




Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Analytische Untersuchungen von Bodenaushub in Baden-Württemberg

 Arbeitsschwerpunkt im Rahmen des umweltpolitischen Schwerpunktes
„Recycling von Bauabfällen - ein Beitrag zur Ressourcenschonung in Baden-
Württemberg“

Bericht über die 1. Projektphase



Baden-Württemberg

HERAUSGEBER: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU)
76157 Karlsruhe · Postfach 21 07 52
poststelle@lfuka.lfu.bwl.de
<http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de>

BEARBEITUNG: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU)
Referat 35 – Kreislaufwirtschaft, Abfallbehandlung
Dr. Carsten Schäfer
Alfred Gamm
Doris Meßmann

STAND: November 2005

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG.....	5
2	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG.....	6
3	GRUNDLAGEN	6
3.1	REGELUNGEN DER LAGA M 20 - TR BODEN	6
3.2	DATENLAGE ZU HINTERGRUNDGEHALTEN IN BÖDEN.....	9
4	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN	12
5	ERGEBNISSE	15
5.1	ERGEBNISÜBERSICHT.....	15
5.2	EINZELERGEBNISSE	17
5.2.1	<i>BESTIMMUNG DER BODENARTEN.....</i>	<i>17</i>
5.2.2	<i>SCHWERMETALLE IM FESTSTOFF.....</i>	<i>17</i>
5.2.3	<i>SCHWERMETALLE IM ELUAT.....</i>	<i>19</i>
5.2.4	<i>SULFAT, CHLORID, LEITFÄHIGKEIT, pH-WERT.....</i>	<i>19</i>
5.2.5	<i>ORGANISCHE PARAMETER</i>	<i>20</i>
5.3	ERGEBNISSE IN BEZUG ZU GEOLOGISCHEN GROßEINHEITEN.....	21
6	BEWERTUNG.....	27
6.1	SCHADSTOFFGEHALTE IN RELATION ZU DEN Z0-WERTEN.....	27
6.2	ZUORDNUNG ZU DEN BODENARTEN	28
6.3	BEZUG DER SCHADSTOFFGEHALTE ZUR GEOLOGIE	28
7	QUELLENVERZEICHNIS.....	29
8	ANHANG.....	30

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des umweltpolitischen Schwerpunktes (UPS) „Recycling von Bauabfällen – ein Beitrag zur Ressourcenschonung in Baden-Württemberg“ untersuchte die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) Bodenaushubmaterialien, die aufgrund ihrer Herkunft und augenscheinlich als unbelastet eingestuft waren, auf ihre Schadstoffgehalte. Die Untersuchungen sollen die Datenbasis erweitern und entsprechende Hinweise und Entscheidungshilfen für die baden-württembergische Umsetzung der Technischen Regeln für Bodenmaterial (TR Boden) in der LAGA-Mitteilung M20 liefern. Die Ergebnisse dieser ersten Projektphase sollten ein erstes Bild von als unbelastet eingestuften Bodenaushubqualitäten zeichnen, wie sie aktuell auf Baustellen in Baden-Württemberg anfallen und auf Bodenaushubdeponien zur Ablagerung angeliefert werden.

Über Baden-Württemberg verteilt wurden 53 Bodenaushubdeponien mit möglichst engem Einzugsgebiet beprobt. Sie wurden so ausgewählt, dass jeder Landkreis und möglichst viele verschiedene geologische Formationen abgedeckt wurden. Der geologische Dienst (ehemals LGRB) war bei der Auswahl beratend tätig. Auf den Bodenaushubdeponien wurden separate Haufwerke von einer bestimmten Baustelle oder in Einzelfällen eine nahe gelegene Baustelle durch die LfU beprobt. Die Proben wurden auf diejenigen Parameter untersucht, für die in der TR Boden (Stand 05.11.2004) Zuordnungswerte festgelegt sind, mit Ausnahme einzelner geogen unbedeutender Parameter.

Die Differenzierung der Z₀-Werte in die drei Hauptbodenarten Sand, Lehm/Schluff und Ton gemäß TR Boden war nicht immer möglich, da die beprobten Haufwerke zum Teil Mischungen verschiedener Bodenhorizonte und -abschnitte waren, deren eindeutige Zuordnung zu einer der drei Bodenarten problematisch ist. Nach den Vorgaben der TR Boden sollen für Bodenmaterial, das nicht bodenartsspezifisch zugeordnet werden kann bzw. als Gemisch verschiedener Bodenarten bei Baumaßnahmen anfällt, die Zuordnungswerte für Lehm/Schluff angewendet werden.

