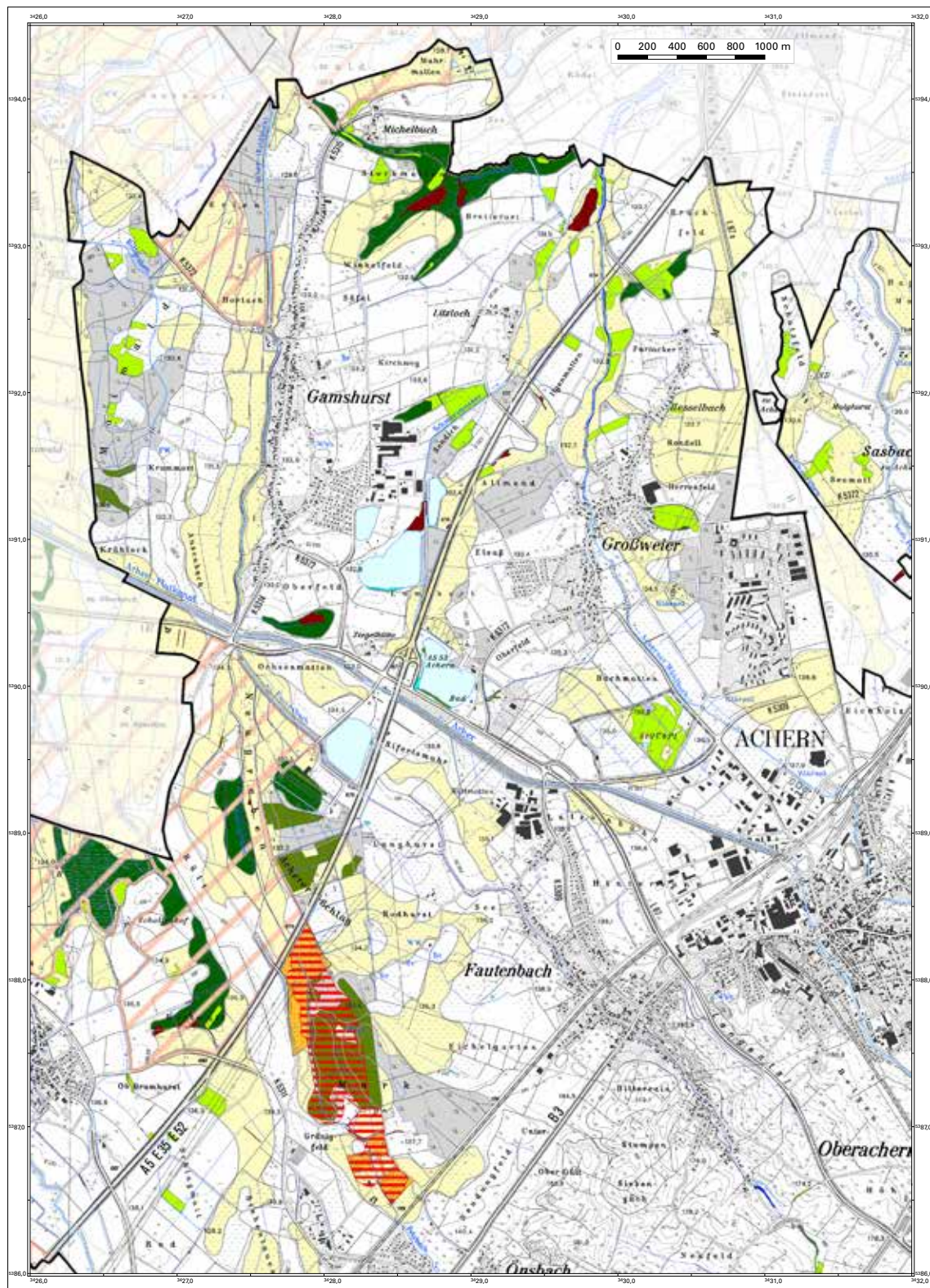
Abb. 5.2.3.7-1 zeigt beispielhaft einen größeren, geschützten Feuchtgebietskomplex mit anstehenden Nassgleyen nördlich von Gamshurst nahe der Ortsgruppe Michelbuch (Abb. 5.2.3.7-2).



Abb. 5.2.3.7-1: Geschützter Feuchtgebietskomplex mit Röhrichtbestand auf Nassgley, Gemarkung Gamshurst; Bild: R. Olschewski

Durch Nutzungsextensivierung (z.B. Reduzierung der Grünlandschnitte, Beweidung und Düngung) bzw. vollständige Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung lassen sich solche Feuchtbiootope potenziell auf die gesamte Fläche mit stark feuchten und nassen Böden ausweiten, wenn die aktuelle Nutzung die Entwicklung einer seltenen und schützenswerten Pflanzengesellschaft behindert. Extensivierungsmaßnahmen werden jedoch nur anerkannt, wenn mehrere Einzel-Maßnahmen kombiniert werden (z.B. Reduzierung der Düngung und der Beweidung).





#### Feuchtbiotope

- Moore, Sümpfe, Röhrichtsbestände, Riede, Gewässervegetation
- Naturnahe Bruch-, Sumpf-, Auwälder
- Streuwiesen, seggen- und binsenreiche Nasswiesen
- Quellbereiche, natürliche und naturnahe Bereiche fließender Binnengewässer einschließlich ihrer Ufer, regelmäßig überschwemmte Bereiche
- Altarme, natürliche und naturnahe Bereiche stehender Binnengewässer mit Uferbereichen, Moorgewässer

#### Sonderstandorte für die naturnahe Vegetation

- hoch
- sehr hoch

]} Bewertung

#### Überschwemmungsgebiete

- Überschwemmungsgebiet
- Nutzungsänderungen (z.T. stillgelegte Ackerflächen)

#### Weitere Kennzeichnung

- Vogelschutzgebiete

#### Gewässer (TK 25)

- Stehgewässer
- Fließgewässer

- Gemeindegrenze Achern

Kartengrundlage:  
"Sonderstandorte für die naturnahe Vegetation"  
Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50), Landesamt  
für Geologie, Rohstoffe und Bergbau  
Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)

"Feuchtbiotope"; "Überschwemmungsgebiete";  
"Weitere Nutzungen"  
Landratsamt Ortenaukreis

"Topographische Karte 1 : 25.000 (TK 25)"  
© Landesamt für Geoinformation und Land-  
entwicklung (www.lgl-bw.de), AZ.: 28519-1/11

Kartographie:  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 5.2.3.7-2: Nutzungsextensivierung und Wiedervernässung, Gemeinde Achern

Die Herstellung von Sonderstandorten für naturnahe Vegetation auf unveränderten Böden, beispielsweise durch Abtrag des humosen Oberbodens oder Aufbringen von nicht kulturfähigem Material, wird nicht als Ausgleichsmaßnahme anerkannt, da solche Maßnahmen vermeidbare Eingriffe in den Boden darstellen.

In Teilflächen mit ehemals hohem Wasserstand, z.B. über Auengley oder Anmoorgley, kann ergänzend zur Nutzungsextensivierung durch Wiedervernässung (z.B. Beseitigung oder Verschluss von Drainagegräben) die potenziell hohe bzw. sehr hohe Funktionserfüllung als „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ wiederhergestellt werden.

Die Karte in Abb. 5.2.3.7-2 zeigt die entsprechenden Flächen beiderseits der BAB A5 westlich von Achern.

Extensivierungs-Maßnahmen werden mit einem Gewinn von 0,75 Wertstufen, Wiedervernässungs-Maßnahmen mit einem Gewinn von 1 - 2 Wertstufen anerkannt. Voraussetzung ist ein entsprechendes Potenzial zur Entwicklung einer schützenswerten naturnahen Vegetation, das durch eine fachliche Expertise nachgewiesen werden muss.

Haben sich z.B. auf Grünlandflächen bereits Zeigerpflanzen für stark feuchte oder nasse Bodenverhältnisse entwickelt, können Ausgleichsmaßnahmen sehr wahrscheinlich zielführend umgesetzt werden (Abb. 5.2.3.7-3).

Eingriffe in Böden mit hoch bis sehr hoch bewerteter Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ können bezogen auf die Flächengröße 1:1 ausgeglichen werden, wenn am Ort der Ausgleichsmaßnahme durch Wiedervernässung und/oder Nutzungsextensivierung extreme Standorteigenschaften hergestellt werden können, die Voraussetzung für die Entwicklung einer besonders angepassten, seltenen und schützenswerten Pflanzengesellschaft sind.



Abb. 5.2.3.7-3: Auenpseudogley-Auengley mit Binsen auf extensiv bewirtschaftetem Grünland nördlich von Achern-Wagshurst; Bild: R. Olschewski



## 5.3 Umgang mit Bodenaushub

### 5.3.1 Allgemeines

Bei Baumaßnahmen anfallender Erdaushub kann am Baustandort in der Regel nicht vollständig verwertet werden. Im Ortenaukreis nimmt überschüssiger Aushub jährlich ein Volumen von mehr als 150 000 m<sup>3</sup> ein (Abb. 5.3.1-1).

Im Baugeschäft wird Bodenaushub überwiegend als zu beseitigender „Bauabfall“ behandelt, der mit der Auftragsvergabe i.d.R. Eigentum des Bauunternehmers oder eines beauftragten Subunternehmers wird. Ihre Aufgabe ist es, den Bodenaushub anderenorts zu verwerten bzw. zu beseitigen. Oft wird unter Termindruck der organisatorisch und kostengünstigste Verwertungs- oder Entsorgungsweg gewählt. Kann der Bodenaushub nicht an anderen Baustandorten verwertet oder auf kreiseigenen Erdaushubdeponien abgelagert werden, wird oft die Auffüllung landwirtschaftlicher Nutzflächen gewählt. Seit 1990 sind so mehr als 2 150 000 m<sup>3</sup> Bodenaushub auf landwirtschaftliche Nutzflächen im Landkreis verbraucht worden.

Am häufigsten wird Boden an den Mittel- und Unterhängen des Schwarzwalds und der Vorbergzone aufgetragen (Abb. 5.3.1-2), um die maschinelle Bewirtschaftung von Grünland zu erleichtern.

In der Rheinebene steht bei der Bodenaufbringung regelmäßig die Absicht im Vordergrund, den Grundwasser-Flurabstand zu erhöhen.

Bei unsachgemäßer Durchführung der Bodenaufträge ist der gewünschte Nutzen der Maßnahme nicht zu erreichen (Kap. 5.3.2.3). Mit aufwändigen Nachsorgemaßnahmen muss dann versucht werden, die Ertragsfähigkeit am Verwertungsstandort wieder herzustellen (Kap. 5.3.2.5). Für die Optimierung der Aushubverwertung ist daher ihre Vorbereitung bereits im Rahmen von Gestattungsverfahren unerlässlich (Kap. 5.1.3).

Besondere Anforderungen gelten für im Ortenaukreis häufig anfallenden Bodenaushub mit erhöhten Schadstoffgehalten (Kap. 5.3.3).

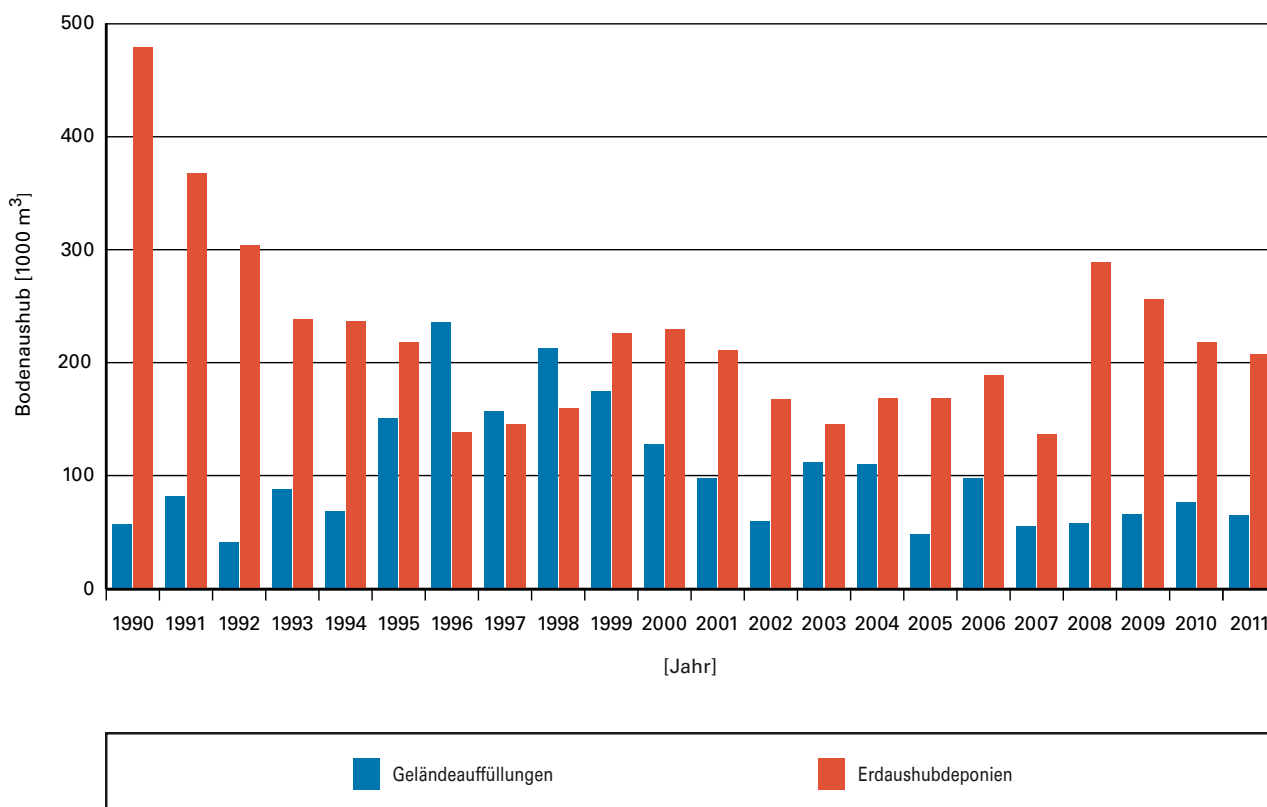
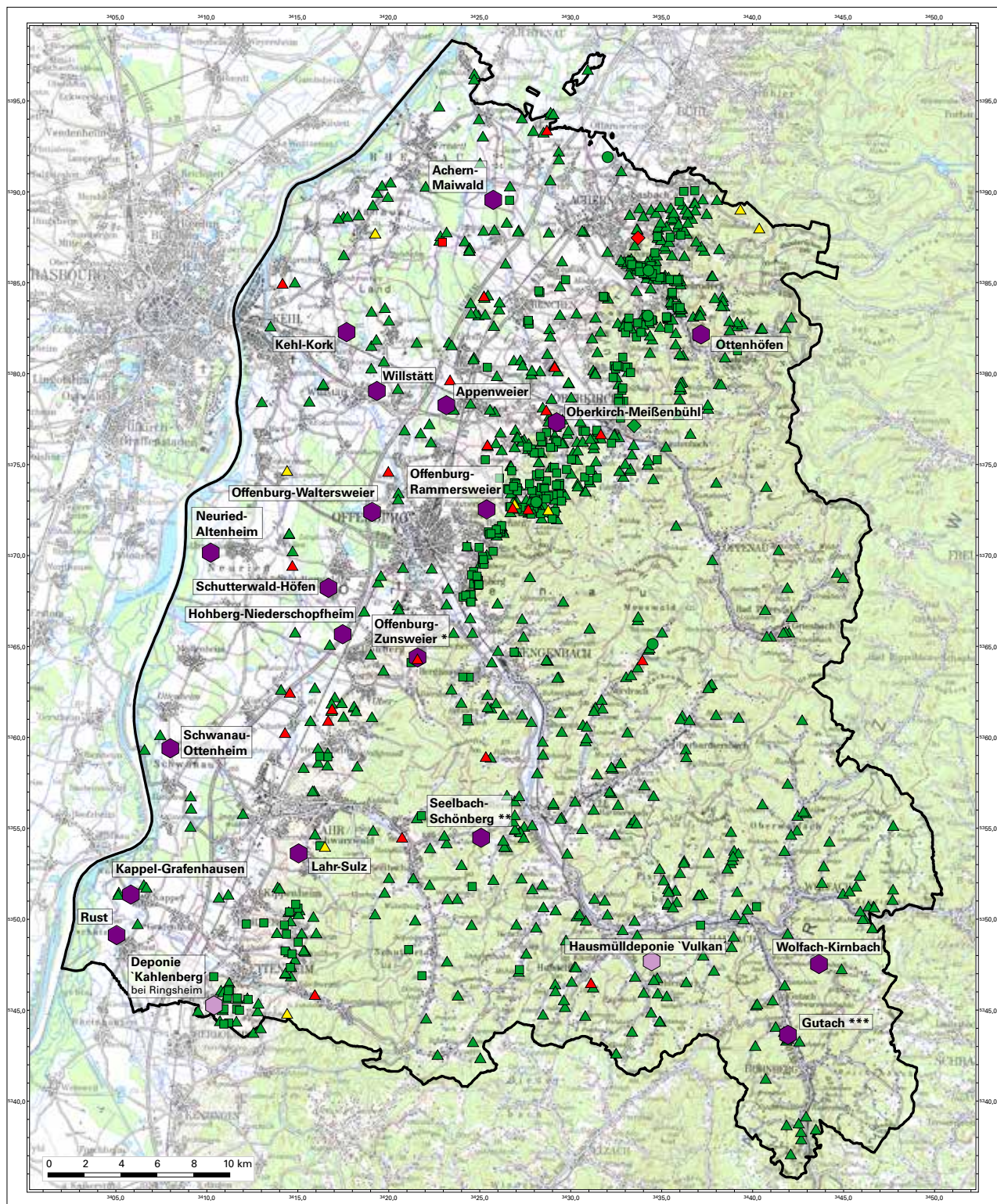


Abb. 5.3.1-1: Verwertung und Beseitigung von Bodenaushub im Ortenaukreis in den Jahren 1990 - 2011; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





- △ Auffüllung
- Planie / Terrassierung
- Abgrabung
- ◇ Geländeänderung

- Landkreisgrenze
- Gemeindegrenze

- Bewirtschaftungserleichterung / Bodenverbesserung
- Rekultivierung (Wiederherstellung eines neuen Bodens)
- ungenehmigte Bodenauffüllung

- Erdaushubdeponie
- ehemalige Hausmülldeponie

- \* Zulassungserweiterung für erhöht kupferhaltigen Erdaushub von Rebflächen
- \*\* Zulassungserweiterung für erhöht schwermetall- und arsenhaltigen Erdaushub aus ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten
- \*\*\* Zulassungserweiterung für erhöht schwermetallhaltigen Erdaushub von Überschwemmungsflächen der Gutachtaue

Kartengrundlage:  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200)  
© Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

Kartographie:  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. 5.3.1-2: Oberbodenaufträge, Rekultivierungen, Abgrabungen; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

### 5.3.2 Bodenauftrag auf durchwurzelbare Bodenschichten

#### 5.3.2.1 Rechtliche Grundlagen

Die bodenschutzrechtlichen Anforderungen sind in § 12 BBodSchV geregelt. Sie gelten für die Herstellung, Sicherung oder für das Wiedernutzbarmachen durchwurzelbarer Bodenschichten. Sie sind z.B. bei Bodenaufträgen auf landwirtschaftliche Nutzflächen oder bei Rekultivierungen von Rohstoffabbauflächen einzuhalten. Die wichtigsten Anforderungen nach § 12 BBodSchV sind:

- Stoffgehalte und physikalische Eigenschaften des aufzutragenden Bodenaushubs dürfen nicht zur Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung führen
- die nachhaltige Sicherung oder Wiederherstellung mindestens einer der in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 3 b und c BBodSchG genannten Bodenfunktionen (§ 12 Abs. 2 BBodSchV)
- bei landwirtschaftlicher Folgenutzung sollen im Hinblick auf künftige unvermeidbare Schadstoffeinträge durch Bewirtschaftungsmaßnahmen oder atmosphärische Schadstoffeinträge die Schadstoffgehalte in der entstandenen durchwurzelbaren Bodenschicht 70 % der Vorsorgewerte nach Anhang 2 Nr. 4 BBodSchV nicht überschreiten (§ 12 Abs. 4 BBodSchV)
- beim Aufbringen von Bodenmaterial auf landwirtschaftlich einschließlich gartenbaulich genutzte Böden ist deren Ertragsfähigkeit zu sichern oder wiederherzustellen und darf nicht dauerhaft verringert werden (§ 12 Abs. 5 BBodSchV)
- Böden, die die Bodenfunktionen nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 2 BBodSchG in besonderem Maß erfüllen, sollen von dem Auf- und Einbringen von Materialien ausgeschlossen werden (§ 12 Abs. 8 BBodSchV).

Darüber hinaus ist entsprechend § 202 BauGB humoser Oberboden („Mutterboden“), der bei Baumaßnahmen und anderen Veränderungen der Erdoberfläche anfällt, in nutzbarem Zustand zu erhalten und vor Vernichtung und Vergeudung zu schützen.

#### 5.3.2.2 Fachtechnische Anforderungen

Die zu beachtenden Kriterien und Grundlagen sind in verschiedenen Fachveröffentlichungen dargelegt worden.

Einen zusammenfassenden Überblick über die fachtechnischen Anforderungen bei der Durchführung von Abgrabungen, Auffüllungen und Geländeänderungen enthält das Merkblatt des Landratsamts Ortenaukreis, das mit einem Erhebungsbogen für Anträge auf bau- und naturschutzrechtliche Genehmigung von Geländeänderungen zur Verfügung steht (<http://www.ortenaukreis.de> - *Stichwort: „Geländeänderungen“*). Die wichtigsten Anforderungen sind:

- im aufzutragenden Bodenaushub dürfen die Schadstoffgehalte nicht über den Vorsorgewerten der BBodSchV liegen (Kap. 4.1.1). Ausnahmen sind in Gebieten möglich, in denen Böden erhöhte Schadstoffgehalte aufweisen (Kap. 5.3.3.1)
- auf durchwurzelbaren Bodenschichten darf nur Bodenaushub mit ähnlichen oder günstigeren physikalischen Eigenschaften aufgetragen werden (u.a. Steingehalt < 30 Vol.-%)
- je nach Einzelfall ist auf landwirtschaftlichen Nutzflächen die Ertragsfähigkeit mit geeigneten Nachsorgemaßnahmen wieder herzustellen und zu sichern (Kap. 5.3.2.5)
- auf Böden mit Boden- und Grünlandgrundzahlen > 60 (Kap. A.5.1.3.1) darf kein Bodenaushub aufgetragen werden, da zu besorgen ist, dass die Erdarbeiten zur Verschlechterung der „natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ führen (Kap. 3.2.1). Bei Boden- und Grünlandgrundzahlen ≤ 24 ist zu prüfen, ob ein Bodenauftrag hinsichtlich der hoch zu bewertenden Bodenfunktion „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“ im Einzelfall vertretbar ist
- bei Bodenaufträgen > 20 cm Mächtigkeit ist der humose Oberboden („Mutterboden“) zuvor abzuschieben.

#### 5.3.2.3 Folgen von Bodenverdichtungen

Bodenmaterial unterliegt beim Ausbau, Transport und Wiedereinbau der Verdichtung. Dabei wird nicht nur bei hohen Wassergehalten das Bodengefüge nachteilig verändert.

Mit Gefügeveränderungen ist eine Änderung der Porengrößenverteilung verbunden. Der Anteil der luftführenden und entwässernd wirkenden Grobporen ( $\varnothing > 0,05 \text{ mm}$ ) nimmt i.d.R. ab. Bei Schluffen, Lehmen und Tonen nimmt



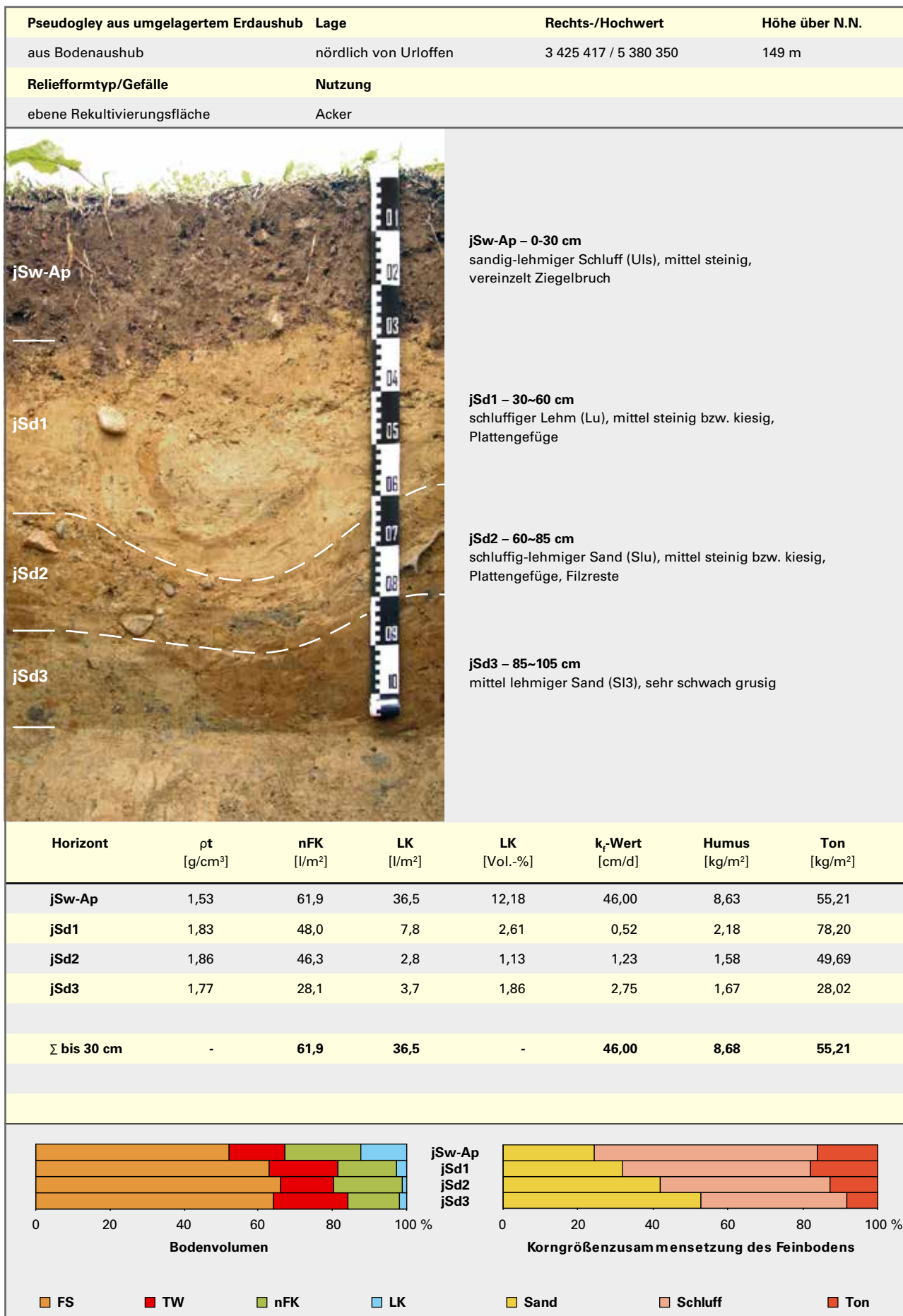


Abb. 5.3.2.3-1: Profildatenblatt Rekultivierungsstandort „Urloffen“; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis; Bild: R. Olschewski



auch das Volumen des Porenanteils ab, der Wasser pflanzenverfügbar speichert ( $\varnothing$  0,0002 - 0,05 mm). Verdichtungen schränken den Wasser- und Lufthaushalt durch die verringerte Luftkapazität LK und nutzbare Feldkapazität nFK ein (Kap. A.3.2).

Durch die unterbrochene Vernetzung des Grobporensystems (fehlende Porenkontinuität) wird die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_f$  verringert. Verdichtungen beeinträchtigen die Durchwurzelbarkeit des Bodens.

Von erheblichen und nachhaltigen Beeinträchtigungen der „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ ist auszugehen, wenn die Werte für die

- Luftkapazität LK < 5 Vol.-%
- gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_f$  < 10 cm/d

betragen und gleichzeitig ein dichtes bis sehr dichtes, plattiges Bodengefüge vorliegt [LEBER, BÖKEN 2005].

Solche Verhältnisse begünstigen die Bildung von Stauwasser und hemmen das Wurzelwachstum durch Luftmangel. Die Standortbedingungen gleichen denen typischer Stauwasserböden. Im Winterhalbjahr wird das Pflanzenwachstum durch Staunässe, im Sommer während Trockenperioden durch Wassermangel eingeschränkt (Kap. 3.1.2).

Die Folgen von Bodenverdichtungen werden beispielhaft anhand der Ergebnisse bodenphysikalischer Untersuchungen an einer rekultivierten Rohstoffabbaufläche veranschaulicht (Abb. 5.3.2.3-1). Dort wurde kulturfähiges Bodenmaterial ungeachtet feuchter Witterungs- und Bodenverhältnisse abgekippt, einplaniert und wiederholt mit schweren Nutzfahrzeugen befahren. Die starke Verdichtung des abgelagerten Bodenaushubs ist im Unterboden an „Würgestrukturen“ zu erkennen (jSd-Horizonte).

Die Trockenrohdichte  $\rho_t$  ist ab 30 cm Tiefe mit Werten um 1,8 g/cm<sup>3</sup> hoch. Gleichzeitig sind die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit Werten für  $LK \leq 2,61$  Vol.-% und  $k_f \leq 2,75$  cm/d sehr stark eingeschränkt. Im Gelände war dies bis ins Frühjahr an groß-

flächigen Wasserlachen zu erkennen. Bei langen, niederschlagsfreien Wetterperioden stellt sich Wassermangel ein. Kulturpflanzen steht dann aus dem unverdichteten Oberboden (jSw-Ap-Horizont) mit max. 62 l/m<sup>2</sup> nur ein relativ geringer Wasservorrat zur Verfügung. Wegen der stark eingeschränkten Durchwurzelbarkeit können die Pflanzen das im Unterboden gespeicherte Wasser kaum erschließen ( $nFK > 100$  l/m<sup>2</sup>). Die Ertragsfähigkeit des Standorts wird nicht nur durch Wasserüberschuss, sondern auch durch zeitweiligen Trockenstress beeinträchtigt.

Ist der verdichtete Bodenaushub nicht lockerungsfähig und/oder können tief liegende Verdichtungen nicht mit Lockerungswerkzeugen erreicht werden, kann die Ertragsfähigkeit durch Nachsorgemaßnahmen nicht mehr dauerhaft hergestellt werden (Kap. 5.3.2.5).

### 5.3.2.4 Vorsorge

Um im Anschluss an eine Verwertung von Bodenaushub die physikalischen Materialeigenschaften optimal zu nutzen und Bodenfunktionen am Auftragsstandort zu verbessern bzw. zu sichern, bedarf es bereits bei der Planung und Durchführung vorsorgender Maßnahmen.

Damit ausschließlich geeigneter Bodenaushub auf durchwurzelbaren Bodenschichten verwertet wird, müssen die Materialeigenschaften bekannt sein (Kap. 5.1.3.2, 5.3.2.5 u. 5.3.3). Bodenaushub mit hohem Stein- oder Kiesgehalt (> 30 Vol.-%) oder sehr toniges Bodenmaterial ist für eine derartige Verwertung nicht oder kaum geeignet. Ebenso ist stark feuchtes oder nasses Bodenmaterial selten in kulturfähigem Zustand zu erhalten (Abb. 5.3.2.4-1).

Bei den Planungen der Inanspruchnahme großer Flächenareale (z.B. Bebauungsplangebiete, Rohstoffabbau) sind die Materialeigenschaften bereits vor dem Ausbau in Kombination mit einer Massenbilanz durch Geländeerhebungen und/oder Datenauswertungen zu klären (Kap. 5.1.4.2). Dies ist auch dann erforderlich, wenn Bodenaushub im Rahmen von Kompensationsmaßnahmen (z.B. Oberbodenauftrag) zum Ausgleich eines Eingriffs in den Boden verwendet werden soll (Kap. 5.2.3).



Abb. 5.3.2.4-1: Nasses Bodenmaterial aus grundwasserführenden Schichten wird oft bereits beim Ausbau und Transport stark verdichtet; Bild: R. Olschewski

Bei der Planung sind die Klima- und Geländeverhältnisse am Verwertungsstandort zu berücksichtigen (v.a. Grundwasser, Niederschlag, Hangneigung). Lössboden ist z.B. für den Auftrag auf Auenböden mit hoch anstehendem Grundwasserspiegel nicht geeignet. Wegen der hohen Wasserspeicherfähigkeit (Abb. 3.2.1-1:  $n_{FK} > 250 \text{ l/m}^2$ ) würde das Lössmaterial anschließend stark vernässen. Auch aufgrund seiner hohen Erosions- und Verschlammungsneigung eignet sich Lössboden nicht für den Auftrag an Standorten mit einer deutlichen Hangneigung und hohem jährlichen Niederschlag. Bei der Festlegung der Mächtigkeit eines Bodenauftrags muss berücksichtigt werden, dass mögliche Verdichtungen und Vernässungen auf der Fläche durch Nachsorgemaßnahmen noch behoben werden können (Kap. 5.3.2.5).

Bei der Durchführung der Erdarbeiten ist u.a. zum Schutz vor irreversiblen Bodenverdichtungen zu beachten:

- kulturfähiger Boden ist schonend und unter sorgfältiger Trennung von nicht kulturfähigem Material auszuheben und zu verwerten

- bei Zwischenlagerung und Einbau darf kulturfähiger Boden möglichst nicht befahren werden (Vor-Kopf-Schüttung)
- Erdarbeiten dürfen nur bei ausreichend abgetrocknetem Boden und niederschlagsfreier Witterung durchgeführt werden.

### 5.3.2.5 Nachsorge

Nach Abschluss des Bodenauftrags ist vor der geplanten Folgenutzung zu prüfen, ob eventuelle Verdichtungen und Vernässungen durch mechanische Lockerung und/oder Bedarfsdrainagen beseitigt werden müssen. Für den Erfolg von Lockerungsmaßnahmen ist entscheidend ob verdichtete Bodenschichten

- mit Lockerungswerkzeugen erreichbar und
- dauerhaft lockerungsfähig sind.

Unter dem humosen Oberboden können Bodenverdichtungen mit raupengestützten Werkzeugen nur bis in eine Tiefe von max. 80 - 90 cm gelockert werden (Abb. 5.3.2.5-1).



Abb. 5.3.2.5-1: Die maximale Arbeitstiefe von Werkzeugen zur Tiefenlockerung beträgt 80 - 90 cm; Rekultivierungsstandort „Urloffen“; Bild: R. Olschewski

Entscheidend für den Erfolg der Maßnahmen ist, dass der Unterboden bei Durchführung der Arbeiten ausreichend trocken bzw. entwässert ist (ggfs. Bedarfsdrainage) und dass gelockerter Boden nicht während bzw. nach den Arbeiten durch Befahren wieder verdichtet wird.

Erfahrungsgemäß bildet sich in schluff- und feinsandreichen Böden mit einem Tongehalt < 17 Gew.-% kein stabiles Bodengefüge aus. Solche Bodenarten, zu denen u.a. tonarmer Löss zählt, neigen zur Verschlammung und zum Zerfließen, bevor der wasserspeicherfähige Porenraum mit Wasser gesättigt ist (Kap. A.3.2). Mit einem dauerhaften Lockerungserfolg ist kaum zu rechnen [MÜLLER 1985].

Bei einem hohen Tongehalt > 50 Gew.-% ist unter süddeutschen Klimaverhältnissen der Lockerungserfolg in Tiefen > 30 - 40 cm ebenfalls unsicher, weil solche Bodenarten schlecht bis zur erforderlichen krümelig-brüchigen Konsistenz abtrocknen [BORCHERT, GRAF 1985].

Einen Überblick über tiefenlockerungsfähige bzw. zur Verschlammung neigende Bodenarten bietet Abb. A.5.3.2.5-1.

Zur Sicherung des Lockerungserfolgs bzw. zur Wiederherstellung der Porenkontinuität ist besonders bei anschließender ackerbaulicher Nutzung

- die Erntesaat mit möglichst mehrjährigen, intensiv wurzelnden Pflanzen durchzuführen, z.B. Luzerne
- der Pflanzenaufwuchs in den ersten Jahren zu mulchen, um dem Auftragsboden organische Masse für tiefgrabende Regenwürmer zur Verfügung zu stellen (Durchporung des Unterbodens)
- auf den Anbau von Körnermais zu verzichten, der i.d.R. im Herbst bei hoher Bodenfeuchte, d.h. hoher Druckempfindlichkeit des Bodens geerntet werden muss
- Bewirtschaftungs- sowie Pflegemaßnahmen nur bei ausreichend abgetrocknetem Boden durchzuführen.

### 5.3.3 Umgang mit schadstoffhaltigem Bodenaushub

#### 5.3.3.1 Verwertung in Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten

Gemäß § 12 Abs. 10 BBodSchV ist in Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten der Böden eine Verlagerung von Bodenmaterial innerhalb des Gebiets zulässig, wenn die in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 3 b und c BBodSchG genannten Bodenfunktionen nicht zusätzlich beeinträchtigt und insbesondere die Schadstoffsituation am Ort des Aufbringens nicht nachteilig verändert wird. Gebiete mit erhöhten Schadstoffgehalten der Böden können von der zuständigen Behörde festgelegt werden. Dabei kann die zuständige Behörde Abweichungen von § 12 BBodSchV Abs. 3 und 4 zulassen.

Bei Baumaßnahmen anfallender Bodenaushub kann also auch dann auf einer durchwurzelbaren Bodenschicht verwertet werden, wenn Vorsorgewerte der BBodSchV überschritten sind.

Gebiete mit geogen oder siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten der Böden sind im Ortenaukreis u.a.

- ehemalige Bergbau- und Verhüttungsgebiete im Schutter- und im Kinzigtal sowie ihre Einzugsgebiete (v.a. Blei; Kap. 4.1.2 u. 4.2.3)
- ehemalige Schwemmfächer der Kinzig Schutter (v.a. Blei)
- Weinbauflächen (v.a. Kupfer; Kap. 4.1.9)
- Auenbereiche des Gutachtals (v.a. Kupfer, Zink, PAK durch frühere Abwassereinleitungen; Kap. 4.2.7, 4.2.10 und 4.2.11)
- Auenbereiche der Rheinebene (v.a. geogenes Arsen; Kap. 4.2.2)
- Vorländer eingedeichter Fließgewässer (v.a. PAK; Kap. 4.1.5 u. 4.2.11)
- Hafengebiet Kehl und angrenzende Gewerbegebiete (großflächige Ablagerungen unterschiedlicher Materialien).

Auch die Trassenbereiche stark befahrener Straßen zählen zu den Flächen mit siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten (Kap. 4.1.4) [UM 2007].



Bei der Planung von Baumaßnahmen in diesen Gebieten ist neben den Fragen zu möglichen Beeinträchtigungen von Schutzgütern stets durch eine Massenbilanz zu klären, ob überschüssiger Bodenaushub außerhalb von Baustandorten verwertet werden kann oder beseitigt werden muss.

In einigen Gebieten ist eine Verwertung von Bodenaushub aufgrund der Eigentumsverhältnisse oder des Reliefs nicht zu verwirklichen oder nicht sinnvoll. Das Regierungspräsidium Freiburg hat deshalb auf Antrag des Ortenaukreises und Nachweis der Unbedenklichkeit die Zulassung einzelner kreiseigener Erdaushubdeponien (Abb. 5.3.1-2) für die Ablagerung von Bodenaushub mit gebietsspezifisch erhöhten Schadstoffgehalten erweitert:

- Erdaushubdeponie Schönberg („Rebio“) für bergbau- und verhüttungsbedingt schadstoffhaltigen Bodenaushub (Kap. A.5.3.1)
- Erdaushubdeponie Gutach für schadstoffhaltigen Bodenaushub aus der Gutachaue
- Erdaushubdeponie Offenburg-Zunsweier für Bodenaushub aus Weinbauflächen der Umgebung.

Spezifisch belasteter Bodenaushub aus anderen Gebieten kann ggfs. auf nahe gelegenen Erdaushubdeponien abgelagert werden. Dazu sind im Einzelfall spezifische Analysen durchzuführen. Diesbezügliche Vorgaben legt das Landratsamt Ortenaukreis im Rahmen von Gestattungsverfahren fest.

### 5.3.3.2 Verwertung außerhalb durchwurzelbarer Bodenschichten

Schadstoffhaltiger Bodenaushub aus Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten kann grundsätzlich wie Bodenaushub aus kleinräumig kontaminierten Altstandorten oder Altablagerungen außerhalb durchwurzelbarer Bodenschichten verwertet werden.

Im Ortenaukreis trifft dies insbesondere für Bodenaushub mit erhöhten PAK-Gehalten aus den Vorländern eingedeichter Fließgewässer wie der Kinzig oder des Renchflutkanals zu (Kap. 4.2.11). In den nächsten Jahren werden bei der Gewässerunterhaltung ungefähr 420 000 m<sup>3</sup> Aushub anfallen, der allerdings nur bei bautechnischer Eignung zur notwendigen Sanierung von Gewässerdämmen verwendet werden kann [REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG 2008].

Als weitere Verwertungsmöglichkeiten kommen in Frage:

- Verfüllung von Abgrabungen innerhalb der Gebiete und andere bodenähnliche Anwendungen; stillgelegte Rohstoffabbaustätten können z.B. mit den Schadstoffgehalten des Bodenmaterials unter einer  $\geq 2$  m mächtigen, durchwurzelbaren Bodenschicht verfüllt werden. Für die durchwurzelbare Bodenschicht gelten die Anforderungen in Kap. 5.3.2.2
- Einbau in technische Bauwerke; dazu zählen Schüttungen z.B. von Straßendämmen und Lärmschutzwällen sowie Auffüllungen in Gewerbegebieten.

Ob und welche Verwertungsart in Frage kommt, hängt im Einzelfall ab von

- den Schadstoffgehalten des Bodenaushubs
- den hydrogeologischen Verhältnissen am Verwertungsstandort
- den notwendigen bzw. gewählten Sicherungsmaßnahmen (Einbaukonfiguration)
- der Lage in einem bestehenden oder geplanten Wasserschutzgebiet, einem Gebiet mit häufigen Überschwemmungen oder einem Wasservorranggebiet.

Entscheidend für die Zulässigkeit der Verwertung von erhöht schadstoffhaltigem Bodenmaterial sind die hydrogeologischen Verhältnisse am Verwertungsstandort.

Um dem Schutz des Grundwassers bei der Verwertungsmaßnahme Rechnung zu tragen, ist je nach Einbaukonfiguration zwischen der geplanten Schüttkörperbasis des Bodenmaterials und dem höchsten Grundwasserstand grundsätzlich ein Abstand von mindestens 1 m einzuhalten.

Die hydrogeologischen Standortverhältnisse müssen deshalb durch

- eine Auswertung der beim Landratsamt Ortenaukreis geführten Grundwasserstand-Daten der Grundwassermessstellen im Umfeld, in Verbindung mit
- bodenkundlichen Aufnahmen am Verwertungsstandort (Böden, Grundwasserdeckschichten)

geklärt werden.

Aufzeichnungen zum Grundwasserstand aus Baugrundgutachten oder einmaligen Baggerschürfen reichen i.d.R. nicht aus, weil sie lediglich den Grundwasserstand am Tag der Geländearbeiten repräsentieren. Je nach Jahreszeit kann der Grundwasserstand näher am maximalen oder minimalen Höhenniveau des langjährigen Grundwasserschwankungsbereichs liegen.

Abb. 5.3.3.2-1 zeigt beispielhaft die langjährige Aufzeichnung des Grundwasserstands an der Grundwassermessstelle Nr. 119/066-7 westlich von Lahr-Langenwinkel. Es ist zu erkennen, dass der höchste Grundwasserstand im Zeitraum von 1970 bis 2011 mehrmals bei maximal 157,2 m ü. NN lag und um 1,7 m schwankt.

Im Hinblick auf den Mindestabstand von 1 m zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand ist i.d.R. die Obergrenze des Kapillarsaums über dem Grundwasserspiegel maßgeblich (Go-Horizont).

In den Böden der Talauen ist der Go-Horizont oftmals an den ausgefällten Manganoxiden (schwarz) oder Eisenoxiden (rostfarben) zu erkennen. Langfristig wasser-gesättigtes Feinbodenmaterial (Gr-Horizont) ist i.d.R. fahlgrau gefärbt (Abb. 5.3.3.2-2, Kap. 3.1.2 - semiterrestrische Böden).