Eine größere Anzahl an Proben überschritt den TOC-Wert (Z₀). Die Ursache dürfte in einer Vermischung der untersuchten Materialien mit humosem Oberboden liegen. Lässt man die TOC-Überschreitungen außer Betracht und nimmt vereinfacht die Z₀-Werte der TR Boden als Maßstab, könnten von den 59 untersuchten Proben 32 Proben und damit 54 % nicht als Z₀-Material verwertet werden. 25 Proben (42 %) könnten nicht als Z₀*-Material verwertet werden. Überschreitungen von Z₀* wurden vor allem bei Arsen im Feststoff sowie Sulfat im Eluat festgestellt. Diese Parameter können in bestimmten Gesteins- bzw. Substrattypen erhöht sein.

Über den ubiquitären Hintergrund erhöhte PAK-Gehalte in Böden gelten als Indikator für spezifische Kontaminationen. Von den 59 untersuchten Proben wiesen 18 Proben PAK-Gehalte größer 0,5 mg/kg auf. Eine dieser 18 Proben und eine weitere waren aufgrund erhöhter Quecksilbergehalte auffällig. Bei den restlichen 40 Proben ergibt sich (ohne Berücksichtigung der TOC-Überschreitungen) folgendes Bild: 20 Proben (50 %) liegen unter Z₀, bei 20 Proben (50 %) liegt mindestens einer der Parameter über Z₀ und bei 16 Proben (40 %) auch über Z₀*.

Die erhöhten Schadstoffgehalte in den Proben sind bei keinem der untersuchten Parameter eindeutig auf eine geologische Formation beschränkt. Tendenzen, z. B. höhere Schwermetallgehalte in Gebieten des Jura, sind erkennbar. Aufgrund der geringen Probenanzahl und der nur ungefähren geologischen Einordnung der Proben sind nach dieser ersten Projektphase noch keine belastbaren Aussagen zum Zusammenhang der Schadstoffgehalte mit der Geologie am Herkunftsort des Bodens bzw. zur Qualität des Bodenaushubaufkommens insgesamt in Baden-Württemberg möglich.

Als unproblematisch erwiesen sich die Z₀-Werte der TR Boden für die Schwermetallgehalte im Eluat sowie für die Mineralölkohlenwasserstoffe. Diese Werte wurden bei allen Bodenproben eingehalten.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) hat den umweltpolitischen Schwerpunkt (UPS) „Recycling von Bauabfällen – ein Beitrag zur Ressourcenschonung in Baden-Württemberg“ eingerichtet, um Untersuchungen und Maßnahmen durchzuführen, die bei der Festlegung der Rahmenbedingungen für die Verwertung von mineralischen Abfällen wie Bauschutt und Boden in Baden-Württemberg behilflich sein sollen. In einem Arbeitsschwerpunkt dieses UPS sollen unbelastete Bodenaushubmaterialien auf ihre Hintergrund-Schadstoffgehalte untersucht werden. Damit soll ein Überblick über die Qualitäten von derzeit in Baden-Württemberg anfallendem unbelastetem Bodenaushub („Z0-Qualität“) gewonnen werden. Flächendeckend in ganz Baden-Württemberg sollen Proben aus entsprechenden Monodeponien entnommen werden, um gegebenenfalls auch regionale Besonderheiten aufgrund geogen bedingter höherer Hintergrundwerte erkennen zu können.