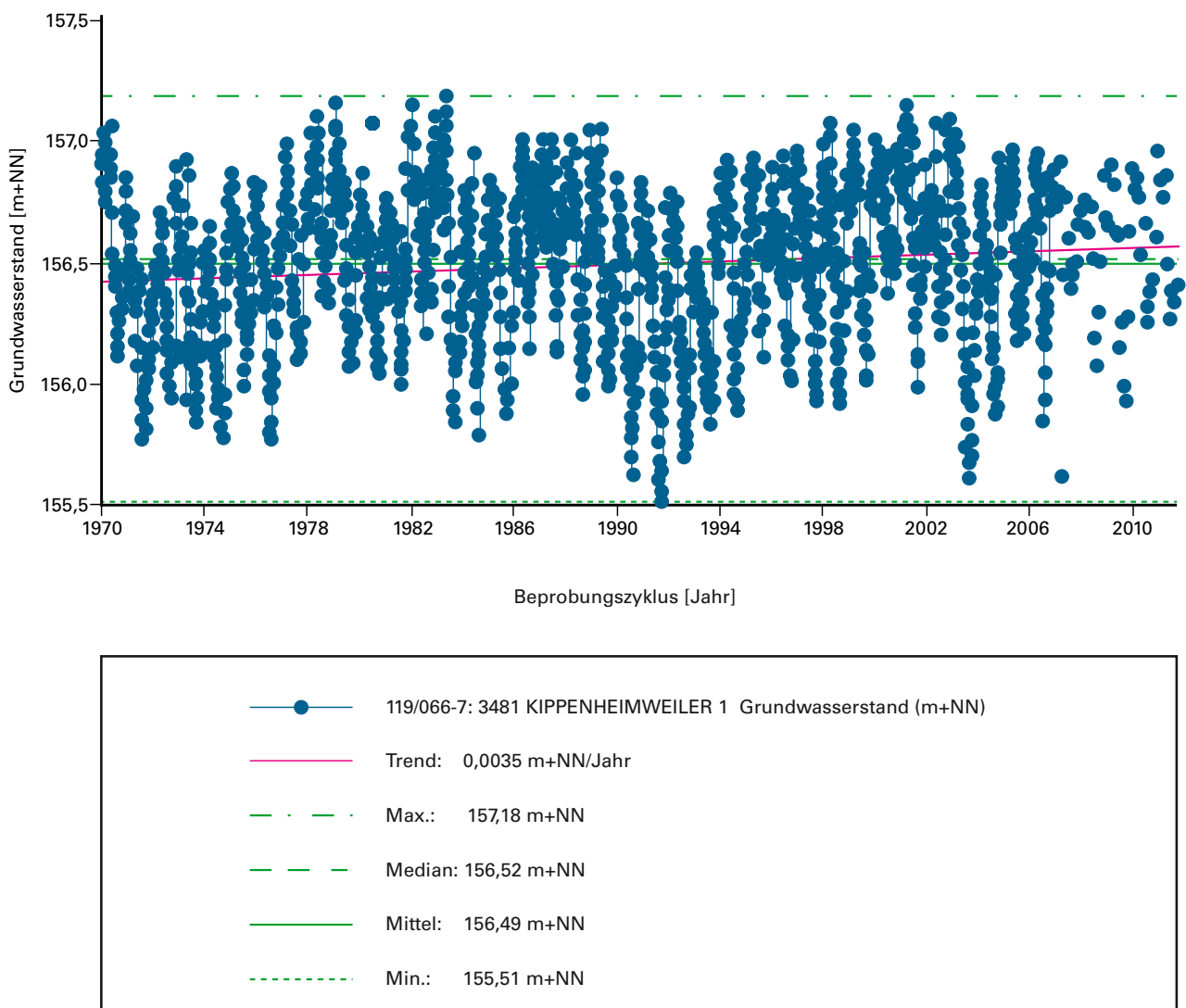


Abb. 5.3.3.2-1: Aufzeichnung des Grundwasserstands an der Messstelle Nr. 119/066-7 westlich von Lahr-Langenwinkel von 1970 bis 2011

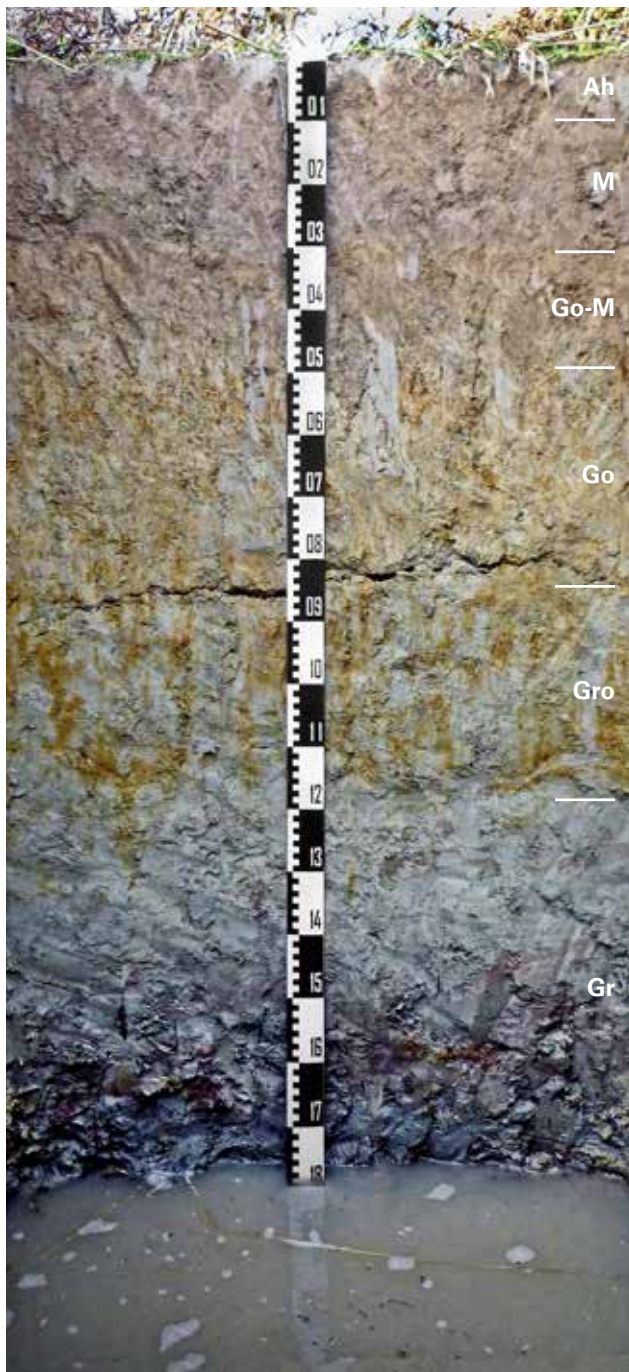


Abb. 5.3.3.2-2: Auengley-Brauner Auenboden aus schluffigen Auen-sedimenten in einem Gewerbegebiet bei Hofweier; Bild: R. Olschewski



Abb. 5.3.3.2-3: Brauner Auenboden-Auenpseudogley aus verschwemmtem würmzeitlichem Löss in einem Gewerbegebiet bei Achern; Bild: R. Olschewski

Liegt der Grundwasserspiegel infolge einer früheren Grundwasserabsenkung deutlich unter einem relik-tischen Go-Horizont, können Daten über die Grundwasserhöchststände direkt für die Bewertung hergezo-gen werden.

In Böden der Talauen, die von Stauwasser geprägt sind, ist es schwieriger den Go-Horizont nach oben genau abzu-grenzen, weil die wasserstauenden Sd-Horizonte ebenfalls

durch rostfarbene Eisenoxide aus Lösungs- und Fällungs-reaktionen in typischer Ausprägung gekennzeichnet sind („Marmorierung“; Abb. 5.3.3.2-3, Kap. 3.1.2).

Eisenoxide in Go- und Sd-Horizonten können nach ihrer Verteilung an Bodenaggregaten nach außen („extrover-tiert“) oder nach innen gerichtet („introvertiert“) un-terschieden werden [STAHR ET AL. 2008]. Die Beurteilung der an Verwertungsstandorten in Talauen anstehenden Böden



erfordert daher bodenkundlichen Sachverstand und sollte durch ein erfahrenes Ingenieurbüro erfolgen.

Die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort in Abb. 5.3.3.2-2 genügen nicht der Anforderung an den Mindestabstand von 1 m zur Oberkante des Go-Horizonts. Das humose Bodenmaterial muss aus Gründen der Baustatik mindestens 30 cm tief abgetragen werden, so dass erhöht schadstoffhaltiges Boden- oder Recyclingmaterial, das bis auf das Höhenniveau einer Erschließungsstraße eingebaut werden sollte, direkt über dem Go-Horizont läge.

Anders stellen sich die Verhältnisse am Standort in Abb. 5.3.3.2-3 dar. Dort wird der Mindestabstand von 1 m auch dann eingehalten, wenn das humose Bodenmaterial bis zu einer Tiefe von 40 cm abgeschoben würde.

Informationen insbesondere über die Sicherungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Einbaukonfigurationen sind der Verwaltungsvorschrift zur Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial des Umweltministeriums zu entnehmen [VwV Boden, UM 2007].

### 5.3.4 Erdaushubdeponien und -börse

Der Eigenbetrieb Abfallwirtschaft des Ortenaukreises betreibt derzeit 19 kreiseigene Erdaushubdeponien (Abb. 5.3.1-2). Abgesehen von den Zulassungserweiterungen bei einzelnen Erdaushubdeponien für die Annahme von gebietsspezifisch erhöht schadstoffhaltigem Bodenaushub darf auf den Deponien nur unbelastetes mineralisches Material abgelagert werden (Boden, Kies, Gesteinsbruch, entwässerte Sedimente). In der Regel sind dafür keine Schadstoffanalysen notwendig.

An den kreiseigenen Erdaushubdeponien können Privathaushalte Kleinmengen an Bauschutt abgeben (Backsteine, unbewehrter Beton, Dachziegel, Pflastersteine). Größere Bauschuttmengen gewerblicher Betriebe müssen in einer Bauschuttrecyclinganlage verwertet werden.

Informationen über

- die einzelnen Erdaushubdeponien (Anfahrtswege Öffnungszeiten, Telefonverbindungen)
- die Gebühren bei Selbstanlieferung
- Bauschuttrecyclinganlagen

können der Internetseite des Eigenbetriebs Abfallwirtschaft unter den Menüpunkten Abfallannahmestellen, Abfallgebühren/Selbstanlieferung entnommen werden:

[www.abfallwirtschaft-ortenaukreis.de](http://www.abfallwirtschaft-ortenaukreis.de)

Das Landratsamt Ortenaukreis betreibt seit 1989 eine Erdaushubbörse als kostenlose Vermittlungsstelle für Erdaushub. Zur leichteren Vermittlung können Anbieter und Nachfragende auf die Internetseite des Eigenbetriebs Abfallwirtschaft (Menüpunkt „Service“) direkt auf die Erdaushubbörse zugreifen.

## 5.4 Naturnahe Regenwasserversickerung

### 5.4.1 Allgemeines

Im Wassergesetz für Baden-Württemberg vom 20. Januar 2005 wurde die „naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung“ als vorrangiges Gestaltungsprinzip der Beseitigung von Niederschlagswasser eingeführt [WG 2005].

Das Ableiten von Niederschlagswässern über die Kanalisation erfordert erhebliche technische und ökonomische Aufwendungen, weil das Kanalisationssystem einschließlich Kläranlagen so dimensioniert werden muss, dass bei Starkniederschlägen ein ordnungsgemäßer Betrieb gewährleistet ist (Abb. 4.1.5-1).

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr wird die Ableitung von gering verschmutztem Niederschlagswasser über die Kanalisation zu Recht in Frage gestellt (Kap. 4.5). Im Wassergesetz für Baden-Württemberg wird dem in § 45b Abs. 3 Rechnung getragen. Danach soll Regenwasser von Grundstücken, die nach dem 1. Januar 1999 bebaut, befestigt oder an die öffentliche Kanalisation angeschlossen werden, durch Versickerung oder ortsnahe Einleitung in ein oberirdisches Gewässer beseitigt werden, sofern es mit vertretbarem Aufwand und schadlos möglich ist.

Das Prinzip des naturnahen Umgangs mit Niederschlagswässern erfordert die frühzeitige Einbindung der Entwässerungsplanung beim Aufstellen von Bebauungsplänen. Die Wahl der Versickerungsart hängt u.a. von den örtlichen Boden- und Untergrundverhältnissen ab.

Als wichtigste Bausteine einer naturnahen Regenwasserversickerung innerhalb eines Baugebiets gelten folgende Systeme, die ggfs. kombiniert werden können

- Flächenversickerung
- Muldenversickerung
- Mulden-Rigolenversickerungen.

Die Versickerung erfolgt im Wesentlichen über eine belebte Oberbodenschicht mit einer Mächtigkeit von i.d.R. mindestens 30 cm.

Unterirdische punkt- und linienförmige Versickerungsanlagen (Schächte oder Rigolen) erfordern eine besondere Überwachung und sind deshalb zu vermeiden. Sofern sie im Einzelfall eingesetzt werden, ist eine Vorbehandlung auf das Niveau der Sickerwasserprüfwerte (BBodSchV) erforderlich. Jedenfalls muss eine ungesättigte Bodenzone von mindestens 1 m unterhalb der Anlage verbleiben.

### Regelwerke der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA)

DWA-A-138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser

DWA-M-153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser

### Arbeitshilfen der LUBW

Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser: Regenrückhaltung

Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten

### 5.4.2 Bodeneigenschaften

Bei der naturnahen Versickerung von Niederschlagswasser werden die natürlichen Bodenfunktionen „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ und „Filter und Puffer für Schadstoffe“ genutzt, weil der Bodenkörper

- abgeleitetes Niederschlagswasser aufnimmt, zwischenspeichert und zeitverzögert in den Untergrund abgibt
- Schadstoffe im Ablaufwasser (Kap. 4.1.5) filtert und puffert.

Die Schadstoffeinträge in den Boden müssen so gering gehalten werden, dass die Filter- und Pufferfähigkeit langfristig erhalten bleibt.

Die „Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten“ der LUBW unterscheiden zwischen gering, mittel und stark belasteten Regenabflüssen. Ob eine Behandlung von Regenwasser erforderlich ist, ist mit Hilfe des Bewertungsverfahrens (gemäß ATV-DVWK-M 153 bzw. der o.g. Arbeitshilfe) zu ermitteln.

Nach dem Arbeitsblatt DWA-A-138 [DWA 2005] sind bei der Planung von Anlagen für die naturnahe Regenwasserversickerung folgende Bodeneigenschaften zu berücksichtigen

- Wasserdurchlässigkeit
- Mächtigkeit.

Die Wasserdurchlässigkeit des Bodens hängt vor allem von seiner Porosität ab.

Die Ableitung großer Sickerwassermengen ist an schnell dränende Grobporen gebunden ( $\varnothing > 50 \mu\text{m}$  = Luftkapazität). Die Porosität kann indirekt durch Messung der Wasserleitfähigkeit bestimmt und mit dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  in den Einheiten m/s bzw. cm/d beschrieben werden (Kap. A.3.2).

Nach dem Arbeitsblatt DWA-A-138 [DWA 2005] sind für Versickerungen mittel bis sehr hoch durchlässige Böden geeignet, deren Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  zwischen  $1 \times 10^{-3}$  und  $1 \times 10^{-6}$  m/s bzw. 8.640 und 8,64 cm/d liegt.

Bei  $k_f$ -Werten  $> 1 \times 10^{-3}$  m/s, die für Grobsand oder sandigen Kies typisch sind, versickert das Niederschlagswasser zu schnell, um mitgeführte Schadstoffe vor dem Eintritt in das Grundwasser ausreichend zu filtern und zu puffern.

Bei  $k_f$ -Werten  $< 1 \times 10^{-6}$  m/s, die häufig bei schluff- und tonreichen Böden gemessen werden, kann grundsätzlich versickert werden. Es muss jedoch von langen Einstauzeiten ausgegangen werden, die nur mit einer großen Flächendimensionierung der Anlage vermieden werden können, was i. d. R. auf räumliche und ökonomische Grenzen stößt.

Eine Abschätzung kann anhand von Durchlässigkeitsbeiwerten aus der ingenieurgeologischen und der bodenkundlichen Fachliteratur erfolgen (Tab. 5.4.2-1 und -2).

Es ist zu beachten, dass die dort angegebenen  $k_f$ -Werte

- untereinander differieren
- z.T. weite Variationsbreiten haben
- ungenaue Angaben zur Bodenart enthalten (Abb. 3.1.1-3).

Tab. 5.4.2-1: Durchlässigkeitsbeiwerte verschiedener Böden nach Muth (Prinz, Strauß 2006)

| Bodenart       | Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ |        |
|----------------|-------------------------------|--------|
|                | [m/s]                         | [cm/d] |
| Sand           | $5 \times 10^{-5}$            | 432,00 |
| lehmgiger Sand | $2 \times 10^{-5}$            | 172,80 |
| sandiger Lehm  | $8 \times 10^{-6}$            | 69,12  |
| Lehm           | $4 \times 10^{-6}$            | 34,56  |
| toniger Lehm   | $2 \times 10^{-6}$            | 17,28  |

Tab. 5.4.2-2: Häufige Durchlässigkeitsbeiwerte in wassergesättigten Böden verschiedener Körnung nach Scheffer/Schachtschabel (2010)

| Bodenart | Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$                       |                       |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
|          | [m/s]                                               | [cm/d]                |
| Sande    | $\sim 4 \times 10^{-3}$ bis $\sim 4 \times 10^{-5}$ | $\sim 30\,000 - 300$  |
| Schluffe | $\sim 4 \times 10^{-3}$ bis $\sim 5 \times 10^{-7}$ | $\sim 30\,000 - 4$    |
| Lehme    | $\sim 4 \times 10^{-3}$ bis $\sim 1 \times 10^{-7}$ | $\sim 30\,000 - 1$    |
| Tone     | $\sim 4 \times 10^{-3}$ bis $\sim 1 \times 10^{-9}$ | $\sim 30\,000 - 0,01$ |



Bei der Verwendung von Literaturangaben bleibt jedoch der Einfluss des örtlichen Bodengefüges und der Lagerungsdichte auf die Durchlässigkeit unberücksichtigt. Auf Böden mit Schichtungen unterschiedlicher Bodenarten können Literaturdaten nur eingeschränkt übertragen werden.

Nicht realistisch auf Böden übertragbar sind Schätzwerte zur Wasserdurchlässigkeit von Grundwasseraquiferen, die aus Lockergesteinen aufgebaut sind. Diese  $k_f$ -Werte sind aus Ergebnissen von Pumpversuchen und gleichzeitig durchgeführten Korngrößenanalysen abgeleitet worden [PRINZ, STRAUSS 2006; LANGGUTH, VOIGT 2004]. Deshalb ist Sickerversuchen zur Ermittlung der konkreten Durchlässigkeitsweite am Ort der geplanten Anlage stets der Vorzug zu geben (Kap. A.5.4.4).

Grundsätzlich muss darauf geachtet werden, dass die Versickerungsflächen vor, während und nach der Bauphase nicht durch Befahren verdichtet und in ihrer Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigt werden (Kap. 5.3.2.3).

Die Mächtigkeit des wasserungesättigten Bodens bis zum Kapillarsaum des Grundwasserspiegels (z.B. Go-Horizont) muss mindestens 1 m betragen, weil bei einer geringeren Mächtigkeit zu besorgen ist, dass die im Niederschlagswasser mitgeführten Schadstoffe in das Grundwasser gelangen.

Manche Bodentypen, bei denen das Grundwasser kapillar bis kurz unter die Geländeoberfläche steigt, sind nicht als Standort von Versickerungsanlagen geeignet (z.B. Auengleye, Abb. 3.1.2-5).

Soll zur Gewährleistung eines ausreichenden Zuleitungsgefälles oder wegen örtlicher Stauwasserverhältnisse der Boden abgetragen werden, ist darauf zu achten, dass der erforderliche Sickerraum erhalten bleibt (Abb. 5.4.2-1).

Versickerungsanlagen sind nur dann als Minimierungsmaßnahme eines Eingriffs in die Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ zu werten, wenn im verbleibenden Boden ein Wasserspeichervermögen erhalten bleibt (Kap. 5.1.3.2). Die Entscheidung, ob und in welchem Umfang entsprechende Anlagen als Minimierung gewertet werden können, muss unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse am jeweiligen Standort erfolgen (Abb. 5.4.2-1 u. Kap. 3.2.3).

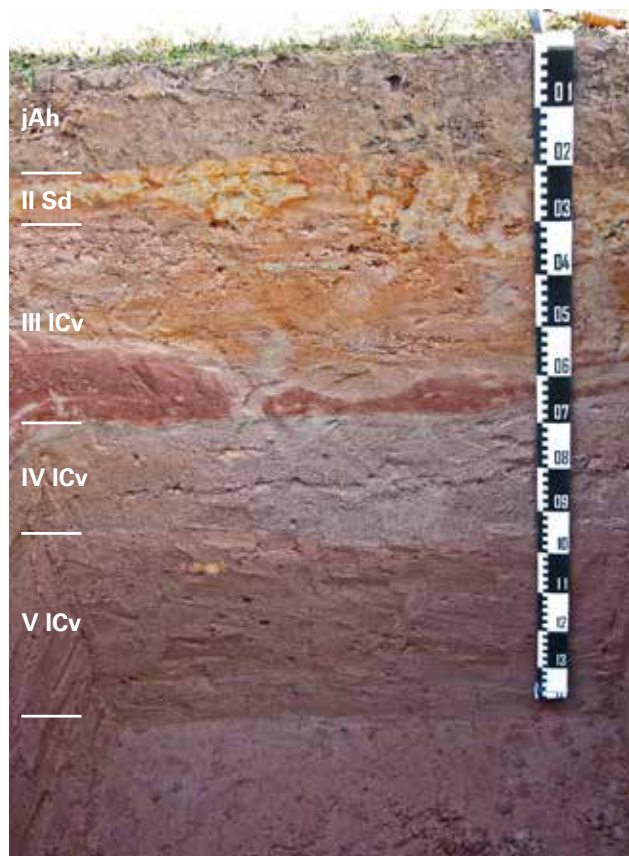


Abb. 5.4.2-1: Bis zum Niederterrassensand abgetragener Stauwasserboden einer Versickerungsanlage bei Schuttwald mit neu angedeckter, belebter Oberbodenschicht aus schluffigem Lehm (Lu); Bild: R. Olschewski

Die Schadstoffeinträge in den Boden von Versickerungsanlagen werden im Wesentlichen durch den Regenwasserabfluss von Dach- und Verkehrsflächen geprägt (Kap. 4.1.5). Maßgeblich sind dabei Schwermetalle und Kohlenwasserstoff-Verbindungen.

Eine belebte Oberbodenschicht gewährleistet, dass gering belastete Niederschlagsabflüsse bzw. noch tolerierbare Abflussmengen ohne Besorgnis einer Grundwasserverunreinigung versickert werden können.

Um eine ausreichende Filter- und Pufferleistung zu bieten, muss der Oberboden i.d.R. mindestens 30 cm mächtig sein und eine bestimmte Qualität aufweisen. Für die in Kap. 3.2.4 erläuterten Kenngrößen geben die „Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten“ [LUBW 2005b] folgende Werte an:

- pH-Wert  $\geq 6,0$
- Humusgehalt von 2 - 10 Gew.-%
- Tongehalt von 5 - 20 Gew.-%

Bei Oberböden mit  $\text{pH} < 6$  wird im Ortenaukreis alternativ zu einer Aufkalkung eine mindestens 20 cm starke Filterschicht aus carbonathaltigem Sand unterhalb der Oberbodenschicht eingebaut ( $\text{CaCO}_3 > 5$  Gew.-%, Körnung 0/2 - 0/4).

Tonreichere Oberböden können ebenso verwendet werden. Bei Begrünung sorgen Wurzelwerk und Bodenorganismen für ein krümeliges Bodengefüge und damit für eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit (Abb. 5.4.2-1).

Wird stark belastetes Niederschlagswasser, z.B. von unbeschichteten Kupfer- und Zinkdächern ohne Vorbehandlung versickert, ist davon auszugehen, dass die Filter- und Pufferleistung des Oberbodens der Versickerungsanlagen langfristig ausgeschöpft wird. Schon im Lauf eines Jahres können die zugeleiteten Schwermetallfrachten dazu führen, dass die Gehalte im Oberboden über die Vorsorgewerte der BBodSchV angereichert werden (Abb. 5.4.2-2).

Deshalb ist für stark belastete Niederschlagswasserabflüsse eine Behandlungsanlage erforderlich, wie sich aus dem Bewertungsverfahren nach DWA-DVWK-M 153 i.d.R. ergibt. Dabei ist für die Einleitung des behandelten Niederschlagswassers eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich.

Sollen bei Muldenversickerungen bzw. Mulden-Rigolenversickerungen künstliche Filtersubstrate anstelle einer bewachsenen Oberbodenschicht eingebaut werden, ist darauf zu achten, dass es sich um gleichwertige Materialien handelt.



Abb. 5.4.2-2: Grüne Kupferausfällungen (Malachit und evtl. Azurit) in der Regenwasserrinne ein Jahr nach Installation eines Kupferdachs; Bild: R. Olschewski

### 5.4.3 Eignung der Ortenauer Böden zur naturnahen Regenwasserversickerung

Um Trägern und Planern von Bauvorhaben eine erste Einschätzung über die tendenzielle Eignung der Böden zur naturnahen Versickerung zu ermöglichen, hat das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) für den Ortenaukreis eine Übersichtskarte erstellt (Abb. 5.4.3-2).

Die Karte zeigt, dass die Böden um die Ortschaften der Rheinebene und in den Auenlagen der größeren Schwarzwaldtäler für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen geeignet oder überwiegend geeignet sind.

Hervorzuheben sind die Braunen Auenböden aus sandigen und kiesigen Sedimenten der Kinzig zwischen Offenburg-Griesheim und Kehl-Kork. Einen vergleichbaren Bodenaufbau zeigt Abb. 3.1.2-4.

Überwiegend wenig geeignet sind die Böden z.B. an Standorten östlich von Rust und Kappel oder westlich von Lahr und um Schutterwald. Es handelt sich dort u.a. um Böden mit Tonanreicherungen oder tonreicheren Schichten im Unterboden (Kap. 3.1.2, Parabraunerden und Pseudogleye).

Die Siedlungsflächen sind jedoch nicht vollständig von solchen Böden umgeben. Bleibt ausreichend Sickerraum erhalten, kann nach teilweisem Abgraben der Böden immer noch naturnah versickert werden (Abb. 5.4.2-1 und 5.4.3-1).



Abb. 5.4.3-1: Muldenversickerung bei Schutterwald. Stauende Bodenschichten wurden abgegraben (s.a. Abb. 5.4.2-1); Bild: R. Olschewski







Tab. 5.4.3-1: Kriterien für die Einstufung der Versickerungsmöglichkeiten im Ortenaukreis

| Wasserdurchlässigkeit<br>( $k_f$ -Wert)                     | Grundwasserflurabstand* |                                                   | Kombinationen                                                                 |                                                                      | Hangneigung**             |                           |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                                             | meist < 1 m             | ca. 0,5 - 2 m<br>[Angaben nur<br>für Schwarzwald] | Grundwasserflurabstand*<br>> 1 m und ebene bis sehr<br>schwach geneigte Lagen | Grundwasserflurabstand*<br>> 0,5 - 2 m und schwach<br>geneigte Hänge | Schwach<br>3,5 - < 9 %    | mittel bis steil<br>≥ 9 % |
| mittel bis hoch<br>und sehr hoch<br>(10 - ) 40 - > 100 cm/d | ungeeignet              | überwiegend<br>geeignet                           | gut geeignet                                                                  | ungeeignet                                                           | eingeschränkt<br>geeignet | ungeeignet                |
| mittel 10 - 40 cm/d                                         | ungeeignet              | überwiegend<br>geeignet                           | überwiegend geeignet                                                          | ungeeignet                                                           | eingeschränkt<br>geeignet | ungeeignet                |
| gering < 10 cm/d                                            | ungeeignet              | wenig<br>geeignet                                 | wenig geeignet                                                                | ungeeignet                                                           | ungeeignet                | ungeeignet                |

\* entspricht der ungesättigten Bodenzone

\*\* Böden ohne Grundwassereinfluss

Eingeschränkt geeignet für die Versickerung über Mulden und Mulden-Rigolensysteme sind Standorte in der lössbedeckten Vorbergzone. Obwohl für die dortigen Böden mittlere bis hohe Durchlässigkeitsbeiwerte erwartet werden können (Abb. 3.2.1-1), stellen Hangneigung und die Lage oberhalb von bestehenden Siedlungsflächen im Einzelfall nicht überwindbare Probleme dar.

Entlang der Schutter sowie westlich von Appenweier und nord-östlich von Kehl sind die Böden in weiten Bereichen ungeeignet zur Regenwasserversickerung.

Es handelt sich um Böden, die bis kurz unter die Geländeoberfläche stark vom Grundwasser beeinflusst sind und z.T. eine geringe Wasserleitfähigkeit aufweisen (Tab. 3.1.2-1, z.B. Auen- und Nassgleye aus tonigem Auen-sediment).

Im Schwarzwald scheiden viele Standorte als ungeeignet aus. In mehr oder weniger steilen Hanglagen besteht u.a. die Gefahr, dass die Versickerung über Mulden- und Mulden-Rigolensysteme zu Hangrutschungen führt. Kleinräumig können gering wasserdurchlässige, staunasse Böden anstehen.

Tab. 5.4.3-1 fasst die Kriterien für die Einstufung der Möglichkeiten einer naturnahen Regenwasserversickerung in Böden des Ortenaukreises zusammen.

# Anhang

## Fachinformation, Methoden

### A.2.2.3 Gesteinsbeschreibung

#### Gesteinsbildende Silikat-Mineralie

Silikate sind die wichtigsten gesteinsbildenden Mineralie. Sie sind mit mehr als 90 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt.

Grundbaustein der Silikate sind  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder, bei denen vier Sauerstoffionen ( $\text{O}_2^-$ ;  $r = 140 \text{ pm}$ ) wie die Ecken eines Tetraeders das kleinere Silizium ( $\text{Si}^{4+}$ ;  $r = 40 \text{ pm}$ ) umgeben ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ). Silizium besetzt die Tetraederlücken zwischen vier Sauerstoffionen.

Einzelne Sauerstoffionen können zwei  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraedern angehören (Abb. A.2.2.3-1 unten). Je nach Verkettung oder Vernetzung (Polymerisation) der Tetraeder werden die Baugruppen der Insel-, Ring-, Ketten-, Bänder-, Schicht- und Gerüstsilikate unterschieden (Abb. A.2.2.3-2) [OKRUSCH, MATTHES 2005].

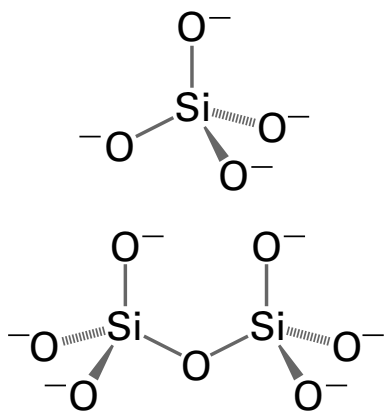


Abb. A.2.2.3-1:  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder (oben); zwei durch ein gemeinsames Sauerstoffion verbundene  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder (unten)

Der Ladungsausgleich der negativ geladenen  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder erfolgt durch positiv geladene Kationen (z.B.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ). Kleine Kationen werden von vier Sauerstoffionen tetraedrisch (Tetraederlücke), die Größeren (i.d.R.  $r > 0,5 \text{ pm}$ ) von sechs Sauer-

stoff- und/oder Hydroxylionen umgeben, die die Ecken eines Oktaeders bilden (Oktaederlücken). Sowohl in den Tetraeder- als auch in den Oktaederlücken kann Silizium ( $\text{Si}^{4+}$ ) durch Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ;  $r = 53 \text{ pm}$ ) ersetzt werden, dessen Ionenradius im Übergangsbereich der tetraedrisch zu den oktaedrisch koordinierten Kationen liegt (Kap. A.3.1.1).

#### Inselsilikate

In dieser Baugruppe liegen die  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder isoliert vor (Abb. A.2.2.3-1 oben). Zu den häufigsten Vertretern dieses Strukturtyps zählen die Granat- und Olivin-Mineralie, bei denen Magnesium- und/oder Eisenionen ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) die  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder verknüpfen. Zu einem kleinen Teil können die Magnesium- und Eisenionen in den Oktaederlücken durch Nickel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) oder Kobalt ( $\text{Co}^{2+}$ ) ersetzt werden [MASON, MOORE 1985].

#### Ringsilikate

Bei dieser Baugruppe sind die  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder in einer Ebene zu Dreier-, Vierer- oder Sechseringen verbunden. Die Mineralie dieses Strukturtyps spielen beim Aufbau der Gesteine eine untergeordnete Rolle, sind jedoch für bestimmte Mineralvergesellschaftungen (Paragenesen) typisch. Beispielsweise ist das Mineral Cordierit ( $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ) Bestandteil hochmetamorpher Gesteine (Cordierit-Gneis).

#### Ketten- und Bändersilikate

Die  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder dieser Baugruppe sind kettenartig aneinandergereiht, wobei jedes Tetraeder zwei Sauerstoffionen mit den benachbarten Tetraedern teilt und bei den Bändersilikaten die Ketten bei jedem zweiten Tetraeder durch ein gemeinsames Sauerstoffion verbunden sind. Die Hohlräume der Bändersilikate enthalten negativ geladene  $\text{OH}^-$ - und  $\text{F}^-$ -Ionen (z.B. Hornblende).

Pyroxen-Mineralie sind die wichtigsten Vertreter der Ketten-, die Gruppe der Amphibole die wichtigsten Vertreter der Bändersilikate. In beiden Baugruppen können dreiwertige Eisenionen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) durch Chrom ( $\text{Cr}^{3+}$ ) ersetzt werden [MASON, MOORE 1985].

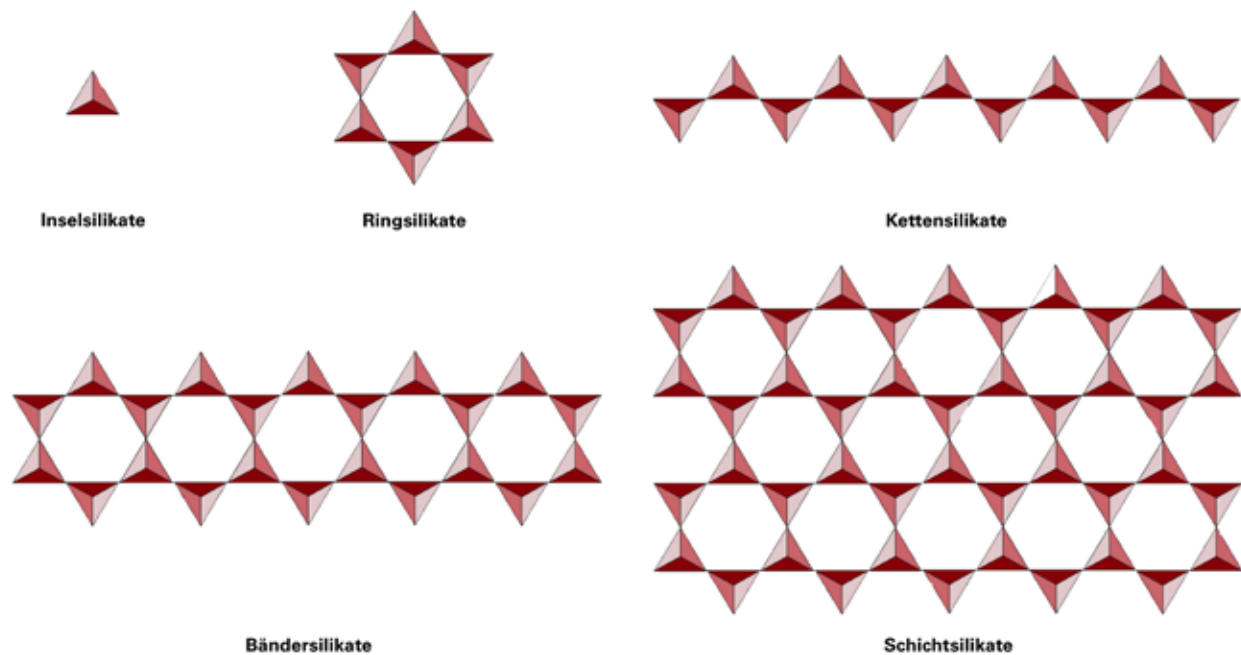


Abb. A.2.2.3-2: Anordnung von  $[\text{SiO}_4]$ -Tetraeder in gesteinsbildenden Silikatmineralen

#### Schichtsilikate

Typische Bauelemente dieser Gruppe sind Tetraeder- und Oktaeder-Schichten, wobei je nach Kombination der Schichten Zwei-, Drei- oder Vierschichtmineralen unterschieden werden.

Die Tetraeder-Schicht wird von aneinandergereihten Sechseringen aus  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraedern gebildet, wobei alle Tetraederspitzen in die gleiche Richtung zeigen. In den Zentren der Sechseringe sind negativ geladene  $\text{OH}^-$ - und/oder  $\text{F}^-$ -Ionen eingebaut. Die Oktaeder-Schichten enthalten im Zentrum positiv geladene Kationen ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ), die von sechs Sauerstoff- bzw.  $\text{OH}^-$ -Ionen der Tetraeder-Schichten umgeben sind. Zu den wichtigsten gesteinsbildenden Dreischicht-Mineralen zählt die Gruppe der Glimmer, deren verbreitete Vertreter Biotit und Muskovit u. a. in Graniten und Gneisen häufig sind. Ein weiteres gesteinsbildendes Zweischicht-Mineral ist der aus Olivin entstehende Serpentin  $\text{Mg}_6[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ .

Die aus der Verwitterung von Glimmer und Feldspäten hervorgehenden Tonminerale gehören ebenfalls zu den Schicht-Silikaten. In Kap. A.3.1.1 wird u. a. der Aufbau der Mineralstrukturen aus Tetraeder- und Oktaeder-Schichten dargestellt.

#### Gerüstsilikate

Die einzelnen  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder dieses Strukturtyps sind über alle Ecken dreidimensional durch gemeinsame Sauerstoffionen miteinander vernetzt. Anders als bei reinem Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) wird ein Teil des Siliziums ( $\text{Si}^{4+}$ ) durch Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) ersetzt. Zur Kompensation des resultierenden negativen Ladungsüberschusses werden positiv geladene Kationen eingebaut. Die Aufnahme großer, positiv geladener Ionen wie  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  führt zur Auflockerung des dreidimensionalen Gerüsts.

Zu den verbreitetsten gesteinsbildenden Gerüstsilikaten zählt die Gruppe der Feldspäte. Die wichtigsten Vertreter sind Kalifeldspat ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) und Plagioklas, der eine Mischkristallreihe zwischen den reinen Endgliedern Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) und Anorthit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) bildet.

In Kalifeldspat kann wie bei manchen Glimmern Kalium ( $r = 138 \text{ pm}$ ) durch Ionen ähnlicher Größe wie z. B. Barium ( $\text{Ba}^{2+}$ ;  $r = 136 \text{ pm}$ ) oder Blei ( $\text{Pb}^{2+}$ ;  $r = 119 \text{ pm}$ ) ersetzt werden [MASON, MOORE 1985].



### A.3.1.1 Grundzüge der Bodenbildung

#### Tonminerale

Tonminerale sind „sekundäre“ Minerale, die u.a. im Boden bei der Verwitterung aus ionar gelösten oder kolloidalen Zerfallsprodukten sowie aus erhaltenen Grundstrukturen gesteinsbildender Silikatminerale entstehen (Glimmer bzw. Feldspäte).

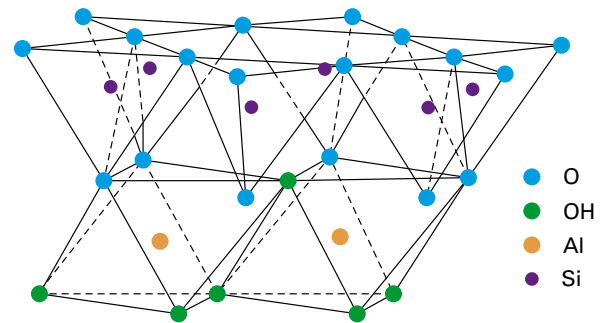
Allen Tonmineralen ist ein schichtartiger Aufbau gemeinsam (Schichtsilikate), wobei zwischen Zweischicht-, Dreischicht- und Vierschicht-Mineralen unterschieden wird. Die Tonmineral-Strukturen werden aus einzelnen Tetraeder- und Oktaeder-Schichten aufgebaut. Die Tetraeder-Bausteine bestehen aus einem Silizium-Ion im Zentrum jedes Tetraeders, das von vier Sauerstoffionen umgeben ist. Bei den Oktaeder-Bausteinen werden Aluminium-Ionen von sechs Sauerstoff- bzw. Hydroxyl-Ionen ( $\text{OH}^-$ -Ionen) umgeben (Kap. A.2.2.3).

Zweischicht-Tonminerale bestehen aus einer Tetraeder- und einer Oktaeder-Schicht, die gemeinsame Sauerstoffionen teilen (Abb. A.3.1.1-1 oben).

Die Struktur der Dreischicht-Tonminerale enthält eine zweite Tetraeder-Schicht, deren Bausteine wieder durch gemeinsame Sauerstoffionen mit der Oktaederschicht verknüpft sind (Abb. A.3.1.1-1 unten). Bei der Bildung von Dreischicht-Tonmineralen können die zentralen Silizium- bzw. Aluminium-Ionen der Tetra- und Oktaeder-Schichten durch ähnlich große Ionen anderer Wertigkeit ersetzt werden: Silizium ( $\text{Si}^{4+}$ ) durch Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) und Aluminium durch Eisen bzw. Magnesium ( $\text{Fe}^{3+/2+}$  bzw.  $\text{Mg}^{2+}$ ). Aus der Substitution von Silizium oder Aluminium resultiert an den Tonmineral-Oberflächen ein negativer Ladungsüberschuss, der für die Eigenschaften und die Funktionen der Böden von Bedeutung ist.

Beispielsweise können Nährstoffkationen wie Kalium ( $\text{K}^+$ ) oder Wassermoleküle ( $\text{H}_2\text{O}$ ) elektrostatisch an die Tonmineraloberflächen sorbiert werden. Der Gehalt an Dreischicht-Tonmineralen bestimmt daher maßgeblich die Kationenaustauschkapazität (KAK) der Böden (Kap. A.4.4.5, Kationenaustauschkapazität).

#### Zweischicht-Tonminerale



#### Dreischicht-Tonminerale

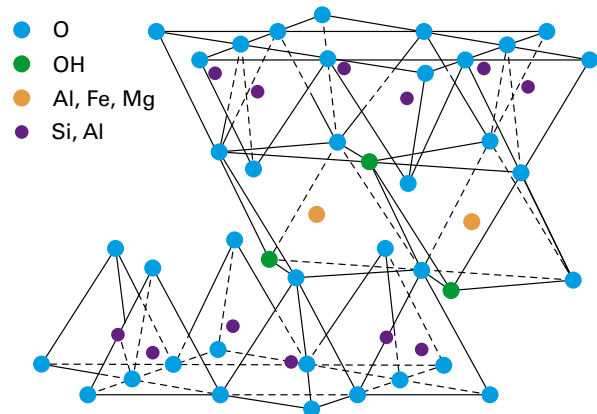


Abb. A.3.1.1-1: Aufbau von Zweischicht- (oben) und Dreischicht-Tonmineralen (unten);  
Quelle: Bodenmagazin Aha!BC.dE

Die negative Überschussladung der Zweischicht-Tonminerale ist geringer, weil weniger substituierbare Ionen als in den Dreischicht-Mineralen vorhanden sind. Zweischicht-Tonminerale sind unter anderem in sauren bis stark sauren Böden bei weit fortgeschrittener Verwitterung zu finden.

Vierschicht-Tonminerale entstehen u.a. in versauerten Böden durch Einlagerung einer dritten Oktaeder-Schicht aus Polymeren von Aluminium-Hydroxiden  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  zwischen die Schicht-Pakete von Dreischicht-Tonmineralen. Die negative Oberflächenladung der Dreischicht-Tonminerale nimmt dadurch ab, so dass sich ihre Eigenschaften denen der Zweischicht-Tonminerale annähern [HEIM 1990; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2010].

Tab. A.3.1.1-1: Eigenschaften ausgewählter Tonminerale (nach Rowell 1997)

| Strukturtypen           | Tonmineral-Hauptgruppen | KAK<br>mmol <sub>e</sub> /kg | Spezifische Oberfläche<br>m <sup>2</sup> /g | Quellfähigkeit      |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|
| Zweischicht-Tonminerale | Kaolinit                | bis 100                      | 10                                          | keine               |
| Dreischicht-Tonminerale | Smectit                 | 1 000                        | 800                                         | intensiv            |
|                         | Illit                   | 250    2 500*                | 20                                          | keine - sehr gering |
|                         | Vermiculit              | 1 500                        | 400                                         | begrenzt            |
| Vierschicht-Tonminerale | Chlorit                 | 100                          | 10                                          | keine               |

\* die Tonminerale werden durch Kaliumionen (K<sup>+</sup>) zusammengehalten, die in die Tetraederschichten eintauchen, weshalb die negative Oberflächenladung (KAK) von 2 500 auf etwa 250 mmol<sub>e</sub>/kg herabgesetzt ist und somit kein Wasser eindringen kann. Die K<sup>+</sup>-Ionen können jedoch langsam abgegeben werden

Unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigen Tonminerale oft einen deutlich blätterartig gestapelten Aufbau (Abb. A.3.1.1-2). Ihre sehr hohe spezifische Oberfläche und ihre Quellfähigkeit beeinflussen je nach innerkristallinem Aufbau wichtige Eigenschaften der Böden wie die Wasserspeicherfähigkeit oder die Kationenaustauschkapazität (Tab. A.3.1.1-1). Bei den Dreischicht-Tonmineralen beträgt der Anteil der inneren Oberfläche an der spezifischen (Gesamt-) Oberfläche etwa 80 - 90 % [HEIM 1990].

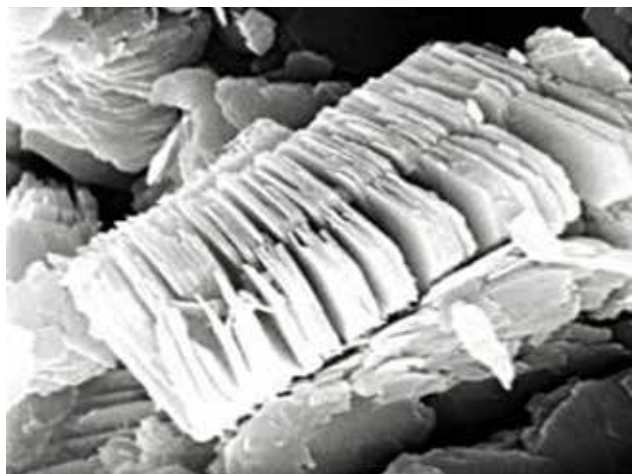


Abb. A.3.1.1-2: Aufnahme des Tonminerals Kaolinit; Bildbreite 20 µm; Quelle: <http://www.min.uni-bremen.de>

Im Labor werden zur Bestimmung des Tongehalts von Bodenproben nach Humuszerstörung zunächst die Sandfraktionen abgesiebt. Anschließend erfolgt die Auftrennung der Kornfraktionen von Schluff und Ton durch Schlämmanalyse.

Dazu wird in Sedimentationszylindern eine Suspension des abgesiebten Bodenmaterials ( $\phi < 0,063$  mm) aufgeschüttelt.

Die Auftrennung beruht auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit der dispergierten Teilchen, die u.a. von ihrem Durchmesser und über die Dichte und Viskosität des Wassers auch von der Temperatur abhängt [HEIM 1990].

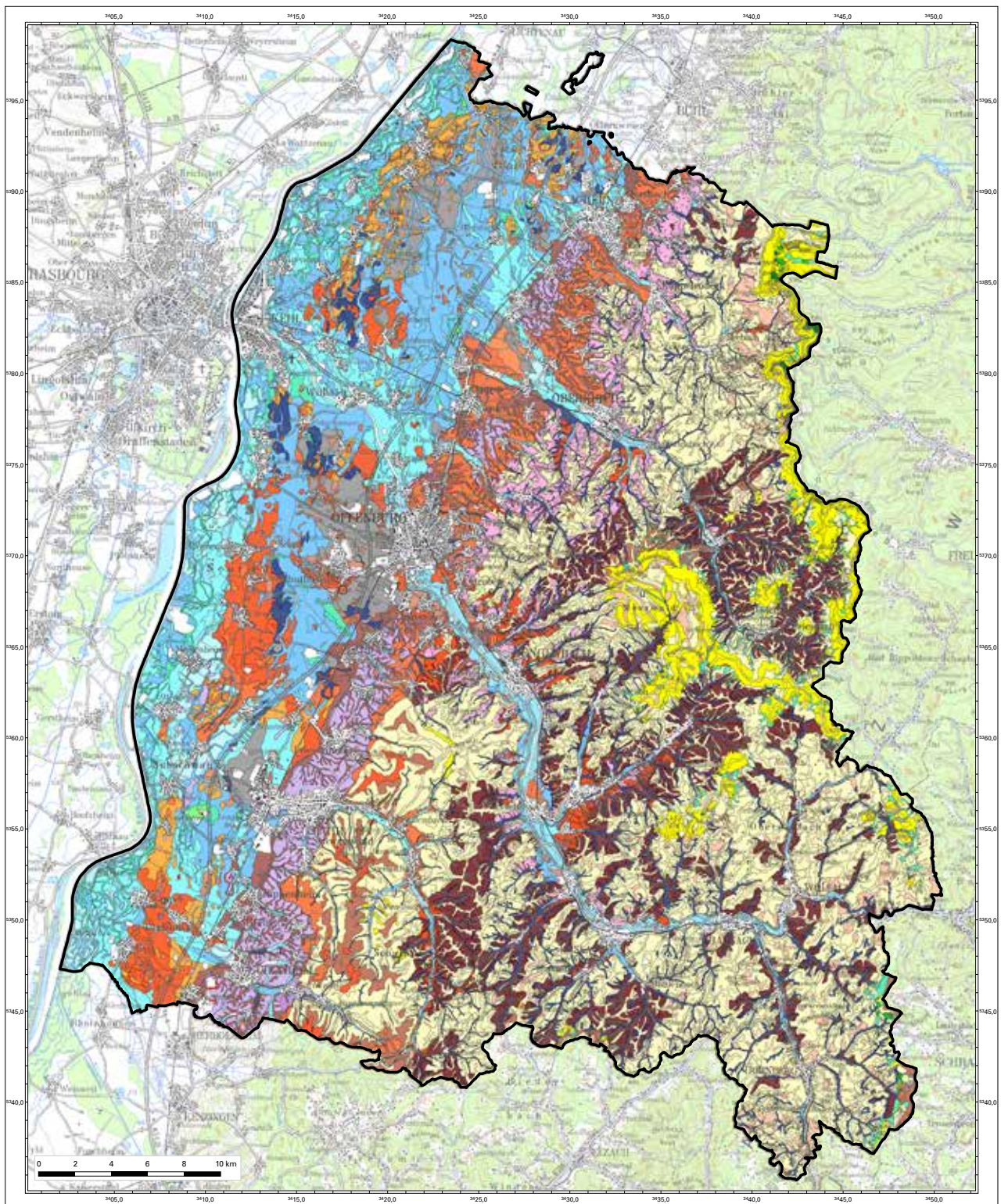
Größere Teilchen sinken schneller als kleinere. Nach Ablauf definierter Sedimentationszeiten werden aus den Zylindern in einer bestimmten Entnahmetiefe Suspensionsproben pipettiert und nach Trocknung der mineralische Rückstand gewogen (Abb. A.3.1.1-3)



Abb. A.3.1.1-3: Geräte für die Schlämmanalyse; Bild: R. Olschewski



### A.3.1.2 Entstehung der häufigsten Böden des Ortenaukreises



**Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50) im Ortenaukreis**

*Legende siehe nachfolgende Seite*

— Landkreisgrenze

*Kartengrundlage:*

Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)

© Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (RP FR, Abt. 9)

Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200)

© Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19

*Kartographie:*

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Abb. A.3.1.2-1: Verbreitung der Böden im Ortenaukreis



## Legende

### Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50) im Ortenaukreis

|                                                                                     |                                                                 |                                                                                     |                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|    | Felshumusboden und Skeletthumusboden aus Schutt und Festgestein |    | Parabraunerde aus Lösslehm bedecktem Kalksteinverwitterungslehm |
|                                                                                     | Ranker aus Festgesteinszersatz                                  |                                                                                     | Terra fusca aus Kalksteinverwitterungslehm                      |
|                                                                                     | Ranker aus Tonstein                                             |                                                                                     | Braunerde-Terra fusca aus Kalksteinverwitterungslehm            |
|                                                                                     | Regosol aus Kristallin-Hangschutt                               |    | Haftnässepseudogley aus Schwemmlöss                             |
|                                                                                     | Regosol aus Sandstein-Hangschutt                                |                                                                                     | Pseudogley aus Lösslehm                                         |
|    | Rendzina aus Kalk- und Dolomitstein                             |    | Pseudogley aus Hochflutlehm                                     |
|    | Rendzina aus Muschelkalk-Hangschutt                             |                                                                                     | Pseudogley aus Fließerden                                       |
|                                                                                     | Rendzina aus Kalksandstein-Schutt                               |                                                                                     | Pseudogley aus Abschwemmmassen                                  |
|    | Pararendzina aus Vulkanit                                       |    | Stagnogley und Bändchenstau podsol aus Sandsteinsersatz         |
|                                                                                     | Pararendzina aus Fließerden und Gesteinsersatz                  |                                                                                     | Stagnogley aus Fließerden                                       |
|                                                                                     | Pararendzina aus Hangschutt                                     |    | Kolluvium aus Abschwemmmassen                                   |
|    | Pararendzina aus Flussschotter                                  |    | Reliktische Auenböden aus Auen sedimenten                       |
|                                                                                     | Pararendzina aus Flugsand                                       |    | Auenkarbonatrohboden aus Hochwasser- und Flussbettsedimenten    |
|    | Pararendzina aus Sandlöss                                       |                                                                                     | Auenregosol aus Flussschotter                                   |
|                                                                                     | Pararendzina aus Löss                                           |                                                                                     | Auenpararendzina aus Auenmergel                                 |
|                                                                                     | Pararendzina aus Hochflutlehm                                   |                                                                                     | Auenpararendzina aus Schotter                                   |
|                                                                                     | Pararendzina aus umgelagertem Lösslehm und Ton-Fließerden       |                                                                                     | Tschernitz und Auenpararendzina aus Auenlehm                    |
|    | Tschernosem aus Löss-Karbonat-Mischsubstrat                     |                                                                                     | Auenbraunerde aus Auenlehm                                      |
|    | Pelosol aus Ton-Fließerden                                      |    | Brauner Auenboden aus Auensand                                  |
|                                                                                     | Braunerde-Pelosol aus Ton-Fließerden                            |                                                                                     | Brauner Auenboden aus Auenlehm                                  |
|    | Pelosol und Pseudogley aus Ton-Fließerden                       |                                                                                     | Brauner Auenboden aus Auenlehm über Hochflutlehm                |
|    | Braunerde aus Mergelsteinsersatz                                |    | Auenpseudogley bis Brauner Auenboden aus Auenlehm               |
|                                                                                     | Braunerde aus Kalksteinschutt                                   |                                                                                     | Brauner Auenboden und Auengley aus Auensand                     |
|    | Braunerde aus Kristallinsersatz und -schutt                     |                                                                                     | Brauner Auenboden und Auengley aus Auenlehm                     |
|                                                                                     | Braunerde und Ferrallite aus stark zersetztem Porphyr           |    | Auenpseudogley aus Auenlehm                                     |
|                                                                                     | Braunerde aus Sandsteinsersatz und -schutt                      |    | Auengley aus Auensand                                           |
|    | Braunerde aus Deckschicht über Unterkeuper-Gestein              |                                                                                     | Auengley aus Auenlehm                                           |
|                                                                                     | Braunerde aus Muschelkalkersatz und -schutt                     |    | Gley aus Schwemmschutt                                          |
|                                                                                     | Braunerde aus Sandstein führenden Fließerden                    |                                                                                     | Gley aus Schwemmlöss                                            |
|                                                                                     | Braunerde aus geringmächtiger Deckschicht über Ton-Fließerden   |                                                                                     | Gley aus Terrassenschotter                                      |
|  | Braunerde aus Flussschotter                                     |                                                                                     | Gley aus Hochwassersedimenten                                   |
|                                                                                     | Braunerde aus Terrassensand                                     |                                                                                     | Gley aus Abschwemmmassen                                        |
|  | Pelosol-Braunerde aus lehmbedeckten Ton-Fließerden              |  | Gley über Niedermoor                                            |
|                                                                                     | Pseudogley-Braunerde aus Fließerden                             |                                                                                     | Quellengley                                                     |
|                                                                                     | Braunerde und Pseudogley aus Lösslehm                           |                                                                                     | Humusgley                                                       |
|  | Braunerde aus Kristallin führenden Fließerden                   |  | Nassgley                                                        |
|  | Braunerde aus Hochflutlehm                                      |                                                                                     | Anmoorgley                                                      |
|                                                                                     | Braunerde aus Lösslehm-Festgestein-Mischsubstrat                |                                                                                     | Moorgley                                                        |
|                                                                                     | Braunerde aus Schwemmlöss                                       |  | Niedermoor                                                      |
|  | Bänderbraunerde aus Rheinkies                                   |  | Nieder- und Hochmoor                                            |
|                                                                                     | Bänderbraunerde und Bänderparabraunerde aus Terrassensand       |  | Hochmoor                                                        |
|                                                                                     | Bänderbraunerde aus Flug- und Dünsand                           |  | Rigosol aus Kristallinsersatz                                   |
|  | Parabraunerde aus Lösslehm-Kristallin-Mischsubstraten           |                                                                                     | Rigosol und Ranker aus Sandsteinsersatz                         |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Schwarzwaldschotter                           |                                                                                     | Rigosol aus Festgesteinsersatz                                  |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Lösslehm-Sandstein-Mischsubstraten            |                                                                                     | Rigosol aus Löss-Kristallin-Mischsubstraten                     |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Lösslehm-Ton-Mischsubstraten                  |                                                                                     | Rigosol aus Löss-Sandstein-Mischsubstraten                      |
|  | Parabraunerde aus Rheinkies                                     |                                                                                     | Rigosol aus Löss-Vulkanit-Mischsubstrat                         |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Terrassensand                                 |                                                                                     | Rigosol aus Löss                                                |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Flugsand                                      |                                                                                     | Rigosol aus Lösslehm                                            |
|  | Parabraunerde aus Sandlöss                                      |                                                                                     | Rigosol aus Löss-Tertiär- und Jura-Mischsubstrat                |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Löss                                          |                                                                                     | Rigosol aus Ton-Fließerden                                      |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Lösslehm                                      |  | Auftragsboden aus Löss                                          |
|                                                                                     | Parabraunerde aus älterem Auenlehm                              |                                                                                     | Auftragsboden aus Löss- und Lösslehm material                   |
|  | Parabraunerde aus Hochflutlehm                                  |                                                                                     | Auftragsboden aus meist natürlichem Substrat                    |
|                                                                                     | Parabraunerde und Pseudogley aus Schotter                       |                                                                                     | Auftragsboden aus Erdaushub                                     |
|                                                                                     | Parabraunerde und Pseudogley aus Lösslehm                       |  | Auftrag                                                         |
|                                                                                     | Parabraunerde und Pseudogley aus Lösslehm-Kies-Mischsubstraten  |                                                                                     | Abgrabungen, z.T. verfüllt und Gewässer                         |
|                                                                                     | Parabraunerde aus Lösslehm-Kristallin-Mischsubstraten           |                                                                                     | Ortslagen                                                       |
|                                                                                     | Parabraunerde aus "alten" Schottern                             |                                                                                     | Kanal, Flussbaumaßnahmen                                        |
|                                                                                     | Parabraunerden aus Fließerden                                   |                                                                                     | See                                                             |
|  | Braunerde und Podsol aus Kristallinsersatz und -schutt          |                                                                                     |                                                                 |
|                                                                                     | Braunerde und Podsol aus Sandsteinsersatz und -schutt           |                                                                                     |                                                                 |
|  | Podsol aus Kristallinsersatz und -schutt                        |                                                                                     |                                                                 |
|                                                                                     | Podsol aus Sandsteinsersatz und -schutt                         |                                                                                     |                                                                 |
|  | Gley und Podsol aus Schutt                                      |                                                                                     |                                                                 |

### A.3.1.2.1 Horizontbezeichnungen und Zusatzsymbole

In Tab. A.3.1.2.1-1 werden die im Bericht am häufigsten verwendeten bodenkundlichen Horizontbezeichnungen und Zusatzsymbole erläutert. Die Erläuterungen lehnen sich an die Bodenkundliche Kartieranleitung (2005) an.

Tab. A.3.1.2.1-1: Horizontbezeichnungen und Zusatzsymbole; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis 2012

| Organische Horizonte (≥ 30 Gew.-% org. Substanz)   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>L</b>                                           | Organischer Horizont aus Ansammlung von nicht und wenig zersetzter Pflanzensubstanz an der Bodenoberfläche<br><b>L</b> von englisch <b>litter</b> = Streu                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>O</b>                                           | Organischer Horizont aus Humusansammlung über Mineralboden oder über Torf. Die organische Substanz besteht zu mehr als 10 Vol.-% aus organischer Feinsubstanz<br><b>O</b> von <b>organisch</b>                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Of</b>                                          | O-Horizont, in dem neben Pflanzenresten die organische Feinsubstanz deutlich hervortritt; ihr Anteil liegt i. d. R. zwischen 10 und 70 Vol.-% der Summe von org. Feinsubstanz und Sprossresten (ohne Wurzelreste und Wurzeln)                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Oh</b>                                          | O-Horizont, in dem organische Feinsubstanz stark überwiegt (i. d. R. > 70 Vol.-%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Mineralische Horizonte (< 30 Gew.-% org. Substanz) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>A</b>                                           | Mineralischer Oberbodenhorizont mit Akkumulation von organischer Substanz und/oder Verarmung an mineralischer Substanz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Ah</b>                                          | A-Horizont mit bis zu 30 Gew.-% akkumuliertem Humus, der mengenmäßig nach unten hin abnimmt; Mindestgehalt an organischer Substanz:<br>bei < 17 Gew.-% und < 50 Gew.-% Schluff: 0,6 Gew.-%<br>bei < 17 Gew.-% und ≥ 50 Gew.-% Schluff bzw. 17 - 45 Gew.-% Ton: 0,9 Gew.-%<br>bei ≥ 45 Gew.-% Ton: 1,2 Gew.-%                                                                                                                                         |
| <b>Aeh</b>                                         | Ah-Horizont, schwach podsolig, durch Humuseinwaschung beeinflusst, ungleichmäßig humos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Ae</b>                                          | A-Horizont, sauergebleicht, podsoliert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Al</b>                                          | A-Horizont, durch Tonverarmung geprägt, über einem tonangereicherten Horizont (Bt) liegend                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Ap</b>                                          | A-Horizont, durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt, Ackerkrume                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>B</b>                                           | Mineralischer Unterbodenhorizont mit einer Änderung des Stoffbestandes und der Farbe gegenüber dem Ausgangsgestein durch Verwitterung, Verlehmung und/oder Stoffanreicherung; in der Regel weniger als 75 Vol.-% Grobbodenmaterial mit Ø ≥ 2 cm                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Bv</b>                                          | B-Horizont, durch Verwitterung verbraunt und verlehmt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Bt</b>                                          | B-Horizont, durch Einwaschung mit Ton angereichert, ausgeprägte Tonhäute (Tapeten) auf den Hohlraumwandungen, an Aggregatoberflächen und in feinen Poren; absolute Tongehaltsdifferenz zwischen Al und Bt beträgt:<br>bei < 17 Gew.-% und < 50 Gew.-% Schluff im Bt: ≥ 3 Gew.-%<br>bei < 17 Gew.-% und ≥ 50 Gew.-% Schluff bzw. 17 - 45 Gew.-% Ton im Bt: ≥ 5 Gew.-%<br>bei ≥ 45 Gew.-% Ton im Bt: ≥ 8 Gew.-% auf eine Distanz von weniger als 30 cm |
| <b>Bs</b>                                          | B-Horizont, mit Eisen-, Aluminium- und Manganoxiden durch Umlagerung angereichert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Bbms</b>                                        | Bs-Horizont, bandförmig, meist < 2 cm mächtig, massiv verfestigt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>C</b>                                           | Mineralischer Untergrundhorizont aus Gestein, das unter dem Bodenkörper ansteht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Cv</b>                                          | C-Horizont, angewittert bis verwittert, meist Übergang zum frischen Gestein; gegenüber Cn-Horizont physikalisch aufgelockert und Veränderung des geogenen Gefüges, Vorkommen von Wurzeln etc.                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Cn</b>                                          | C-Horizont, unverwittertes Locker- oder Festgestein; bei Festgestein keine sekundären Klüfte (z. B. massiver Fels, Gesteinsbänke)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>P</b>                                           | Mineralischer Unterbodenhorizont aus Tongestein oder Tonmergelgestein; Tongehalt der Feinbodenfraktion > 45 Gew.-%<br><b>P</b> von <b>Peloso</b> l                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

#### Mineralische Horizonte (< 30 Gew.-% org. Substanz)

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>S</b>  | Mineralischer Unterbodenhorizont mit Stauwassereinfluss und bestimmten hydromorphen Merkmalen (z. B. Eisen- und/oder Manganoxidausfällungen)<br><b>S</b> von <b>Stauwasser</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Sw</b> | S-Horizont, stauwasserleitend, zeitweise stauwasserführend, $\geq 80$ Flächen-% Nassbleichungs- (Flecken sowie schwache Nassbleichung des gesamten Horizonts) und Oxidationsmerkmale (Eisen-, Manganoxid-Flecken sowie -konkretionen); höhere Wasserdurchlässigkeit ( $k_f$ meist $\geq 10$ cm/d) als darunterliegender Sd-Horizont                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Sd</b> | S-Horizont, wasserstauend, in der Regel 50 - 70 % Rost- und Bleichflecken und marmoriert, Aggregatoberflächen gebleicht, Aggregatinneres rostfleckig oder Marmorierung infolge fehlender Eisenverlagerung nicht vorhanden oder nicht erkennbar, da verdeckt (z. B. Eigenfarbe des Substrats oder durch Humus); höhere effektive Lagerungsdichte und geringe Wasserdurchlässigkeit ( $k_f < 10$ cm/d, meist $< 1$ cm/d) als darüber liegender Sw-Horizont und zeitweilig oder ständig luftarm und geringe Luftkapazität ( $< 3$ Vol.-%) |
| <b>Sg</b> | S-Horizont, haftnass, mit $\geq 80$ Flächen-% Nassbleichungs- und Oxidationsmerkmalen sowie Sd-Merkmalen, unscharfen Bleich- und Rostflecken und Luftmangel bereits bei Feldkapazität wegen hohen Anteils an haftwassererfüllten Mittelporen, verbunden mit sehr niedriger Luftkapazität und hohem Gehalt an Schluff und feinem Feinsand (Feinstsand); wenig Quellung und Schrumpfung                                                                                                                                                  |
| <b>G</b>  | Mineralbodenhorizont mit Grundwassereinfluss und bestimmten hydromorphen Merkmalen (z. B. Eisen- und/oder Manganoxidausfällungen)<br><b>G</b> von <b>Grundwasser</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Go</b> | G-Horizont, mit im Jahreslauf überwiegend oxidierenden Verhältnissen und $\geq 5$ Flächen-% Rostflecken; u. a. im Grundwasserschwankungsbereich einschließlich Schwankungsbereich der Obergrenze des geschlossenen Kapillarraumes entstanden                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Gr</b> | G-Horizont, mit im Jahreslauf fast durchgängig reduzierenden Verhältnissen (nass an über 300 Tagen) und $< 5$ Flächen-% Rostflecken und Reduktionsfarben (grau etc.) im gesamten Horizontabschnitt ( $> 95$ Flächen-%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>M</b>  | Mineralbodenhorizont des Kolluvisol und des Braunen Auenbodens; im Holozän entstanden aus fortlaufend sedimentiertem, humushaltigem Bodenmaterial (z. B. durch Abspülung von Hängen)<br><b>M</b> von lateinisch <b>migrare</b> = wandern                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>R</b>  | anthropogener Mischhorizont, durch tiefgreifende, bodenmischende Meliorationsmaßnahmen (Rigolen, Tiefenumbruch) entstanden, über 4 cm mächtig<br><b>R</b> von <b>Rigolen</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Y</b>  | Horizont aus anthropogenem Auftrag                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

#### Häufige verwendete Zusatzsymbole und Kennzeichnungen

|                |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>I</b>       | Lockersubstrat aus mit dem Spaten grabbarem Gestein, z. B. Löss, Schotter, Festgesteinszersatz                                                                                                                                                              |
| <b>j</b>       | anthropogen umgelagertes Natursubstrat                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>y</b>       | anthropogen umgelagertes künstliches Substrat                                                                                                                                                                                                               |
| <b>f</b>       | unter jüngerer Schicht begrabener (fossiler) Horizont                                                                                                                                                                                                       |
| <b>r</b>       | überprägter (reliktischer) Horizont, dessen Merkmale nicht unter den aktuellen Bedingungen entstanden sind und der in die aktuelle Bodenbildung einbezogen sein kann                                                                                        |
| <b>II, III</b> | römische Ziffern zur Kennzeichnung verschiedener Bodenausgangssubstrate; die Angabe I für die oberste Schicht entfällt; bei den in der Tiefe folgenden Schichten werden die römischen Ziffern II, III etc. den Buchstaben des Horizontsymbols vorangestellt |



## A.3.2 Bodenfunktionen und Bodenbewertung

### Physikalische Kenngrößen des Bodenporenraums

#### Luftkapazität LK

Volumenanteil des Bodens mit weiten Grobporen ( $\varnothing > 0,05 \text{ mm}$ ), die in grund- und stauwasserfreien Horizonten mit Luft gefüllt sind (Einheiten  $\text{l/m}^2$  bzw.  $\text{mm}$ ). In weiten Grobporen ist das Wasser mit einer Saugspannung von weniger als  $-60 \text{ hPa}$  ( $0,06 \text{ bar}$ ) gebunden und kann, z.B. bei Starkniederschlägen, frei beweglich der Schwerkraft folgend schnell versickern.

#### Nutzbare Feldkapazität nFK

Als Volumenanteil angegebene Menge des Bodenwassers, die in engen Grobporen ( $\varnothing 0,01 - 0,05 \text{ mm}$ ) und Mittelporen ( $\varnothing 0,0002 - 0,01 \text{ mm}$ ) mit Saugspannungen zwischen  $-60$  und  $-15000 \text{ hPa}$  ( $0,06 - 15 \text{ bar}$ ) gebunden ist (Einheiten  $\text{l/m}^2$  bzw.  $\text{mm}$ ). Das gespeicherte Wasser ist für Pflanzen nutzbar. Bei fehlendem Grund- und Stauwassereinfluss wird ohne eine Bewässerung die Wasserversorgung angebauter Nutzpflanzen von der nFK bestimmt. In engen Grobporen kann Wasser noch langsam versickern.

#### Totwasser TW

Als Volumenanteil angegebene Menge des Bodenwassers, das in Feinporen ( $\varnothing < 0,0002 \text{ mm}$ ) mit einer höheren Saugspannung ( $< -15000 \text{ hPa} = 15 \text{ bar}$ ) gebunden ist (Einheiten  $\text{l/m}^2$  bzw.  $\text{mm}$ ). Solche hohen Saugspannungen können von Pflanzen i.d.R. nicht überwunden werden. Die Saugspannung von  $-15000 \text{ hPa}$  ( $p_F 4,2$ ) wird als Permanenter Welkepunkt (PWP) bezeichnet.

Der Anteil von Fein-, Mittel- und Grobporen wird im Labor an „ungestörten“ Bodenproben ermittelt, die mit Stechzylindern aus Metall (Innenvolumen:  $100 \text{ cm}^3$ ) in eigens angelegten Bodenaufschlüssen im Gelände entnommen werden.

Das Bodenvolumen in den Stechzylindern wird zunächst vollständig mit Wasser gesättigt und nach erfolgter Gewichtsbestimmung mittels Über- und Unterdruckmethode entsprechend den oben genannten Saugspannungen nach und nach entwässert. Das Gewicht des bei der je-

weils angelegten Saugspannung verdrängten Wassers entspricht dem Volumen der Poren ( $1 \text{ g H}_2\text{O} = 1 \text{ cm}^3$ ).

Abb. A.3.2-1 zeigt Drucktöpfe, in denen die Metallzylinder mit den „ungestörten“ Bodenproben Drücken ausgesetzt werden, die den Saugspannungen im Boden entsprechen, bei denen Wasser in engen Grobporen und Mittelporen (nFK) gebunden ist. Das verdrängte Wasser entwässert über keramische Platten nach außen (in Abb. A.3.2-1 nicht sichtbar).



Abb. A.3.2-1: Drucktöpfe zur Bestimmung des Anteils an engen Grobporen und Mittelporen; Bild: R. Olschewski

#### Lagerungs- und Trockenrohdichte $\rho_t$

Die Lagerungsdichte  $\rho_t$  eines Bodens beschreibt die Masse des bei  $105^\circ\text{C}$  getrockneten Materials bezogen auf das Gesamtvolumen (in  $\text{g/cm}^3$ ).

Bodenart und Trockenrohdichte beeinflussen den jeweiligen Volumenanteil von Grob-, Mittel- und Feinporen. Hohe  $\rho_t$ -Werte infolge starker Bodenverdichtung sind oft mit einer verminderten Luft- und nutzbaren Feldkapazität verbunden, weil der Grobporenanteil i.d.R.

zugunsten des Mittel- und Feinporenanteils abnimmt (Kap. 5.3.2.3). Zur Bestimmung der Dichte des Bodens wird das Material aus Stechzylindern bei 105 °C im Ofen getrocknet.

#### **Wasserleitfähigkeit $k_f$**

Die feste Bodensubstanz (FS) wird vom Sickerwasser umflossen und bildet einen Fließwiderstand. Er wird als gesättigte Wasserleitfähigkeit mit dem Permeabilitätskoeffizient  $k_f$  in den Einheiten cm/d bzw. m/s beschrieben.

Die Wasserleitfähigkeit wird wesentlich von der Bodenart, der Trockenrohdichte und dem Anteil an engen und weiten Grobporen bestimmt. Bei stark verdichteten Böden werden üblicherweise geringe bis sehr geringe  $k_f$ -Werte gemessen ( $k_f < 10$  cm/d bzw.  $< 1,2 \times 10^{-6}$  m/s; Kap. 5.3.2.3).

Im Labor wird die Wasserleitfähigkeit mit unterschiedlichen Apparaturen anhand „ungestörter“ Bodenproben bestimmt. Abb. A.3.2-2 zeigt einen Permeame-

ter, bei dem die mit 100 cm<sup>3</sup> großen Stechzylindern entnommenen Bodenproben in einer Plastikfassung montiert so tief in ein Wasserbecken getaucht werden (Abb. A.3.2-3), bis das Material infolge des hydrostatischen Drucks von unten nach oben vom Wasser durchströmt wird. Die je Zeiteinheit durchströmte Wassermenge wird erfasst und gemessen.



Abb. A.3.2-2: Permeameter zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit im Labor; Bild: R. Olschewski



Abb. A.3.2-3: Wasserbecken des Permeameters mit eingetauchten Metallzylindern (Plastikfassungen); Bild: R. Olschewski

ter, bei dem die mit 100 cm<sup>3</sup> großen Stechzylindern entnommenen Bodenproben in einer Plastikfassung montiert so tief in ein Wasserbecken getaucht werden (Abb. A.3.2-3), bis das Material infolge des hydrostatischen Drucks von unten nach oben vom Wasser durchströmt wird. Die je Zeiteinheit durchströmte Wassermenge wird erfasst und gemessen.

Je nach Fragestellung kann die Wasserleitfähigkeit mit Feldmethoden im Gelände festgestellt werden (Kap. A.5.4).

A.4.1 Wie Schadstoffe in den Boden gelangen

A.4.1.9 Kupfereinträge durch Fungizideinsatz

Im Jahr 1998 hat das Landratsamt Ortenaukreis auf dem kreiseigenen Weingut bei Ortenberg insgesamt 14 Rebflächen auf Kupferanreicherungen im Oberboden (0 - 20 cm Tiefe) und im Hauptwurzelraum der Reben (20 - 50 cm Tiefe) untersucht.

Bei den Böden handelt es sich überwiegend um Schluff-sande oder Sandlehme (Abb. 3.1.1-2) mit einem hohen Gehalt an Feingrus (Ø 2 - > 6,3 mm ). Zur Bewirtschaftungsgeschichte der Flächen, zur Einsatz-Häufigkeit kupferhaltiger Fungizide und zu den Aufwandmengen lagen jedoch keine genaueren Informationen vor.

Die Vorsorgewerte der BBodSchV von 20 bzw. 40 mg Cu/kg TM waren in diesen Flächen häufig überschritten (Tab. A.4.1.9-1). Die Kupferkonzentrationen liegen in einem Bereich, der auch in Weinbergsböden anderer Regionen festgestellt worden ist [BESNARD ET AL. 2001; ESCHNAUER, SCHOLL 1995; PARAT ET AL. 2002].

Die Böden von drei Rebflächen wurden zusätzlich mit dem sequenziellen Extraktionsverfahren auf Kupferbindungsformen untersucht (Kap. A.4.2.1.1, Bindungsformen - anorganische Schadstoffe). Das durch den Fungizideinsatz in den Boden eingetragene Kupfer wird überwiegend an die organische Substanz (Fraktion IV), z.T. an Eisenoxide (Fraktion V und VI) gebunden (Abb. A.4.1.9-1). Untersuchungen mit anderen Verfahren kamen zu vergleichbaren Ergebnissen [BESNARD ET AL. 2001; PARAT ET AL. 2002].

Der hohe Anteil des an die organische Substanz gebundenen Kupfers lässt PARAT ET AL. (2002) vermuten, dass der Abbau der organischen Substanz durch Kupfer behindert

wird. Ob dies zutrifft und ein Zusammenhang mit der seit geraumer Zeit beobachteten nachteiligen Wirkung hoher Kupfergehalte auf Mikro- und Makroorganismen besteht [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2010; UBA 2009; WITTASSEK 1987], wäre gesondert zu untersuchen.

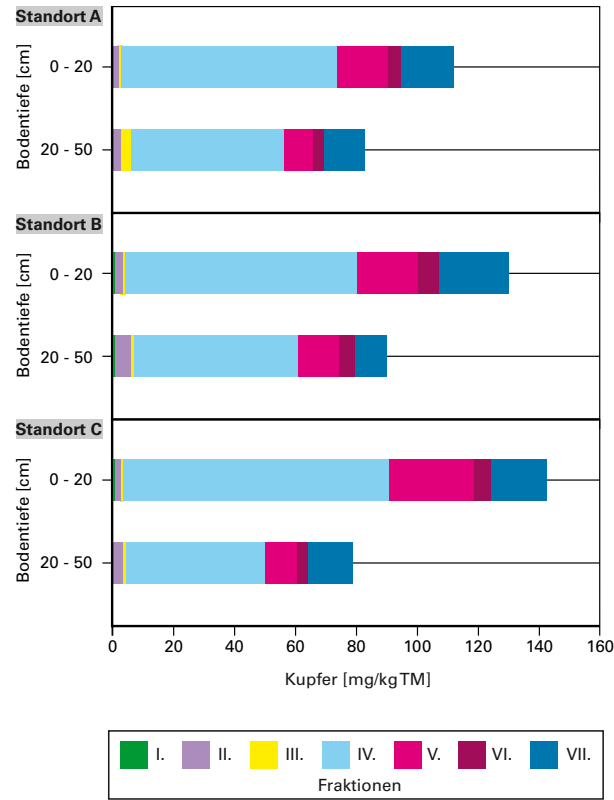


Abb. A.4.1.9-1: Sequenzielle Extraktion von Kupfer aus Reb-böden des landkreiseigenen Weinguts bei Ortenberg

Tab. A.4.1.9-1: Kupfergehalte in 14 ausgewählten Rebflächen des landkreiseigenen Weinguts; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

| Entnahmetiefe<br>[mg/kg TM] | Kupfergehalt [mg/kg TM] |      |       | pH-Wert<br>[CaCl <sub>2</sub> ] | Humusgehalt<br>[Gew.-%] | Carbonatgehalt<br>[Gew.-%] |
|-----------------------------|-------------------------|------|-------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                             | Mittel                  | Min. | Max.  |                                 |                         |                            |
| 0 - 20                      | 89,6                    | 27,4 | 141,0 | 5,7 - 6,8                       | 2,2 - 3,3               | 0,04 - 0,80                |
| 20 - 50                     | 60,9                    | 13,4 | 94,1  | 6,2 - 7,1                       | 1,2 - 1,3               | 0,04 - 1,32                |



#### **A.4.1.10 Abschätzung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzte Böden**

Es liegen folgende vereinfachende Prämissen zugrunde:

- die landwirtschaftlich genutzten Böden des Ortenaukreises sind weder mit Nährstoffen unter- noch überversorgt (Gehaltsklasse C)
- auf den Nährstoffbedarf von Ackerkulturen werden zuerst die Nährstoffe aus anfallendem Wirtschaftsdünger (zu 100 % als Gülle) und der im Jahr 2001 ausgebrachten Klärschlämme angerechnet
- auf den Nährstoffbedarf der Grünlandflächen werden nur die Mengen an Wirtschaftsdüngern angerechnet, die nicht primär zur Deckung des Nährstoffbedarfs von Ackerflächen benötigt werden
- der Nährstoffbedarf der Grünlandflächen wird vollständig gedeckt, obwohl in den Schwarzwaldlagen auf Grünlandflächen oft weniger Mineraldünger zum Einsatz kommt als zur Deckung des Nährstoffbedarfs notwendig wäre
- die Pflanzenverfügbarkeit der Phosphate aus den im Jahr 2001 verwerteten Klärschlämmen wird entsprechend überschlägigen Schätzungen gleich 20 % gesetzt [UBA 2001], ohne die eingeschränkte Pflanzenverfügbarkeit des mit Eisensalzen gefällten Phosphats zu berücksichtigen (Kap. 4.1.6)
- für Rebflächen wird allgemein angenommen, dass kupferhaltige Fungizide zur einmaligen Abschlussbehandlung in der üblichen Aufwandsmenge eingesetzt werden (Kap. 4.1.9), ohne Unterscheidung zwischen konventionellem und ökologischem Weinbau.

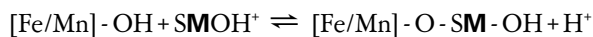
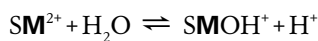
## A.4.2 Anorganische und organische Schadstoffe

### A.4.2.1 Bewertungsmaßstäbe der BBodSchV

#### A.4.2.1.1 Bindung und Mobilisierung von Schadstoffen im Boden

##### Anorganische Schadstoffe

Die Bindung und Mobilisierung anorganischer Schadstoffe im Boden wird von vielen Faktoren und Vorgängen bestimmt. Eine wichtige Rolle spielt die Bindung an Mangan- und Eisenoxide, Huminstoffe und Tonminerale (Kap. A.3.1.1). Nach Bildung von Hydroxyd-Komplexen im Bodenwasser erfolgt die Sorption an Mangan- und Eisenoxide ( $[\text{Fe/Mn}] - \text{OH}$ ) nach dem Schema:



Diese Reaktionen sind umkehrbar, d.h. bei:

- Zunahme der  $\text{H}^+$ -Konzentration durch Versauerungsvorgänge (Kap. 4.4.2) verschiebt sich das Reaktionsgleichgewicht nach links: Schwermetalle werden ionar gelöst ( $\text{SM}^{2+}$ ) und können dann vermehrt mobilisiert und freigesetzt werden
- Abnahme der  $\text{H}^+$ -Konzentration z.B. nach Kalkungen verschiebt sich das Reaktionsgleichgewicht nach rechts: gebildete Schwermetall-Hydroxyd-Komplexe werden an Oxidoberflächen sorbiert.

Die Bindung und Verfügbarkeit der in den Boden eingetragenen bzw. der vorhandenen Schwermetalle wird vom pH-Wert (Kap. A.4.4.5), d.h. vom Grad der Bodenversauerung beeinflusst. Bei niedrigen Boden-pH-Werten werden Schwermetall-Ionen ( $\text{SM}^{2+}$ ) durch elektrostatische Kräfte nur schwach an Tonmineral- und Oxidoberflächen

sorbiert. Sie werden leicht durch  $\text{H}^+$ -Ionen ins Bodenwasser verdrängt, von Pflanzen aufgenommen oder mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Ionar gelöste Schwermetalle bilden den für Pflanzen verfügbaren mobilen Schadstoffpool (Kap. 4.2.1).

Adsorption und Bindung an Oxidoberflächen werden weiter von der Ladung und vom Ionenradius des Schwermetalls bestimmt. Beide Größen sind ausschlaggebend für die Neigung der Ionen,  $\text{SMOH}^+$ -Komplexe zu bilden [BRÜMMER ET AL. 1986].

Die Grenz-pH-Werte in Tab. A.4.2.1.1-1 geben an, ab welchen  $\text{H}^+$ -Konzentrationen Schwermetalle vermehrt als mobile Ionen ( $\text{SM}^{2+}$ ) vorliegen. Blei bildet bei einem pH-Wert  $> 4,0$  noch  $\text{SMOH}^+$ -Komplexe, während Cadmium schon bei  $\text{pH} < 6,5$  dazu neigt, als  $\text{Cd}^{2+}$  in Lösung zu gehen.

Die Sorption der Schwermetalle an Bodenbestandteile nimmt allgemein wie in Tab. A.4.2.1.1-1 dargestellt zu. Die Grenz-pH-Werte sind relative Orientierungsgrößen, da das Ausmaß der für die Schutzgüter Pflanzen und Grundwasser relevanten Mobilisierung u.a. vom Schwermetallgesamtgehalt im Boden bestimmt wird. Bei hohen Blei-Gesamtgehalten können schon mäßig saure Bodenverhältnisse ( $\text{pH}$ -Wert  $< 5,5$ ) zu mobilen Bleianteilen führen, die den Prüfwert der BBodSchV im Hinblick auf die Pflanzenqualität überschreiten. Werden Schwermetalle und Arsen an Oberflächen von Bodenbestandteilen sorbiert, können sie mit der Zeit durch Diffusion eindringen und im Kristallgitter eingebaut werden. Der Vorgang gleicht einer Alterung, die dazu führt, dass größere Schadstoffanteile dem Stoffkreislauf mittel- bis langfristig entzogen werden [KEPPLER 1999; LU ET AL. 2004; ZEIJEN 1995]. Dieser Effekt ist bei verschiedenen Schwermetallen unterschiedlich.

Tab. A.4.2.1.1-1: Grenz-pH-Werte für ausgewählte anorganische Schadstoffe; Quelle: Scheffer, Schachtschabel 2002

| Schwermetall    | Cadmium                                                                              | Zink      | Nickel | Kupfer | Arsen = Chrom | Blei ~ Quecksilber |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------|---------------|--------------------|
| Adsorption*     |  |           |        |        |               |                    |
| Grenz- pH- Wert | 6,5                                                                                  | 6,0 - 5,5 | 5,5    | 4,5    | 4,5 - 4,0     | 4,0                |

\* bei gleicher Konzentration der Schwermetalle

## Bindungsformen - Anorganische Schadstoffe

Der Einbau von Schwermetallen und Arsen in Tonminerale und/oder in das Kristallgitter von Eisen- und Manganoxiden hängt vom Radius und von der Ladung der Schwermetall-Ionen ab. Schwermetalle mit kleinem Ionenradius wie Zink und Kupfer werden stärker in kristallinen Eisenoxiden fixiert als solche mit einem größeren Ionenradius (Tab. A.4.2.1.1-2, Cadmium und Blei). In das Kristallgitter von Eisen- und Manganoxiden werden bevorzugt Schwermetalle eingebaut mit vergleichbaren Ionenradien und einer ähnlichen Ionenladung wie Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) und Mangan ( $\text{Mn}^{2+}$ ). Chrom ( $\text{Cr}^{3+}$ ) kann im Kristallgitter von Eisenoxiden z.B. das  $\text{Fe}^{3+}$  ersetzen und wird darin dauerhaft fixiert. Für das größere Cadmium-Ion ( $\text{Cd}^{2+}$ ) ist eine vergleichbar stabile Fixierung in Eisenoxiden nicht möglich. Aufgrund des Ionenradius kommt eher die Substitution von  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen durch  $\text{Cd}^{2+}$  und der Einbau des Cadmium-Ions in Mn-Oxide in Frage [FISCHER, BRÜMMER 1993; FISCHER 2000; GERTH 1985; KEPPLER 1999].

Tab. A.4.2.1.1-2: Ionen-Radien ausgewählter anorganischer Schadstoffe; Quelle: Fischer, Brümmer 1993; Gerth 1985; Keppler 1999

| Metall  | Ladung           | Ionenradius<br>[pm]* |
|---------|------------------|----------------------|
| Chrom   | $\text{Cr}^{3+}$ | 62 pm                |
| Eisen   | $\text{Fe}^{3+}$ | 64 pm                |
| Nickel  | $\text{Ni}^{2+}$ | 69 pm                |
| Kupfer  | $\text{Cu}^{2+}$ | 73 pm                |
| Eisen   | $\text{Fe}^{2+}$ | 74 pm                |
| Zink    | $\text{Zn}^{2+}$ | 74 pm                |
| Kobalt  | $\text{Co}^{2+}$ | 75 pm                |
| Mangan  | $\text{Mn}^{2+}$ | 83 pm                |
| Cadmium | $\text{Cd}^{2+}$ | 95 pm                |
| Blei    | $\text{Pb}^{2+}$ | 119 pm               |

\* Angaben in Piktometer (1 pm =  $10^{-12}$  m)

Bei Bodenuntersuchungen wird mit sequenziellen Extraktionsverfahren die Bindungsstärke der anorganischen Schadstoffe in und an Mangan- und Eisenoxide, Huminstoffe und Tonminerale ermittelt. Die Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf das Gefährdungspotenzial für die Schutzgüter Pflanzen und Wasser.

Angewendet wurde ein sequenzielles Extraktionsverfahren, das an der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn (1999) für nahezu kalkfreie Böden entwickelt worden ist (Abb. A.4.2.1.1-1 u. -2) [ZEIEN 1995]. Bodenmaterial wird schrittweise mit sieben verschiedenen Lösungsmitteln steigender Extraktionsstärke behandelt. Mit jedem Extraktionsschritt werden zunehmend fester gebundene Schadstoffe gelöst.

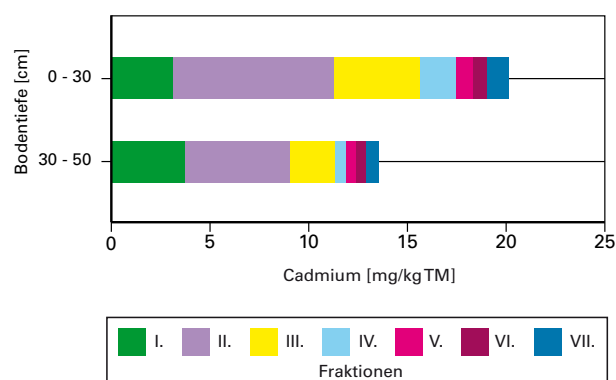


Abb. A.4.2.1.1-1: Sequenzielle Extraktion von Cadmium aus einem kontaminierten Auenboden bei Ortenberg

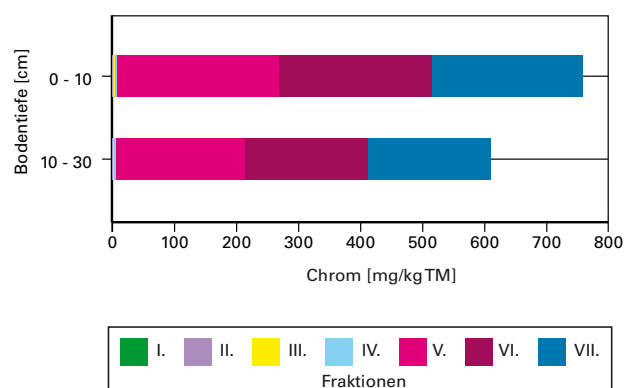


Abb. A.4.2.1.1-2: Sequenzielle Extraktion von Chrom aus einem kontaminierten Auenboden an der „Schutter“

Im ersten Extraktionsschritt werden die mobilen (Fraktion I), im zweiten Extraktionsschritt die leicht nachlieferbaren, mobilisierbaren Schadstoffanteile extrahiert (Fraktion II). Die beiden folgenden Extraktionsschritte lösen die in Manganoxiden (Fraktion III) und in der organischen Substanz gebundenen Schadstoffanteile (Fraktion IV). Die nächsten beiden Extraktionssequenzen lösen die in amorphen (Fraktion V) und kristallinen Eisenoxiden (Fraktion VI) gebundenen Schadstoffe. In der Fraktion VII werden schließlich die sehr fest in Ton- und Silikatmineralen gebundenen Schadstoffe bestimmt.



Die mobilen Schadstoffanteile können potenziell von Pflanzen aufgenommen oder in Richtung Grundwasser verlagert werden (Fraktion I). Zusammen mit den leicht nachlieferbaren Schadstoffanteilen (Fraktion II) bilden sie den für die Schutzgüter Pflanzen und Wasser relevanten verfügbaren Schadstoffpool. Die Schadstoffanteile der Fraktionen VI - VII sind dagegen dauerhaft stabil fixiert. Sie können nur in einem veränderten physikochemischen Milieu freigesetzt werden.

In Abb. A.4.2.1.1-1 sind die Bindungsformen eines stark Cadmium-belasteten Auenbodens bei Ortenberg dargestellt. Der Boden ist bis zum anstehenden Grundwasserspiegel in 1 m Tiefe schwach versauert (pH-Werte von 5,8 - 5,6). In dem sandigen Boden lagen viele Jahre nach Eintreten der Kontamination immer noch bis zu 67 % des Cadmiums in mobiler und leicht nachlieferbarer Form vor (Fraktionen I und II). Etwa 17 - 22 % des Cadmiums sind im Lauf der Zeit in Manganoxide eingebaut worden.

Nur 12 - 13 % des Cadmiums waren in Eisenoxiden oder Tonmineralien fest fixiert (Fraktionen V - VII), d.h. es war davon auszugehen, dass die Qualität von Nahrungspflanzen durch die Cadmiumbelastung beeinträchtigt wird. An dem Standort wurden Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen durchgeführt.

In Abb. A.4.2.1.1-2 sind die Ergebnisse der sequenziellen Extraktion eines Chrom-kontaminierten Auenbodens an der Schutter dargestellt. Der stark tonige Lehm Boden ist sehr schwach sauer (pH-Werte von 6,3 - 6,5). Chrom ist mit 99 % nahezu ausschließlich in amorphen und kristallinen Eisenoxiden sowie in Tonmineralien fest gebunden (Fraktionen V - VI). Nur etwa 0,15 - 0,20 % der Chromgehalte sind mobil bzw. leicht nachlieferbar (Fraktionen I und II). Von den Chromgehalten geht keine Beeinträchtigung der Pflanzenqualität oder des Grundwassers aus; Sanierungs- oder Sicherungsmaßnahmen waren nicht erforderlich.

### Organische Schadstoffe

Einzelverbindungen der organischen Schadstoffgruppen Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB) sowie Dioxine und Furane (PCDD/F) werden im Boden aufgrund ihres hydrophoben Charakters fast ausschließlich an die organische Substanz gebunden. Die Bindungsstärke bzw. die Mobilisierung dieser Schadstoffe wird maßgeblich von ihrer Wasserlöslichkeit und Sorbierbarkeit an die organische Substanz bestimmt.