Die Untersuchungsergebnisse sollen die baden-württembergische Umsetzung der Technischen Regeln für Bodenmaterial (TR Boden) der LAGA-Mitteilung M20 [1] unterstützen. Die gegenüber der aktuell gültigen Fassung der LAGA M20 (Stand 6.11.2003) überarbeitete Version der TR Boden (Stand 5.11.2004) [2] wurde von der Umweltministerkonferenz (UMK) im November 2004 lediglich zur Kenntnis genommen, jedoch nicht von allen Bundesländern mitgetragen und somit nicht offiziell als Mitteilung der LAGA veröffentlicht. Um einen einheitlichen Vollzug in Baden-Württemberg zu gewährleisten, beabsichtigt das Umweltministerium Baden-Württemberg, die TR Boden und damit verbindliche Regelungen in Baden-Württemberg einzuführen. Vor der Einführung soll geprüft werden, inwieweit ggf. die überarbeitete Fassung der TR Boden (Stand 5.11.2004) noch geändert und insbesondere an die Verhältnisse in Baden-Württemberg angepasst werden muss. Hierzu sollen die Untersuchungen Erkenntnisse über mögliche Schadstoffbelastungen und entsprechende Entscheidungshilfen liefern.

3 Grundlagen

3.1 REGELUNGEN DER LAGA M 20 - TR BODEN

Die LAGA-Mitteilung M20 vom 06.11.1997 wurde von der LAGA überarbeitet. Mit Stand vom 6.11.2003 wurde der überarbeitete allgemeine Teil I veröffentlicht [1]. Der Teil II („Technische Regeln für die Verwertung von Bodenmaterial“) und III („Probenahme und Analytik“) fanden nicht die Zustimmung der Umweltministerkonferenz (UMK) am 4./5.11.2004 und wurden lediglich zur Kenntnis genommen, nicht jedoch zur Veröffentlichung freigegeben.

Die TR Boden regelt die Verwertung von Bodenmaterial in Abhängigkeit von den Schadstoffgehalten und -konzentrationen. Das zu verwertende Bodenmaterial wird in Bauklassen zugeordnet, deren Zuordnungswerte Z0 bis Z2 die Obergrenze der Schadstoffgehalte und -konzentrationen für die jeweilige Bauklasse darstellen. Für den uneingeschränkten Einbau von Bodenmaterial in bodenähnlichen Anwendungen sind Zuordnungswerte Z0 und Z0* im Feststoff sowie Z0/Z0* im Eluat festgelegt. Für die Verwertung von Bodenmaterial in technischen Bauwerken gelten beim offenen Einbau die Zuordnungswerte Z1 im Feststoff und Z1.1 im Eluat, wobei in hydrogeologisch günstigen Gebieten auch Bodenmaterial mit Eluatkonzentrationen bis zu den Zuordnungswerten Z1.2 eingebaut werden kann. Für die Verwertung in technischen Bauwerken mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen gelten die Zuordnungswerte Z2 im Feststoff und im Eluat.

In der überarbeiteten und von der UMK zur Kenntnis genommenen, jedoch nicht zur Veröffentlichung freigegebenen Fassung der TR Boden vom 5.11.2004 [2] werden je nach Bodenart Sand, Lehm/Schluff oder Ton unterschiedliche Z0-Werte (Feststoff) vorgeschlagen. Zudem sind Z0*-Werte als maximale Gehalte für die Verfüllung von Abgrabungen unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen festgelegt. Die dortigen Zuordnungswerte Z0 und Z0* sind für die Feststoffgehalte in Tabelle

1, für die Eluatkonzentrationen in Tabelle 2 aufgeführt. Für die Verwendung von Bodenmaterial in technischen Bauwerken gelten die Zuordnungswerte Feststoff nach Tabelle 3 und Eluat nach Tabelle 4. Ausnahmen von den genannten Zuordnungswerten gelten für Böden mit naturbedingt (geogen) oder flächenhaft siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten.

Tabelle 1: Zuordnungswerte Feststoff für Boden für die Verwertung in bodenähnlichen Anwendungen nach der TR Boden vom 5.11.2004

Parameter	Dimension	Z 0 (Sand)	Z 0 (Lehm/Schluff)	Z 0 (Ton)	Z 0* ¹⁾
Arsen	mg/kg TS	10	15	20	15 ²⁾
Blei	mg/kg TS	40	70	100	140
Cadmium	mg/kg TS	0,4	1	1,5	1 ³⁾
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	30	60	100	120
Kupfer	mg/kg TS	20	40	60	80
Nickel	mg/kg TS	15	50	70	100
Thallium	mg/kg TS	0,4	0,7	1	0,7 ⁴⁾
Quecksilber	mg/kg TS	0,1	0,5	1	1,0
Zink	mg/kg TS	60	150	200	300
TOC	Masse-%	0,5 (1,0) ⁵⁾	0,5 (1,0) ⁵⁾	0,5 (1,0) ⁵⁾	0,5 (1,0) ⁵⁾
EOX	mg/kg TS	1	1	1	1 ⁶⁾
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	100	100	100	200 (400) ⁷⁾
BTX	mg/kg TS	1	1	1	1
LHKW	mg/kg TS	1	1	1	1
PCB ₆	mg/kg TS	0,05	0,05	0,05	0,1
PAK ₁₆	mg/kg TS	3	3	3	3
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	0,3	0,3	0,3	0,6