Die Sorption von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen wird oft auf den organischen Kohlenstoffgehalt im Boden bezogen und als  $K_{oc}$ -Wert ausgedrückt. Der  $K_{oc}$ -Wert beschreibt die Verteilung der Stoffe zwischen der organischen Bodensubstanz und dem Bodenwasser. Je hydrophober ein Schadstoff ist, umso stärker ist im Boden die Sorption an die organische Substanz (Tab. A.4.2.1.1-3).

Hohe  $K_{oc}$ -Werte zeigen eine starke Bindung und implizieren geringe Auswaschbarkeit sowie geringe Verfügbarkeit für Nutzpflanzen. Bei den PAK steigt die Sorptionsstärke an die organische Substanz mit der Zahl der Benzolringe der Moleküle. Sie ist bei dem als krebserregend eingestuften Benzo-a-pyren (BaP) mit 5 Benzolringen höher als beim Naphthalin (2 Ringe, Tab. A.4.2.1.1-4). Bei den PCB nimmt die Sorptionsstärke an die organische Substanz mit dem Chlorierungsgrad (Zahl der Chloratome im Schadstoffmolekül) zu.

Bei den PCDD/F ist die Sorptionsstärke allgemein hoch ( $K_{oc}$ -Wert > 100 000). Für die giftige PCDD/F-Einzelsubstanz 2,3,7,8-TCDD („Seveso-Dioxin“) wird ein  $K_{oc}$ -Wert von 30 000 000 angegeben [LfU 1995a].

Bei PSM-Wirkstoffen werden dagegen bereits  $K_{oc}$ -Werte von < 500 im Hinblick auf die Verlagerung bzw. Auswaschung ins Grundwasser als kritisch angesehen [AKKAN ET AL. 2003].

Tab. A.4.2.1.1-3: Wasserlöslichkeit und  $K_{oc}$ -Werte zur Schadstoffgruppen PAK, PCB, PCDD/F und PSM-Wirkstoffen;  
Quellen: Akkan et al. 2003; LfU 1995a, 1997; DIN V 19736

| Schadstoff bzw. -stoffgruppe; PSM-Wirkstoff |                       | Wasserlöslichkeit bei 25 °C | $K_{oc}$ -Wert        |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| PAK**                                       | Naphthalin            | 30,0                        | 360 - 3 200           |
|                                             | Acenaphthylen         | 16,1                        | k. A.                 |
|                                             | Acenaphthen           | 3,47                        | 4 600                 |
|                                             | Fluoren               | 1,98                        | 7 300                 |
|                                             | Phenanthren           | 1,29                        | 1 400 - 23 000        |
|                                             | Anthracen             | 0,073                       | 14 000                |
|                                             | Fluoranthren          | 0,26                        | 100 000 - 200 000     |
|                                             | Pyren                 | 0,14                        | 63 000                |
|                                             | Benz(a)anthracen      | 0,014                       | 200 000 - 1 900 000   |
|                                             | Chrysen               | 0,002                       | 245 471 - 371 535     |
|                                             | Benzo(b)fluoranthren  | 0,0012                      | k. A.                 |
|                                             | Benzo(k)fluoranthren  | 0,00055                     | k. A.                 |
|                                             | Benzo(a)pyren         | 0,0038                      | 3 900 000 - 5 800 000 |
|                                             | Indeno(1,2,3-cd)pyren | 0,062                       | k. A.                 |
|                                             | Dibenz(a,h)anthracen  | 0,0005                      | 800 000 - 3 100 000   |
|                                             | Benzo(ghi)perylene    | 0,00026                     | k. A.                 |
| PCB                                         | Monochlorbiphenyle    | 1,3 - 1,7                   | 3 000 - 8 000         |
|                                             | Bichlorbiphenyle      | 0,056 - 0,790               | 7 000 - 43 000        |
|                                             | Trichlorbiphenyle     | 0,015 - 0,640               | 41 000 - 44 000       |
|                                             | Tetrachlorbiphenyle   | 0,019 - 0,170               | 30 000 - 72 000       |
|                                             | Pentachlorbiphenyle   | 0,0045 - 0,012              | 77 000 - 95 000       |
|                                             | Hexachlorbiphenyle    | 0,00044 - 0,00091           | 1 200 000             |
|                                             | Heptachlorbiphenyle   | 0,00047                     | k. A.                 |
|                                             | Octachlorbiphenyle    | 0,00018 - 0,00027           | k. A.                 |
|                                             | Nonachlorbiphenyle    | 0,00011                     | k. A.                 |
|                                             | Decachlorbiphenyle    | 0,000016                    | k. A.                 |
| PCDD/F                                      | 2,3,7,8-TCDD          | 0,000483*                   | 30 000 000            |
|                                             | OCDD                  | 0,00000036*                 | 12 000 000            |
|                                             | 2,3,7,8-TCDF          | 0,000416*                   | 158 000               |
|                                             | OCDF                  | 0,0000014*                  | 5 600 000             |
| Herbizide                                   | Atrazin               | 33,0                        | 90                    |
|                                             | Dichlorbenil          | 18,0                        | 400                   |
|                                             | Glyphosat             | 15 700,0                    | 21 119                |
| Fungizide                                   | Metalaxyl             | 7 100,0                     | 50                    |
|                                             | Vinclozolin           | 3,4                         | 100                   |
| Insektizide                                 | Lindan                | 5,6                         | 5 420                 |
|                                             | Parathion             | 11,0                        | 5 000                 |

\* für 20 °C; \*\* Angaben zur Wasserlöslichkeit beziehen sich auf reine (kristalline) Verbindungen

Tab. A.4.2.1.1-4:  $K_{oc}$ -Werte für ausgewählte organische Schadstoffe; Quelle: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) 1995a, 1997

| Schadstoff     | 2-/3-Ring PAK<br>Monochlorbiphenyle                                                | 3-Ring-PAK<br>Bi- und Trichlorbiphenyle | 4-Ring-PAK<br>Tetra- und Pentachlorbiphenyle | 4-Ring-PAK<br>2,3,7,8-TCDF | 5-Ring-PAK<br>Hexachlorbiphenyle<br>OCDD/F, 2,3,7,8-TCDD |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------|
| Adsorption     |  |                                         |                                              |                            |                                                          |
| $K_{oc}$ -Wert | 1 000-10 000                                                                       | 10 000-50 000                           | 50 000-100 000                               | 100 000-1 000 000          | > 1 000 000                                              |

Die Sorption organischer Schadstoffe läuft in zwei Phasen ab:

- auf eine vergleichsweise schnelle Adsorption an die Oberfläche organischer Substanzen folgt
- eine langsame intramolekulare Diffusion und chemische Bindung, die letztlich zur relativ stabilen Fixierung in Huminstoffen führt.

Durch die fortschreitende Einbindung in Huminstoffmoleküle nimmt die Verfügbarkeit der Stoffe langfristig ab. Auch dieser Vorgang kann als Alterung bezeichnet werden [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002]. Die Sorptionsstärke und Bindung hängt bei den PAK u. a. von der Art und Zusammensetzung der organischen Substanz ab.

Untersuchungen des Landratsamts Ortenaukreis haben gezeigt, dass überwiegend an Kohlepartikel gebundene PAK (z.B. Kohlehalden aus dem Bergbau bei Berghaupten) in geringeren Konzentrationen mit dem Sickerwasser ausgetragen werden, als beispielsweise PAK aus den Böden der eingedeichten Vorländer der Kinzig. In den dort aufgelandeten Flusssedimenten liegen die PAK überwiegend leicht desorbierbar vor (Abb. A.4.2.1.1-3 bis A.4.2.1.1-6).

Sorbierte organische Schadstoffe sind mikrobiellem Abbau, der Pflanzenaufnahme oder der Auswaschung weitgehend entzogen. Sie reichern sich in humusreichen Bodenschichten an (z.B. humose Oberböden). Trotz der starken Bindung an und in organische Substanzen kann dennoch ein Teil der PAK-, PCB- und PCDD/F in den Unterboden oder Untergrund verlagert werden.

Liegen Mischkontaminationen vor, bei denen Teer- oder Mineralöle als Lösungsvermittler dienen, wird die Verlagerung hydrophober Schadstoffe begünstigt (Altlasten).

PAK, PCB und PCDD/F können mit gelösten organischen Substanzen (DOM, dissolved organic matter) in den Unterboden ausgewaschen werden. DOM wirkt als Trägersubstanz für organische Schadstoffe. Im Unterboden oder Untergrund werden sie als Partikel oder Kolloide ausfiltriert bzw. sorbiert. DOM wird durch mikrobielle Umsetzungs- und Stoffwechselprozesse oder durch Auswaschung löslicher Anteile aus der organischen Substanz freigesetzt [RABER 1996; SCHULTE-EBBERT, SCHÖTTLER 2003; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002].

Die Sorption von PSM-Wirkstoffen wird im Boden maßgeblich vom Humusgehalt bestimmt. Die Mehrzahl der Wirkstoffe und ihre Abbauprodukte (Metabolite) verbleiben deshalb in der Krume landwirtschaftlicher Nutzflächen.

In der Fachliteratur wird zwischen einer schnell einsetzenden oberflächigen Sorption der PSM-Wirkstoffe und Metaboliten und einer nachfolgenden langsamen Einwanderung in Hohl- und Zwischenräume von Huminstoffen und Tonmineralen unterschieden [HAIDER, SCHÄFFER 2000; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002]. Dieser Alterungsprozess vermindert die Aufnahme von PSM-Wirkstoffen über Pflanzenwurzeln oder ihre Verlagerung in tiefere Bodenschichten.



### Bindungsformen - Organische Schadstoffe

Bei der Untersuchung der Bindungsformen der PAK in kontaminierten Bodenmaterialien wurde ein sequenzielles Extraktionsverfahren eingesetzt, das an der Technischen Universität Hamburg-Harburg für Gewässersedimente entwickelt worden ist. Bei dem Verfahren werden die Probenmaterialien in drei Schritten mit unterschiedlichen Extraktionsmitteln behandelt. Die Ergebnisse ermöglichen es, die Bindungsfestigkeit der PAK abzuschätzen (Tab. A.4.2.1.1-5) [PÜSCHEL 1996].

Untersucht wurden PAK-haltige Bodenmaterialien einer Kohlehalde bei Berghaupten sowie von eingedeichten Vorländern der Kinzig. Im Material aus der Kohlehalde sind PAK vermutlich bereits durch diagenetische Prozesse bei der Kohlebildung, d.h. geogen entstanden, während die höheren PAK-Gehalte in den aufsedimentierten Bodenmaterialien der Kinzigvorländer auf rezente anthropogene Einträge aus Oberflächenwässern zurückzuführen sind (Kap. 4.1.5). In Abb. A.4.2.1.1-3 bis -6 sind beispielhaft Ergebnisse für Bodenmaterialien aus dem Kinzigvorland bzw. der Kohlehalde dargestellt.

In den beiden Proben aus dem Kinzigvorland in Höhe Willstätt waren 60 - 80 % des PAK-Gehalts (2,97 bzw. 3,34 mg PAK/kg) leicht desorbierbar an die organische Substanz gebunden. Ein vergleichsweise geringer Anteil von annähernd 0,7 bzw. 12,7 % war an oder in Ruß- oder Kohlepartikel sorbiert bzw. gebunden (0,02 bzw. 0,49 mg PAK/kg). Davon unterscheiden sich die Bindungsverhältnisse in den höher PAK-haltigen Proben der Kohlehalde deutlich.

Bei Gehalten von 5,18 bzw. 12,7 mg PAK/kg sind nur 5,5 bzw. 8,1 % leicht desorbierbar gebunden (0,42 bzw. 0,71 mg PAK/kg), während etwa 83 % bzw. 87 % stark an und in Kohlepartikel sorbiert bzw. gebunden sind (4,32 bzw. 11,07 mg PAK/kg).

Die Proben wurden weiter für Versuche herangezogen, bei denen die Materialien in Laborsäulen unter definierten Bedingungen mit Wasser durchströmt werden [DIN 19528]. Dabei zeigte sich, dass im Perkolat des Bodens aus dem Kinzigvorland mit 0,00055 bzw. 0,00049 mg PAK/l höhere PAK-Konzentrationen eluiert wurden als im Säulenwasser des Materials der Kohlehalde (0,00017 bzw. 0,00002 mg PAK/l). Die PAK sind in der Kohlehalde deutlich fester sorbiert bzw. gebunden. Vermutlich wird in der Kohlehalde weniger „DOM“ (dissolved organic matter) freigesetzt, die zur Lösung und Verlagerung leicht desorbierbarer PAK-Anteile beiträgt.

Tab. A.4.2.1.1-5: Beschreibung der sequenziellen Extraktion und Zuordnung zu Bindungsmatrices (Püschel, 1996)

| Extraktionsschritt | Extraktionsbedingungen | PAK-Fraktion/Bindungsmatrix                                                                                      |
|--------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | pH < 2, Cyclohexan     | leicht desorbierbare PAK-Anteile; an organische Substanz außer Huminstoffe gebunden (z. B. Kohlenhydratpolymere) |
| 2                  | pH > 11, Cyclohexan    | an Huminstoffe gebundener PAK-Anteil                                                                             |
| 3                  | pH > 11, Toluol        | an Kohle- und Rußpartikel gebundene PAK-Anteile                                                                  |

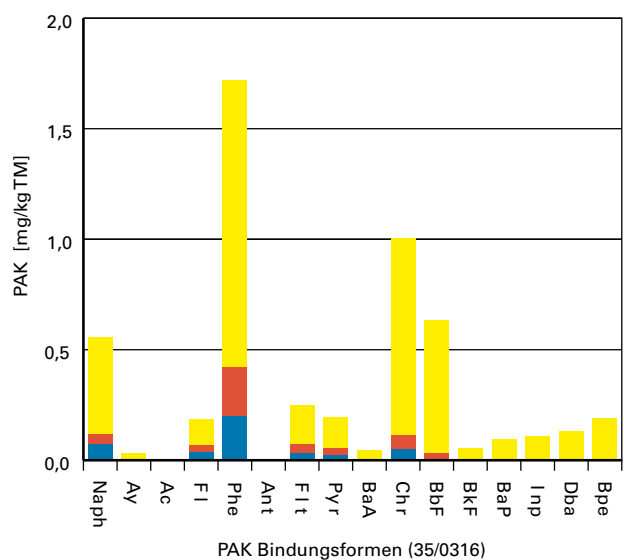
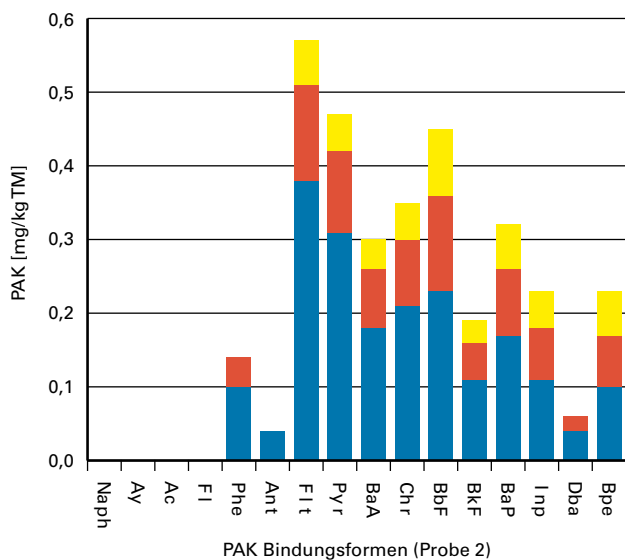


Abb. A.4.2.1.1-3: PAK-Bindungsformen in Probe 2 aus dem Kinzigvorland in Höhe Willstätt (PAK-Gehalt: 3,34 mg/kg TM; PAK-Gehalt im Säulenwasser: 0,00055 mg/l)

Abb. A.4.2.1.1-5: PAK-Bindungsformen in Probe 35/0316 aus einer Kohlehalde bei Berghaupten (PAK-Gehalt: 5,18 mg/kg TM; PAK-Gehalt im Säulenwasser: 0,00017 mg/l)

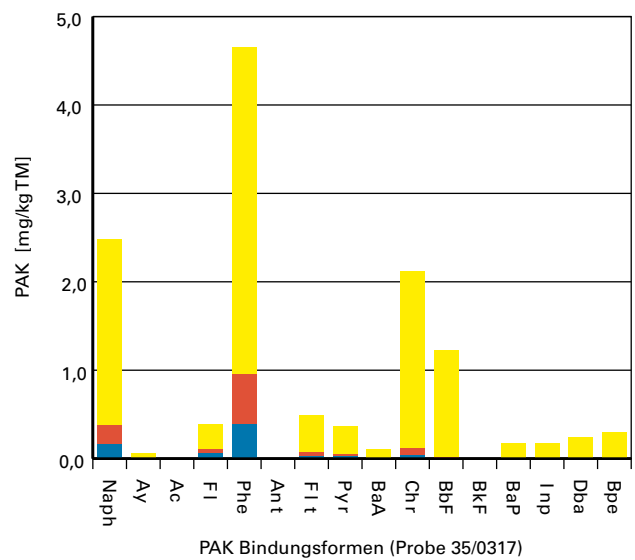
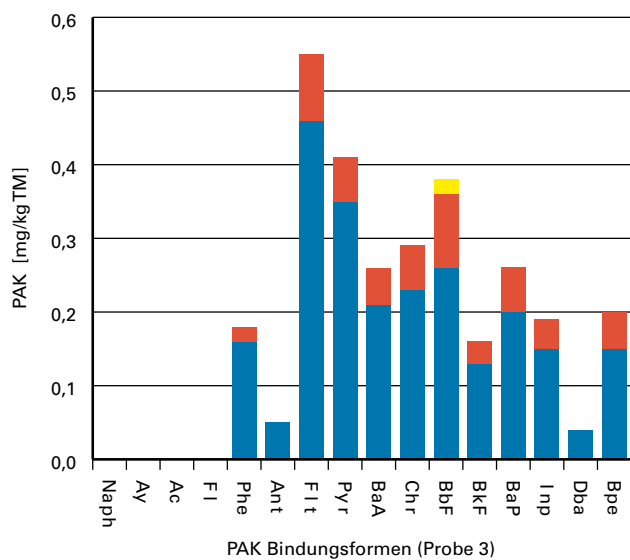


Abb. A.4.2.1.1-4: PAK-Bindungsformen in Probe 3 aus dem Kinzigvorland in Höhe Willstätt (PAK-Gehalt: 2,97 mg/kg TM; PAK-Gehalt im Säulenwasser: 0,00049 mg/l)

Abb. A.4.2.1.1-6: PAK-Bindungsformen in Probe 35/0317 aus einer Kohlehalde bei Berghaupten (PAK-Gehalt: 12,7 mg/kg TM; PAK-Gehalt im Säulenwasser: 0,00002 mg/l)

#### A.4.2.1.2 Natürliche Vorkommen und Einsatzbereiche

##### Arsen

Arsen (As) ist natürlicher Bestandteil zahlreicher sulfidischer Minerale wie Arsenkies (Arsenopyrit,  $\text{FeAsS}$ ), Realgar ( $\text{AsS}$ ) oder Fahlerze (z.B. Tennantit,  $\text{Cu}_{10}(\text{Fe}, \text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}$ ). In Spurenkonzentrationen ist Arsen in allen Gesteinen enthalten. Kohlen enthalten von Natur aus kleine Konzentrationen an Arsen [ALLOWAY 1999; OKRUSCH, MATTHES 2005].

Arsenverbindungen werden u.a. in der Glasindustrie als Entfärbungsmittel und in der Metallverarbeitung als Legierungsbestandteil eingesetzt (z.B. zur Härtung von Bleischroten oder für Hochtemperatur-Anwendungen von Kupfer). Bei der Herstellung von Halbleitern wird hochreines Arsen verwendet. Arsenverbindungen finden ferner Anwendung bei der Druckimprägnierung von Hölzern. Früher wurde Arsen bei der Ledergerbung angewendet [RÖMPP 1989].

Weltweit bedeutend war die Anwendung von Arsen als Wirkstoff in Pflanzenschutzmitteln. In Deutschland ist die Verwendung seit 1974 verboten. Arsenhaltige Insektizide wurden bis dahin vor allem zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers eingesetzt [ALLOWAY 1999; HEITEFUSS 1987; RÖMPP 1989].

##### Blei

Blei (Pb) kommt natürlich in vielen Mineralen vor. Wichtigstes und häufigstes Erzmineral ist der Bleiglanz (Galenit,  $\text{PbS}$ ), der zugleich der wichtigste Silberträger ist [OKRUSCH, MATTHES 2005]. Blei ist in unterschiedlichen Gehalten in allen bodenbildenden Gesteinen vorhanden [LfU 1994].

Bleilegierungen dienen zur Herstellung von Akkumulatoren, insbesondere der Starterbatterien für Kraftfahrzeuge, von Lettern- und Lagermetallen sowie u.a. zur Herstellung von Schrotkugeln. Unlösliche Bleiverbindungen werden zum Auskleiden von Behältern und Rohren für aggressive Flüssigkeiten benutzt. Darüber hinaus wird Blei im Strahlenschutz (Absorption von Röntgen- und Gammastrahlen), bei der Herstellung von Farbpig-

menten (z.B. „gelbes“ Bleichromat oder Bleiweiß) und Rostschutzfarbe (z.B. Mennige) verwendet. In bedeutendem Umfang war es bis 1996 als Antiklopfmittel (Tetraethylblei) für benzinbetriebene Verbrennungsmotoren eingesetzt worden [ALLOWAY 1999; RÖMPP 1989].

##### Cadmium

Cadmium (Cd) ist ein seltenes Metall mit einem Durchschnittsgehalt in den Gesteinen der Erdkruste von ca. 0,1 mg/kg. Cadmium ist als disperses Spurenelement mit bis zu 5 % in Zinkerzen wie Zinkblende (Sphalerit,  $\text{ZnS}$ ) enthalten. Es fällt als Beiprodukt bei der Verhüttung von Zinkerzen an.

Sedimentgesteine weisen eine größere Spannweite an Cadmiumgehalten auf als andere Gesteine. In Phosphatlagertstätten, die für die Herstellung von Düngersphosphaten abgebaut werden, kann das Schwermetall in größeren Konzentrationen enthalten sein [ALLOWAY 1999; OKRUSCH, MATTHES 2005].

Die wichtigsten Anwendungsgebiete für Cadmium liegen im Korrosionsschutz und in der Herstellung von Batterien und Farbpigmenten. „Rotes“ Cadmiumsulfoselenid wird beispielsweise für Email und Keramik benötigt. Von untergeordneter Bedeutung ist inzwischen die Verwendung als Stabilisator in PVC sowie bei der Herstellung von Legierungen und Bildröhren [RÖMPP 1989; ALLOWAY 1999].

##### Chrom

Für Chrom (Cr) wird in den Gesteinen der Erdkruste ein mittlerer Gehalt von 100 mg/kg TM angegeben.

Dreiwertiges Chrom ( $\text{Cr}^{3+}$ ) kann aufgrund des vergleichbaren Ionenradius das dreiwertige Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) in gesteinsbildenden Mineralen wie zum Beispiel in Hornblenden ersetzen. Höhere Gehalte an Chrom können in Eisenerzen vorkommen [ALLOWAY 1999; MASON, MOORE 1985; OKRUSCH, MATTHES 2005].

In der Metallindustrie wird Chrom u.a. bei der Herstellung von hitzebeständigem, nichtrostendem Stahl, von Legierungen und zum Verchromen verwendet. Chromverbindungen sind wichtige Oxidations- und Redukti-



onsmittel in der chemischen Industrie. Anorganische Chromverbindungen werden weiter zur Herstellung von Farbstoffen eingesetzt (z.B. Chromoxidgrün). Daneben dient es bei der Ledergerbung und zur Imprägnierung von Holz [RÖMPP 1989].

#### **Kobalt**

Als Baustein ist Kobalt (Co) in einigen Sulfid- und Arsenidmineralen enthalten. Wirtschaftlich wichtige Kobalterze sind Cobaltin (Kobaltglanz,  $\text{CoAsS}$ ) und Skutterudit (Speiskobalt,  $(\text{CoAs}_{3-x})$ ). Wie Nickel hat Kobalt als Ion ( $\text{Co}^{2+}$ ) einen vergleichbaren Radius wie zweiwertiges Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) und Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Als häufige Bausteine der gesteinsbildenden Minerale Biotit und Olivin können sie durch Kobaltionen ersetzt werden. In olivinreichen Gesteinen wie etwa Serpentiniten ist z.B. mehr Kobalt enthalten als in Graniten, die nie Olivin und wenig Biotit enthalten [ALLOWAY 1999; MASON, MOORE 1985; OKRUSCH, MATTHES 2005].

Kobalt wird hauptsächlich zur Herstellung von Magnetlegierungen oder Legierungen für Maschinenbauteile, Hart- und Schneidmetalle verwendet. In der Glas-, Keramik- und Emailindustrie werden Kobaltverbindungen als Farbpigmente eingesetzt (z.B. Kobaltblau,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ). Im Ortenaukreis wurden bereits im 18. Jahrhundert in einem bei Nordrach-Kolonie errichteten Blaufarbenwerk Kobalterze verarbeitet, um die Farben in der dortigen Glashütte zu verwenden (Kap. 2.3).

#### **Kupfer**

Die wirtschaftlich wichtigsten Kupferminerale sind Kupferglanz (Chalkosin,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ) und Kupferkies (Chalkopyrit,  $\text{CuFeS}_2$ ), die oft in hydrothermalen Erzlagerstätten vorkommen. Bei der Verwitterung bilden sich häufig grüner Malachit ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ) und blauer Azurit ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ). Malachit überzieht korrodierte Kupferdächer und -leitungen [MASON, MOORE 1985; OKRUSCH, MATTHES 2005].

Kupfer ist in allen Böden enthalten. In Böden aus Granit und Sandstein sind die Gehalte niedriger als in lehmig/schluffigen Böden aus Sedimentgesteinen [LfU 1994].

Der Einsatzbereich von Kupfer ist vielfältig. Von großer Bedeutung ist es in der Elektroindustrie. Wegen seiner Wärmeleitfähigkeit kommt es im Apparatebau zur Anwendung. Es ist Bestandteil bekannter Legierungen (Messing und Bronze). Zu anderen Anwendungen zählt die Verwendung als Katalysator und Stabilisator in der chemischen Industrie, als Pigment in der Malerei (z.B. Azurblau) sowie als Baustoff im Leitungsbau und für Dachbedeckungen [RÖMPP 1989].

Kupfer wird aufgrund seiner fungiziden Wirkung als Holz- und Pflanzenschutzmittel verwendet (Kap. 4.1.9). In der Landwirtschaft wird es Mineralfuttermitteln zugesetzt (Kap. 4.1.8).

#### **Nickel**

Der durchschnittliche Nickelgehalt der Gesteine der Erdkruste wird mit 75 mg/kg Gestein angegeben. Nickelionen ( $\text{Ni}^{2+}$ ) haben einen vergleichbaren Ionenradius wie Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) und Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ). In gesteinsbildenden Mineralien wie Biotit und Olivin kann es Eisen und Magnesium als Baustein im Kristallgitter ersetzen. Das wirtschaftlich wichtigste Nickelerz ist Pentlandit ( $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$ ), das in den hydrothermalen Erzlagerstätten des Ortenaukreises jedoch keine Bedeutung hat.

Höhere Nickelgehalte können Erdöl, Eisenerze und Schwarzschiefer enthalten [ALLOWAY 1999; MASON, MOORE 1985; OKRUSCH, MATTHES 2005].

Nickel wird bei der Veredelung von Stahl, in der Galvanik sowie als Legierungsmetall bei Hochtemperaturwerkstoffen in der Kraftwerkstechnik, im Turbinenbau sowie beim Bau chemischer Apparate verwendet. Viel Nickel verbraucht die chemische Industrie u. a. als Katalysator. Farbpigmente wie Nickel-titangelb sind z.B. in Fassadenanstrichen enthalten [RÖMPP 1989].

#### **Quecksilber**

Ein wichtiges Quecksilbererz ist der Zinnober (Cinnabarit,  $\text{HgS}$ ). Quecksilber kommt in abbauwürdigem Umfang nur in vulkanogen-sedimentären Lagerstätten vor. In früheren Jahrhunderten waren solche

Lagerstätten in Deutschland nur in Rheinland-Pfalz bedeutend [OKRUSCH, MATTHES 2005]. Quecksilber ist in den meisten Gesteinen in Spurenkonzentrationen  $< 0,1$  mg/kg TM enthalten. Tonschiefer können etwas höhere Quecksilbergehalte aufweisen [ALLOWAY 1999].

Quecksilber wird im Instrumenten- und Apparatebau (z.B. Thermometer) und in der Elektrotechnik verwendet (Leuchtmittel). Bei der Herstellung von Chlor aus gelöstem Kochsalz (NaCl) ist es Elektrodenbestandteil (Chloralkalielektrolyse). Ferner werden in der chemischen Industrie Quecksilberverbindungen als Katalysatoren benötigt. Für Farbpigmente oder Holzschutzmittel hat es heute seine Bedeutung verloren [RÖMPP 1989]. Der Einsatz von quecksilberhaltigen Pflanzenschutzmitteln gegen Pilzkrankheiten wurde in Deutschland im Jahr 1981 wegen der Toxizität der Präparate verboten [HEITEFUSS 1987].

#### **Zink**

Wichtigstes und häufigstes Zinkmineral ist Zinkblende (Sphalerit, ZnS). Sie kommt in hydrothermalen Erzgängen häufig zusammen mit Bleiglanz vor [OKRUSCH, MATTHES 2005]. Für Gesteine wird ein mittlerer Zinkgehalt zwischen 10 und 120 mg/kg TM angegeben. Böden aus Kalkgestein können über 200 mg/kg, solche aus Sanden besonders wenig Zink enthalten [ALLOWAY 1999; LfU 1994]. Niedrige Zinkgehalte sind für sehr stark versauerte Podsolböden typisch ( $< 10$  mg/kg TM).

Zink zählt zu den industriell am häufigsten verarbeiteten Schwermetallen. Es wird hauptsächlich zum Verzinken von Stahl verwendet. Als Legierungsmetall (z.B. Messing, Titanzink) wird es u. a. in der Bauindustrie in Blechen und Bändern eingesetzt. Das Schwermetall dient ferner der Herstellung galvanischer Elemente und Druckplatten. In der chemischen Industrie dient es als Reduktionsmittel. Neben synthetischen Zinkfarben findet Zinkblende (Sphalerit, ZnS) in geringem Umfang zur Herstellung von Zinkweiß Verwendung [RÖMPP 1989].

## **Stoffdefinition, Entstehung, natürliche Vorkommen, Einsatzbereiche**

#### **PAK**

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind eine Gruppe organischer Schadstoffe mit mehreren 100 Einzelverbindungen aus zwei oder mehr Benzolringen in unterschiedlicher Anordnung.

PAK-Einzelverbindungen zeichnen sich durch geringe Wasserlöslichkeit und Abbaubarkeit aus. Diese Eigenschaften nehmen mit zunehmender Zahl der Benzolringe weiter ab. PAK mit fünf und mehr Ringen werden praktisch nicht abgebaut.

In der Umwelt von Bedeutung ist das krebserregende (karzinogene) und gentoxische (mutagene) Potenzial von Einzelverbindungen mit vier und mehr Benzolringen. Besonders toxisch ist die PAK-Einzelverbindung Benzo-a-pyren (BaP).

Wichtigste PAK-Quelle ist heute die Verbrennung praktisch aller organischer Energieträger wie Kohle, Heizöl, Kraftstoffe und Holz. Dabei werden PAK insbesondere bei Sauerstoffmangel gebildet und gasförmig oder partikulär gebunden in die Umwelt eingetragen. In der Natur können PAK u. a. bei Vulkanausbrüchen oder bei der Bildung von Kohle und Erdöl entstehen. Nur wenige PAK-Einzelverbindungen wie z.B. Naphthalin werden gezielt aus Steinkohlenteer hergestellt und als Zwischenprodukt für Farb- und Kunststoffe, Pflanzenschutzmittel, Kosmetikzusätze und Weichmacher verwendet [RÖMPP 1992; SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL 2002; LfU 1997; STARKE ET AL. 1991].

In Deutschland werden die 16 häufigsten PAK-Einzelverbindungen analysiert („EPA-PAK“). Bewertet wird sowohl der Summengehalt als auch der Gehalt der Einzelverbindung BaP.

#### **PCB**

Polychlorierte Biphenyle (PCB) sind eine aus 209 Einzelverbindungen bestehende Verbindungsklasse von aromatischen organischen Chlorverbindungen.

Die Einzelverbindungen unterscheiden sich durch die Zahl und Stellung der bis zu 10 enthaltenen Chloratome.

Die allgemeinen Stoffeigenschaften der PCB wie z.B. die chemische und thermische Beständigkeit haben sie zu einer vielseitig technisch und industriell einsetzbaren Chemikalie gemacht. PCB fanden unter anderem Verwendung als Isolier- und Kühlmittel in Kondensatoren und Transformatoren, als Hydraulikflüssigkeit, als Flammenschutzmittel für Papier, Gewebe und Holz sowie als Weichmacher in Lacken und Klebstoffen.

In Deutschland werden PCB seit 1983 nicht mehr hergestellt. Seit 1989 gilt ein Verwendungsverbot. Aus PCB können bei Verbrennungsvorgängen bei Temperaturen  $< 800^{\circ}\text{C}$  Dioxine und Furane (PCDD/F) entstehen [LfU 1995c, RÖMPP 1991]. Eine große Menge an PCB kam durch unsachgemäße Handhabung in die Umwelt [LfU 1995c].

#### **PCDD/F**

Unter „Dioxinen“ werden 210 Einzelverbindungen an polychlorierten Dibenzodioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF) zusammengefasst. Die Einzelverbindungen unterscheiden sich durch die Zahl und Stellung der Chloratome im Molekül.

PCDD/F werden weder gezielt hergestellt, noch gibt es für sie technische Anwendungsbereiche. Sie entstehen bei einer Reihe von industriellen Prozessen der chlororganischen Chemie als Verunreinigungen.

Weitere Quellen sind Verbrennungsvorgänge in Industrie und Verkehr, Waldbrände, die Verfeuerung von Heizstoffen oder die Verbrennung von Kunststoffen und behandeltem Holz [LfU 1995a; RÖMPP 1990].

Die wichtigsten Emissionsquellen waren früher Anlagen der Chlorchemie, Müllverbrennungsanlagen, Heizkraftwerke und Metallschmelzen. Von Müllverbrennungsanlagen, die die Grenzwerte der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung [BImSchV 1990] einhalten, gehen keine wesentlichen Dioxinmissionen mehr aus.

Bei Kraftstoffen wurde im Jahr 1992 durch das Verbot von Chlor- und Bromverbindungen als Scavenger-Zusatz die Entstehung von Dioxinen verringert. Sekundärquelle von PCDD/F können Klärschlämme sein, wenn den Kläranlagen z.B. Oberflächenwässer zugeleitet werden, die Staubpartikel aus Verbrennungsvorgängen enthalten (Hausbrand, Straßenverkehr).

Die 210 Einzelverbindungen unterscheiden sich in ihrer Toxizität (Exkurs: Toxizitätsäquivalente; Kap. 4.2.13) [LfU 1995a].



#### A.4.2.1.3 Magen-Darm-Modell

Die Resorptionsverfügbarkeit im menschlichen Organismus von Schadstoffen aus Böden wird gemäß DIN 19738 ermittelt. Das Verfahren soll die Magen-Darm-Passage möglichst realistisch widerspiegeln. Dazu werden 2 g feinkörniges Bodenmaterial ( $\varnothing \leq 1$  mm; Schema in Abb. A.4.2.1.3-1) zunächst im sauren Milieu extrahiert.

Die Extraktion kann mit und ohne Zusatz von Vollmilchpulver durchgeführt werden. Der Zusatz von 10 g Vollmilchpulver dient der Simulation des Einflusses von Lebensmittelbestandteilen im menschlichen Verdauungstrakt (z.B. Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette) auf die Schadstoffmobilisierung. Der mit der Vollmilchpulver-Zugabe auf ca. 27 % erhöhte Fettgehalt entspricht in etwa dem durchschnittlichen Fettanteil der Nahrung.

Der Suspension aus synthetischem Magensaft, Bodenmaterial u. ggfs. Vollmilchpulver wird zur Nachbildung der im Magen herrschenden Milieubedingungen 10%-ige Salzsäure zugesetzt bis pH 2,0 erreicht ist. Diese Suspension wird bei 37 °C insgesamt über zwei Stunden stetig bewegt. Anschließend wird zur Simulation der Darmpassage unter Zusatz der entsprechenden Reagenzien ein alkali-

scher pH-Wert eingestellt. Der Ansatz wird weitere sechs Stunden bei 37 °C geschüttelt.

Flüssige (synthetischer Verdauungsansatz) und feste Phase (Bodenmaterial) werden danach durch Zentrifugieren getrennt und die Schadstoffkonzentration in beiden Phasen bestimmt. Die flüssige Phase enthält den potenziell resorptionsverfügbaren Schadstoffanteil.

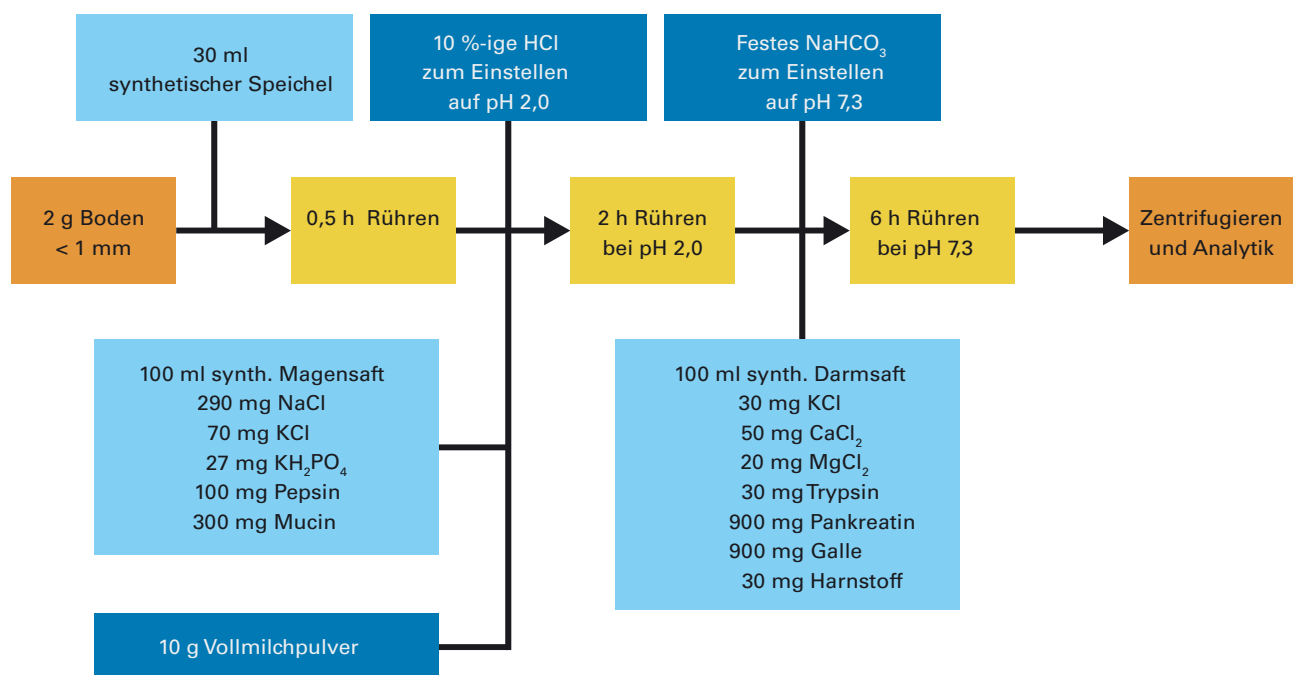
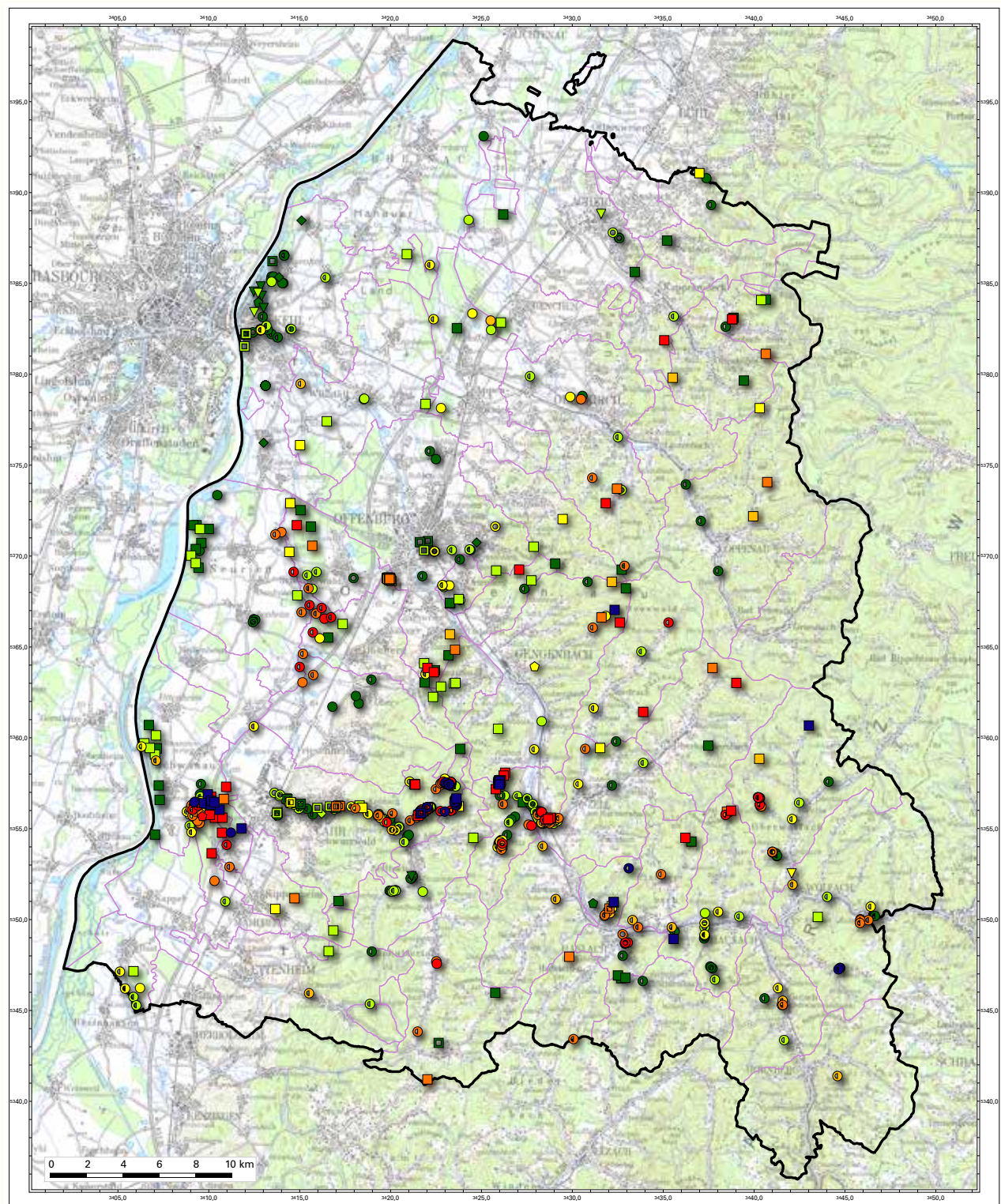


Abb. A.4.2.1.3-1: Verfahrensschema der Extraktion nach DIN 19738 zur Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen aus Böden; Quelle: Landratsamt Ortenaukreis

A.4.2.2.1 Arsengehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



Arsengehalte

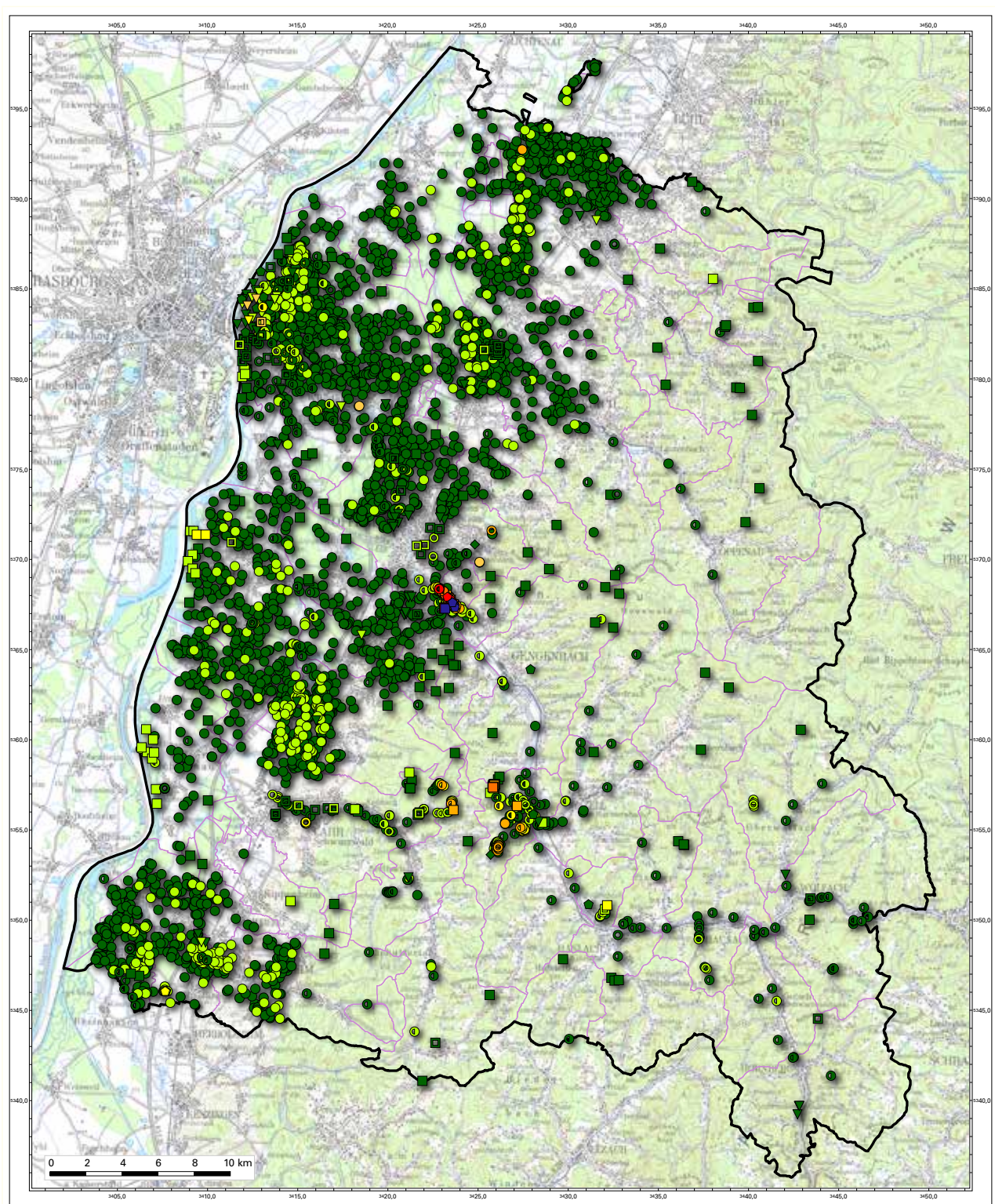
|                                                      |                                               | Arsen [mg/kg] im Oberboden |          |          |          |          |           |            |      |   |                 |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|------|---|-----------------|
| Bodennutzung                                         |                                               | bis 10                     | >10 - 15 | >15 - 20 | >20 - 25 | >25 - 50 | >50 - 125 | >125 - 140 | >140 |   |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | Grünland                                      | ●                          | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●          | ●    | — | Landkreisgrenze |
|                                                      | Wald                                          | ■                          | ■        | ■        | ■        | ■        | ■         | ■          | ■    |   |                 |
|                                                      | Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen | ◆                          | ◆        | ◆        | ◆        | ◆        | ◆         | ◆          | ◆    |   |                 |
| Kinderspielflächen                                   |                                               | ◆                          | ◆        | —        | —        | ◆        | —         | —          | —    | — | Gemeindegrenze  |
| Haus- und Kleingärten                                |                                               | ○                          | ○        | ○        | ○        | ○        | ○         | ○          | ○    |   |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            |                                               | ■                          | ■        | ■        | ■        | ■        | ■         | ■          | ■    |   |                 |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    |                                               | ▼                          | ▼        | ▼        | ▼        | —        | —         | —          | —    |   |                 |
|                                                      |                                               | —                          | —        | —        | —        | —        | —         | —          | —    | — | nicht enthalten |

Kartgrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.4.1 Cadmiumgehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



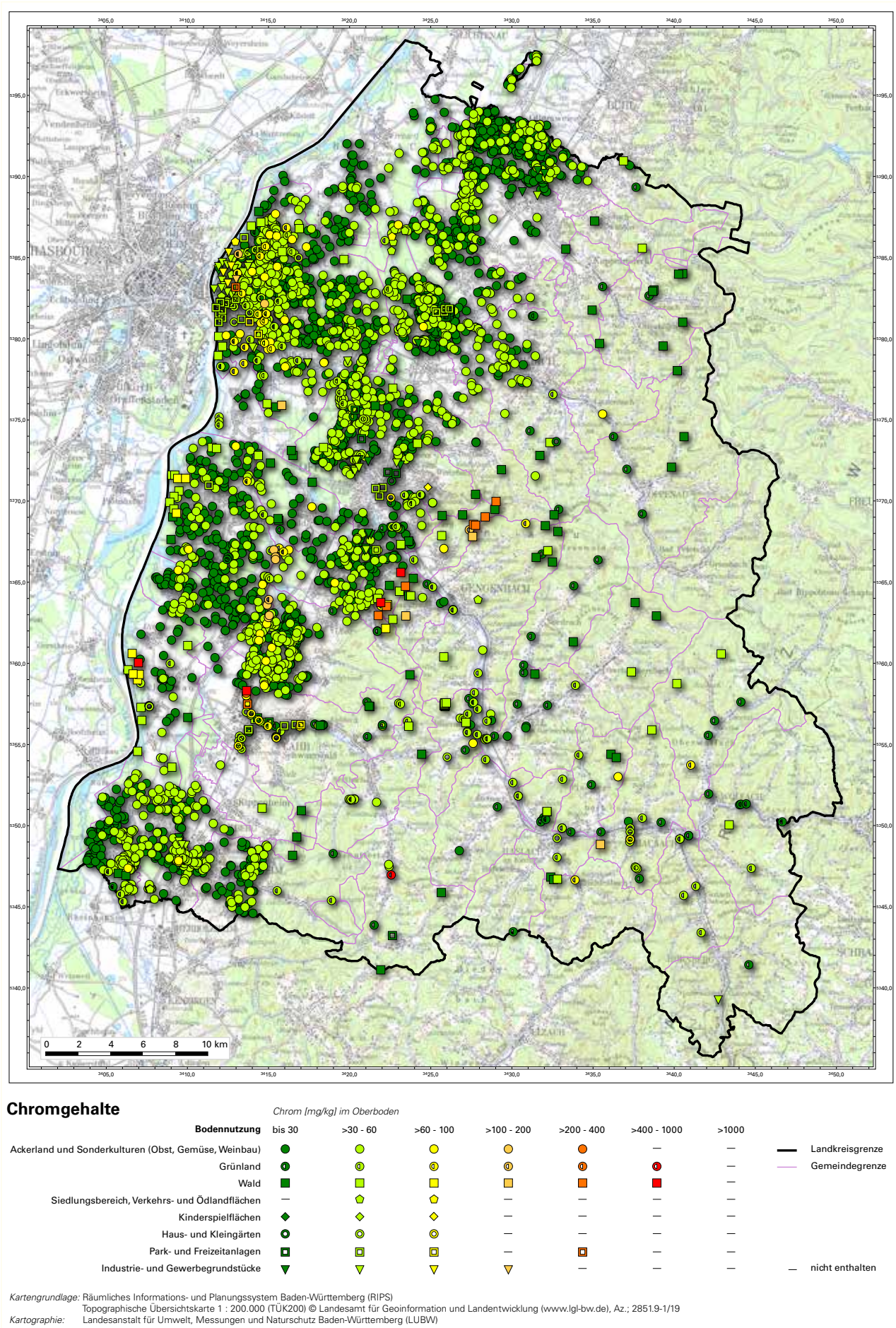
| Cadmiumgehalte                                       | Cadmium [mg/kg] im Oberboden |         |            |            |            |             |              |              |              |       |
|------------------------------------------------------|------------------------------|---------|------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------|
|                                                      | Bodennutzung                 | bis 0,4 | >0,4 - 1,0 | >1,0 - 1,5 | >1,5 - 2,0 | >2,0 - 10,0 | >10,0 - 20,0 | >20,0 - 50,0 | >50,0 - 60,0 | >60,0 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) |                              | ●       | ●          | ●          | ●          | ●           | ●            | —            | —            | —     |
| Grünland                                             |                              | ●       | ●          | ●          | ●          | ●           | ●            | ●            | —            | ●     |
| Wald                                                 |                              | ■       | ■          | ■          | ■          | ■           | ■            | ■            | —            | ■     |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        |                              | ◆       | ◆          | ◆          | ◆          | ◆           | ◆            | ◆            | —            | ◆     |
| Kinderspielflächen                                   |                              | ◆       | ◆          | —          | —          | —           | ◆            | —            | —            | —     |
| Haus- und Kleingärten                                |                              | ○       | ○          | ○          | ○          | ○           | —            | ●            | —            | —     |
| Park- und Freizeitanlagen                            |                              | □       | □          | —          | —          | —           | —            | —            | —            | —     |
| Industrie- und Gewerbegebiete                        |                              | ▼       | ▼          | ▼          | ▼          | —           | —            | —            | —            | —     |
|                                                      |                              | —       | —          | —          | —          | —           | —            | —            | —            | —     |

Kartgrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.5.1 Chromgehalte in den Böden des Ortenaukreises

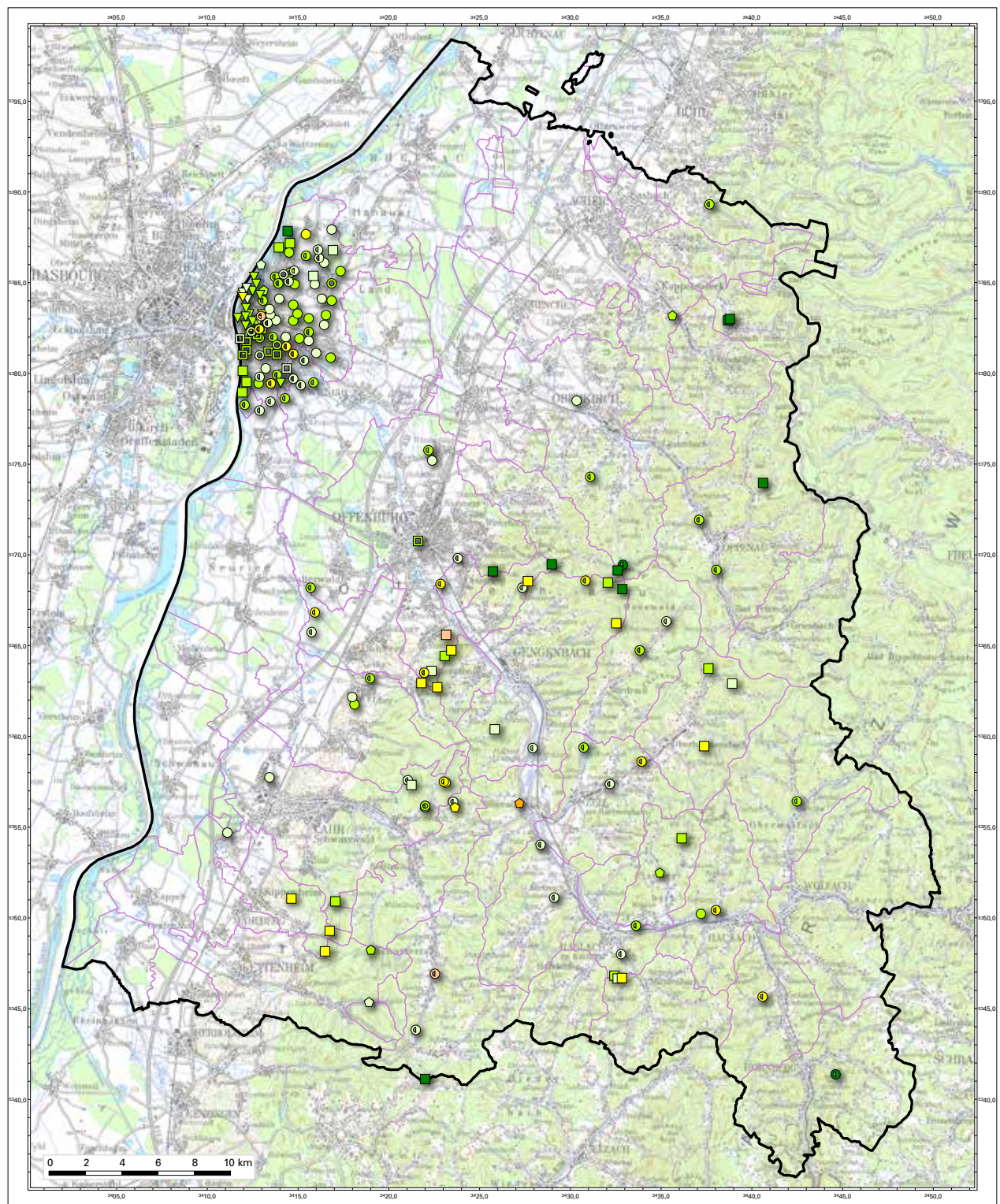
Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





A.4.2.6.1 Kobaltgehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



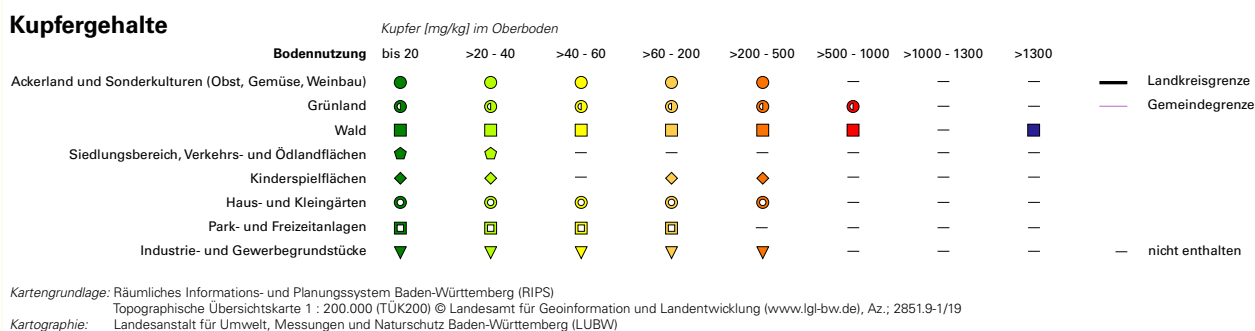
Kobaltgehalte

| Bodennutzung                                         | Kobalt [mg/kg] im Oberboden |        |         |          |           |      |                 |
|------------------------------------------------------|-----------------------------|--------|---------|----------|-----------|------|-----------------|
|                                                      | bis 3                       | >3 - 7 | >7 - 10 | >10 - 25 | >25 - 100 | >100 |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | —                           | ●      | ○       | ●        | —         | —    | Landkreisgrenze |
| Grünland                                             | ●                           | ○      | ○       | ○        | ○         | —    |                 |
| Wald                                                 | ■                           | ■      | ■       | ■        | ■         | —    | Gemeindegrenze  |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | —                           | ■      | ■       | ■        | ■         | ■    |                 |
| Kinderspielflächen                                   | —                           | —      | —       | —        | —         | —    | nicht enthalten |
| Haus- und Kleingärten                                | —                           | ○      | ○       | —        | —         | —    |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            | —                           | ■      | ■       | —        | —         | —    | nicht enthalten |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | —                           | ▼      | ▼       | ▼        | —         | —    |                 |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



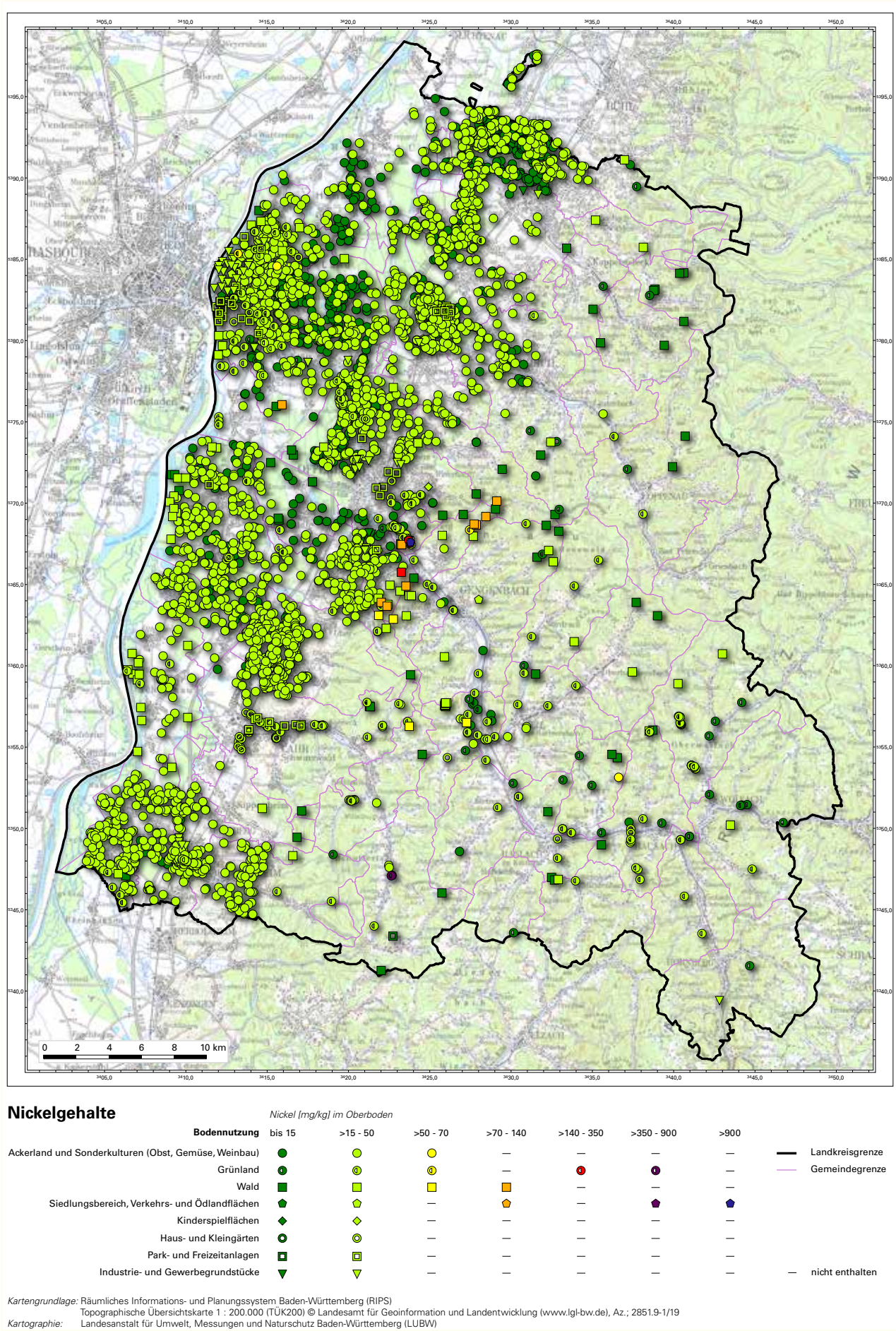
Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





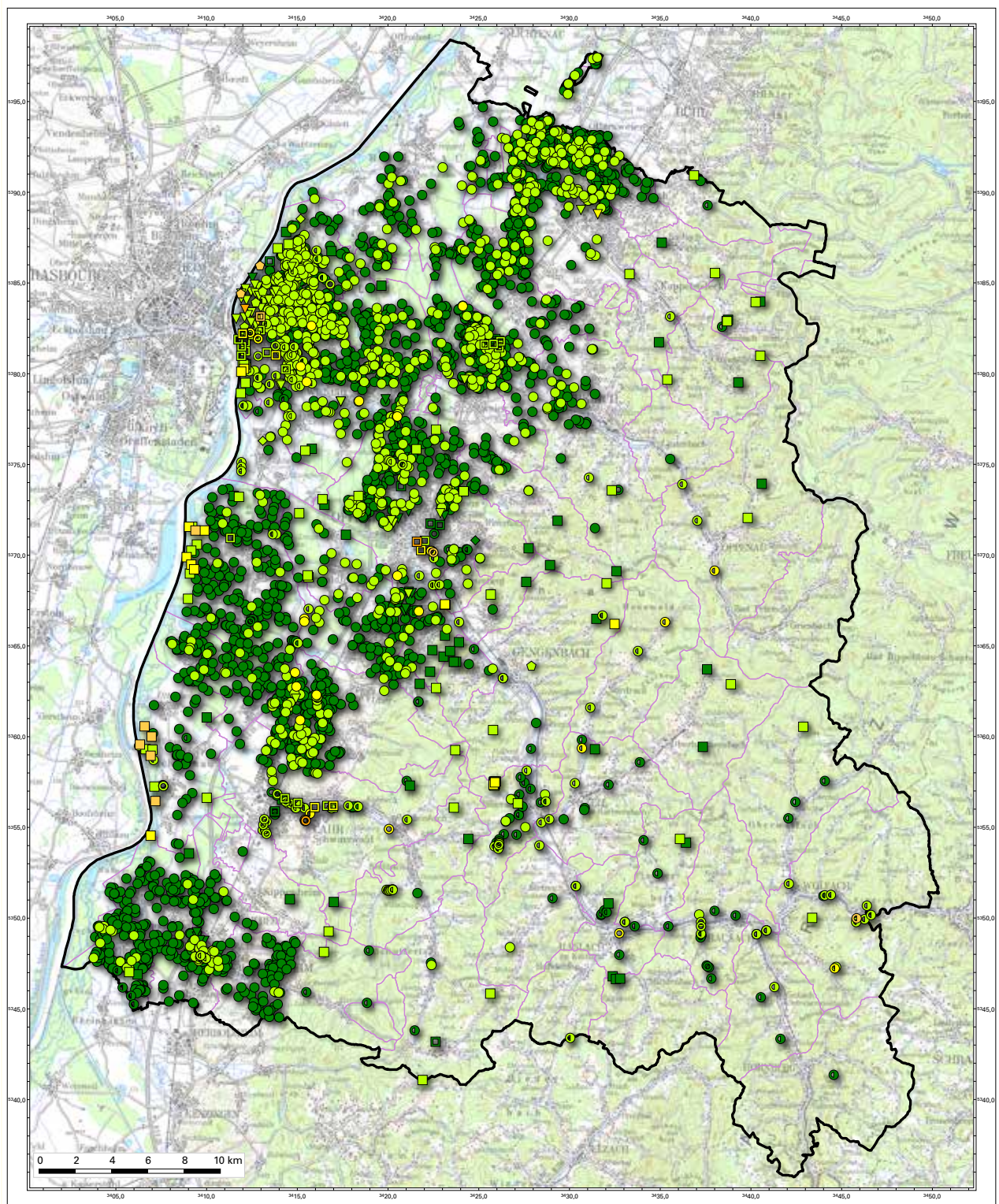
A.4.2.8.1 Nickelgehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





A.4.2.9.1 Quecksilbergehalte in den Böden des Ortenaukreises *Quelle: Landratsamt Ortenaukreis*



Quecksilbergehalte

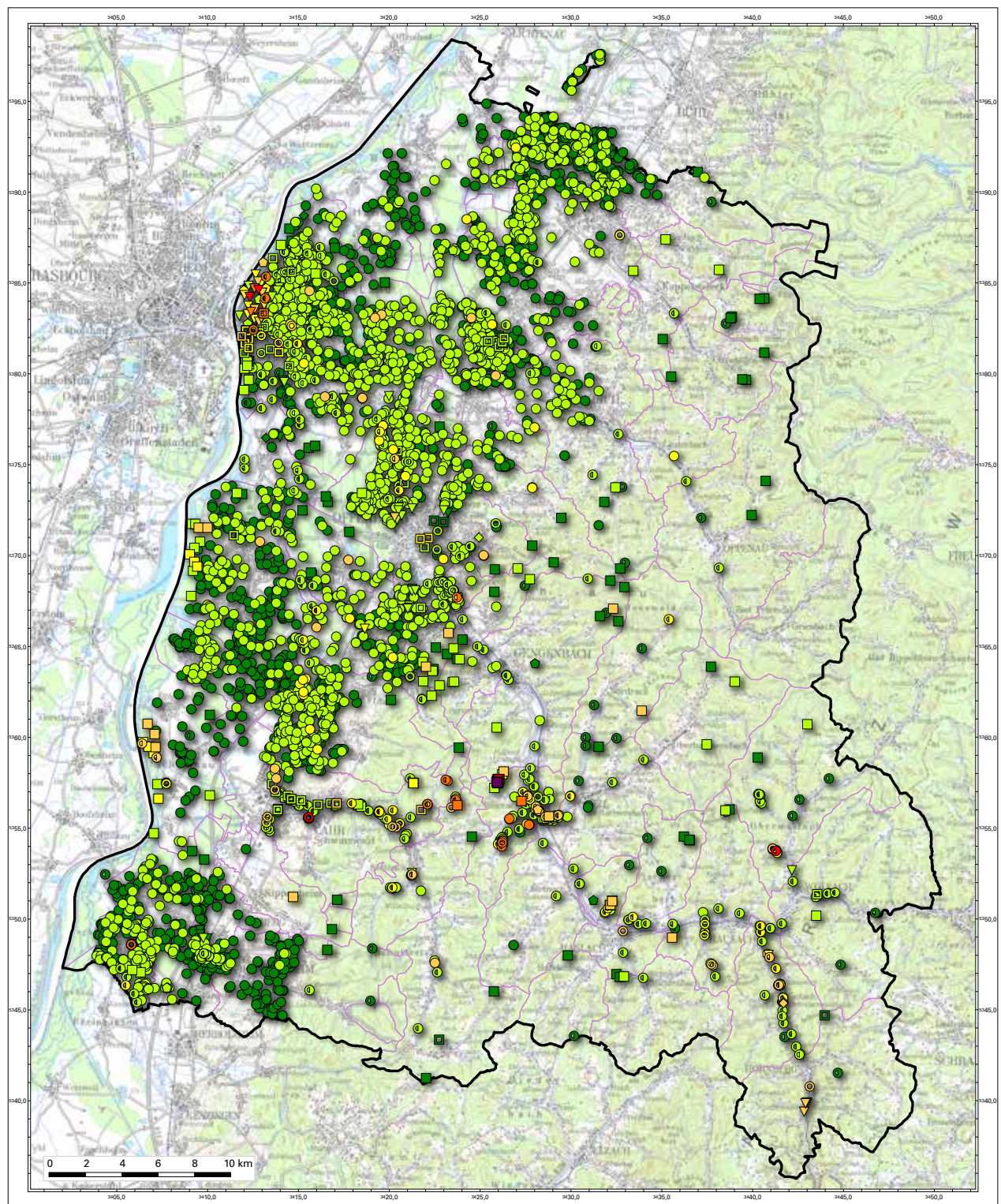
| Bodennutzung                                         | Quecksilber [mg/kg] im Oberboden |            |            |            |           |          |          |          |     |                 |
|------------------------------------------------------|----------------------------------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|-----|-----------------|
|                                                      | bis 0,1                          | >0,1 - 0,5 | >0,5 - 1,0 | >1,0 - 2,0 | >2,0 - 10 | >10 - 20 | >20 - 50 | >50 - 80 | >80 |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | ●                                | ●          | ●          | —          | —         | —        | —        | —        | —   | Landkreisgrenze |
| Grünland                                             | ●                                | ●          | ●          | ●          | —         | —        | —        | —        | —   |                 |
| Wald                                                 | ■                                | ■          | ■          | ■          | —         | —        | —        | —        | —   | Gemeindegrenze  |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | ◆                                | ◆          | ◆          | ◆          | —         | —        | —        | —        | —   |                 |
| Kinderspielflächen                                   | ◆                                | ◆          | —          | —          | —         | —        | —        | —        | —   | nicht enthalten |
| Haus- und Kleingärten                                | ○                                | ○          | ○          | ○          | ○         | —        | —        | —        | —   |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            | □                                | □          | □          | —          | □         | —        | —        | —        | —   | nicht enthalten |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | ▼                                | ▼          | —          | —          | ▼         | —        | —        | —        | —   |                 |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.10.1 Zinkgehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



Zinkgehalte

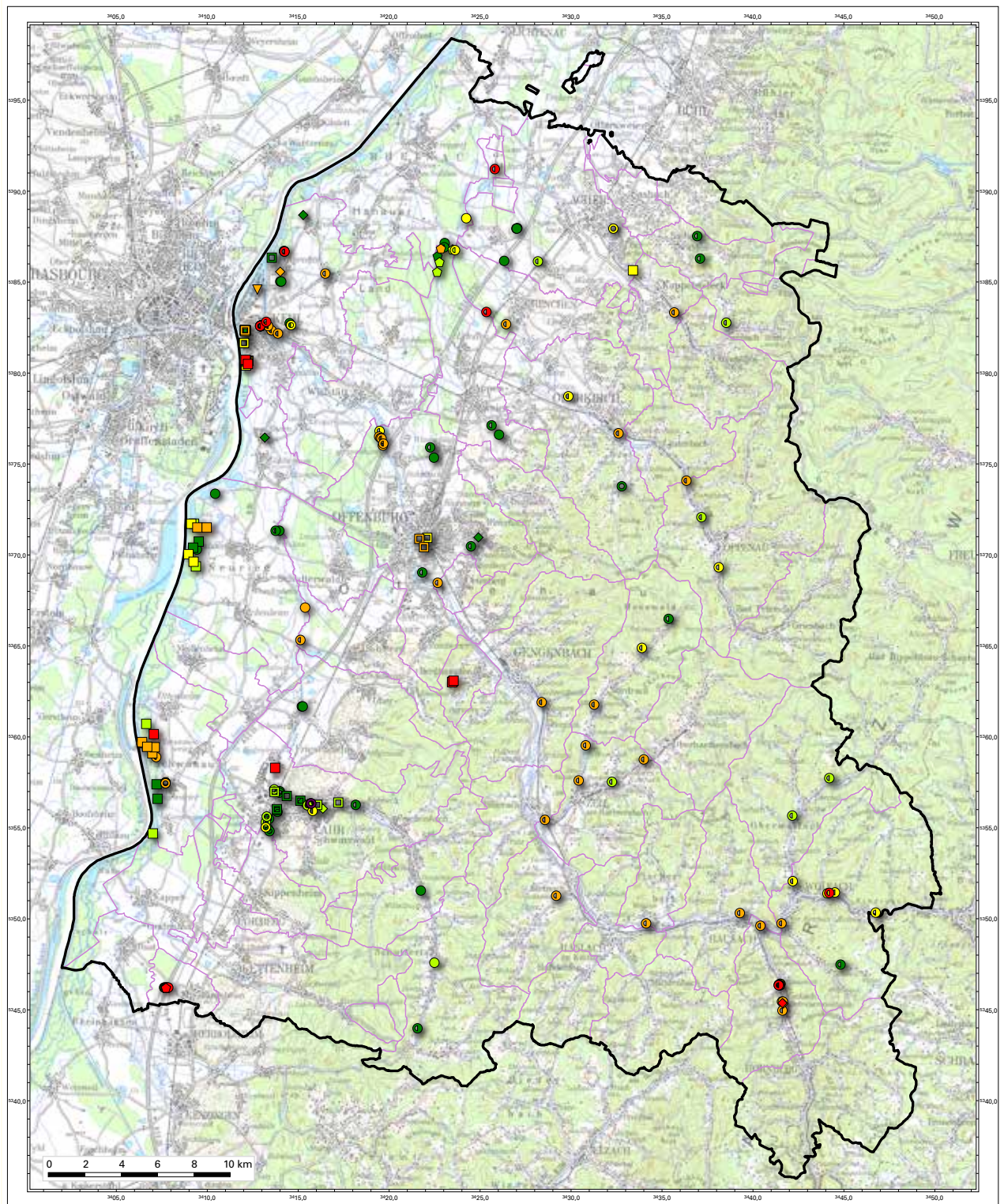
| Landnutzung                                          | Zink [mg/kg] im Oberboden |           |            |            |            |             |       |                 |
|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------|-----------------|
|                                                      | bis 60                    | >60 - 150 | >150 - 200 | >200 - 400 | >400 - 800 | >800 - 1500 | >1500 |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | ●                         | ●         | ●          | ●          | ●          | —           | —     | Landkreisgrenze |
| Grünland                                             | ●                         | ●         | ●          | ●          | ●          | ●           | —     |                 |
| Wald                                                 | ■                         | ■         | ■          | ■          | ■          | ■           | ■     | Gemeindegrenze  |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | ◆                         | ◆         | ◆          | ◆          | ◆          | ◆           | ◆     |                 |
| Kinderspielflächen                                   | ◆                         | ◆         | —          | ◆          | —          | —           | —     | nicht enthalten |
| Haus- und Kleingärten                                | ○                         | ○         | ○          | ○          | ○          | ○           | —     |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            | ■                         | ■         | ■          | ■          | ■          | —           | —     | nicht enthalten |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | ▼                         | ▼         | ▼          | ▼          | ▼          | ▼           | —     |                 |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.11.1 PAK-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



PAK-Gehalte

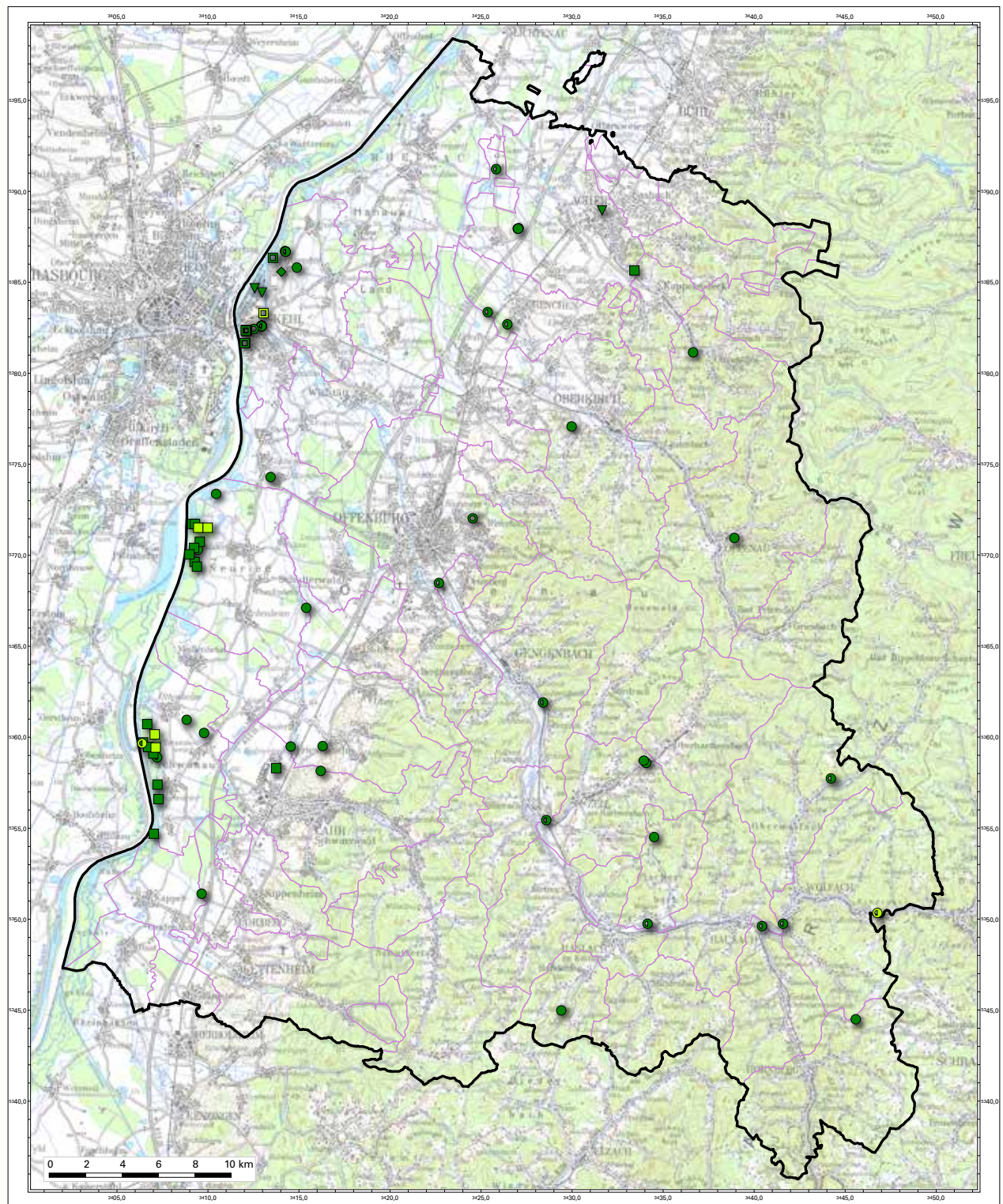
| Bodennutzung                                         | PAK [mg/kg] im Oberboden |        |        |        |         |           |      |                 |
|------------------------------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|---------|-----------|------|-----------------|
|                                                      | bis 1                    | >1 - 2 | >2 - 3 | >3 - 9 | >9 - 30 | >30 - 100 | >100 |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | ●                        | ●      | ●      | ●      | ●       | —         | —    | Landkreisgrenze |
| Grünland                                             | ●                        | ●      | ●      | ●      | ●       | —         | —    |                 |
| Wald                                                 | ■                        | ■      | ■      | ■      | ■       | —         | —    | Gemeindegrenze  |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | ◆                        | ◆      | —      | ◆      | ◆       | —         | —    |                 |
| Kinderspielflächen                                   | ◆                        | ◆      | —      | ◆      | ◆       | —         | —    | nicht enthalten |
| Haus- und Kleingärten                                | ○                        | ○      | ○      | ○      | ○       | —         | —    |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            | ■                        | ■      | ■      | ■      | —       | —         | —    | nicht enthalten |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | —                        | —      | —      | ▼      | —       | —         | —    |                 |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TUK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.12.1 PCB-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis



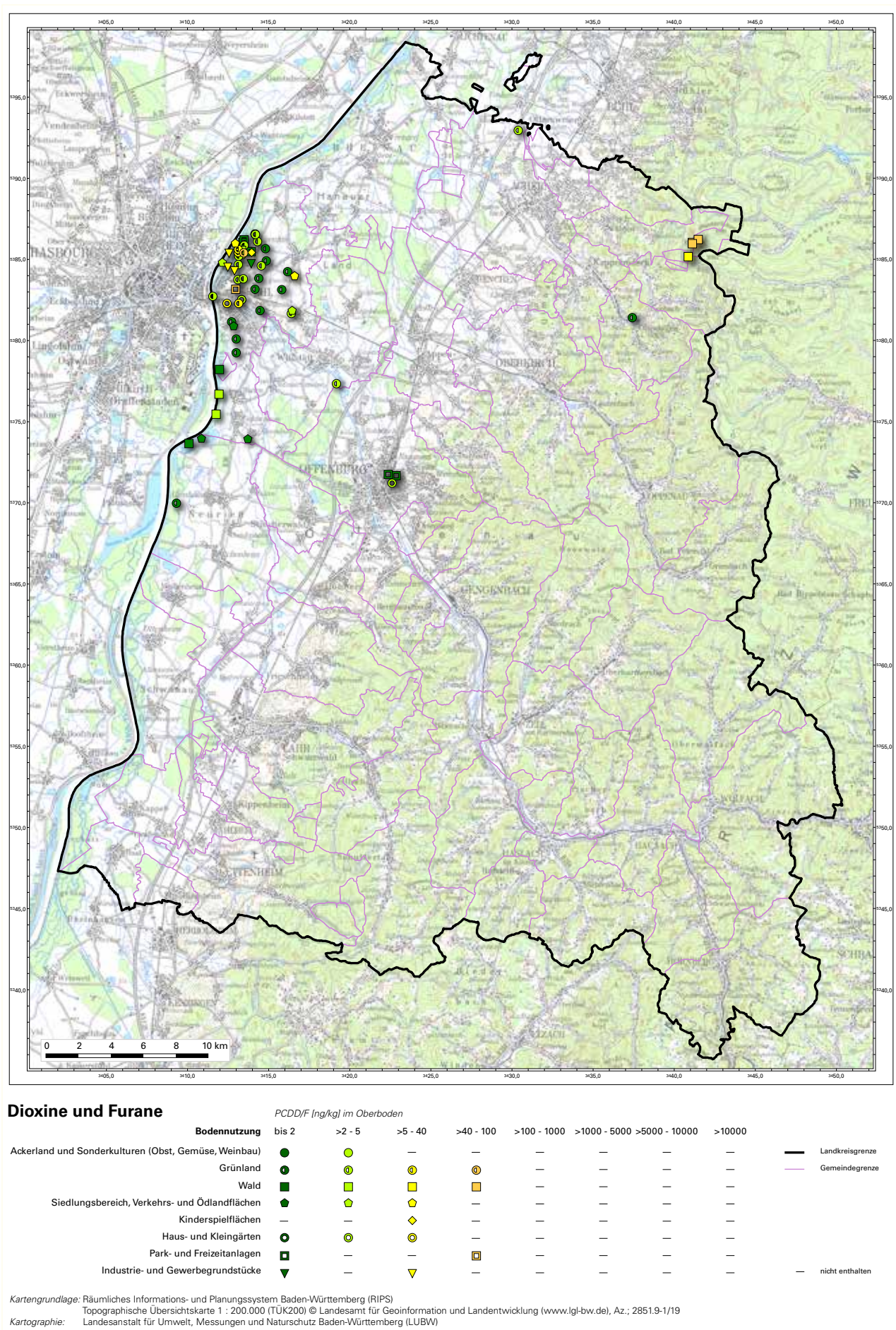
| PCB-Gehalte                                          |   | PCB [mg/kg] im Oberboden |             |            |            |            |           |     |                 |
|------------------------------------------------------|---|--------------------------|-------------|------------|------------|------------|-----------|-----|-----------------|
| Bodennutzung                                         |   | bis 0,05                 | >0,05 - 0,2 | >0,2 - 0,4 | >0,4 - 0,8 | >0,8 - 2,0 | >2,0 - 40 | >40 |                 |
| Ackerland und Sonderkulturen (Obst, Gemüse, Weinbau) | ● | —                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   | Landkreisgrenze |
| Grünland                                             | ○ | ○                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   |                 |
| Wald                                                 | ■ | ■                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   | Gemeindegrenze  |
| Siedlungsbereich, Verkehrs- und Ödlandflächen        | — | —                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   |                 |
| Kinderspielflächen                                   | ◆ | —                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   | nicht enthalten |
| Haus- und Kleingärten                                | ○ | —                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   |                 |
| Park- und Freizeitanlagen                            | □ | □                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   |                 |
| Industrie- und Gewerbegrundstücke                    | ▼ | —                        | —           | —          | —          | —          | —         | —   |                 |

Kartengrundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem Baden-Württemberg (RIPS)  
Topographische Übersichtskarte 1 : 200.000 (TÜK200) © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19  
Kartographie: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



A.4.2.13.1 PCDD/F-Gehalte in den Böden des Ortenaukreises

Quelle: Landratsamt Ortenaukreis





#### A.4.3.1 Stickstoff - Quellen und Bedeutung

##### DüV 2007

Die Düngeverordnung gibt vor, anhand von festgelegten Erfahrungswerten über die Stickstoffgehalte in Ernteprodukten bestimmter Qualität (z.B. Proteingehalt der Getreidekörner) sowie der am jeweiligen Anbaustandort erwarteten Erntemenge den Düngebedarf zu errechnen. Auf den Düngebedarf ist die Stickstoffnachlieferung aus der Mineralisation aufgebracht organischer Düngemittel bzw. aus den Ernteresten vorangegangener Pflanzenbestände anzurechnen (Erfahrungswerte). Nur auf Basis des so errechneten Düngebedarfs dürfen wesentliche Stickstoffmengen ausgebracht werden.

Die Düngeverordnung verpflichtet die Landwirte darüber hinaus, die Stickstoffmengen auf ihren Flächen im Rahmen eines jährlich vorgeschriebenen Nährstoffvergleichs zu bilanzieren und den in den drei letzten Düngejahren durchschnittlich angefallenen Stickstoff-Überschuss schrittweise von 90 kg N/ha auf 60 kg N/ha bis zum Jahr 2011 zu verringern.

##### SchALVO

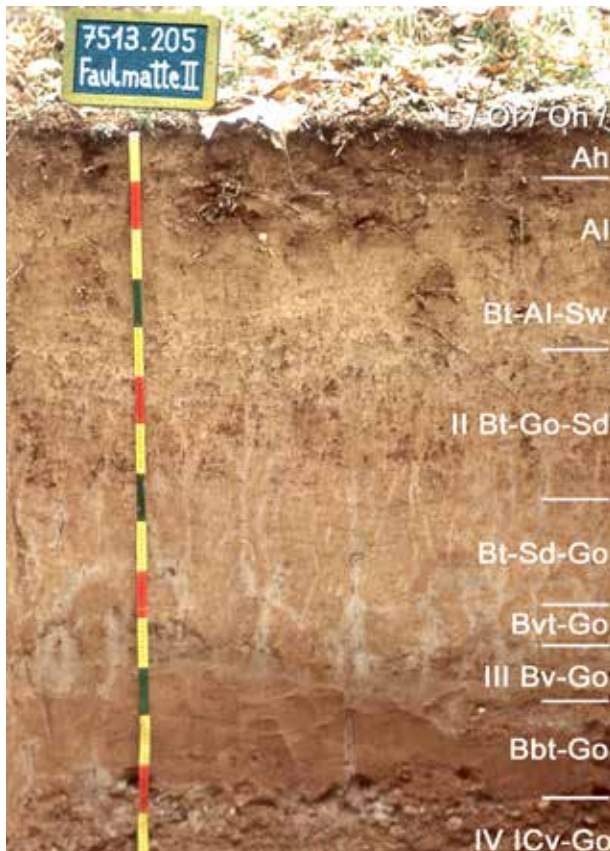
In Nitratproblemgebieten unterliegt die landwirtschaftliche Bewirtschaftung detaillierten Regelungen [SchALVO 2001]. Grundsätzlich geht es darum, alle Bewirtschaftungsmaßnahmen den Standortverhältnissen so anzupassen, dass eine Nitratauswaschung soweit wie möglich vermieden wird. Für Ackerflächen gilt zum Beispiel ein generelles Begrünungsgebot. Nach der Ernte der Hauptfrüchte müssen Ackerflächen baldmöglichst mit Zwischenfrüchten begrünt werden. Abfrierende Zwischenfrüchte dürfen ab dem 1. Dezember, winterharte ab dem 1. Februar in den Boden eingearbeitet werden. Das Umbrechen von Grünlandflächen in Ackerland ist in Wasserschutzgebieten nicht erlaubt.

Für viele Kulturpflanzen müssen bei der Stickstoffdüngung die aktuellen Bodengehalte an pflanzenverfügbarem Mineralstickstoff ( $N_{\min}$ ) berücksichtigt werden. Dazu sind Bodenuntersuchungen durchzuführen.

Im Frühjahr ist darauf zu achten, dass die Einzelgaben bei auswaschungsgefährdeten Böden (A-Böden) auf maximal 50 kg N/ha, bei anderen Böden auf maximal 80 kg N/ha beschränkt werden. Bei langsam wirkenden Mineraldüngern können Einzelgaben maximal auf 80 kg N/ha bzw. 100 kg N/ha erhöht werden. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Düngungen muss bei Mineraldünger mindestens 2 Wochen, bei Tabak bzw. bei Wirtschaftsdüngern mindestens 3 Wochen betragen.

Mit Wirtschaftsdüngern dürfen nach Ernte der Hauptfrucht je nach Folgefrucht maximal 40 kg anrechenbarer bzw. 80 kg Gesamtstickstoff je Hektar ausgebracht werden. Je nachdem, ob Gülle, Geflügelkot oder Stallmist ausgebracht und welche Folgefrucht angebaut wird, gelten unterschiedliche zeitliche und Mengen-Begrenzungen. Beispielsweise darf Gülle auf Grünland nur bis zum 30. Oktober, Stallmist bis zum 1. Dezember ausgebracht werden.