- 1) maximale Feststoffgehalte für die Verfüllung von Abgrabungen unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen (siehe "Ausnahmen von der Regel" für die Verfüllung von Abgrabungen in Nr. II.1.2.3.2)
- 2) Der Wert 15 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 20 mg/kg
- 3) Der Wert 1 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 1,5 mg/kg
- 4) Der Wert 0,7 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 1,0 mg/kg
- 5) Bei einem C:N-Verhältnis > 25 beträgt der Zuordnungswert 1 Masse-%.
- 6) Bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen.
- 7) Die angegebenen Zuordnungswerte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C₁₀ bis C₂₂. Der Gesamtgehalt, bestimmt nach E DIN EN 14039 (C₁₀ bis C₄₀), darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten.

Tabelle 2: Zuordnungswerte Eluat für Boden für die Verwertung in bodenähnlichen Anwendungen nach der TR Boden vom 5.11.2004

Parameter	Dimension	Z 0/Z 0*
pH-Wert	-	6,5-9,5
Leitfähigkeit	µS/cm	250
Chlorid	mg/l	30
Sulfat	mg/l	20
Cyanid	µg/l	5
Arsen	µg/l	14
Blei	µg/l	40
Cadmium	µg/l	1,5
Chrom (gesamt)	µg/l	12,5
Kupfer	µg/l	20
Nickel	µg/l	15
Quecksilber	µg/l	< 0,5
Zink	µg/l	150
Phenolindex	µg/l	20

Tabelle 3: Zuordnungswerte Feststoff für Boden für den eingeschränkten Einbau in technischen Bauwerken nach der TR Boden vom 5.11.2004

Parameter	Dimension	Z 1	Z 2
Arsen	mg/kg TS	45	150
Blei	mg/kg TS	210	700
Cadmium	mg/kg TS	3	10
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	180	600
Kupfer	mg/kg TS	120	400
Nickel	mg/kg TS	150	500
Thallium	mg/kg TS	2,1	7
Quecksilber	mg/kg TS	1,5	5
Zink	mg/kg TS	450	1500
Cyanide, gesamt	mg/kg TS	3	10
TOC	Masse-%	1,5	5
EOX	mg/kg TS	3 ¹⁾	10
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	300 (600) ²⁾	1000 (2000) ²⁾
BTX	mg/kg TS	1	1
LHKW	mg/kg TS	1	1
PCB ₆	mg/kg TS	0,15	0,5
PAK ₁₆	mg/kg TS	3 (9) ³⁾	30
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	0,9	3

- 1) Bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen.
- 2) Die angegebenen Zuordnungswerte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C₁₀ bis C₂₂. Der Gesamtgehalt, bestimmt nach E DIN EN 14039 (C₁₀ bis C₄₀), darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten.
- 3) Bodenmaterial mit Zuordnungswerten > 3 mg/kg und ≤ 9 mg/kg darf nur in Gebieten mit hydrogeologisch günstigen Deckschichten eingebaut werden.

Tabelle 4: Zuordnungswerte Eluat für Boden für den eingeschränkten Einbau in technischen Bauwerken nach der TR Boden vom 5.11.2004

Parameter	Dimension	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert	-	6,5-9,5	6-12	5,5-12
Leitfähigkeit	µS/cm	250	1500	2000
Chlorid	mg/l	30	50	100 ¹⁾
Sulfat	mg/l	20	50	200
Cyanid	µg/l	5	10	20
Arsen	µg/l	14	20	60 ²⁾
Blei	µg/l	40	80	200
Cadmium	µg/l	1,5	3	6
Chrom (gesamt)	µg/l	12,5	25	60
Kupfer	µg/l	20	60	100
Nickel	µg/l	15	20	70
Quecksilber	µg/l	< 0,5	1	2
Zink	µg/l	150	200	600
Phenolindex	µg/l	20	40	100