#### A.4.4.2 Bodenversauerung im Ortenaukreis

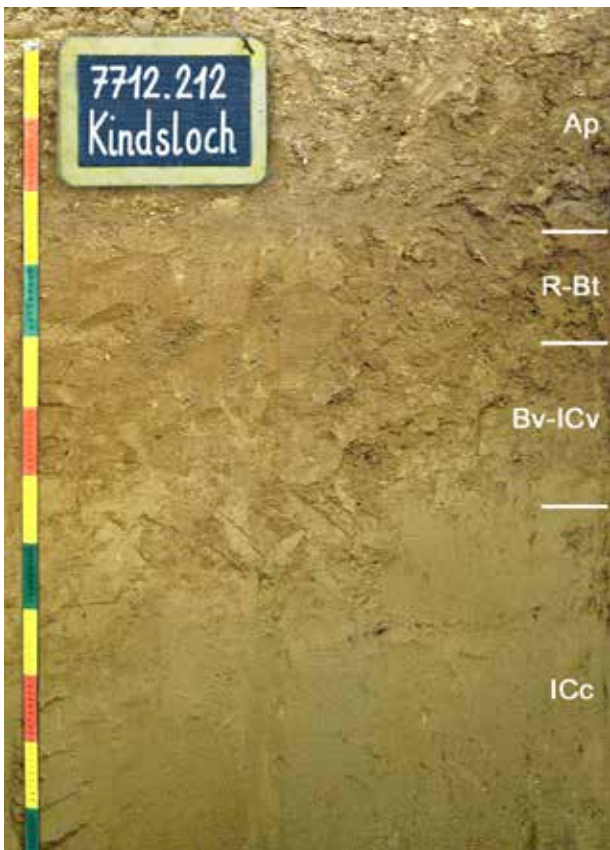


| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>eff</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| - 9        | Lu       | 3,4                          | 85                                         | < 1                |
| - 29       | Lu       | 3,8                          | 47                                         | 1                  |
| - 43       | Lu       | 3,8                          | 47                                         | < 1                |
| - 80       | Lu       | 4,3                          | 128                                        | 24                 |
| - 95       | Ls2      | 4,1                          | 161                                        | 39                 |
| - 109      | Sl3      | 4,1                          | 79                                         | 64                 |
| - 119      | Sl2      | 4,2                          | 27                                         | 48                 |
| - 135      | St2      | 4,2                          | 40                                         | 61                 |

| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>eff</sub> ] austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                           | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| - 9        | 8,0                                                                      | 86,4             | 5,4              | <0,1             | <0,1             | <0,1             | 0,1            | <0,1            |
| - 29       | 4,2                                                                      | 93,2             | 1,7              | 0,4              | <0,2             | <0,2             | 0,6            | <0,2            |
| - 43       | 4,9                                                                      | 94,9             | <0,2             | 1,3              | <0,2             | <0,2             | 0,4            | <0,2            |
| - 80       | 4,0                                                                      | 69,9             | <0,1             | 1,9              | 2,8              | 21,6             | <0,1           | <0,1            |
| - 95       | 3,2                                                                      | 57,3             | <0,1             | <0,1             | 7,0              | 31,2             | 0,2            | 0,9             |
| - 109      | 5,6                                                                      | 30,5             | 0,1              | <0,1             | 11,4             | 51,1             | 0,7            | 0,6             |
| - 119      | 8,5                                                                      | 41,9             | <0,4             | <0,4             | 10,7             | 37,0             | 0,7            | <0,4            |
| - 135      | 5,3                                                                      | 34,0             | <0,3             | <0,3             | 16,8             | 43,8             | <0,3           | <0,3            |

Abb. A.4.4.2-1: Gley-Pseudogley-Parabraunerde aus spätwürmzeitlichem Hochflutlehm der Rheinebene westlich Schutterwald; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB



| Tiefe [cm] | Bodenart | pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ] | KAK <sub>pot</sub> [mmol <sub>c</sub> /kg] | Basensättigung [%] |
|------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| - 26       | Lu       | 7,0                          | 152                                        | 100                |
| - 41       | Lu       | 7,0                          | 150                                        | 100                |
| - 65       | Lu       | 7,2                          | 101                                        | 100                |
| - 100      | Ut3      | 7,4                          | 60                                         | 100                |

| Tiefe [cm] | Sorptionsverhältnisse [% der KAK <sub>eff</sub> ] austauschbare Kationen |                  |                  |                  |                  |                  |                |                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|            | H <sup>+</sup>                                                           | Al <sup>3+</sup> | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| - 26       | -                                                                        | -                | -                | -                | 87,0             | 7,0              | 4,6            | 1,4             |
| - 41       | -                                                                        | -                | -                | -                | 91,1             | 6,3              | 2,5            | 0,1             |
| - 65       | -                                                                        | -                | -                | -                | 93,6             | 5,0              | 1,3            | 0,1             |
| - 100      | -                                                                        | -                | -                | -                | 91,7             | 7,2              | 1,1            | <0,1            |

Abb. A.4.4.2-2: Erodierte Parabraunerde aus würmzeitlichem Löss im Gewann „Kindsloch“ bei Mahlberg; Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB); Bild: LGRB

#### A.4.4.5 Kennwerte der Bodenversauerung

##### pH-Wert

Ein Maß für die Bodenreaktion ist die Konzentration gelöster Wasserstoffionen ( $\text{g H}^+/\text{l}$ ). Kenngröße der Bodenreaktion ist der pH-Wert (Zahlenwerte von 0 - 14; Abb. A.4.4.5-1). Mit sinkendem pH-Wert steigt die Wasserstoffionenkonzentration innerhalb einer pH-Stufe zehnfach:

$$\text{pH } 5 = 10^{-5} = 1/10^5 = 1/100\,000 = 0,00001 \text{ g H}^+/\text{l}$$

$$\text{pH } 2 = 10^{-2} = 1/10^2 = 1/100 = 0,01 \text{ g H}^+/\text{l}$$

Böden mit pH-Werten unter dem Neutralpunkt (pH 7) reagieren sauer, mit Werten darüber alkalisch.

Da der pH-Wert der Böden kleinräumig und zeitlich variiert, wird zur Beschreibung des aktuellen Versauerungsstatus als zusätzliche Kenngröße die Basensättigung herangezogen. Sie bezeichnet den prozentualen Anteil der Nährstoffionen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  an der Kationenaustauschkapazität ( $\text{KAK}_{\text{eff}}$ ) eines Bodens (s. Kationenaustauschkapazität KAK).

Eine Basensättigung < 20 % kennzeichnet die fortgeschrittene Ausschöpfung des Austauscherpuffers (Tab. A.4.4.5-1). Eine Bodenschicht mit einem so geringen Basensättigungswert ist stark versauert. Das Pflanzenwachstum und die Qualität von Quellwasser können hier beeinträchtigt werden (Kap. 4.4.3). Die Beziehung zwischen pH-Wert

Tab. A.4.4.5-1: Beziehung zwischen Basensättigung und Boden-pH-Wert; Quelle: AG Boden 2005

| Basensättigung [%] | pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ) | Bezeichnung                           |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| < 5                | < 3,3                       | sehr basenarm                         |
| 5 bis < 20         | 3,3 bis < 3,8               | basenarm                              |
| 20 bis < 50        | 3,8 bis < 4,8               | mittelbasisch                         |
| 50 bis < 80        | 4,8 bis < 6,0               | basenreich                            |
| 80 bis 100         | $\geq 6,0$                  | sehr basenreich<br>bis basengesättigt |

und Basensättigung zeigt Tab. A.4.4.5-1. Die wichtigsten Puffersubstanzen und -reaktionen enthält vereinfacht Tab. A.4.4.5-2.

##### Kationenaustauschkapazität KAK

Die Oberflächen von Bodenbestandteilen (Tonminerale, Huminstoffe) sind elektrisch negativ geladen (Kap. A.3.1.1).  $\text{H}^+$ -Ionen, Nährstoff- und Schwermetall-Kationen werden dadurch elektrostatisch an die Oberflächen gebunden. Die gesamte Ladung der Kationen, die beim jeweils herrschenden pH-Wert sorbiert werden kann, wird als effektive Kationenaustauschkapazität  $\text{KAK}_{\text{eff}}$  bezeichnet und in der Einheit  $\text{mmol } \text{c}/\text{kg}$  angegeben [ROWELL 1997].

An den Tonmineral-Oberflächen sorbierte Kationen können durch eine äquivalente Ladung gelöster Ionen ausgetauscht werden. Der Vorgang ist reversibel. Zum Beispiel können  $\text{H}^+$ - und  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen aus Versauerungs-

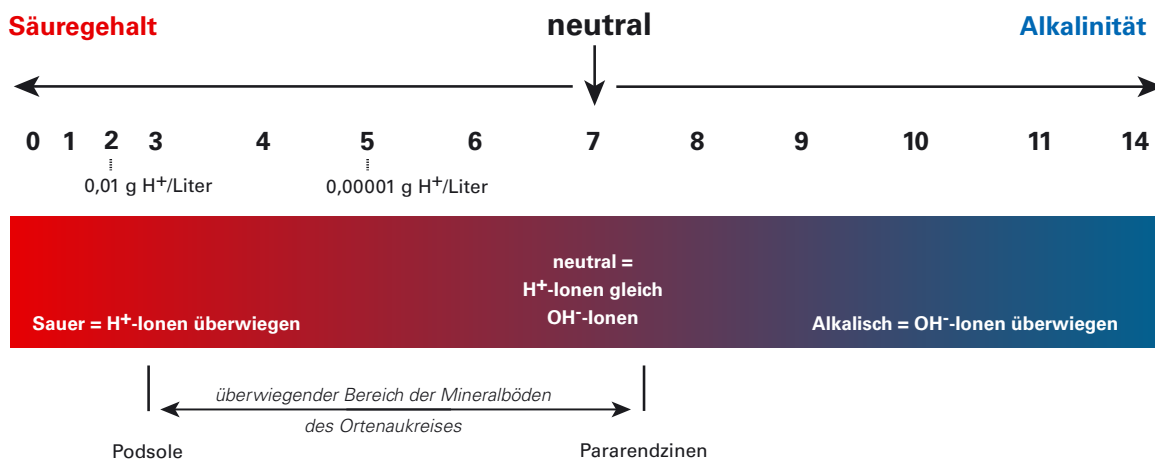


Abb. A.4.4.5-1: pH-Werte in Böden; nach <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu>



Tab. A.4.4.5-2: Puffersubstanzen und pH-Bereiche der Pufferung mit Beispielen bodenchemischer Veränderungen der Böden;  
Quellen: UBA 1996; Ulrich 1985, Schwertmann et al. 1987

| Puffersubstanzen   | vorherrschender pH-Bereich der Pufferung                                                             | Bodenchemische Veränderungen und Beispielreaktionen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Carbonat-Puffer    | 8,6 - 6,2<br>(nur in carbonat- bzw. kalkhaltigen Böden)                                              | Verlust an $\text{CaCO}_3$ als $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$<br><br>$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Silikat-Puffer     | über die ganze pH-Skala<br>(vorherrschender Pufferbereich in carbonat-freien Böden $\text{pH} > 5$ ) | <i>Primäre Silikate</i><br>Freisetzen u. a. von Nährstoff- und Schwermetall-Kationen aus Mineralstrukturen, Tonmineralbildung (Erhöhung der KAK)<br><br>$-(\text{SiO})\text{M} + \text{H}^+ \rightarrow -(\text{SiOH}) + \text{M}^+$<br><br><i>Tonminerale</i><br>Tonzerstörung (Verlust von KAK), Freisetzen von Kationen (z. B. Mg, Al) aus Mineralstrukturen, austauschbares Al in der Bodenlösung<br><br>$-(\text{SiO})_3\text{Al} + 3\text{H}^+ \rightarrow -(\text{SiOH})_3 + \text{Al}^{3+}$ |
| Austauscher-Puffer | 8 - 5                                                                                                | Verlust austauschbarer Kationen<br><br>$\text{TM-OH[M]} + \text{H}^+ \rightarrow \text{TM-OH}_2^+ + \text{M}^{+1})$<br>$\text{TM-OH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{TM-OH}_2^+$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Manganoxid-Puffer  | 5,5 ~ 4,5                                                                                            | $\text{Mn}^{2+}$ -Freisetzung<br><br>$2\text{MnO}_2^+ + 4\text{H}^+ + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mn}^{2+} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Aluminium-Puffer   | < 4,2                                                                                                | Al in der Bodenlösung, austauschbares Al<br><br>$\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Eisen-Puffer       | < 3,2                                                                                                | $\text{Fe}^{3+}$ -Freisetzung<br><br>$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

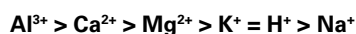
<sup>+1)</sup>  $\text{M}^+ = 1/2 \text{ Ca}, 1/2 \text{ Mg}, \text{ K}, \text{ Na}$

und Neutralisationsvorgängen sorbierte Nährstoffionen von den Oberflächen in das Bodensickerwasser verdrängen und der Auswaschung zuführen (Abb. A.4.4.5-2).

Die  $\text{H}^+$ - und  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen können wiederum z.B. durch  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen aus Kalkdüngern ausgetauscht werden.

Allgemein werden höher geladene Kationen wie Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) stärker sorbiert als geringer geladene wie  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{K}^+$ . Bei Kationen gleicher Ladung ist der Grad der Hydratation entscheidend. Größere schwach hydratisierte Kationen werden fester an den Tonmineral-Oberflächen sorbiert, weil ihre Ladung schwächer von den Wassermolekülen abgeschirmt wird als bei kleineren Kationen.

Bei gleicher Ionen-Konzentration in der Bodenlösung nimmt die Sorptionsstärke in der Reihenfolge ab:



Die mit dem Kationenaustausch verbundene  $\text{H}^+$ -Ionen-Sorption ist eine Pufferreaktion, bei der die Protonen aus Versauerungsvorgängen aus dem Bodenwasser entfernt („neutralisiert“) werden. Der als Basensättigung bezeichnete prozentuale Anteil der Nährstoffkationen ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) an der Kationenaustauschkapazität  $\text{KAK}_{\text{eff}}$  ist ein guter Indikator für die Elastizität der Böden gegenüber Säurebelastungen beziehungsweise für das Potenzial der Böden dieser Standorte, diese Säurebelastung ohne negative ökologische Konsequenzen abzupuffern [UBA 1996].

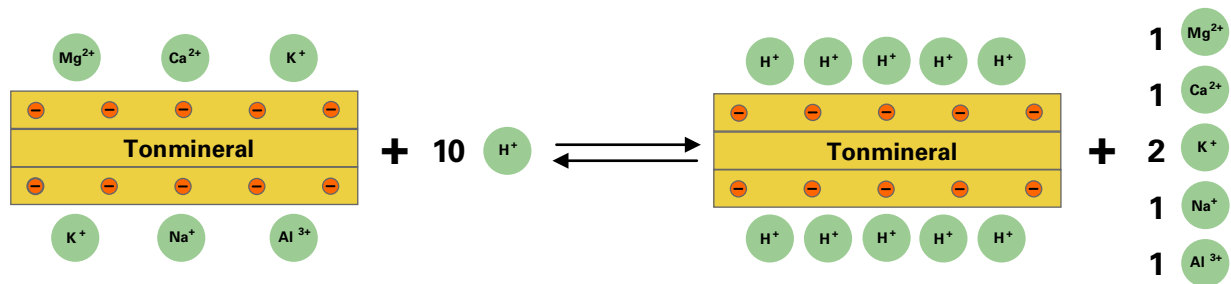


Abb. A.4.4.5-2: Vereinfachtes Schema des Kationenaustauschs an Tonmineralen

Die  $KAK_{eff}$  wird aus der Summe aller beim jeweiligen pH-Wert sorbierten Kationen abgeleitet ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $H^+$ ). Im Labor der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) wird die  $KAK_{eff}$  nach vollständigem Belegen von 2,5 g Boden mit 100 ml  $NH_4Cl$ -haltiger Austauscherlösung bestimmt (Durchströmung mit kontrollierter Geschwindigkeit). Das in der Austauscherlösung dissoziierte Ammoniumion ( $NH_4^+$ ) verdrängt die anderen Kationen von den Austauscherplätzen am Probenmaterial in die Lösung, in der sie anschließend gemessen werden.

Die potenzielle Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) wird bei einem voreingestelltem pH-Wert von 8,1 bestimmt.

## A.5.1 Bodenschutz in Planungsverfahren

### A.5.1.3.1 Bodendaten - Bodenschätzung

Die Bodenschätzung wurde auf Acker- und Grünland getrennt durchgeführt. Anhand von wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnissen wurden sowohl ein Acker- als auch ein Grünlandschätzungsrahmen ausgearbeitet (Tab. A.5.1.3.1.1-1 u. A.5.1.3.1.2-3).

#### A.5.1.3.1.1 Ackerschätzungsrahmen

Im Ackerschätzungsrahmen sind 94 Wertzahlen (Bodenzahlen) von 7 bis 100 angegeben. Die Bodenzahl 100 charakterisiert den unter dem Gesichtspunkt des Ertrags besten Boden, bezogen auf durchschnittliche Jahresniederschläge von 600 mm, 8 °C Jahresdurchschnittstemperatur und weitgehend ebenes Gelände. Der Standard ist eine gut entwickelte Schwarzerde aus der Magdeburger Börde (Tab. A.5.1.3.1.1-1).

Nur Böden mit Bodenzahlen  $\geq 18$  gelten als ackerfähig. Bodenzahlen  $\leq 7$  kennzeichnen Unland. Die Bodenzahl, d.h. die Ertragsfähigkeit eines Bodens hängt von der Bodenart, von der Entstehungsart und von der Zustandsstufe ab.

#### Bodenart

Den Bodenarten der Bodenschätzung liegen entgegen der Darstellung in Kap. 3.1.1 die Anteile der abschlämmbaren Teilchen zugrunde ( $\varnothing < 0,01$  mm, Tab. A.5.1.3.1.1-2 u. Tab. 3.1.1-2 bzw. Abb. 3.1.1-3).

Bei der praktischen Durchführung der Bodenschätzung im Gelände lassen sich die Bodenarten erfahrungsgemäß hinreichend genau mit der Fingerprobe ermitteln. Zwischen Schluff ( $\varnothing 0,063 - 0,002$  mm) und Ton ( $\varnothing < 0,002$  mm) kann jedoch nicht exakt unterschieden werden, weshalb bei den Erhebungen keine gesonderte Einteilung in Schluffe erfolgte. Schluffreiche Böden aus Löss hat man durch die gesonderte Kennzeichnung (Lö) bei der Entstehungsart berücksichtigt.

Ferner wurde angestrebt, bei etwaigem Korngrößenwechsel bis 1 m Tiefe nur eine gemittelte Bodenart anzugeben.

Steht z.B. bis 50 cm Tiefe lehmiger Sand (IS) über sandigem Lehm (sL) an, ist die gemittelte Bodenart stark lehmiger Sand (SL).

Im Ackerschätzungsrahmen werden acht, im Grünlandschätzungsrahmen vier Bodenarten unterschieden.

#### Entstehungsart

Es werden stark vereinfacht die geologischen Ausgangsmaterialien der Bodenbildung unterschieden. Je nach Alter und Lagerung sind im Ackerschätzungsrahmen vier Entstehungsarten aufgenommen worden:

- AI** Alluvium (nacheiszeitliche Lockersedimente aus Abschwemm-Massen und Ablagerungen von Fließgewässern → Niederungs- und Auenböden)
- Lö** Löss (windverfrachtete Lockersedimente → Böden aus Löss und Lösslehm)
- D** Diluvium (Gesteine aus eiszeitlichem und tertiärem Ausgangsmaterial; im Ortenaukreis sehr selten)
- V** Verwitterungsboden (Böden aus anstehenden Festgesteinen, z. B. Sandstein, Gneis)
  - Vg** stark steinige Verwitterungsböden.

Der Zusatz „g“ in (Vg), in (Dg) oder (Alg) kennzeichnet deutliche Grobbodenanteile, die zu einer Wertminderung führen.

#### Zustandsstufe

Bei der Ausarbeitung des Ackerschätzungsrahmens war zu berücksichtigen, dass die Ertragsfähigkeit eines Bodens nicht nur von der Bodenart und dem geologischen Ausgangsmaterial abhängt.

Im Ackerschätzungsrahmen wurden deshalb alle anderen die Ertragsfähigkeit bestimmenden Einflussfaktoren (u.a. Humus- und Kalkgehalt, Krümen- und Profiltiefe, Vernäsung und Verdichtung) in sieben Zustandsstufen zusammengefasst.

Zugrunde gelegt wurde dabei die Vorstellung, dass sich die Böden unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen mit der Zeit von einem Zustand geringer Ertragsfähigkeit (Zustandsstufe 7, z.B. Bodentyp Ranker) in einen Zustand maximaler Ertragsfähigkeit entwickeln (Zustandsstufe 1, z.B. Bodentyp Schwarzerde, Parabraunerde), um mit



Tab. A.5.1.3.1.1-1: Ackerschätzungsrahmen

| Bodenart                          | Entstehung | Zustandsstufe |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------|------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                   |            | 1             | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |
|                                   |            |               |         |         |         |         |         |         |
| S<br>Sand                         | D          |               | 41 - 34 | 33 - 27 | 26 - 16 | 20 - 16 | 15 - 12 | 11 - 7  |
|                                   | Al         |               | 44 - 37 | 36 - 30 | 29 - 24 | 23 - 19 | 18 - 14 | 13 - 9  |
|                                   | V          |               | 41 - 34 | 33 - 27 | 26 - 21 | 20 - 16 | 15 - 12 | 11 - 7  |
| SI (S/IS)<br>anlehmiger Sand      | D          |               | 51 - 43 | 42 - 35 | 34 - 28 | 27 - 22 | 21 - 17 | 16 - 11 |
|                                   | Al         |               | 53 - 46 | 45 - 38 | 37 - 31 | 30 - 24 | 23 - 19 | 18 - 13 |
|                                   | V          |               | 49 - 43 | 42 - 36 | 35 - 29 | 28 - 23 | 22 - 18 | 17 - 12 |
| IS lehmiger Sand                  | D          | 68 - 60       | 59 - 51 | 50 - 44 | 43 - 37 | 36 - 30 | 29 - 23 | 22 - 16 |
|                                   | Lö         | 71 - 63       | 62 - 54 | 53 - 46 | 45 - 39 | 38 - 32 | 31 - 25 | 24 - 18 |
|                                   | Al         | 71 - 63       | 62 - 54 | 53 - 46 | 45 - 39 | 38 - 32 | 31 - 25 | 24 - 18 |
|                                   | V          |               | 57 - 51 | 50 - 44 | 43 - 37 | 36 - 30 | 29 - 24 | 23 - 17 |
|                                   | Vg         |               |         | 47 - 41 | 40 - 34 | 33 - 27 | 26 - 20 | 19 - 12 |
| SL (IS/sL) stark<br>lehmiger Sand | D          | 75 - 68       | 67 - 60 | 59 - 52 | 51 - 45 | 44 - 38 | 37 - 31 | 30 - 23 |
|                                   | Lö         | 81 - 73       | 72 - 64 | 63 - 55 | 54 - 47 | 46 - 40 | 39 - 33 | 32 - 25 |
|                                   | Al         | 80 - 72       | 71 - 63 | 62 - 55 | 54 - 47 | 46 - 40 | 39 - 33 | 32 - 25 |
|                                   | V          | 75 - 68       | 67 - 60 | 59 - 52 | 51 - 44 | 43 - 37 | 36 - 30 | 29 - 22 |
|                                   | Vg         |               |         | 55 - 48 | 47 - 40 | 39 - 32 | 31 - 24 | 23 - 16 |
| sL sandiger Lehm                  | D          | 84 - 76       | 75 - 68 | 67 - 60 | 59 - 53 | 52 - 46 | 45 - 39 | 38 - 30 |
|                                   | Lö         | 92 - 83       | 82 - 74 | 73 - 65 | 64 - 56 | 55 - 48 | 47 - 41 | 40 - 32 |
|                                   | Al         | 90 - 81       | 80 - 72 | 71 - 64 | 63 - 56 | 55 - 48 | 47 - 41 | 40 - 32 |
|                                   | V          | 85 - 77       | 76 - 68 | 67 - 59 | 58 - 51 | 50 - 44 | 43 - 36 | 35 - 27 |
|                                   | Vg         |               |         | 64 - 55 | 54 - 45 | 44 - 36 | 35 - 27 | 26 - 18 |
| L Lehm                            | D          | 90 - 82       | 81 - 74 | 73 - 66 | 65 - 58 | 57 - 50 | 49 - 43 | 42 - 34 |
|                                   | Lö         | 100 - 92      | 91 - 83 | 82 - 74 | 73 - 65 | 64 - 56 | 55 - 46 | 45 - 36 |
|                                   | Al         | 100 - 90      | 89 - 80 | 79 - 71 | 70 - 62 | 61 - 54 | 53 - 45 | 44 - 35 |
|                                   | V          | 91 - 83       | 82 - 74 | 73 - 65 | 64 - 56 | 55 - 47 | 46 - 39 | 38 - 30 |
|                                   | Vg         |               |         | 70 - 61 | 60 - 51 | 50 - 41 | 40 - 30 | 29 - 19 |
| LT schwerer Lehm                  | D          | 87 - 79       | 78 - 70 | 69 - 62 | 61 - 54 | 53 - 46 | 45 - 38 | 37 - 28 |
|                                   | Al         | 91 - 83       | 82 - 74 | 73 - 65 | 64 - 57 | 56 - 49 | 48 - 40 | 39 - 29 |
|                                   | V          | 87 - 79       | 78 - 70 | 69 - 61 | 60 - 52 | 51 - 43 | 42 - 34 | 33 - 24 |
|                                   | Vg         |               |         | 67 - 58 | 57 - 48 | 47 - 38 | 37 - 28 | 27 - 17 |
| T Ton                             | D          |               | 71 - 64 | 63 - 56 | 55 - 48 | 47 - 40 | 39 - 30 | 29 - 18 |
|                                   | Al         |               | 74 - 66 | 65 - 58 | 57 - 50 | 49 - 41 | 40 - 31 | 30 - 18 |
|                                   | V          |               | 71 - 63 | 62 - 54 | 53 - 45 | 44 - 36 | 35 - 26 | 25 - 14 |
|                                   | Vg         |               |         | 59 - 51 | 50 - 42 | 41 - 33 | 32 - 24 | 23 - 14 |
| Mo Moor                           |            |               | 54 - 46 | 45 - 37 | 36 - 29 | 28 - 22 | 21 - 16 | 15 - 10 |

Tab. A.5.1.3.1.1-2: Einteilung der Bodenarten für die Bodenschätzung

| Acker | Grünland | Bezeichnung der Bodenart | Abschlämbbare Teilchen in % |
|-------|----------|--------------------------|-----------------------------|
| S     | S        | Sand                     | < 10                        |
| Sl    | S        | anlehmiger Sand          | 10 - 13                     |
| IS    | LS       | lehmiger Sand            | 14 - 18                     |
| SL    | LS       | stark lehmiger Sand      | 19 - 23                     |
| sL    | L        | sandiger Lehm            | 24 - 29                     |
| L     | L        | Lehm                     | 30 - 44                     |
| LT    | T        | schwerer Lehm            | 45 - 60                     |
| T     | T        | Ton                      | > 60                        |
| Mo    | Mo       | Moor                     |                             |

zunehmender Alterung wieder in einen die Ertragsfähigkeit einschränkenden Zustand zurückzukehren (Zustandsstufe 7) [MÜCKENHAUSEN 1985].

Diese Annahme trifft für Böden aus bestimmten Gesteinen bei langem Betrachtungszeitraum in groben Zügen zu (z.B. für die Bodenentwicklung auf Löss von Pararendzina über Parabraunerde zu Pseudogley, Kap. 3.1.2).

Die Zustandsstufen 1, 3, 5 und 7 können wie folgt beschrieben werden, wobei die Stufen 2, 4 und 6 Übergänge darstellen [MÜCKENHAUSEN 1985; STAHR ET AL. 2008]:

- Zustandsstufe 1 beschreibt tiefgründige Böden mit mächtigem, mehr oder weniger stark humosem Oberboden, der allmählich in einen mehr oder weniger humus- und kalkhaltigen, gut durchwurzelbaren und durchlüfteten, unverdichteten Unterboden übergeht.
- Zustandsstufe 3 kennzeichnet mittel bis tiefgründigen Böden, deren weniger humoser Oberboden sich deutlich vom bereits mehr oder weniger entkalkten Unterboden abhebt. Erste Anzeichen von Versauerung und Tonverlagerung sind erkennbar.
- Zustandsstufe 5 kennzeichnet Böden, deren mäßig durchwurzelbarer Unterboden deutliche Anzeichen von Verdichtung und Staunässe aufweisen (Ausfällungen von Mangan- und Eisenoxiden, z.B. Abb. 3.1.2-3).
- Zustandsstufe 7 kennzeichnet einerseits flachgründige, steinreiche und trockene Böden, andererseits wenig durchwurzelbare, stark versauerte oder wegen

Verdichtung oder hoch anstehendem Grundwasser stark vernässte Böden.

#### Bodenzahl, Ackerzahl

Anhand von Bodenart, Entstehungsart und Zustandsstufe kann im Ackerschätzungsrahmen eine Zahlen-spanne abgeleitet werden, woraus der Bodenschätzer je nach Befund vor Ort eine Bodenzahl vergibt. Im Hinblick auf die je nach Standort verschiedenen Ernteerträge spiegeln die Differenzen bei den Bodenzahlen die Unterschiede der Bodenbeschaffenheit wider. Bei den Bodenzahlen handelt es sich um Verhältniszahlen.

Die Bezugsgrößen 600 mm durchschnittlicher Jahresniederschlag, 8 °C durchschnittliche Jahrestemperatur und weitgehend ebenes Gelände treffen bei vielen landwirtschaftlichen Nutzflächen nur selten zu. Daher sind bei der Schätzung oft Korrekturen erforderlich. Sie werden durch Ab- oder Zuschläge vorgenommen, woraus sich die Ackerzahl ergibt (z.B. sL 3Lö 71/84; 71 = Bodenzahl, 84 = Ackerzahl).

Ertragssteigerungen, die mit Hilfe von Betriebsmitteln (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Saatgut) erzielt werden, bleiben in der Bodenschätzung unberücksichtigt.

Bei der Bewertung von Bodenfunktionen oder der Zulässigkeit von Geländeauffüllungen sind die Klassenzeichen und/oder die Bodenzahlen maßgeblich.

#### A.5.1.3.1.2 Grünlandschätzungsrahmen

Der Grünlandschätzungsrahmen berücksichtigt, dass die Ertragsleistung von Grünland weniger von der Bodenart und vom geologischen Ausgangsmaterial der Bodenbildung, sondern viel mehr vom Niederschlag und von der Temperatur bzw. der Wasserversorgung abhängt (Tab. A.5.1.3.1.2-1 und -2). Im Grünlandschätzungsrahmen werden nur drei Zustandsstufen (I, II und III) und vier Bodenarten unterschieden (Tab. A.5.1.3.1.2-3).

Tab. A.5.1.3.1.2-1: Einteilung der Wärmestufen

| Wärmestufe | Jahresdurchschnittstemperatur |
|------------|-------------------------------|
| a          | > 8 °C                        |
| b          | 7,0 - 7,9 °C                  |
| c          | 5,7 - 6,9 °C                  |
| d          | ≤ 5,6 °C                      |

Tab. A.5.1.3.1.2-2: Einteilung der Wasserstufen

| Wasserstufe | Beschreibung                                                                                    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | frischer gesunder Standort, guter Süßgräserbestand                                              |
| 3           | trockene bzw. feuchte Standorte (ohne Staunässe) mit geringem Anteil an Hart- bzw. Sauergräsern |
| 5 / 5-      | sehr trockene bzw. nasse bis sumpfige Standorte mit hohem Anteil an Hart- bzw. Sauergräsern     |

#### Stufen (Zustandsstufen)

Stufe I steht für den günstigsten Bodenzustand, der etwa den Zustandsstufen 2 und 3 des Ackerschätzungsrahmens entspricht. Die Stufe II entspricht den Zustandsstufen 4 und 5 bzw. die ungünstige Stufe III (sauer, dicht) den Zustandsstufen 6 und 7 des Ackerschätzungsrahmens. Eine der Zustandsstufe 1 des Ackerschätzungsrahmens entsprechende Stufe gibt es im Grünlandschätzungsrahmen nicht, da solche Böden i. d. R. immer ackerbaulich genutzt werden.

#### Klima

Anders als bei der Schätzung ackerbaulich genutzter Böden wird bei der Schätzung von Grünlandböden von Beginn an die durchschnittliche Jahrestemperatur berücksichtigt. Da in Deutschland die Jahresniederschlagsmenge mit abnehmender Jahresdurchschnittstemperatur zunimmt (Kap. 2.4.1), genügt die Einteilung in drei bzw. vier Klimastufen (Tab. A.5.1.3.1.2-1).

#### Wasserverhältnisse

Bei der Schätzung wird der Einfluss von Grund-, Stau- und/oder Niederschlagswasser aufgrund der schwierigen Trennung zusammenfassend beurteilt. Da bei extensiver Nutzung der Pflanzenbestand die Wasserverhältnisse widerspiegelt (Abb. 5.2.3.7-3), wurde dies beim Entwurf der 5-stufigen Skala berücksichtigt. Wasserstufe 1 steht für günstige, Wasserstufe 5 für besonders ungünstige, zu nasse oder zu trockene Verhältnisse. Letztere sind durch ein hochgestelltes Minuszeichen für „zu trocken“ gekennzeichnet. Die Wasserstufen 2 und 4 sind sinngemäß Übergänge der in Tab. A.5.1.3.1.2-2 beschriebenen Stufen.

#### Grünlandgrundzahl, Grünlandzahl

Mit Hilfe der Faktoren Bodenart, Stufe, Klima und Wasserverhältnisse wird wie in der Ackerschätzung im Grünlandschätzungsrahmen innerhalb einer Zahlenspanne die Grünlandgrundzahl abgeleitet (7 - 88).

Einflüsse, die den Pflanzenwuchs und -ertrag mindern bzw. die Heugewinnung hemmen, wie z. B. Schattlagen, hohe Luftfeuchtigkeit, Nebel, Spätfröste, werden durch Abschläge von der Grünlandgrundzahl angerechnet. Das Ergebnis bildet die Grünlandzahl (z. B. L 1 a2 74/59; 74 = Grünlandgrundzahl, 59 = Grünlandzahl).

Bei der Bewertung von Bodenfunktionen oder der Zulässigkeit von Geländeauffüllungen sind die Klassenzeichen und/oder die Grünlandgrundzahlen maßgeblich.



Tab. A.5.1.3.1.2-3: Grünlandschätzungsrahmen

| Boden               |                  | Klima | Wasserverhältnisse |         |         |         |         |
|---------------------|------------------|-------|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| Art                 | Stufe            |       | 1                  | 2       | 3       | 4       | 5       |
| S<br>Sand           | I<br>(45 - 40)   | a     | 60 - 51            | 50 - 43 | 42 - 35 | 34 - 28 | 27 - 20 |
|                     |                  | b     | 52 - 44            | 43 - 36 | 35 - 29 | 28 - 23 | 22 - 16 |
|                     |                  | c     | 45 - 38            | 37 - 30 | 29 - 24 | 23 - 19 | 18 - 13 |
|                     | II<br>(30 - 25)  | a     | 50 - 43            | 42 - 36 | 35 - 29 | 28 - 23 | 22 - 16 |
|                     |                  | b     | 43 - 37            | 36 - 30 | 29 - 24 | 23 - 19 | 18 - 13 |
|                     |                  | c     | 37 - 32            | 31 - 26 | 25 - 21 | 20 - 16 | 15 - 10 |
|                     | III<br>(20 - 15) | a     | 41 - 34            | 33 - 28 | 27 - 23 | 22 - 18 | 17 - 12 |
|                     |                  | b     | 36 - 30            | 29 - 24 | 23 - 19 | 18 - 15 | 14 - 10 |
|                     |                  | c     | 31 - 26            | 25 - 21 | 20 - 16 | 15 - 12 | 11 - 7  |
| IS<br>lehmiger Sand | I<br>(60 - 55)   | a     | 73 - 64            | 63 - 54 | 53 - 45 | 44 - 37 | 36 - 28 |
|                     |                  | b     | 65 - 56            | 55 - 47 | 46 - 39 | 38 - 31 | 30 - 23 |
|                     |                  | c     | 57 - 49            | 48 - 41 | 40 - 34 | 33 - 27 | 26 - 19 |
|                     | II<br>(45 - 40)  | a     | 62 - 54            | 53 - 45 | 44 - 37 | 36 - 30 | 29 - 22 |
|                     |                  | b     | 55 - 47            | 46 - 39 | 38 - 32 | 31 - 26 | 25 - 19 |
|                     |                  | c     | 48 - 41            | 40 - 34 | 33 - 28 | 27 - 23 | 22 - 16 |
|                     | III<br>(30 - 25) | a     | 52 - 45            | 44 - 37 | 36 - 30 | 29 - 24 | 23 - 17 |
|                     |                  | b     | 46 - 39            | 38 - 32 | 31 - 26 | 25 - 21 | 20 - 14 |
|                     |                  | c     | 40 - 34            | 33 - 28 | 27 - 23 | 22 - 18 | 17 - 11 |
| L<br>Lehm           | I<br>(75 - 70)   | a     | 88 - 77            | 76 - 66 | 65 - 55 | 54 - 44 | 43 - 33 |
|                     |                  | b     | 80 - 70            | 69 - 59 | 58 - 49 | 48 - 40 | 39 - 30 |
|                     |                  | c     | 70 - 61            | 60 - 52 | 51 - 43 | 42 - 35 | 34 - 26 |
|                     | II<br>(60 - 55)  | a     | 75 - 65            | 64 - 55 | 54 - 46 | 45 - 38 | 37 - 28 |
|                     |                  | b     | 68 - 59            | 58 - 50 | 49 - 41 | 40 - 33 | 32 - 24 |
|                     |                  | c     | 60 - 52            | 51 - 44 | 43 - 36 | 35 - 29 | 28 - 20 |
|                     | III<br>(45 - 40) | a     | 64 - 55            | 54 - 46 | 45 - 38 | 37 - 30 | 29 - 22 |
|                     |                  | b     | 58 - 50            | 49 - 42 | 41 - 34 | 33 - 27 | 26 - 18 |
|                     |                  | c     | 51 - 44            | 43 - 37 | 36 - 30 | 29 - 23 | 22 - 14 |
| T<br>Ton            | I<br>(70 - 65)   | a     | 88 - 77            | 76 - 66 | 65 - 55 | 54 - 44 | 43 - 33 |
|                     |                  | b     | 80 - 70            | 69 - 59 | 58 - 48 | 47 - 39 | 38 - 28 |
|                     |                  | c     | 70 - 61            | 60 - 52 | 51 - 43 | 42 - 34 | 33 - 23 |
|                     | II<br>(55 - 60)  | a     | 74 - 64            | 63 - 54 | 53 - 45 | 44 - 36 | 35 - 26 |
|                     |                  | b     | 66 - 57            | 56 - 48 | 47 - 39 | 38 - 30 | 29 - 21 |
|                     |                  | c     | 57 - 49            | 48 - 41 | 40 - 33 | 32 - 25 | 24 - 17 |
|                     | III<br>(40 - 35) | a     | 61 - 52            | 51 - 43 | 42 - 35 | 34 - 28 | 27 - 20 |
|                     |                  | b     | 54 - 46            | 45 - 38 | 37 - 31 | 30 - 24 | 23 - 16 |
|                     |                  | c     | 46 - 39            | 38 - 32 | 31 - 25 | 24 - 19 | 18 - 12 |
| Mo<br>Moor          | I<br>(45 - 40)   | a     | 60 - 51            | 50 - 42 | 41 - 34 | 33 - 27 | 26 - 19 |
|                     |                  | b     | 57 - 49            | 48 - 40 | 39 - 32 | 31 - 25 | 24 - 17 |
|                     |                  | c     | 54 - 46            | 45 - 38 | 37 - 30 | 29 - 23 | 22 - 15 |
|                     | II<br>(30 - 25)  | a     | 53 - 45            | 44 - 37 | 36 - 30 | 29 - 23 | 22 - 16 |
|                     |                  | b     | 50 - 43            | 42 - 35 | 34 - 28 | 27 - 21 | 20 - 14 |
|                     |                  | c     | 47 - 40            | 39 - 33 | 32 - 26 | 25 - 19 | 18 - 12 |
|                     | III<br>(20 - 15) | a     | 45 - 38            | 37 - 31 | 30 - 25 | 24 - 19 | 18 - 13 |
|                     |                  | b     | 41 - 35            | 34 - 28 | 27 - 22 | 21 - 16 | 15 - 10 |
|                     |                  | c     | 37 - 31            | 30 - 25 | 24 - 19 | 18 - 13 | 12 - 7  |

### A.5.1.3.1.3 Bewertungsbeispiel

Insbesondere große Grundstücke, die vollständig oder teilweise landwirtschaftlich genutzt werden, können in Teilflächen verschiedene Boden- und Ertragsverhältnisse aufweisen und daher mit unterschiedlichen Klassenzeichen und Wertzahlen in der Bodenschätzung beschrieben und bewertet worden sein. Solche Teilflächen können sich auch auf benachbarte Grundstücke erstrecken.

In ihrer ursprünglichen Form liegen die Bodenschätzungsdaten nicht digital vor. Zur digitalen Nutzung der Bodenschätzungsdaten stehen in Baden-Württemberg die Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) und des Automatisierten Liegenschaftsbuchs (ALB) des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) zur Verfügung. Bei der Datenaufbereitung und -auswertung durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg werden die Inhalte der Bodenschätzung auf das Flurstück übertragen und mit folgenden Datenfeldern dokumentiert:

- Datenfeld „ANZ\_TF“: Anzahl der Teilflächen mit unterschiedlichen Klassenzeichen und Wertzahlen, die auf dem jeweiligen Grundstück vorliegen
- Datenfeld „KLZ“: Klassenzeichen der flächenmäßig dominierenden Teilfläche
- Datenfeld „KLZ\_FLUR“: Anteil der Teilfläche mit dem dominierenden Klassenzeichen am gesamten Grundstück (in %)
- Datenfeld „WZ1\_KLZ“: Zahlenbereich, in dem die Bodenzahl oder Grünlandgrundzahl liegt, bzw. bei mehreren Teilflächen die gemittelten Bodenzahlen oder Grünlandgrundzahlen liegen
- Datenfeld „WZ2\_KLZ“: Zahlenbereich, in dem die Ackerzahl oder Grünlandzahl liegt, bzw. bei mehreren Teilflächen die gemittelten Ackerzahlen oder Grünlandzahlen liegen
- Datenfeld „SONDER“: Anteil der Teilflächen mit Sonderzeichen am gesamten Grundstück (in %)
- Datenfeld „ANT\_ALK“: Anteil der geschätzten Flächen an der Grundstücksfläche (in %).

Bei der Bewertung der Bodenfunktionen auf der Grundlage der ALK/ALB-Datensätze muss darauf geachtet werden, Fehlinterpretationen zu vermeiden. Sie sind möglich,

wenn für Grundstücke zwei oder mehr Klassenzeichen bzw. Wertzahlen vergeben worden sind.

Die Abb. A.5.1.3.1.3-1 und -2 zeigen die Flächen eines Bebauungsplangebiets im Schwarzwald, das sich über drei große, teils forstwirtschaftlich genutzte Grundstücke erstreckt (rot umrandet).



Abb. A.5.1.3.1.3-1: Bewertung der Bodenfunktion 'Ausgleichskörper im Wasserkreislauf' anhand der Klassenzeichen für flächenmäßig dominierende Grundstücksteilflächen. Die Grenzen des Bauplangebiets sind rot dargestellt. Die Leistungsfähigkeit der Böden nimmt von gering (Bewertungsklasse 1; hellgrün) nach mittel (Bewertungsklasse 2; dunkelgrün) zu.



Abb. A.5.1.3.1.3-2: Bewertung der Bodenfunktion 'Ausgleichskörper im Wasserkreislauf' anhand der Klassenzeichen für alle Grundstücksteilflächen. Die Leistungsfähigkeit der Böden nimmt von gering (Bewertungsklasse 1; hellgrün) nach hoch (Bewertungsklasse 3; dunkelgrün) zu.

Die ALK/ALB-Datensätze geben nur für die flächenmäßig dominierenden Grundstücksteilflächen die Klassenzeichen (IS 4 D, SL 5 Vg) bzw. (IS 4 Vg) an. Das Datenfeld „ANZ\_TF“ enthält aber auch die Information, dass Teilflächen der Grundstücke mit mehreren, unterschiedlichen Klassenzeichen und Wertzahlen bewertet worden sind.

Werden beispielsweise zur Bewertung der Bodenfunktion „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“ die Klassenzeichen der dominierenden Teilflächen herangezogen, so führt dies zum Ergebnis in Abb. A.5.1.3.1.3-1. Im südlichen Plangebiet („KLZ\_FLUR“: IS 4 Vg) werden die Böden der Bewertungsklasse 1 (gering, hellgrün), im nördlichen Abschnitt („KLZ\_FLUR“: IS 4 D, SL 5 Vg) dagegen der Bewertungsklasse 2 (mittel, dunkelgrün) zugeordnet.

Bewertet man aufgrund der Informationen aus Datenfeld „ANZ\_TF“ die analogen Bodenschätzungsdaten, ergibt sich ein realistischeres Bild mit den entsprechenden Konsequenzen beim naturschutzrechtlichen Ausgleich (Abb. A.5.1.3.1.3-2). Die überplanten Böden werden größtenteils der Bewertungsklasse 3 (hochwertig, Klassenzeichen L I a2, L II a2 und L II a3) zugeordnet. Eine geringe bzw. mittlere Leistungsfähigkeit (Bewertungsklasse 1 und 2) weisen nur die Böden in den Hangbereichen auf, die überwiegend außerhalb des Bebauungsplangebiets liegen (z.B. Klassenzeichen SL 5 Vg, IS 4 Vg).



### **A.5.3 Umgang mit Bodenaushub**

#### **A.5.3.1 Sickerwasseruntersuchungen im Hinblick auf die Entsorgung von bergbau- und verhüttungsbedingt schadstoffhaltigem Erdaushub**

Seit Beginn der ersten Bodenuntersuchungen zum Umfang und zu den Auswirkungen bergbau- und verhüttungsbedingt erhöhter Schadstoffgehalte in den Böden des Ortenaukreises bestand insbesondere in den Schwerpunktbereichen bei Biberach und Lahr das Problem, anfallenden schadstoffhaltigen Erdaushub ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten bzw. zu beseitigen.

Planungen, größere Massen an Erdaushub auf Grundlage von § 12 Abs. 10 BBodSchV innerhalb der betroffenen Gebiete zu verwerten, scheiterten entweder an der ungeeigneten Geländemorphologie, der zu niedrigen Vorbelastung am Auftragsstandort oder an den Eigentumsverhältnissen. Lange Zeit war es daher nur möglich, entsprechend belasteten Erdaushub auf einer kreiseigenen Hausmülldeponie zu beseitigen.

In Verbindung mit den hohen Deponierungskosten war zu erwarten, dass in den betroffenen Gebieten eine bauliche Entwicklung stark eingeschränkt wird. In Anbetracht der geringen Beeinträchtigung von Schutzgütern (Kap. 4.2.3) war außerdem fraglich, ob die Bevölkerung die daraus resultierende finanzielle Mehrbelastung akzeptiert oder - wie vereinzelt erfolgt - andere Wege sucht, sich des Erdaushubs mit erhöhten Schadstoffgehalten zu entledigen.

Um die Erdaushubproblematik einer akzeptablen und für alle befriedigenden Lösung zuzuführen, hat das Landratsamt Ortenaukreis auf der Grundlage der Erkenntnisse über die Schadstoffbindungsformen (Kap. A.4.2.1.1) dem Regierungspräsidium Freiburg vorgeschlagen, den bergbau- und verhüttungsbedingt erhöht schadstoffhaltigen Erdaushub auf der kreiseigenen Erdaushubdeponie „Rebio“ abzulagern. Diese Deponie - ein ehemaliges Steinbruchgelände - liegt verkehrsgünstig auf einem Bergkamm zwischen den früheren Bergbaurevieren der Stadt Lahr und der Gemeinde Biberach.

Hinsichtlich einer möglichen Grundwasserbeeinträchtigung wurde mit dem Regierungspräsidium Freiburg vereinbart, die Stabilität der Bindung von Blei im Boden zunächst mit Sickerwasseruntersuchungen zu belegen. Maßgeblich dafür waren Bedenken, wonach bei den Aushubarbeiten und beim Transport im Erdaushub eine Änderung des physiko-chemischen Milieus eintreten könnte, die zur Schadstoffmobilisierung führt.

Dazu hat das Landratsamt auf der stillgelegten Hausmülldeponie „Vulkan“ bei Haslach eine Versuchsanlage eingerichtet, an der mit finanzieller Unterstützung durch das Regierungspräsidium die Sickerwasserkonzentrationen im schadstoffhaltigen Erdaushub über sechs Monate beobachtet wurden. Die Versuchsanlage bestand aus zwei jeweils 100 m<sup>2</sup> großen Feldern, an deren Basis unbelastetes Bodenmaterial in einer Mächtigkeit von 1 m angehäuft wurde. Auf beiden Feldern wurde anschließend ebenfalls 1 m mächtig erhöht schadstoffhaltiger Erdaushub aus den ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten aufgetragen.

Zur Gewinnung des Bodensickerwassers wurden Saugkerzen sowohl kurz vor als auch nach dem Übergang in das unterliegende, unbelastete Bodenmaterial eingebaut. Einen Überblick über den Aufbau der Versuchsanlage gibt Abb. A.5.3.1-1. Dort sind u. a. die pH-Werte der eingebauten Bodenmaterialien sowie wesentliche Informationen zu den eingesetzten Saugkerzen angegeben.

Die Bodensickerwässer wurden während des 6-monatigen Untersuchungszeitraums vom 1. November 2001 bis 30. April 2002 kontinuierlich beprobt und halbmönatlich untersucht. Die angelegte Saugspannung von 0,3 bar gewährleistete, dass nur Bodenwasser aus den schnell dränenden Grob- bzw. langsam dränenden Mitelporen und damit das tatsächliche Bodensickerwasser erfasst wurde. Die eingesetzten Bodenmaterialien sowie die Bodensickerwasser-Proben wurden auf Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink untersucht. Der Übersichtlichkeit wegen sind im Folgenden nur die Ergebnisse für den Leitparameter Blei dargestellt.

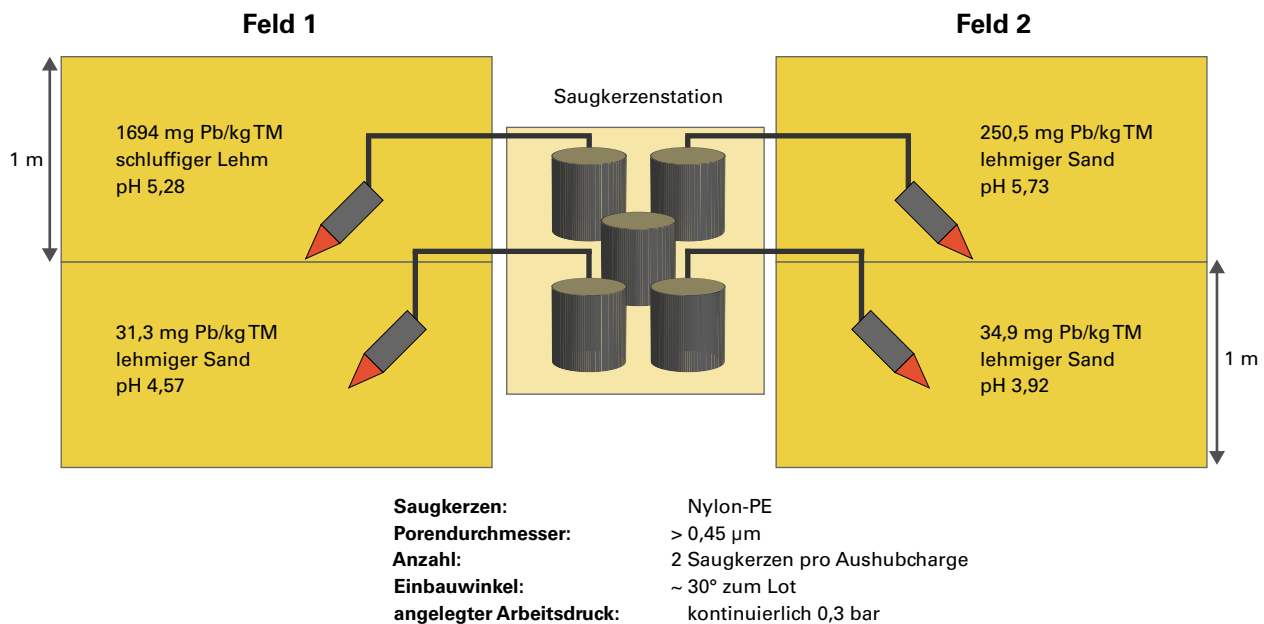


Abb. A.5.3.1-1: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Abb. A.5.3.1-2 und -3 zeigen die Bleikonzentrationen, die im sechsmonatigen Untersuchungszeitraum in den gesammelten Bodensickerwässern aus belasteten und unbelasteten Bodenmaterialien der Versuchsanlage gemessen worden sind.

Danach unterschritten die Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser der bergbau- und verhüttungsbedingt erhöht schadstoffhaltigen Erdaushubmaterialien nahezu ausschließlich die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser. Nur einmal lag

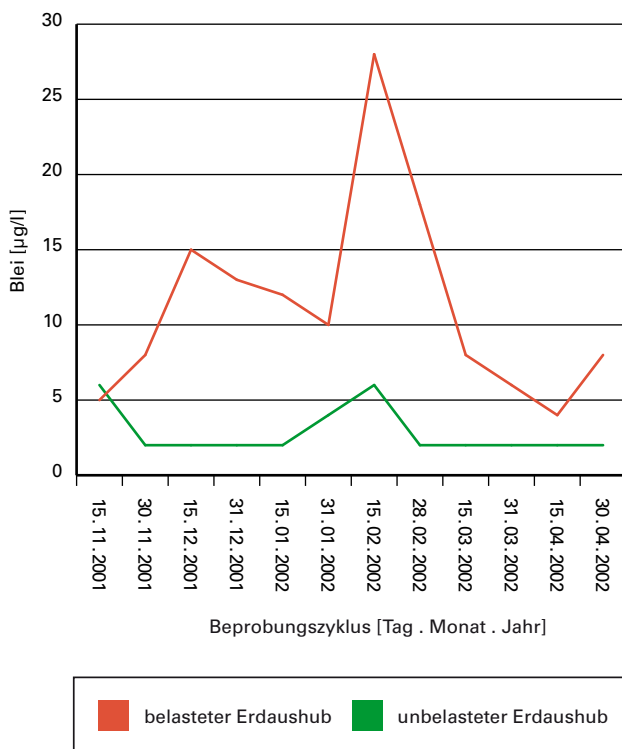


Abb. A.5.3.1-2: Zeitlicher Verlauf der Bleikonzentrationen im Sickerwasser von Feld 1

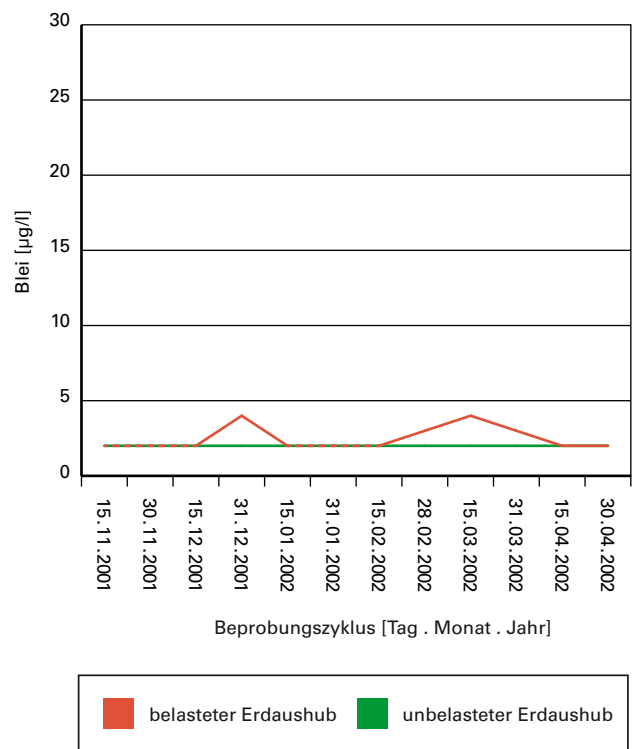


Abb. A.5.3.1-3: Zeitlicher Verlauf der Bleikonzentrationen im Sickerwasser von Feld 2

die Bleikonzentration im Sickerwasser des höher belasteten Bodenmaterials von Feld 1, das direkt von einem ehemaligen Schmelzenstandort in Biberach stammt, mit 28 µg Blei/l etwas über dem Prüfwert der BBodSchV von 25 µg Blei/l (Abb. A.5.3.1-2).

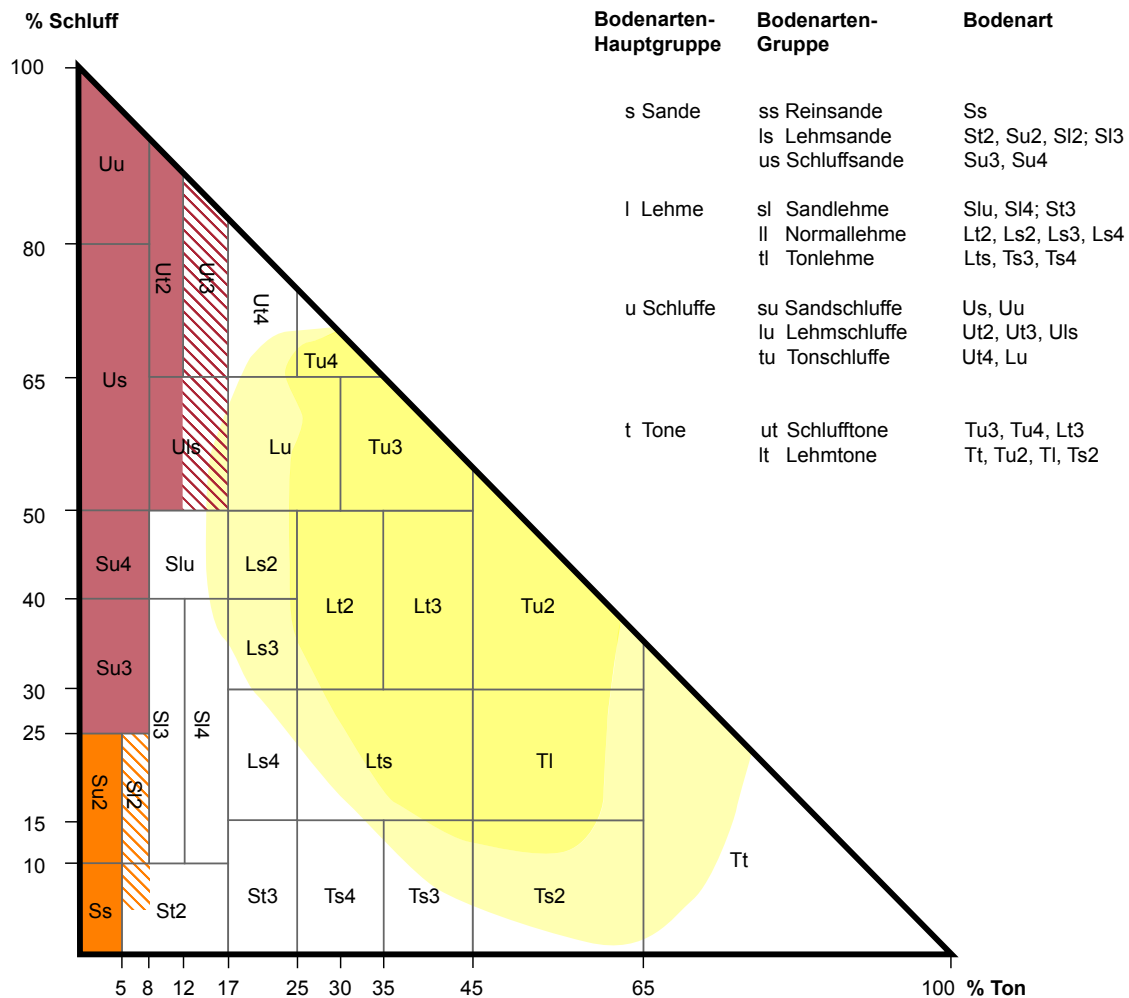
Im Sickerwasser, das in Mitte der Basisschüttung aus unbelastetem Bodenmaterial gesammelt wurde, unterschritten die Schadstoffkonzentrationen stets deutlich die stoffspezifischen Prüfwerte. Gegenüber den Hintergrundkonzentrationen, die bundesweit in unbelasteten Böden von Lysimeterstationen ermittelt wurden [BIELERT 1999], waren die Sickerwasserwerte im unbelasteten Bodenmaterial von Feld 1 mit maximal 6 µg Blei/l zeitweise erhöht. Die Konzentrationen im Sickerwasser aus dem unterliegenden, unbelasteten Bodenmaterial von Feld 2 unterschritten stets die analytische Bestimmungsgrenze von 2 µg Blei/l (Abb. A.5.3.1-3).

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse hat der Eigenbetrieb Abfallwirtschaft des Ortenaukreises beim Regierungspräsidium Freiburg beantragt, die Zulassung der kreiseigenen Erdaushubdeponie „Rebio“ für bergbau- und verhüttungsbedingt erhöht schadstoffhaltigen Erdaushub aus den Gemeinden Biberach und der Stadt Lahr zu erweitern. Die Genehmigung des Regierungspräsidiums erging im Juli 2004. Der Erdaushub kann seither zum Preis wie unbelasteter Bodenaushub auf der kreiseigenen Erdaushubdeponie abgelagert werden.



### A.5.3.2 Bodenauftrag auf durchwurzelbare Bodenschichten

#### A.5.3.2.5 Nachsorge



#### Bodenartliche Abgrenzung tiefenlockerungsfähiger Böden

- Hauptbereich der lockerungsfähigen Böden (RT)
- Grenzbereich der lockerungsfähigen Böden (RT)

#### Verschlämmungsneigung bei schluff- und feinsandreichen Böden (überwiegende Kornfraktion zwischen 2 und 125 µm im Bodenartendiagramm)

- bei schluffreichen Schichten - sehr stark
- bei schluffreichen Schichten - stark
- bei feinsandreichen Schichten - sehr stark
- bei feinsandreichen Schichten - stark

Abb. A.5.3.2.5-1: Abgrenzung tiefenlockerungsfähiger Böden sowie Verschlämmungsneigung bei schluff- und feinsandreichen Bodenarten; Quellen: Müller 1985; Borchert, Graf 1985

## A.5.4 Naturnahe Regenwasserversickerung

### A.5.4.4 Methoden zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten

Wichtigste Voraussetzung für die Bemessung der Versickerungsrate ist die Kenntnis des Durchlässigkeitsbeiwerts am Standort der geplanten Versickerungsanlage. Im Gelände kann der  $k_f$ -Wert anhand einer Reihe von Infiltrations- und Sickerungsversuchen bestimmt werden. Die Versuche sollten im Gelände einfach durchzuführen sein und die Auswertung keinen hohen Aufwand erfordern.

Bodenkundliche Aufnahmen des Bodenaufbaus und der Untergrundverhältnisse müssen den Infiltrations- und Sickerungsversuchen stets vorangehen. Nur so lassen sich die Versuchsergebnisse interpretieren und es kann abgeschätzt werden, wie viele Einzelversuche erforderlich sind. Dazu ist i. d. R. die Auswertung vorhandener Bodenkarten mit einer anschließenden Prüfung durch einfache Sondierungen mit einem Handbohrstock ausreichend.

Die versickerungswirksame Porosität des Bodens kann - wie die Lagerungsdichte - kleinräumig wechseln. Auch bei standardisierten Messmethoden können daher die Versuchsergebnisse streuen. Soll bei Muldenanlagen und Mulden-Rigolensystemen der Bodenkörper weitgehend erhalten werden, ist bei den Geländeuntersuchungen zu beachten, dass Einzelmessungen auf einer ausreichend großen Fläche mehrfach durchgeführt werden [BURGHARDT 1999].

Für Flächen- oder Muldenversickerungen hat sich die Methode mit dem Doppelringinfiltrometer bewährt. In tieferen Bodenschichten im Bereich von Rigolen ist die Schurfversickerung zu empfehlen (Abb. A.5.4.4-1 und -2). Bei beiden Methoden wird zunächst durch längere Wasserzugabe ein weitgehend wassergesättigter Sickerraum geschaffen.

Anschließend wird die Wassermenge bestimmt, die pro Zeiteinheit zugegeben werden muss, um den Wasserstand im Innenring des Doppelringinfiltrometers bzw. im Schurf konstant zu halten. Die gleichzeitige Zugabe und Versickerung von Wasser im Außenring des Doppelringinfiltrometers soll eine horizontale Sickerströmung aus dem Innenring verhindern [OLZEM 1999].



Abb. A.5.4.4-1: Prüfung der Wasserleitfähigkeit mit einem Doppelringinfiltrometer; Bild: G. Glomb.



Abb. A.5.4.4-2: Prüfung der Wasserleitfähigkeit im Unterboden mittels Schurfversickerung; Bild: H. Seitz

# Literaturverzeichnis

- ABETZ, K. (1955): Bäuerliche Waldwirtschaft - Dargestellt an den Verhältnissen in Baden. - 348 Seiten, Parey, Hamburg Berlin
- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 5. verbesserte und erweiterte Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- AGRICOLA, G. (1556): De Re Metallica Libri XII: Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, gebundene Ausgabe Juli 2003 - Fourier Verlag, Wiesbaden
- Aha!BC.de: Internet-Magazin mit allgemeinverständlichen Informationen rund um das Thema Boden; <http://www.ahabc.de/entwicklung/stoffneubildung/tonminerale.html>
- AKKAN, Z., FLAIG H. & K. BALLSCHMITTER (2003): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel in der Umwelt - Emissionen, Immissionen und ihre human- und ökotoxikologische Bewertung. - Schadstoffe und Umwelt, Band 15, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- ALLOWAY, B. J. [Hrsg.] (1999): Schwermetalle in Böden - Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. - Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- BAATZ, K. (1988): Ultramafite in Schwarzwald und Vogesen. - Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- BACHMANN, H.-G. (2004): Das Silber aus dem Stein bekommen: Archäometallurgische Überlegungen zum Nordschwarzwälder Hüttenwesen. - MARKL G. & LORENZ S. [Hrsg.]: Silber Kupfer Kobalt - Bergbau im Schwarzwald. - Markstein Verlag, Filderstadt 2004, Seiten 81-98
- BAUSKE, B. (1994): Einfluss von Salzlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung auf die Mobilität von Schwermetallen in Straßenrandböden und im Laborauslaugverfahren. - Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 24, Universität Hamburg
- BBA Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (2002 ff):  
- in: ROSSBERG, D., GUTSCHE, V., ENZIAN, S. & M. WICK - Neptun 2000 - Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Ackerbau Deutschlands. Berichte aus der BBA, Heft 98, 2002  
- in: ROSSBERG, D. - NEPTUN 2001 - Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Obstbau, im Hopfen und in Erdbeeren. Berichte aus der BBA, Heft 122, 2003  
- in: ROSSBERG, D. - NEPTUN 2003 - Erhebung der tatsächlichen Pflanzenschutzmittel-Anwendungen im Weinbau. Berichte aus der BBA, Heft 124, 2004  
- in: ROSSBERG, D. - NEPTUN 2004 - Obstbau. Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel. Berichte aus der BBA, Heft 129, 2006  
- in: ROSSBERG, D. - NEPTUN 2005 - Zuckerrüben. Statistische Erhebung zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis, 37 S. Berichte aus der BBA, Heft 137, 2006  
- in: ROSSBERG, D. - NEPTUN 2005 - Gemüsebau. Statistische Erhebung zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis, 66 S. Berichte aus der BBA, Heft 139, 2007
- BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz. - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. <http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/>
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. - Bundesgesetzblatt, Nr. 36, Teil I, Seite 1554 ff., 12. Juli 1999, Bonn
- BBR (2009): Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR 2009): <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2898>
- BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen - Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. - 3., erweiterte Auflage, Gustav Fischer Verlag, Jena - Stuttgart



- BESNARD, E., CHENU C. & M. ROBERT (2001): Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils. - *Environmental Pollution*, Band 112, Seiten 329-337, Elsevier
- BfR Bundesinstitut für Risikobewertung (2004): Stellungnahme zu Schwermetallbelastungen in Nebenprodukten der Schlachtung. FB 3 - 5110-02-230031 vom 20.02.2004
- BfR (2010): Bewertung von Dioxingehalten in Eiern aufgrund einer Warnung im EU-Schnellwarnsystem. - Stellungnahme Nr. 20/2010 des Bundesinstitut für Risikobewertung vom 05. Mai 2010, Berlin
- BGK Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2007): Auswertung der RAL-Gütesicherung Komposte nach RAL-GZ 251 der Jahre 2004 und 2005 durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln, unveröffentlicht, zitiert in LTZ (2008)
- BIELERT, U. (1999): Hydrogeochemie von Spurenelementen in Sicker-, Grund- und Trinkwässern - von der Sickerwasserpas-sage bis zur Aufbereitung. - Dissertation, Georg-August-Uni-versität Göttingen
- BlmSchV 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (1990): "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbren-nung von Abfällen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2003 (BGBl. I, S. 1633), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. Januar 2009 (BGBl. I, S. 129) geändert worden ist"
- BioAbfV Bioabfallverordnung (2012): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirt-schaftlich und gärtnerisch genutzten Böden in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 Bundesgesetzblatt, Jahr-gang 2013, Teil I, Nr. 16, Seite 658 ff., Bonn
- BLIEDTNER, M. & M. MARTIN (1986): Erz- und Minerallagerstät-ten des Mittleren Schwarzwaldes - Eine bergbaugeschichtliche und lagerstättenkundliche Darstellung. - Geologisches Landes-amt Baden-Württemberg [Hrsg.], Freiburg i. Br.
- BLIEDTNER, M. & M. MARTIN (1988): Erz- und Minerallagerstät-ten des Mittleren Schwarzwald - eine bergbaugeschichtliche und lagerstättenkundliche Darstellung. - Geologisches Landes-amt Baden-Württemberg [Hrsg.], Freiburg i. Br.
- BLUME, H.-P. (1990): Handbuch des Bodenschutzes. - ecomed Verlag, Landsberg/Lech
- BNatSchG (2009): Bundesnaturschutzgesetz. - Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. [http://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg\\_2009/](http://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/)
- BOLLER, M. (2004): Schwermetallemissionen von Dächern und Straßen.  
- in: Stoffströme in Flussgebieten, Siedlungswasserwirtschaftli-ches Seminar WS 2003/04, Seiten 15-33, Institut für Siedlungs-wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 13. Februar 2004
- BORCHERT, H. & R. GRAF (1985): Über die Entwicklungsten-denz des Bodengefüges in tiefgelockerten Böden aus verschie-denen geologischen Substraten  
- in: Die Gefügemelioration durch Tiefenlockerung - Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse, DVWK-Schriften Band 70, Sei-ten 75-138, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- BRAUKMANN, U. (1995): Biologische und chemische Untersu-chungen zur Gewässerversauerung in Baden-Württemberg.  
- in: Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen. - eco-med Verlagsgesellschaft, Landsberg, 1995
- BRÜMMER, G. W., GERTH, J. & U. HERMS (1986): Heavy metal species, mobility and availability in soils. - *Zeitschrift für Pflan-zenernährung und Bodenkunde* 149, Seiten 382-398
- BUBERL, H. G., VON WILPERT, K., TREFZ-MALCHER, G. & E. E. HILDEBRAND (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg. Ergebnisse der Bodenzustandserfas-sung im Wald 1989-92 (BZE). Mitteilungen der Forstliche Ver-suchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Seiten 182, 99
- BÜRGER, K. (2004): Veränderung von Waldökosystemen auf-grund historischer Nutzung im Schwarzwald und in den Vo-gesen. - Dissertation an der geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg i. Br. <http://freidok.uni-freiburg.de/volltexte/1538>

- BURGHARDT, W. (1999): Zur Konzeption der Bodenuntersuchungen für eine Regenwasserversickerung in Mulden.  
- in: BUNDESVERBAND BODEN [Hrsg.]: Regenwasserversickerung und Bodenschutz. BVB-Materialien, Band 2, Seiten 16-30, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- CESARZ, R., HÖLSCHER, T. & K. MÜLLER-SÄMANN (2006): Modellierung von Bodenerosion/Oberflächenabfluss in den Kleinzugsgebieten Schlossberg-Maiertal der Gemarkung Friesenheim und in Efringen-Kirchen im Landkreis Lörrach mit dem Computermodell Erosion-3D. - Agentur für Nachhaltige Nutzung von Agrarlandschaften (ANNA) im Auftrag des Landes Baden-Württemberg, Landesanstalt für Pflanzenbau (unveröffentlicht)
- CLUA Chemische Landesuntersuchungsanstalt Freiburg (1994): Untersuchungsergebnisse von Lebensmitteln auf Dioxine und PCB. - Chemische Landesuntersuchungsanstalt Freiburg, Stellungnahme an die Stadt Kehl vom 24.08.1994, Az.: 33/4/5701/010000
- CURRLE, O., BAUER, O., HOFÄCKER W., SCHUMANN, F. & W. FRISCH (1983): Biologie der Rebe - Aufbau, Entwicklung, Wachstum. - D. Meininger Verlag und Druckerei GmbH, Neustadt an der Weinstraße
- CVUA Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg (2005): Bio-Monitoring 2004 in Kehl - Abschlussbericht über Untersuchungen. - Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg, 18.02.2005, Az.: 33/5477.10-15
- CVUA (2006): Untersuchung einer Ei- und Bodenprobe auf dem Gelände des Kleintierzüchtervereins Kehl auf Dioxine und dioxinähnliche PCB. - Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg, 07.06.2006, Az.: 33/053003456ff-050100
- DBG Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1992): Strategien zur Reduzierung standort- und nutzungsbedingter Belastungen des Grundwassers mit Nitrat - Arbeitsgruppe Bodennutzung in Wasserschutz- und -schongebieten der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Oldenburg
- DIN 19528 (2009): Elution von Feststoffen - Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen, 24 Seiten - Beuth Verlag, Berlin
- DIN 19708: Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. - Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 19738: Bodenbeschaffenheit - Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. - Beuth Verlag, Berlin
- DIN V 19736: Ableitung von Konzentrationen organischer Stoffe im Bodenwasser. - Vornorm, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 1998, Beuth Verlag, Berlin
- DLG-LLFG (2007): Hinweise zur Kalkdüngung. - DLG-Merkblatt, 2. überarbeitete Auflage, Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V., Frankfurt a.M., Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau Sachsen-Anhalt, Bernburg
- DüMV Düngemittelverordnung (2008): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln - Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2008, Teil I, Seite 2524 ff., 16. Dezember 2008, Bonn
- DüMV (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln - Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2012, Teil I, Seite 2482 ff., 5. Dezember 2012, Bonn
- DüV Düngeverordnung (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen - Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2007, Teil I, Nr. 7, Seite 222 ff., 5. März 2007, Bonn
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. - Arbeitsblatt A 138, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWD Deutscher Wetterdienst (2007): Mittelwerte der Periode 1961 bis 1990, [http://www.dwd.de/de/funde/klima/klimadaten/online/nat/index\\_mittelwerte.htm](http://www.dwd.de/de/funde/klima/klimadaten/online/nat/index_mittelwerte.htm)

- EBERLE, J., EITEL, B., BLÜMEL, W. D. & P. WITTMANN (2010): Deutschlands Süden - vom Erdmittelalter zur Gegenwart. - 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- EROSIONSCHV Erosionsschutzverordnung (2010): Verordnung des Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung und Verbraucherschutz zur Einteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung (Erosionsschutzverordnung - ErosionsSchV) vom 29. Mai 2010, GBl. Nr. 9 vom 20.06.2010, Seiten 457-463
- ESCHNAUER, H. R. & W. SCHOLL (1995): Zur Ökologie und Önologie von Mineralstoffen und Spurenelementen aus Ober-Ingelheim/Rheinhessen. - Geisenheimer Berichte, Band 19, Veröffentlichungen der Forschungsanstalt Geisenheim, Geisenheim
- EU Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung. - ABl. L 140 vom 30.05.2002, S. 10 ff., zuletzt geändert durch Art. 1 ÄndVO (EU) 107/2013 vom 5. 2. 2013, ABl. Nr. L 35 S. 1
- FINK, A. (1992): Dünger und Düngung - Grundlagen und Anleitung zur Düngung von Kulturpflanzen. - 2. neubearbeitete Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- FISCHER, L. (2000): Untersuchungen zur Ad-/Desorption und Diffusion von Schwermetallen und Aluminium mit Geothiten unterschiedlicher Kristallinität - Experimentelle Ergebnisse und Prozessmodellierung. - Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 30, Institut für Bodenkunde, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn
- FISCHER, L. & G. W. BRÜMMER (1993): Schwermetallbindung durch Geothit: Adsorption, Diffusion und Festlegung verschiedener Schwermetalle. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft Band 72, Seiten 335-338, Kiel
- FLL FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU e.V. (2008): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen - Dachbegrünungsrichtlinie. - Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., Bonn
- FRANK, E. (1927): Über Bodenazidität im Walde. Freiburger Druck- und Verlagsgesellschaft Muth, 155 S., Freiburg
- FREDE, H.-G. & S. DABBERT (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. ecomed-Verlag, Landsberg 1. Auflage 1998, 2. Auflage 1999, 451 Seiten
- FRIEDMANN, A. (2000): Die spät- und postglaziale Landschafts- und Vegetationsgeschichte des südlichen Oberrheintieflands und Schwarzwalds. Freiburger Geographische Hefte 62, 222 S.
- FVA Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (2000): Bodenschutzkalkung im Wald. - Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Blatt 50/2000, Freiburg
- GASSMANN, G. (1991): Der südbadische Eisenerzbergbau - Geologischer und montanhistorischer Überblick. - Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- GEBHARDT, H. (1995): Ökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg - Auswirkungen der Gewässerversauerung auf Fische in Fließgewässern. - in: Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen. - ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg, 1995
- GERTH, J. (1985): Untersuchungen zur Adsorption von Nickel, Zink und Cadmium durch Bodentonfraktionen unterschiedlichen Stoffbestandes und verschiedener Bodenkomponenten. - Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel
- GEYER, M. & M. P. GWINNER (2011): Geologie von Baden-Württemberg. - 5., völlig neu bearbeitete Auflage, herausgegeben von Geyer M., Nitsch E. und Simon T., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- GHANEM, A. S. (1976): Altersstellung und anthropogene Beeinflussung von Parabraunerden in der Emmendinger Vorbergzone. - Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 5, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.
- GOLDENBERG, G. (1996): Umweltbeeinflussung durch das frühe Montanwesen - Beispiele aus dem Schwarzwald. - in: JOCKENHÖVEL A. (1996): Bergbau, Verhüttung und Waldnutzung im Mittelalter - Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. - Beiheft Nr. 121 zur Vierteljahrschrift für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte, Franz Steiner Verlag, Stuttgart



- GRANT, C. A., BAILEY, L. D., MCLAUGHLIN, M. J. & B. R. SINGH (1999): Management Factors which Influence Cadmium Concentrations in Crops.  
- in: MCLAUGHLIN M. J. and B. R. SINGH [eds.]: Cadmium in Soils and Plants. - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Bosten London
- HAIDER, K. & A. SCHÄFFER (2000): Umwandlung und Abbau von Pflanzenschutzmitteln in Böden - Auswirkungen auf die Umwelt. - Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
- HAMANN, L. (1990): Konzentration und Verhalten von Chrom in Böden, Pflanzen, Sicker- und Grundwasser gerbereischlamm-gedüngter Ackerflächen in der Umgebung von Weinheim (Rhein-Neckar-Kreis). - Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, Band 40, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- HAPKE, H. J. (2002): Veterinärmedizinische und pharmakologische Aspekte von Spurenelementen und unerwünschten Stoffen.  
- in: KTBL-Schriften 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, Seiten 23-30, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- HARITOPOULOU, T. (1996): Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle in urbanen Entwässerungssystemen - Aufkommen, Transport und Verbleib. - Schriftenreihe des Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Band 77, Universität Karlsruhe (TH)
- HEESCHEN, W. & A. BLÜTHGEN (1981): Untersuchungen der Bleikontamination der Milch.  
- in: Zum Carry-over von Blei, Schriftenreihe des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 254, Seiten 53-60, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup
- HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale. - Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- HEITEFUSS, R. (1987): Pflanzenschutz - Grundlagen der praktischen Phytomedizin. - 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
- HERRMANN, L. & K. STAHR (1998): Environment and Soilsapes of South-West Germany. - 16th World Congress of Soil Science. - Tour Guide, Excursion B6. - Hohenheimer bodenkundliche Hefte 47, Stuttgart
- HILDEBRAND, E. E., VON WILPERT, K. & H. G. BUBERL (1996): Erkenntnismöglichkeiten an Waldökosystemen im Spannungsfeld zwischen Großräumiger Mustererkennung und dem „eiersenen Gesetz des Örtlichen“. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Jg. 167, H. 9-10, Seiten 174-178
- HIMMLER, H. (1995): Zur Vergesellschaftung von Wassermossen in unterschiedlich sauren Bächen.  
- in Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen. - eco-med Verlagsgesellschaft, Landsberg, 1995
- HUTH, B., RENNERT, S., GROTHKOPP, H. & K. LÜTZNER (1995): Schadstoffeintrag durch atmosphärische Depositionen.  
- in: Schadstoffe im Regenfluss III - Präsentation eines BMBF-Projektes, Schriftenreihe des Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Band 73, Seiten 169-197, Universität Karlsruhe
- IPE Bonn - Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn (2001): Ergebnisse des UBA-Vorhabens „Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben“ (UBA 2004) - Ergebnisse Teilprojekt Bonn, unveröffentlicht
- JOCKENHÖVEL, A. (1996): Bergbau, Verhüttung und Waldnutzung im Mittelalter; Auswirkungen auf Mensch und Umwelt Ergebnisse eines Internationalen Workshops (Dillenburg, 11.-15. Mai 1994. Wirtschaftshistorisches Museum "Villa Grün"), 1. Auflage 1996, Franz Steiner Verlag, Stuttgart
- KAUSS, D. (1989): Von der historischen Ortenau zum Ortenaukreis.  
- in: Daheim im Ortenaukreis - Stadler Verlagsgesellschaft, Seiten 209-231, Konstanz, 1989
- KEPPLER, J. (1999): Modellversuche und Geländeuntersuchungen zur Kinetik der Schwermetall-Festlegung sowie zur Löslichkeit, Mobilisierung und Verlagerung von Schwermetallen in belasteten Böden. - Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 27, Institut für Bodenkunde, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn

KESSLER, G. (1994): Steinkohlen-Bergbau.

- in: Erläuterungen zu Blatt 7613 Lahr/Schw.-Ost - Geologische Karte 1:25 000 von Baden-Württemberg, Seiten 229-241, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg 1994

KESSLER, G. & J. LEIBER (1994): Erläuterungen zu Blatt 7613 Lahr/Schw.-Ost - Geologische Karte 1:25 000 von Baden-Württemberg, Seiten 220-244, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg 1994

KLIWA Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (2005a): Vergleich und Bewertung der regionalen Klimaszenarien, - <http://www.kliwa.de/download/kurzregioklisze.pdf>

KLIWA (2005b): Der Klimawandel in Baden-Württemberg - in: KLIWA - Klimawandel und Wasserwirtschaft. Kurzbericht Klimawandel, April 2007 - <http://www.kliwa.de/download/kliwazukunftsbew.pdf>

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. (Kliwa-Arbeitskreis: LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, BLfU Bayerisches Landesamt für Umwelt, DWD - Deutscher Wetterdienst). Bruchsal

KÖLLE, W. (2001): Wasseranalysen - richtig beurteilt, Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe, Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung und EU-Trinkwasserrichtlinie - Wiley VCH, Weinheim

KÖNIG, J. & E. BALEANZ (1991): Charakterisierung anthropogener Stäube in der Außenluft an typischen Standorten in Baden-Württemberg - zeitliche und örtliche Verteilung ausgewählter toxischer und kanzerogener Staubbestandteile. Projekt Umwelt und Gesundheit, Forschungsbericht KfK-PUG 2, Teil II: Organische Staubbestandteile, Kernforschungszentrum Karlsruhe

KREUZE, W. & W. KRACKE (1981): Untersuchungen zum Übergang von Blei auf Fleisch und Organe von Rindern unter natürlichen Haltungs- und Fütterungsverhältnissen.

- in: Zum Carry-over von Blei, Schriftenreihe des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 254, Seiten 43-52, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup

KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (1995): Schwermetalle in der Landwirtschaft. - Arbeitspapier 217, Darmstadt

KTBL (2005): Schwermetalle und Tierarzneimittel in Wirtschaftsdüngern. - KTBL-Schrift 435, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

KÜSTER, H. (1998): Offenland - Wald - Kulturlandschaft, Gedanken zur holozänen Landschaftsentwicklung.

- in: MÄCKEL R. & A. FRIEDMANN [Hrsg.]: Wandel der Geo-Biosphäre in den letzten 15 000 Jahren im südlichen Oberrheintiefland und Schwarzwald. - Freiburger Geographische Hefte, Heft 54, Seiten 61-72, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

LABO Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden; 3. überarbeitete und ergänzte Auflage - [http://www.labo-deutschland.de/documents/LABO-HGW-Text\\_4e3.pdf](http://www.labo-deutschland.de/documents/LABO-HGW-Text_4e3.pdf)

LABO (2008): Abschlussbericht von Overesch M., Düster L., Greff K. & T. Mansfeldt: Ermittlung und Beurteilung des Mobilisierungspotenzials von Arsen in Böden

LABO (2009): Bodenschutz in der Umweltprüfung nach BauGB - Leitfaden für die Praxis der Bodenschutzbehörden in der Bauleitplanung. - Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden und Abfall 2006; LABO-Projekt 1.06: Berücksichtigung der Bodenschutzbelange in der Umweltprüfung nach BauGB - [https://www.labo-deutschland.de/documents/umweltpruefung\\_494\\_2c1.pdf](https://www.labo-deutschland.de/documents/umweltpruefung_494_2c1.pdf)

LABO (2012): Anbau von Nutzpflanzen auf naturbedingt mit Arsen belasteten Böden. Handlungsempfehlungen für Landwirte und Gärtner

Landratsamt Ortenaukreis (2002): Versuch zum Schadstoffaustrag aus hoch bzw. erhöht schadstoffhaltigem Erdaushub ehemaliger Bergbau- und Verhüttungsgebiete der Stadt Lahr und der Gemeinde Biberach. - Endbericht des Landratsamtes Ortenaukreis, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz (unveröffentlicht)

- Landratsamt Ortenaukreis (2004): Untersuchungen zur potentiellen Resorptionsverfügbarkeit erhöhter Gehalte anorganischer Schadstoffe in ehemaligen Bergbau- und Verhüttungsgebieten des Ortenaukreises. - Endbericht des Landratsamtes Ortenaukreis, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz (unveröffentlicht)
- Landratsamt Ortenaukreis (2007): Bodenuntersuchungen auf Quarzporphyr-Standorten im Ortenaukreis. - Kurzbericht des Landratsamt Ortenaukreis, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz (unveröffentlicht)
- LANGGUTH, H.-R. & R. VOIGT (2004): Hydrogeologische Methoden. - 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- LAP Landesanstalt für Pflanzenbau (2003): Systemvergleich Bodenbearbeitung - Pflanzenbauliche und wirtschaftliche Auswirkungen verschiedener Verfahren der Bodenbearbeitung. - Versuchsbericht 1995 - 2002, Informationen für die Pflanzenproduktion Sonderheft 1/2003, Forchheim
- LEBERT, M. & H. BÖKEN (2005): Kriterien zur Erkennung von Bodengefügeschäden. - 43. Lieferung XII/05, 4100  
- in: ROSENKRANZ, EINSELE, HARRESS [Hrsg.]: Bodenschutz. - Ergänzendes Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- LEIBER, J. (1994): Mineralische Rohstoffe.  
- in: Erläuterungen zu Blatt 7613 Lahr/Schw.-Ost - Geologische Karte 1:25 000 von Baden-Württemberg, Seiten 220-244, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg 1994
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (1994): Schwermetallgehalte in Böden aus verschiedenen Ausgangsgesteinen Baden-Württembergs. - Handbuch Boden, Band 3, Karlsruhe
- LfU (1995a): Mögliche Gefährdungen des Grundwassers durch PCB und Dioxine und Furane in Böden. - Texte und Berichte zum Bodenschutz 1/95, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- LfU (1995b): Bodenuntersuchungen an der BAB A 5 in Höhe Ringsheim. - Karlsruhe
- LfU (1995c): Stoffbericht Polychlorierte Biphenyle (PCB). - Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Karlsruhe
- LfU (1997): Stoffverhalten von Gaswerkspezifischen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). - Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- LfU (2003a): Umweltdaten 2003. - Karlsruhe
- LfU (2003b): Schadstoffe in klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs. - Bodenschutz, Band 14, Karlsruhe
- LfU (2005a): Geotope im Regierungsbezirk Freiburg, Bodenschutz Band 18, Karlsruhe
- LfU (2005b): Steckbrief Straßenbankettschälgut. - Kreislaufwirtschaft und Abfallbehandlung, Karlsruhe
- LGRB Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg (1997): Stellungnahme an das Landratsamt Ortenaukreis zu den hohen Chrom- und Nickelgehalten in Böden auf Gemarkung Dörflinbach, Gemeinde Schuttertal, vom 26.02.1997; Az.: 0514.01/97-4762, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg
- LTZ Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft - Abschlussbericht des Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg - LTZ - Karlsruhe
- LTZ (2011): Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland in Baden-Württemberg. - Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
- LU, A., ZHANG, S. & X. SHAN (2004): Time effect on the fractionation of heavy metals in soils. - Geoderma 125, 225 - 234
- LUA Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1995): Literaturstudien zum PCDD/F-Transfer vom Boden in die Nahrungskette. - Materialien, Nummer 15, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen



- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2005a): Geotope im Regierungsbezirk Freiburg. - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe
- LUBW (2005b): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13994>
- LUBW (2008): Böden als Archive der Natur- und Kulturgeschichte - Grundlagen und beispielhafte Auswertungen, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/46724>
- LUBW & Regierungspräsidium Karlsruhe (2009): Arsen in Böden und Gesteinen im Regierungsbezirk Karlsruhe - Status, Bewertung, Konsequenzen
- LUBW (2010a): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit - Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/99474/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=199&OBJECT=99474&MODE=METADATA>
- LUBW (2010b): Bericht zur Versauerung der Umwelt - Medienübergreifende Bewertung der Versauerung der letzten drei Dekaden in Baden-Württemberg, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/62828>
- LUBW (2012): Datenlieferung Depositionsdaten der Intensiv-Messstelle Kehl vom 01.06.2012. Ref. 22 Boden, Altlasten der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- LUBW (2013): Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung - Arbeitshilfe. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/225761>
- LUDWIG, A. (1996): <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltext-server/2222/1/Chromium.pdf>
- LUFA Augustenberg (2001): Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Baden-Württemberg. - Nicht veröffentlichte Daten
- in: MALBURG-GRAF, B. und W. D. BLÜMEL (2002): Überprüfung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Bodennutzung in der Region Stuttgart unter Hilfe einer Schwermetallbilanzierung. - Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, PW 98 202, Institut für Geographie Universität Stuttgart
- LUFA Oldenburg - Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Oldenburg (2001): Ergebnisse des UBA-Vorhabens „Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben“ (UBA 2004) - Ergebnisse Teilprojekt Oldenburg, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Oldenburg
- MÄCKEL, R. (1997): Spät- und postglaziale Flussaktivität und Talentwicklung im Schwarzwald und Oberrheintiefland. - in: MÄCKEL R., METZ B. [Hrsg.]: Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. - Freiburger Geographische Hefte, Heft 36, Seiten 75-99, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- MÄCKEL, R. & A. FRIEDMANN [Hrsg.] (1998): Wandel der Geobiosphäre in den letzten 15000 Jahren im südlichen Oberrheintiefland und Schwarzwald. - Freiburger Geographische Hefte, Heft 54, Seiten 61-72, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- MARFELS, H., IBURG, J. & U. FRITSCHKE (1991): Charakterisierung anthropogener Stäube in der Außenluft an typischen Standorten in Baden-Württemberg - zeitliche und örtliche Verteilung ausgewählter toxischer und kanzerogener Staubbestandteile. Projekt Umwelt und Gesundheit, Forschungsbericht KfK-PUG 2, Teil I: Anorganische Staubbestandteile, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- MARKL, G. (2004): Wie kommt Silber ins Gestein? - Die Bildung der Schwarzwälder Erzgänge und ihrer Minerale. - in: MARKL G. & S. LORENZ [Hrsg.]: Silber Kupfer Kobalt - Bergbau im Schwarzwald. - Markstein Verlag, Filderstadt 2004, Seiten 11-44
- MARKL, G. & S. LORENZ (2004): Silber, Kupfer, Kobalt - Bergbau im Schwarzwald. - Markstein Verlag, Filderstadt 2004
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. - 2nd edition, Academic Press, Harcourt Brace & Company, San Diego