1) bei natürlichen Böden in Ausnahmefällen bis 300 mg/l

2) bei natürlichen Böden in Ausnahmefällen bis 120 µg/l

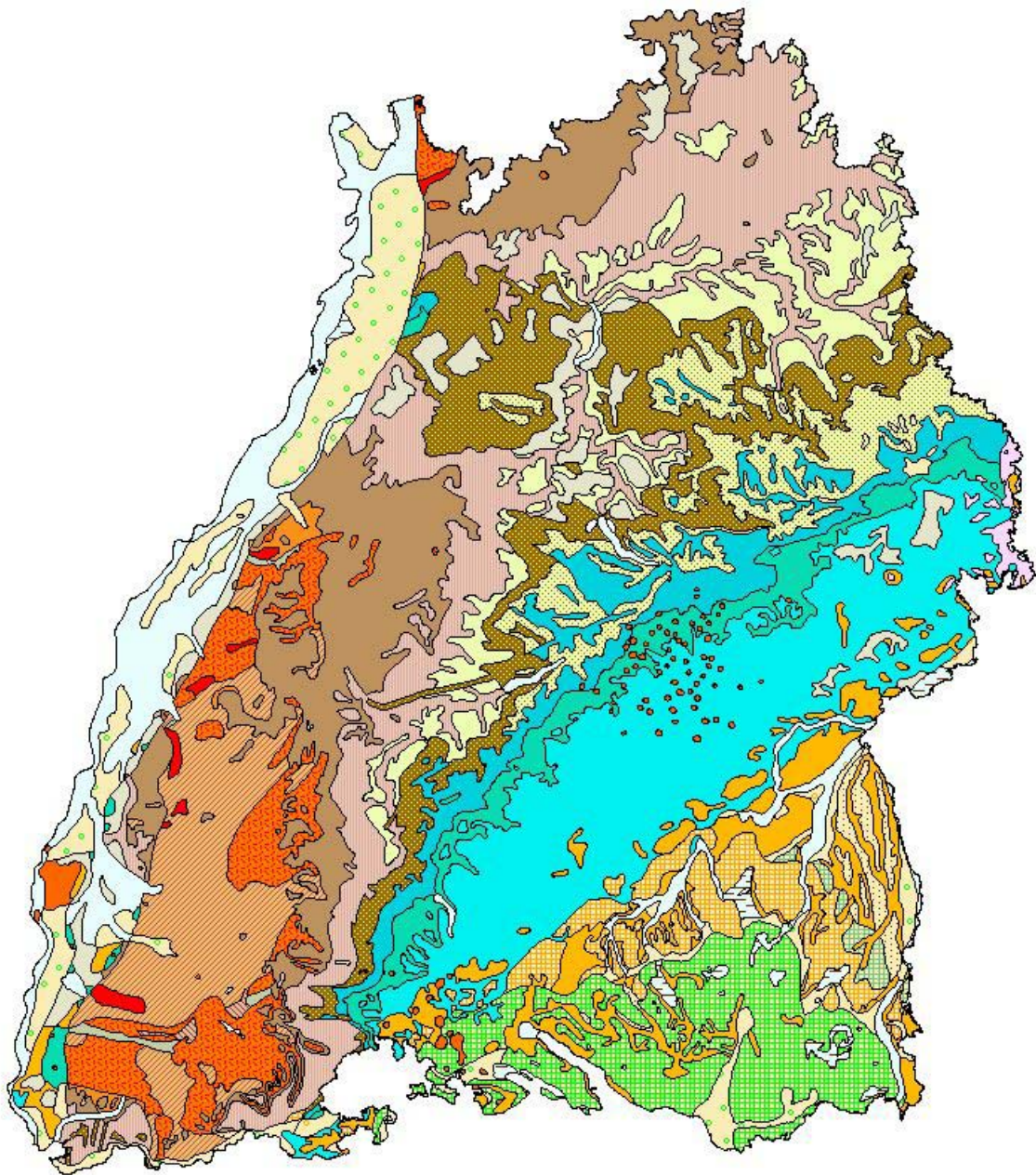
3.2 DATENLAGE ZU HINTERGRUNDGEHALTEN IN BÖDEN