- MASON, B. & C. B. MOORE. (1985): Grundzüge der Geochemie. - Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart
- MAUS, H. (1965): Petrogenetische Typen der Schwarzwälder Quarzporphyre. - Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- MAYER, J. (1996): Bodenuntersuchungen im Schulgarten. Eine praxisorientierte Arbeitshilfe. Hamburg: IPN Kiel
- MCKENZIE, N. J. & P. J. RYAN (1999): Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89, Seiten 67-94
- MEESBURG, H. (1995): Der Einfluss hydrologischer Prozesse auf hydrochemische Muster in einem episodisch sauren Fließgewässer im Südschwarzwald. - in: Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen. - eco-med Verlagsgesellschaft, Landsberg, 1995
- MEINKEN, W. (1999): Hydrochemische Untersuchung und Modellierung der Grundwasserbeschaffenheit in einem quartären Porengrundwasserleiter (Rheingraben/Ortenaukreis). - Freiburger Geowissenschaftliche Beiträge, Band 14, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- MERIAN, E., ANKE, M., IHNAT, M. & M. STOEPLER [EDS.] (2004): Elements and their Compounds in the Environment - Occurrence, Analysis and Biological Relevance. - Volume 1-3, 2nd completely revised and enlarged edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- METZ, R. (1989): Geologie und Landschaftsform. - in: Daheim im Ortenaukreis - Stadler Verlagsgesellschaft, Seiten 150-193, Konstanz, 1989
- MLR Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (2005): Dioxine in Freilandeiern - Untersuchungsergebnisse, Ursachen, Maßnahmen und Hilfen. - Handreichung für Legehennenhalter. Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, Stuttgart
- MLR (2006): Pressemitteilung 484 des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg vom 12.12.2006
- MOHR, H. D. (1985): Schwermetalle in Boden, Reben und Wein - Untersuchungen zur Anreicherung von Schwermetallen aus Siedlungsabfällen (Müllkompost, Müllklärschlammkompost) in Weinbergsböden, Reben, Most und Wein. - Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 308, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup
- MORCHE, W. (1979): Petrographische und Geochemische Untersuchungen am Durbachtal des Schwarzwaldes. - Diplomarbeit an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (unveröffentl.)
- MÜCKENHAUSEN, E. (1985): Die Bodenkunde und ihre geologischen, mineralogischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. - 3. Auflage DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- MÜLLER, C., PERETZKI, F. & K. RUTZMOSER (1993): Schwermetalle in Wirtschaftsdüngern - Ergebnisse aus dem Bodenbeobachtungsprogramm der LBP. - Schule und Beratung 03/93, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten
- MÜLLER, W. (1985): Standortkundliche Voraussetzungen für die Gefügemelioration durch Tiefenlockerung im humiden Klima - in: Die Gefügemelioration durch Tiefenlockerung - Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse, DVWK-Schriften Band 70, Seiten 1-36, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- NIPPES, K.-R. (1997): Gewässer und Wasserhaushalt des Schwarzwaldes. - in: Schwarzwald und Oberrheintiefland. Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. Freiburger Geographische Hefte 36, Freiburg
- OBERACKER, F. (2002): Verwendung und Entsorgung arsenhaltiger Wasserwerksschlämme. - Schriftenreihe des Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Band 107, Universität Karlsruhe

- OKRUSCH, M. & S. MATTHES (2005): Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. - 7. vollständig überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York
- ÖKVO Ökokonto-Verordnung (2010): Verordnung des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr über die Anerkennung und Anrechnung vorzeitig durchgeführter Maßnahmen zur Kompensation von Eingriffsfolgen (Ökokonto-Verordnung - ÖKVO). - Gesetzblatt für Baden-Württemberg, Nr. 23, Seiten 1089-1123, 28. Dezember 2010
- OLZEM, R. (1999): Methoden zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten im Rahmen der Regenwasserversickerung. - Bundesverband Boden [Hrsg.]: Regenwasserversickerung und Bodenschutz. BVB-Materialien, Band 2, Seiten 44-49, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- PARAT, C., CHAUSSOD, R., LÈVÈQUE, J., DOUSSET, S. & F. ANDREUX (2002): The relationship between copper accumulated in vineyard calcareous soil and soil organic matter and iron. - European Journal of Soil Science, Band 53, Seiten 663-669, Blackwell Science Ltd.
- PARLOW, E. & H.-J. ROSNER (1997): Das Klima des Oberrheingrabens.  
- in: Schwarzwald und Oberrheintiefland. Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. - Freiburger Geographische Hefte 36, Freiburg
- PECHER, H.-P. & V. MELOSCH (2002): Einfluss reduzierter Cu- und Zn-Versorgung auf die Aufzuchtleistung von Ferkeln.  
- in: KTBL-Schriften 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, Seiten 98-101, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- PETERSEN, U. (2002): Futtermittelrechtliche Vorschriften über Spurenelemente und unerwünschte Stoffe.  
- in: KTBL-Schriften 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, Seiten 36-41, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- PRINZ, H. & R. STRAUSS (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. - 4. bearbeitete und erweiterte Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, München
- PÜSCHEL, R. (1996): Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Gewässern: Untersuchungen zum Sorptionsverhalten und zur abiotischen Oxidation. - Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg
- RABER, B. (1996): Verteilungsverhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und deren Desorption aus Böden unter dem Einfluss von gelöster organischer Substanz (DOM) unterschiedlicher Herkunft. - Dissertation, Universität Bochum, 1. Aufl. Wissenschaftsverlag Marau, Frankfurt/Main
- Regierungspräsidium Freiburg (2008): Stellungnahme des Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt, an das Landratsamt Ortenaukreis, Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz, zum Umfang abgesetzten Bodenmaterials an Fließgewässern vom 23.04.2008, Az.: 53.10
- REKLIP - Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt (1995): Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd - Regio-Klima-Projekt (REKLIP). Kartenband, Verlagsgemeinschaft VDF-Hochschulverlag (Zürich), IFG (Offenbach), EDITIONS CO-PRUR (Strasbourg)
- Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn; Institut für Bodenkunde (1999): Boden. - Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 27
- RÖHR, C. (1990): Die Genese der Leptinite und Paragneise zwischen Nordrach und Gengenbach im mittleren Schwarzwald. - Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie C, Mineralogie, Band 11, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt
- RÖMER, W. (2003): Eisenreiche Klärschlämme reduzieren die P-Verfügbarkeit und gehören nicht auf Ackerböden. - Bodenschutz, Heft 2, Seiten 48-50
- RÖMER, W. & I. F. SAMIE (2001): Einfluss eisenhaltiger Klärschlämme auf Kenngrößen der P-Verfügbarkeit in Ackerböden. - Journal of Plant Nutrition and Soil Science 164, Seiten 321-327, Weinheim



- RÖMER, W. & I. F. SAMIE (2002): Phosphordüngewirkung eisenhaltiger Klärschlämme. - Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165, Seiten 83-90, Weinheim
- ROMMEL, P. & J. SCHNEIDER (1997): Bodenkundliche Untersuchungen im Einflussbereich der Fahrbahn. - Planfeststellungsverfahren zum 6-streifigen Ausbau der BAB A5 Karlsruhe - Weil am Rhein, Auftraggeber: Autobahnbetriebsamt Karlsruhe
- RÖMPP, H. (1989-1992): Chemie Lexikon. - 9., erweiterte und neubearbeitete Auflage, 6 Bände, Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
- ROTH, U., SCHULTHEISS, U., DÖHLER, H., ECKEL, H., KÜHNEN, V., FRÜCHTENICHT, K. & A. UHLEIN (2002): Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. - in: KTBL-Schriften 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, Seiten 9-13, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- ROWELL, D. L. (1997): Bodenkunde - Untersuchungsmethoden und ihre Anwendung. - Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York
- RÜDE, T. R. (1996): Beiträge zur Geochemie des Arsens. - Schriftenreihe des Instituts für Petrographie und Geochemie, Heft 10, Universität Karlsruhe
- SAMIE, I. F. (2003): Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit Phosphatelimination durch Eisensalze. - Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen
- SchALVO (2001): Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über Schutzbestimmungen und die Gewährung von Ausgleichsleistungen in Wasser- und Quellschutzgebieten (Schutzgebiets- und Ausgleichs-Verordnung - SchALVO). - Gesetzblatt für Baden-Württemberg, Nr. 4, Seite 145 ff., 28.02.2001, Stuttgart
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. - 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. - 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin
- SCHENKEL, H. (2002): Spurenelemente in Futtermitteln und Futterzusatzstoffen. - in: KTBL-Schriften 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, Seiten 9-13, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- SCHERER, U. & S. FUCHS (2004): Schwermetalleinträge in die Oberflächengewässer Deutschlands. - in: Stoffströme in Flussgebieten, Siedlungswasserwirtschaftliches Seminar WS 2003/04, Seiten 5-14, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 13. Februar 2004
- SCHMIDT, U. E. (1989): Entwicklung der Bodennutzung im mittleren und südlichen Schwarzwald 1780. - Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- SCHNEIDER, R. (2000): Landschafts- und Umweltgeschichte im Einzugsgebiet der Elz. - Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg i. Br.; <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/125>
- SCHOLL, W. (1959): Spurenelementuntersuchung in Gestein, Böden und Pflanzen des Schwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung des Kobalts. - Dissertation an der Technischen Hochschule Karlsruhe
- SCHREINER, A. (1992): Einführung in die Quartärgeologie. - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- SCHULTE-EBBERT, U. & U. SCHÖTTLER (2003): Transport polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) bei der Untergrundpassage - Einfluss organischer und anorganischer mobiler Festphasen auf die Mobilität von PAK. - Dortmund Beiträge zur Wasserforschung, Band 62, Institut für Wasserforschung GmbH Dortmund
- SCHUSTER, E. (1991): Quecksilberkontaminierte Böden - Eine Literaturstudie zur Einschätzung des Verhaltens von Quecksilber und seiner Verbindungen. - Studie im Auftrag

- des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen [Hrsg.], Technische Universität München
- SCHWERTMANN, U., SÜSSER, P. & L. NÄTSCHER (1987): Prototypenpuffersubstanzen in Böden, - Z. Pflanzenernähr. Bodenl. 150, Seiten 174-178
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. - Ulmer Verlag, Stuttgart
- SEIDEL, J. (2004): Massenbilanz holozäner Sedimente am südlichen und mittleren Oberrhein. - Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg i. Br. - <http://freidok.unifreiburg.de/volltexte/1565>
- SEWARD, T. M. & H. L. BARNES (1997): Metal transport by hydrothermal ore fluids. - in: BARNES, H. L.: Geochemistry of hydrothermal ore deposits. - 3rd edition, 1997, Seiten 435-486, John Wiley & Sons, Inc. New York, Weinheim
- SMUL Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (2006): Arsentransfer Boden - Pflanze. - Schriftenreihe des Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 14, Dresden
- SMUL (2008): Schwermetalle in Düngemitteln. - Schriftenreihe des Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 3, Dresden
- solum, büro für boden + geologie, Freiburg i. Br.; Landratsamt Ortenaukreis; Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 (LGRB) (2004): Modellhafte Erkundung von Bergbaurückstandshalden - Gefährdungsabschätzung Pfad Boden - Grundwasser im „Teufelswald“, Gemeinde Biberach (Ortenaukreis). - Unveröffentlichter Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt U52-02.02 des Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- STAHR, K., KANDELER, E., HERRMANN, L. & T. STRECK (2008): Bodenkunde und Standortlehre - Grundwissen Bachelor. - Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- STARKE, U., HERBERT, M. & G. EINSELE (1991): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in Boden und Grundwasser - Teil 1 Grundlagen zur Beurteilung von Schadensfällen. - in: ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., KÖNIG, W. & G. EINSELE [Hrsg.]: Bodenschutz. - ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kennziffer 1680, 9. Lieferung X/91, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- THIES, H. (1995): Limnochemische Untersuchungen an Karseen des Nordschwarzwaldes im Hinblick auf die Gewässerversauerung. - in: Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen. - eco-med Verlagsgesellschaft, Landsberg, 1995
- TrinkwV Trinkwasserverordnung (2011): Trinkwasserverordnung. - Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2011, Teil I, Seite 2370 ff., 28. November 2011, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 5. Dezember 2012, BGBl. I, S. 2562, Bonn
- UBA Umweltbundesamt (1992): Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln - Literaturschau und Analysen. - UBA-Texte 55/92, Berlin
- UBA (1996): Ausmaß und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. - UBA-Berichte 1/96, Berlin
- UBA (1999): Pflanzenbelastungen auf kontaminierten Standorten - Plant impact at contaminated sites. - UBA-Berichte 1/99, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- UBA (2004): Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. - UBA-Texte 06/04, Berlin
- UBA (2009): Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff: Ökologische Auswirkungen der Akkumulation von Kupfer im Boden. - UBA-Texte 10/09, Berlin

- UBA (2010): Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche; <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=A1DEF7404E3073172FFF7A9553188C95?ident=21305>
- UBA (2012a): <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/bodenschutz/vorsorge.htm>
- UBA (2012b): <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/bodenschutz/nachsorge.htm>
- UBA (2012c): Anpassung der WHO-Faktoren; Chemikalienpolitik und Schadstoffe, REACH; <http://www.umweltbundesamt.de/chemikalien/dioxine.htm> (Exkurs: Toxizitätsäquivalente; Kap. 4.2.13)
- UHLIN, A. (2001): Stallbilanzen von Schwermetallen am Beispiel ausgewählter Milchviehbetriebe. - Diplomarbeit Universität Bayreuth.  
- in: UBA 2004
- ULRICH, B. (1985): Natürliche und anthropogene Komponenten der Bodenversauerung. Mitteilg. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 43, Seiten 159-187
- ULRICH, B. (1995): Der ökologische Bodenzustand - seine Veränderung in der Nachkriegszeit, Ansprüche der Baumarten. - Forstarchiv, 66, 4, Seiten 117-127
- UM Umweltministerium Baden-Württemberg (1992): Verkehrsbedingte Immissionen in Baden-Württemberg - Schwermetalle und organische Fremdstoffe in straßennahen Böden und Aufwuchs. - Schriftenreihe Luft Boden Abfall, Heft 19, Stuttgart
- UM (1993a): Emissionen und Immissionen im Raum Kehl-Offenburg. - Bericht UM-14-93, Stuttgart
- UM (1993b): Dritte Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Ermittlung und Einstufung von Gehalten anorganischer Schadstoffe im Boden (VwV Anorganische Schadstoffe) vom 24. August 1993, Az.: 44-8810.30-1/46, seit Inkrafttreten der BBodSchV (1999) nicht mehr gültig
- UM (1995a): Bodenzustandsbericht Karlsruhe - Schadstoffgehalte der Böden - Bericht Um-14-95, Stuttgart
- UM (1995b): Bodenzustandsbericht Pforzheim - Schadstoffgehalte der Böden - Bericht UM-15-95, Stuttgart
- UM (1995c): Bodenzustandsbericht Kehl - Schadstoffgehalte der Böden - Bericht UM-16-95, Stuttgart
- UM (2007): Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14. März 2007, Az.: 25/8980.08M20 LAND/3; [http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103193/Bodenaushub\\_-\\_Verwaltungsvorschrift.pdf](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103193/Bodenaushub_-_Verwaltungsvorschrift.pdf)
- UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg (2003): Autobahntransekt Intensiv-Messstelle Forst, Schadstoffgehalte. Onlinejournal U722
- UMEG (2004a): Atmosphärische Deposition 2003. Intensivmessstellen Baden-Württemberg. - Onlinejournal U811
- UMEG (2004b): Hintergrundwerte für atmosphärische Depositionen. - Onlinejournal U1361
- UMEG (2004c): Umweltbeobachtung. Hintergrundwerte für Atmosphärische Depositionen (Stand 03.2004). UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91766/U12-U46-N04.pdf?command=downloadContent&filename=U12-U46-N04.pdf>
- UMEG (2004d): Bilanzbericht Bruchsal 2003. - Onlinejournal U914
- VaWS Anlagenverordnung wassergefährdende Stoffe (2005): Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung wassergefährdende Stoffe - VaWS). - Gesetzblatt für Baden-Württemberg, Nr. 17, Seite 740 ff., 30.11.2005, Stuttgart



VDLUFA Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (2006): Einstufung pflanzenverfügbaren Spurennährstoffgehalte im Boden in Gehaltsklassen. - Methodenhandbuch VDLUFA, Band I, Methode A 6.4.1, Speyer

VINX, R. (2011): Gesteinsbestimmung im Gelände. - 3. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

WERNER, W. & V. DENNERT (2004): Lagerstätten und Bergbau im Schwarzwald - Ein Führer unter besonderer Berücksichtigung der für die Öffentlichkeit zugänglichen Bergwerke. - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [Hrsg.], Freiburg i. Br.

WG (2005): Wassergesetz von Baden-Württemberg vom 20. Januar 2005, GBl. S. 219, zuletzt geändert durch Artikel 41 der Verordnung vom 25. Januar 2012, GBl. Nr. 3, S. 65, in Kraft getreten am 28. Februar 2012

Wikipedia Enzyklopädie: Stichwort „Knöllchenbakterien“; <http://de.wikipedia.org/wiki/Kn%C3%B6llchenbakterien>

VON WILPERT, K. & E. E. HILDEBRAND (1994): Stoffeintrag und Waldernährung in Fichtenbeständen Baden-Württembergs. Forst u. Holz 49, Seiten 629-632

WITTASSEK, R. (1987): Untersuchungen zur Verteilung des Kupfers in Boden, Vegetation und Bodenfauna eines Weinbergökosystems. - Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

ZEIEN, H. (1995): Chemische Extraktion zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden. - Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 17, Institut für Bodenkunde, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn

ZIRLEWAGEN, D. (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. Dissertation, Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung 19, Freiburg, 154 Seiten

ZIRLEWAGEN, D. & K. VON WILPERT (2004): Using model scenarios to predict and evaluate forest management impacts on soil base saturation at landscape level. Eur. J. Forest Res. 123, Seiten 269-282

# Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Kurztitel: genauer Bildtitel / Tabellentitel incl. Quellenangabe siehe Bildunterschrift / Tabellenüberschrift

|               |                                                                                     |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1-1:     | Beeinträchtigung des Bodens - Flächenverbrauch                                      | 13 |
| Abb. 1-2:     | Bodenzustandsberichte in Baden-Württemberg                                          | 14 |
| Abb. 2.1-1:   | Hauptnutzungsarten der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) im Ortenaukreis         | 15 |
| Abb. 2.1-2:   | Naturraumeinheiten des Ortenaukreises                                               | 16 |
| Abb. 2.2.1-1: | Schematischer West-Ost-Schnitt vom Oberrhein zur Hornisgrinde                       | 17 |
| Abb. 2.2.1-2: | Aufbau des Deckgebirges im mittleren Schwarzwald (nach Metz 1989)                   | 18 |
| Abb. 2.2.1-3: | Geologische Karte, Ortenaukreis                                                     | 19 |
| Abb. 2.2.2-1: | Abbau von Bausandstein bei Lahr-Kuhbach                                             | 20 |
| Abb. 2.2.2-2: | Bodenbildung auf periglazialer Deckschicht aus lösslehmhaltiger Decklage            | 21 |
| Abb. 2.2.3-1: | Weißlicher Mooswald-Quarzporphyr                                                    | 23 |
| Abb. 2.2.3-2: | <i>Flasergneis</i> aus dem Steinbruch „Artenberg“                                   | 24 |
| Abb. 2.2.3-3: | <i>Paragneis</i> aus dem Steinbruch „Hechtsberg“                                    | 24 |
| Abb. 2.2.3-4: | <i>Durbachit</i> Fundort nahe dem „Scheibenköpfle“                                  | 24 |
| Abb. 2.2.3-5: | <i>Serpentinit</i> aus einem kleinen, aufgelassenen Steinbruch bei Höfen            | 25 |
| Abb. 2.2.3-6: | <i>Oberkirch-Granit (Biotit-Granit)</i> aus Steinbruch bei Kappelrodeck-Waldulm     | 25 |
| Abb. 2.2.3-7: | <i>Brandeck-Quarzporphyr</i> aus dem Steinbruch im Gereut bei Lahr-Reichenbach      | 25 |
| Abb. 2.2.4-1: | Modell zur Entstehung der hydrothermalen Erz- und Mineralgänge im Schwarzwald       | 26 |
| Abb. 2.2.4-2: | Gangmineralisation aus Baryt und Fluorit unterschiedlicher Generationen bei Haslach | 27 |
| Abb. 2.3-1:   | Überdeckter humoser Oberboden östlich von Kippenheimweiler                          | 28 |
| Abb. 2.3-2:   | Bergbaureviere und Verhüttungsplätze im Kinzigtal                                   | 29 |
| Abb. 2.3-3:   | Verhau in der Eisenwand am Kuhhornkopf                                              | 30 |
| Abb. 2.3-4:   | Halde aus dem ehemaligem Kohlebergbau                                               | 30 |
| Abb. 2.3-5:   | Großflächige Entwaldung bei der Holzkohleproduktion                                 | 31 |
| Abb. 2.3-6:   | Weidbrennen („Rüttebrennen“)                                                        | 31 |
| Abb. 2.3-7:   | Umgestaltung von Rebgelände bei Ortenberg                                           | 32 |
| Abb. 2.4.1-1: | Mittlere Niederschlagshöhe in mm/a im Zeitraum 1951 - 1980                          | 33 |
| Abb. 2.4.2-1: | Klimatische Wasserbilanz 1951 - 1980                                                | 34 |
| Abb. 3.1.1-1: | Schema zur Bodenentwicklung                                                         | 35 |
| Abb. 3.1.1-2: | Mineralbestand in den Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton                          | 36 |
| Abb. 3.1.1-3: | Bodenarten des Feinbodens < 2 mm mit Klassifikation auf verschiedenen Niveaus       | 37 |
| Abb. 3.1.2-1: | Braunerde über Gneishangschutt                                                      | 38 |
| Abb. 3.1.2-2: | Parabraunerde aus Lössverwitterung                                                  | 39 |
| Abb. 3.1.2-3: | Aus der Verwitterung von Lösslehm hervorgegangener Pseudogley                       | 39 |
| Abb. 3.1.2-4: | Brauner Auenboden auf sandig-kiesigen Flussbettablagerungen                         | 40 |
| Abb. 3.1.2-5: | Auengley aus Auenlehm und sandig-kiesigen Flussbettablagerungen                     | 41 |
| Abb. 3.2.1-1: | Profildatenblatt, Standort: „Kindsloch“, Gemarkung Mahlberg                         | 44 |
| Abb. 3.2.1-2: | Bodenfunktionskarte „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“                                 | 45 |
| Abb. 3.2.2-1: | Profildatenblatt, Standort: „Schliffkopf“                                           | 47 |
| Abb. 3.2.2-2: | Bodenfunktionskarte „Sonderstandort für naturnahe Vegetation“                       | 48 |
| Abb. 3.2.3-1: | Profildatenblatt, Standort: „Linx“                                                  | 50 |
| Abb. 3.2.3-2: | Bodenfunktionskarte „Ausgleichskörper im Wasserkreislauf“                           | 51 |

|                  |                                                                                          |     |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 3.2.4-1:    | Profildatenblatt, Standort: „Bodersweier“                                                | 53  |
| Abb. 3.2.4-2:    | Bodenfunktionskarte „Filter und Puffer für Schadstoffe“                                  | 54  |
| Abb. 3.2.5-1:    | Das Hochmoor der Hornisgrinde                                                            | 55  |
| Abb. 4.1.1-1:    | Mäßig tiefe Braunerde aus Durbachitzersatz am „Scheibenköpfle“                           | 57  |
| Abb. 4.1.1-2:    | Pseudogley-Pelosol aus Tonfließerde über Tonstein des Mittleren Rotliegenden             | 57  |
| Abb. 4.1.1-3:    | Pseudogley-Braunerde aus Lösslehm über Tonfließerde                                      | 58  |
| Abb. 4.1.1-4:    | Auengley aus Auenlehm in Zone IIIb                                                       | 58  |
| Abb. 4.1.2-1:    | Wassergetriebenes Pochwerk                                                               | 59  |
| Abb. 4.1.2-2:    | Schlämmen von gepochtem Erzmaterial                                                      | 59  |
| Abb. 4.1.2-3:    | Röstöfen und -stadel für Bleierze                                                        | 60  |
| Abb. 4.1.2-4:    | Auengley-Auenpseudogley aus sandigen, lehmigen und schluffigen Abschwemmmassen           | 60  |
| Abb. 4.1.2-5:    | Schlackenfundstücke aus Biberach                                                         | 61  |
| Abb. 4.1.3-1:    | Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche im Stadtgebiet von Kehl                            | 62  |
| Abb. 4.1.4-1:    | Bleikonzentrationen in 0 - 5 cm Bodentiefe am Straßenrand                                | 64  |
| Abb. 4.1.4-2:    | Untersuchungsstandort an der BAB A 5 in Höhe Niederschopfheim                            | 64  |
| Abb. 4.1.5-1:    | Schematische Darstellung der kommunalen Entwässerungssysteme                             | 65  |
| Abb. 4.1.5-2:    | Mündung eines Oberflächenwasserkanals in den Mühlbach der Stadt Offenburg                | 66  |
| Abb. 4.1.6-1:    | Entsorgungswege des Ortenauer Klärschlammes 1994 - 2011                                  | 67  |
| Abb. 4.1.7-1:    | Papierfaserschlämme                                                                      | 68  |
| Abb. 4.1.8-1:    | Verzinkte Inneneinrichtung eines Abferkelstalls                                          | 71  |
| Abb. 4.1.9-1:    | Falscher Mehltau der Rebe ( <i>Plasmopara viticola</i> , <i>Rebenperonospora</i> )       | 72  |
| Abb. 4.2.1-1:    | Einteilung bodenspezifischer Risikobereiche                                              | 75  |
| Abb. 4.2.2.2-1:  | Hoch arsenhaltiger Eisenschlamm am Wasserwerk des WSG „Neuried - Dundenheimer Wald“      | 79  |
| Abb. 4.2.3.1-1:  | Bleigehalte in den Böden des Ortenaukreises                                              | 81  |
| Abb. 4.2.3.2-1:  | Verletzung der Grasnarbe durch lange Standzeiten von Tieren auf Grünlandflächen          | 82  |
| Abb. 4.2.3.2-2:  | Standort der modellhaften Erkundung von Bergbaurückstandshalden bei Biberach             | 83  |
| Abb. 4.2.6.2-1:  | Mit Farbabfällen (z. B. „Kobaltblau“) verfüllte Sandgrube bei Ortenberg                  | 87  |
| Abb. 4.2.7.2-1:  | Auengley-Brauner Auenboden mit Schwermetallkontaminationen bei Gutach                    | 90  |
| Abb. 4.2.10.2-1: | Wachstumsdepressionen an einem ehemaligen Verhüttungsstandort in Seelbach                | 96  |
| Abb. 4.2.11.1-1: | Eingedeichtes Vorland an der Kinzig nördlich von Offenburg mit bis zu 8,3 mg PAK/kg      | 96  |
| Abb. 4.3.1-1:    | Stickstoffkreislauf im Boden                                                             | 101 |
| Abb. 4.3.1-2:    | Knöllchenbakterien an der Wurzel der Zaunwicke ( <i>Vicia sepium</i> )                   | 101 |
| Abb. 4.3.1-3:    | Beeinträchtigung der Standfestigkeit von Getreide bei zu hoher Stickstoffdüngung         | 102 |
| Abb. 4.3.2-1:    | Mäßig tiefe Parabraunerde aus Sandlöss (Decklage) über Niederterrassenschotter           | 103 |
| Abb. 4.3.2-2:    | Parabraunerde aus würmzeitlichem Sandlöss über sandig-kiesigem Niederterrassenschotter   | 104 |
| Abb. 4.3.3-1:    | Im Herbst wird als Zwischenfrucht in der Ortenau vor allem Senf angebaut                 | 105 |
| Abb. 4.3.3-2:    | Der Anbau von Spargel ähnelt im frühen Entwicklungsstadium der Schwarzbrache             | 105 |
| Abb. 4.3.4-1:    | Verlauf der Nitratkonzentrationen in drei Grundwassermessstellen                         | 106 |
| Abb. 4.3.4-2:    | Wasserschutzgebiete und Nitratgehalte im Grundwasser                                     | 107 |
| Abb. 4.3.4-3:    | Eisenausfällungen in einem Entwässerungsgraben nördlich von Kippenheimweiler             | 108 |
| Abb. 4.3.7-1:    | Tunnelspritzgeräte reduzieren im Weinbau PSM-Aufwandmengen                               | 109 |
| Abb. 4.3.7-2:    | Relative Einsatzintensität von Pflanzenschutzmitteln in den Gemeinden des Ortenaukreises | 110 |
| Abb. 4.3.8-1:    | 2,6-Dichlorbenzamid-Konzentration im geförderten Grundwasser des WSG „Sasbach-Mättich“   | 111 |
| Abb. 4.4.1-2:    | Versauerungsstatus der Niederschläge am Dauerbeobachtungsstandort Gengenbach             | 113 |
| Abb. 4.4.1-1:    | Sammelgefäße für das Niederschlagswasser im Fichtenbestand einer Depositionsmessfläche   | 113 |



|                 |                                                                                           |     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 4.4.2-1:   | Tief entwickelte Braunerde aus lösslehmhaltiger Fließerde mit Granitschutt                | 114 |
| Abb. 4.4.2-2:   | Bodenversauerung                                                                          | 115 |
| Abb. 4.4.2-3:   | Podsol aus Sandstein-Hangschutt (Mittlerer Buntsandstein), „WSG Durbach“                  | 116 |
| Abb. 4.4.2-4:   | Pseudogley-Parabraunerde aus umgelagertem Lösslehm über Tonfließerde                      | 116 |
| Abb. 4.4.2-5:   | Brauner Auenboden-Auengley aus Auenlehm                                                   | 117 |
| Abb. 4.4.3.1-1: | Aluminiumkonzentrationen in Quell- und Sickerwasser im WSG „Busterbachquelle“             | 119 |
| Abb. 4.4.3.2-1: | Nadeln einer gesunden Fichte und Magnesiummangelsymptome                                  | 120 |
| Abb. 4.4.3.2-2: | Stickstoffeinträge an der Depositionsmessfläche „Gengenbach“                              | 120 |
| Abb. 4.4.3.2-3: | Kalkausbringung im Forst durch Verblasen                                                  | 121 |
| Abb. 4.4.3.3-1: | Frisch gekalkte Ackerfläche bei Niederschopfheim                                          | 121 |
| Abb. 4.4.4.1-1: | Entwicklung der Häufigkeitsverteilung von pH-Werten (H <sub>2</sub> O) im Mineralboden    | 122 |
| Abb. 4.4.4.2-1: | Beziehung zwischen Bodenreaktion und Calciumsättigung im Probenkollektiv der BZE          | 124 |
| Abb. 4.4.4.2-2: | Soll-Zustand der Basensättigung                                                           | 125 |
| Abb. 4.4.4.2-3: | Ist-Zustand der Basensättigung                                                            | 126 |
| Abb. 4.4.4.2-4: | Kalkungsbedarf                                                                            | 127 |
| Abb. 4.4.4.2-5: | Im Ortenaukreis seit Beginn der 1980er Jahre durchgeführte Bodenschutzkalkungen           | 128 |
| Abb. 4.5-1:     | Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche [%] zwischen 1992 und 2010                      | 129 |
| Abb. 4.5-2:     | Siedlungs- und Verkehrsflächenanteile an den Gemeindeflächen 2010 [%]                     | 130 |
| Abb. 4.5-3:     | Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Zeitraum von 1992 bis 2010 [ha]             | 130 |
| Abb. 4.5-4:     | Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Zeitraum von 1992 bis 2010 [%]               | 131 |
| Abb. 4.5-5:     | Siedlungsfläche je Einwohner im Jahr 2010 [m <sup>2</sup> /Einwohner]                     | 131 |
| Abb. 4.5-6:     | Anteil der Erholungsfläche an der Siedlungsfläche im Jahr 2010 [%]                        | 131 |
| Abb. 4.5-7:     | Wohnflächendichte im Jahr 2008 [m <sup>2</sup> /ha]                                       | 131 |
| Abb. 4.6.1-1:   | Schema der Bodenerosion                                                                   | 132 |
| Abb. 4.6.1-2:   | Durch erodierten Lössboden verschlammter Wirtschaftsweg                                   | 132 |
| Abb. 4.6.3-1:   | Pararendzina aus weitgehend unverwittertem Löss im Abtragsbereich; „Schlossberg-Maiertal“ | 134 |
| Abb. 4.6.3-2:   | Kolluvium im Akkumulationsbereich; „Schlossberg-Maiertal“                                 | 134 |
| Abb. 4.6.4-1:   | Erosionserscheinungen auf einem Maisfeld trotz Bearbeitung quer zum Hanggefälle           | 135 |
| Abb. 4.6.4-2:   | Oberflächennah eingearbeitete Pflanzenrückstände bei Mulchsaat                            | 136 |
| Abb. 4.6.5-1:   | Im Jahr 2007 durch abgeschwemmten Lössboden verschlammte Ackerfläche                      | 137 |
| Abb. 4.6.5-2:   | Verteilung der Flächen mit hohem Nettobodenabtrag [t/ha]                                  | 138 |
| Abb. 5.1.3.2-1: | Leitfaden zur Bodenfunktionsbewertung                                                     | 142 |
| Abb. 5.1.4-1:   | Bodenschutz in der Umweltprüfung nach BauGB                                               | 144 |
| Abb. 5.2.2-1:   | Arbeitshilfe „Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung“        | 147 |
| Abb. 5.2.3.2-1: | Altablagerung aus Boden und Bauschutt bei Achern-Oensbach                                 | 148 |
| Abb. 5.2.3.3-1: | Flachgründiger, kiesiger Ackerstandort bei Achern-Gamshurst                               | 149 |
| Abb. 5.2.3.3-2: | Planungskarte Oberbodenauftrag und Rekultivierung, Gemeinde Achern                        | 150 |
| Abb. 5.2.3.4-1: | Planungskarte Erosionsschutz, Gemeinde Achern                                             | 152 |
| Abb. 5.2.3.5-1: | Dachbegrünung, Stadtteil-/Familienzentrum Innenstadt, Stadt Offenburg                     | 153 |
| Abb. 5.2.3.7-1: | Geschützter Feuchtgebietskomplex mit Röhrichtbestand auf Nassgley                         | 154 |
| Abb. 5.2.3.7-2: | Nutzungsextensivierung und Wiedervernässung, Gemeinde Achern                              | 155 |
| Abb. 5.2.3.7-3: | Auenpseudogley-Auengley mit Binsen auf extensiv bewirtschaftetem Grünland                 | 156 |
| Abb. 5.3.1-1:   | Verwertung und Beseitigung von Bodenaushub im Ortenaukreis in den Jahren 1990 - 2011      | 157 |
| Abb. 5.3.1-2:   | Oberbodenaufträge, Rekultivierungen, Abgrabungen                                          | 158 |
| Abb. 5.3.2.3-1: | Profildatenblatt Rekultivierungsstandort „Urloffen“                                       | 160 |

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 5.3.2.4-1: Nasses Bodenmaterial aus grundwasserführenden Schichten                                                                                             | 162 |
| Abb. 5.3.2.5-1: Die maximale Arbeitstiefe von Werkzeugen zur Tiefenlockerung beträgt 80 - 90 cm                                                                     | 162 |
| Abb. 5.3.3.2-1: Aufzeichnung des Grundwasserstands an der Messstelle Nr. 119/066-7                                                                                  | 165 |
| Abb. 5.3.3.2-2: Auengley-Brauner Auenboden aus schluffigen Auensedimenten                                                                                           | 166 |
| Abb. 5.3.3.2-3: Brauner Auenboden-Auenpseudogley aus verschwemmtem würmzeitlichem Löss                                                                              | 166 |
| Abb. 5.4.2-1: Bis zum Niederterrassensand abgetragener Stauwasserboden einer Versickerungsanlage                                                                    | 170 |
| Abb. 5.4.2-2: Grüne Kupferausfällungen (Malachit und evtl. Azurit) in der Regenwasserrinne                                                                          | 171 |
| Abb. 5.4.3-1: Muldenversickerung bei Schutterwald                                                                                                                   | 171 |
| Abb. 5.4.3-2: Eignung der Standorte für naturnahe Niederschlagswasserversickerung                                                                                   | 172 |
| Abb. A.2.2.3-1: $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder                                                                                                                    | 174 |
| Abb. A.2.2.3-2: Anordnung von $[\text{SiO}_4]$ -Tetraeder in gesteinsbildenden Silikatmineralen                                                                     | 175 |
| Abb. A.3.1.1-1: Aufbau von Zweischicht- und Dreischicht-Tonmineralen                                                                                                | 176 |
| Abb. A.3.1.1-2: Aufnahme des Tonminerals Kaolinit                                                                                                                   | 177 |
| Abb. A.3.1.1-3: Geräte für die Schlämmanalyse                                                                                                                       | 177 |
| Abb. A.3.1.2-1: Verbreitung der Böden im Ortenaukreis                                                                                                               | 178 |
| Abb. A.3.2-1: Drucktöpfe zur Bestimmung des Anteils an engen Grobporen und Mittelporen                                                                              | 182 |
| Abb. A.3.2-2: Permeameter zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit im Labor                                                                                           | 183 |
| Abb. A.3.2-3: Wasserbecken des Permeameters mit eingetauchten Metallzylindern (Plastikfassungen)                                                                    | 183 |
| Abb. A.4.1.9-1: Sequenzielle Extraktion von Kupfer aus Rebböden                                                                                                     | 184 |
| Abb. A.4.2.1.1-1: Sequenzielle Extraktion von Cadmium aus einem kontaminierten Auenboden                                                                            | 187 |
| Abb. A.4.2.1.1-2: Sequenzielle Extraktion von Chrom aus einem kontaminierten Auenboden                                                                              | 187 |
| Abb. A.4.2.1.1-3: PAK-Bindungsformen in Probe 2 aus dem Kinzigvorland in Höhe Willstätt                                                                             | 192 |
| Abb. A.4.2.1.1-4: PAK-Bindungsformen in Probe 3 aus dem Kinzigvorland in Höhe Willstätt                                                                             | 192 |
| Abb. A.4.2.1.1-5: PAK-Bindungsformen in Probe 35/0316 aus einer Kohlehalde bei Berghaupten                                                                          | 192 |
| Abb. A.4.2.1.1-6: PAK-Bindungsformen in Probe 35/0317 aus einer Kohlehalde bei Berghaupten                                                                          | 192 |
| Abb. A.4.2.1.3-1: Verfahrensschema der Extraktion nach DIN 19738                                                                                                    | 197 |
| Abb. A.4.4.2-1: Gley-Pseudogley-Parabraunerde aus spätwürmzeitlichem Hochflutlehm                                                                                   | 210 |
| Abb. A.4.4.2-2: Erodierte Parabraunerde aus würmzeitlichem Löss im Gewann „Kindsloch“ bei Mahlberg                                                                  | 210 |
| Abb. A.4.4.5-1: pH-Werte in Böden; nach <a href="http://eusoils.jrc.ec.europa.eu">http://eusoils.jrc.ec.europa.eu</a>                                               | 211 |
| Abb. A.4.4.5-2: Vereinfachtes Schema des Kationenaustauschs an Tonmineralen                                                                                         | 213 |
| Abb. A.5.1.3.1.3-1: Bewertung der Bodenfunktion `Ausgleichskörper im Wasserkreislauf anhand der Klassenzeichen für flächenmäßig dominierende Grundstücksteilflächen | 219 |
| Abb. A.5.1.3.1.3-2: Bewertung der Bodenfunktion `Ausgleichskörper im Wasserkreislauf anhand der Klassenzeichen für alle einzelnen Grundstücksteilflächen            | 219 |
| Abb. A.5.3.1-1: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage                                                                                                             | 222 |
| Abb. A.5.3.1-2: Zeitlicher Verlauf der Bleikonzentrationen im Sickerwasser von Feld 1                                                                               | 223 |
| Abb. A.5.3.1-3: Zeitlicher Verlauf der Bleikonzentrationen im Sickerwasser von Feld 2                                                                               | 223 |
| Abb. A.5.3.2.5-1: Abgrenzung tiefenlockerungsfähiger Böden sowie Verschlammungsneigung                                                                              | 224 |
| Abb. A.5.4.4-1: Prüfung der Wasserleitfähigkeit mit einem Doppelringinfiltrimeter                                                                                   | 225 |
| Abb. A.5.4.4-2: Prüfung der Wasserleitfähigkeit im Unterboden mittels Schurfversickerung                                                                            | 225 |

|                  |                                                                                             |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 2.1-1:      | Daten zum Ortenaukreis                                                                      | 15  |
| Tab. 3.1.1-1:    | Zunahme der Oberfläche bei der Zerkleinerung eines Felsquaders mit 1 m <sup>3</sup> Volumen | 35  |
| Tab. 3.1.1-2:    | Untergliederung der Feinbodenfraktion                                                       | 36  |
| Tab. 3.1.2-1:    | Unterscheidung der Auenböden nach Tiefenlage                                                | 41  |
| Tab. 3.2-1:      | Bewertungsklassen für die Funktionserfüllung von Böden                                      | 42  |
| Tab. 3.2.1-1:    | Bewertung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit nach der nFK bis in 1 m Bodentiefe             | 43  |
| Tab. 3.2.2-1:    | Bewertung des Wasserhaushalts nach der bodenkundlichen Feuchtestufe                         | 46  |
| Tab. 3.2.3-1:    | Bewertung als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf                                           | 49  |
| Tab. 3.2.4-1:    | Bewertung der Filter- und Pufferfunktion                                                    | 52  |
| Tab. 4.1.3-1:    | Ubiquitäre Depositions-Hintergrundwerte im Großraum Schweiz/Österreich/Süddeutschland       | 63  |
| Tab. 4.1.5-1:    | Schadstoffgehalte in Sedimenten von Oberflächenwasserkälen                                  | 66  |
| Tab. 4.1.6-1:    | Geschätzte jährliche Schwermetall-Fracht durch landwirtschaftliche Klärschlammverwertung    | 67  |
| Tab. 4.1.8-1:    | Schwermetallgehalte einer Auswahl von Phosphatdüngemitteln (Mittelwerte)                    | 70  |
| Tab. 4.1.8-2:    | Schwermetallgehalte einer Auswahl von Kalkdüngemitteln (Mittelwerte)                        | 70  |
| Tab. 4.1.8-3:    | Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für Schadstoffe (DüMV 2012)                          | 71  |
| Tab. 4.1.8-4:    | Schwermetallgehalte einer Auswahl an wirtschaftseigenen Düngern                             | 72  |
| Tab. 4.1.10-1:   | Bilanz der Schwermetalleinträge durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung         | 74  |
| Tab. 4.1.10-2:   | Überschlägige Schwermetallfracht auf Ackerflächen 1997 und 2001                             | 74  |
| Tab. 4.2.2.1-1:  | Statistische Kennwerte für Arsen in Oberböden, Stand 2013                                   | 77  |
| Tab. 4.2.2.2-1:  | Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen der BBodSchV (1999)                                      | 78  |
| Tab. 4.2.3.1-1:  | Statistische Kennwerte für Blei in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013                 | 80  |
| Tab. 4.2.3.2-1:  | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Blei der BBodSchV (1999)                            | 82  |
| Tab. 4.2.3.2-2:  | Resorptionsverfügbarkeit von Blei in Böden des Ortenaukreises                               | 82  |
| Tab. 4.2.4.1-1:  | Statistische Kennwerte für Cadmium in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013              | 84  |
| Tab. 4.2.4.2-1:  | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Cadmium der BBodSchV (1999)                         | 85  |
| Tab. 4.2.5.1-1:  | Statistische Kennwerte für Chrom in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013                | 86  |
| Tab. 4.2.5.2-1:  | Vorsorge- und Prüfwerte für Chrom der BBodSchV (1999)                                       | 86  |
| Tab. 4.2.6.1-1:  | Statistische Kennwerte für Kobalt in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013               | 88  |
| Tab. 4.2.7.1-1:  | Statistische Kennwerte für Kupfer in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013               | 89  |
| Tab. 4.2.7.2-1:  | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Kupfer der BBodSchV (1999)                          | 90  |
| Tab. 4.2.8.1-1:  | Statistische Kennwerte für Nickel in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013               | 92  |
| Tab. 4.2.8.2-1:  | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Nickel der BBodSchV (1999)                          | 92  |
| Tab. 4.2.9.1-1:  | Statistische Kennwerte für Quecksilber in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013          | 93  |
| Tab. 4.2.9.2-1:  | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Quecksilber der BBodSchV (1999)                     | 93  |
| Tab. 4.2.10.1-1: | Statistische Kennwerte für Zink in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013                 | 95  |
| Tab. 4.2.10.2-1: | Vorsorge- und Prüfwerte für Zink der BBodSchV (1999)                                        | 95  |
| Tab. 4.2.11.1-1: | Statistische Kennwerte für PAK in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013                  | 97  |
| Tab. 4.2.11.2-1: | Vorsorge- und Prüfwerte für PAK und Benzo-a-pyren der BBodSchV (1999)                       | 97  |
| Tab. 4.2.12.1-1: | Statistische Kennwerte für PCB in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013                  | 98  |
| Tab. 4.2.12.2-1: | Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für PCB der BBodSchV (1999)                             | 98  |
| Tab. 4.2.13.1-1: | Statistische Kennwerte für PCDD/F in Oberböden des Ortenaukreises, Stand 2013               | 99  |
| Tab. 4.2.13.2-1: | Maßnahmenwerte für PCDD/F der BBodSchV (1999) und Richtwerte der BGA Dioxin (1993)          | 100 |
| Tab. 4.4.4.2-1:  | Mittlere pH-Werte der Tiefenstufen 5 und 15 cm                                              | 123 |
| Tab. 4.6.5-1:    | Ergebnis der Simulation mit EROSION-3D für einen gewöhnlichen Landregen                     | 138 |
| Tab. 4.6.5-2:    | Ergebnis der Simulation mit EROSION-3D für ein Starkregenereignis                           | 138 |



|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 5.1.3.2-1: Gesamtbewertung der Böden                                                             | 143 |
| Tab. 5.2.3.5-1: Abflusskennzahlen und Jahresabflussbeiwerte bei unterschiedlichen Gründachaufbauhöhen | 153 |
| Tab. 5.4.2-1: Durchlässigkeitsbeiwerte verschiedener Böden nach Muth                                  | 169 |
| Tab. 5.4.2-2: Häufige Durchlässigkeitsbeiwerte in wassergesättigten Böden                             | 169 |
| Tab. 5.4.3-1: Kriterien für die Einstufung der Versickerungsmöglichkeiten im Ortenaukreis             | 173 |
| Tab. A.3.1.1-1: Eigenschaften ausgewählter Tonminerale (nach Rowell 1997)                             | 177 |
| Tab. A.3.1.2.1-1: Horizontbezeichnungen und Zusatzsymbole                                             | 180 |
| Tab. A.4.1.9-1: Kupfergehalte in 14 ausgewählten Rebflächen des landkreiseigenen Weinguts             | 184 |
| Tab. A.4.2.1.1-1: Grenz-pH-Werte für ausgewählte anorganische Schadstoffe                             | 186 |
| Tab. A.4.2.1.1-2: Ionen-Radien ausgewählter anorganischer Schadstoffe                                 | 187 |
| Tab. A.4.2.1.1-3: Wasserlöslichkeit und $K_{oc}$ -Werte                                               | 189 |
| Tab. A.4.2.1.1-4: $K_{oc}$ -Werte für ausgewählte organische Schadstoffe                              | 190 |
| Tab. A.4.2.1.1-5: Beschreibung der sequenziellen Extraktion und Zuordnung zu Bindungsmatrices         | 191 |
| Tab. A.4.4.5-1: Beziehung zwischen Basensättigung und Boden-pH-Wert                                   | 211 |
| Tab. A.4.4.5-2: Puffersubstanzen und pH-Bereiche der Pufferung                                        | 212 |
| Tab. A.5.1.3.1.1-1: Ackerschätzungsrahmen                                                             | 215 |
| Tab. A.5.1.3.1.1-2: Einteilung der Bodenarten für die Bodenschätzung                                  | 216 |
| Tab. A.5.1.3.1.2-1: Einteilung der Wärmestufen                                                        | 217 |
| Tab. A.5.1.3.1.2-2: Einteilung der Wasserstufen                                                       | 217 |
| Tab. A.5.1.3.1.2-3: Grünlandschätzungsrahmen                                                          | 218 |