Landesweite Hintergrundgehalte für Schwermetalle in natürlichen Unterböden (B und Cv-Horizonte) liegen seit längerem vor (LfU 1994) [4]. Diese Daten waren auch eine Grundlage für die Ableitung von länderübergreifenden Hintergrundwerten in Ober- und Unterböden Deutschlands im Auftrag der LABO (LABO 2003). Die Zusammenstellung hat gezeigt, dass Vorsorgewerte für Böden der BBodSchV in der Regel eingehalten werden. Überschreitungen in Einzelfällen waren bei Oberböden z. B. in Industriezentren oder bei Unterböden in Regionen mit altem Erzbergbau oder besonderen Bodenausgangsgesteinen (z. B. basische Vulkanite, „Ölschiefer“) zu verzeichnen. Die Veröffentlichung weist auch darauf hin, dass typische luftgetragene, ubiquitäre Kontaminanten wie z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe auf Oberböden beschränkt und wegen des fehlenden Bezugs zum Bodenausgangsgestein in natürlichen Unterböden nur in Ausnahmefällen nachweisbar sind.

Die TR Boden vom 5.11.2004 enthält eine Öffnungsklausel, nach der in Gebieten mit naturbedingt oder großflächig siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten höhere Zuordnungswerte für die Verwertung von Boden zulässig sind, wenn das Bodenmaterial aus diesen Gebieten stammt. Neben der Bestimmung der aktuellen Qualitäten von unbelastetem Bodenaushub in Baden-Württemberg sollte daher innerhalb dieses Projekts auch versucht werden, einen Bezug der Herkunft der Proben zu den geologischen Großeinheiten in Baden-Württemberg herzustellen.

Die Geologie von Baden-Württemberg ist in vereinfachter Form in der Geologischen Schulkarte Baden-Württemberg im Maßstab 1:1.000.000 [3] dargestellt (Geologische Großeinheiten; Abbildung 1).

Abbildung 1: Geologische Schulkarte Baden-Württemberg im Maßstab 1:1.000.000 [3] mit den geologischen Großeinheiten (Legende aufsteigend nach geologischem Alter)



- | | |
|--|--|
|  Junge Talfüllung |  Oberjura (Weißer Jura) und Jura ungegliedert |
|  Moor und Torf |  Mitteljura (Brauner Jura) |
|  Löss und Lehm |  Unterjura (Schwarzer Jura) |
|  Würmzeitliche Schotter (Niederterrasse) |  Höherer Mittel- und Oberkeuper |
|  Würmzeitliche Moränensedimente |  Tieferer Mittelkeuper sowie ungegliederter Keuper |
|  Rißzeitliche Schotter (Hochterrasse) |  Unterkeuper (Lettenkeuper) |
|  Rißzeitliche Moränensedimente |  Muschelkalk |
|  Moränensedimente des älteren Pleistozäns |  Buntsandstein |
|  Deckenschotter des älteren Pleistozäns |  Sedimentgesteine des Rotliegenden und des Zechsteins |
|  Quartäre Sedimente (ungegliedert) |  Ältere vulkanische Gesteine |
|  Tertiäre Sedimentgesteine |  Sedimentgesteine des Karbons |
|  Jüngere vulkanische Gesteine |  Kambrium bis Devon (vorwiegend Alte Schiefer) |
|  Impaktgesteine |  Granite und andere Plutonite |
| |  Gneise, vergneiste Gesteine und Migmatite |

Nach den in Baden-Württemberg über Schwermetallgehalte natürlicher Unterböden vorliegenden Daten können diese je nach Geologie des Ausgangsgesteins (Gesteinstyp) deutlich variieren. Dabei muss beachtet werden, dass die verschiedenen geologischen Großenheiten sehr unterschiedliche Gesteinstypen aufweisen, oder bestimmte Gesteinstypen treten in mehr als nur einer geologischen Großenheit auf. Ein zwingender Zusammenhang zwischen den geologischen Großenheiten und bestimmten, charakteristischen Schwermetallgehalten besteht daher nicht. In Tabelle 5 sind die Untersuchungsergebnisse den jeweils relevanten Z0-Werten der TR Boden (Stand 5.11.2004) gegenübergestellt. Bei den damaligen Untersuchungen wurde noch nicht in die Hauptbodenarten Sand, Lehm/Schluff und Ton der BBodSchV differenziert.

Tabelle 5: Schwermetallkonzentrationen (Mittelwerte und 90-Perzentile) in Böden verschiedener Ausgangsgesteine in Baden-Württemberg nach [4] im Vergleich zu den Z0-Werten (Feststoff) der TR Boden (Stand 5.11.04);

(n = Anzahl der untersuchten Proben; M= Mittelwert; 90p = 90-Perzentil; alle Werte in mg/kg)

	n	Pb		Cr		Cu		Ni		Zn	
<i>TR Boden (Stand 5.11.04)</i>											
Z 0 (Sand)		40		30		20		15		60	
Z 0 (Lehm/Schluff)		70		60		40		50		150	
Z 0 (Ton)		100		100		60		70		200	
		M	90p	M	90p	M	90p	M	90p	M	90p
Magmatite	29	25	46	17	32	7	12	7	14	45	85
Metamorphite	50	38	72	52	84	26	53	26	43	85	118
Sandsteine	74	20	43	18	34	5	10	11	29	30	58
Kalksteine-Muschelkalk	39	50	12 0	44	60	33	46	44	63	85	156
Tonsteine-Keuper	22	23	45	52	74	39	95	43	61	50	65
Wechselfolgen-Keuper	15	20	31	34	56	10	18	24	44	46	76
Tonsteine-Jura	39	33	53	47	72	32	65	88	142	120	165
Kalksteine-Jura	83	31	45	66	99	27	45	60	98	97	153
Löss	202	26	43	37	49	17	23	29	42	57	78
Sande, Kies	81	11	23	17	33	8	17	12	23	31	67
Geschiebemergel	90	19	28	34	46	16	24	26	40	52	64
Wechselfolgen-Tertiär	6	20	37	22	38	18	36	25	46	57	76

	n (Cd/ Tl)	Cd		Tl	
<i>TR Boden (Stand 5.11.04)</i>					
Z 0 (Sand)		0,4		0,4	
Z 0 (Lehm/Schluff)		1		0,7	
Z 0 (Ton)		1,5		1	
		M	90p	M	90p
Magmatite + Metamorphite	24	0,11	0,22	0,59	1,29
Sandsteine	32/ 27	0,09	0,10	0,30	0,73
Kalksteine-Muschelkalk	12/ 9	0,24	0,51	0,67	1,05
Tonsteine	14	0,12	0,18	0,34	0,72
Posidonienschiefer	47/ 48	1,00	2,20	2,80	5,70
Kalksteine-Jura	21/ 17	0,52	1,00	0,29	0,90
Quartär	61/ 60	0,11	0,10	0,15	0,20

Geochemische Untersuchungen an ausgewählten Gesteinen des oberflächennahen Untergrunds in Baden-Württemberg sind in einer Dissertation von LOTZE [5] dokumentiert. Gesteinsschichten der Trias (Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper) und des Jura im Großraum Stuttgart wurden auf Gesamt- und eluierbare Gehalte an Schwermetallen, Sulfat und anderen Stoffen untersucht. Die Verteilung geogener Schwermetalle in Gesteinen und Böden Baden-Württembergs wurden darüber hinaus in [6] untersucht.

4 Durchführung der Untersuchungen

Zur Beprobung von Bodenaushubmaterial wurden in Baden-Württemberg 53 Bodenaushubdeponien angefahren. Die Auswahl der 53 Deponien aus den über 400 Bodenaushubdeponien in Baden-Württemberg erfolgte nach verschiedenen Kriterien.

Zum einen wurden bevorzugt Gemeindedepo­nien ausgewählt, da diese meist nur Bodenaushub aus der eigenen Gemeindegemarkung annehmen und daher ein kleines, definiertes Einzugsgebiet aufweisen. Aus den Gemeindedepo­nien wurden möglichst solche ausgewählt, in deren Gemarkung die geologische Formation weitgehend einheitlich ist. Hierbei war der geologische Dienst behilflich.

Andererseits wurden die Deponien möglichst gleichmäßig über das Land verteilt ausgewählt, sodass in jedem Landkreis mindestens eine Deponie beprobt wurde.

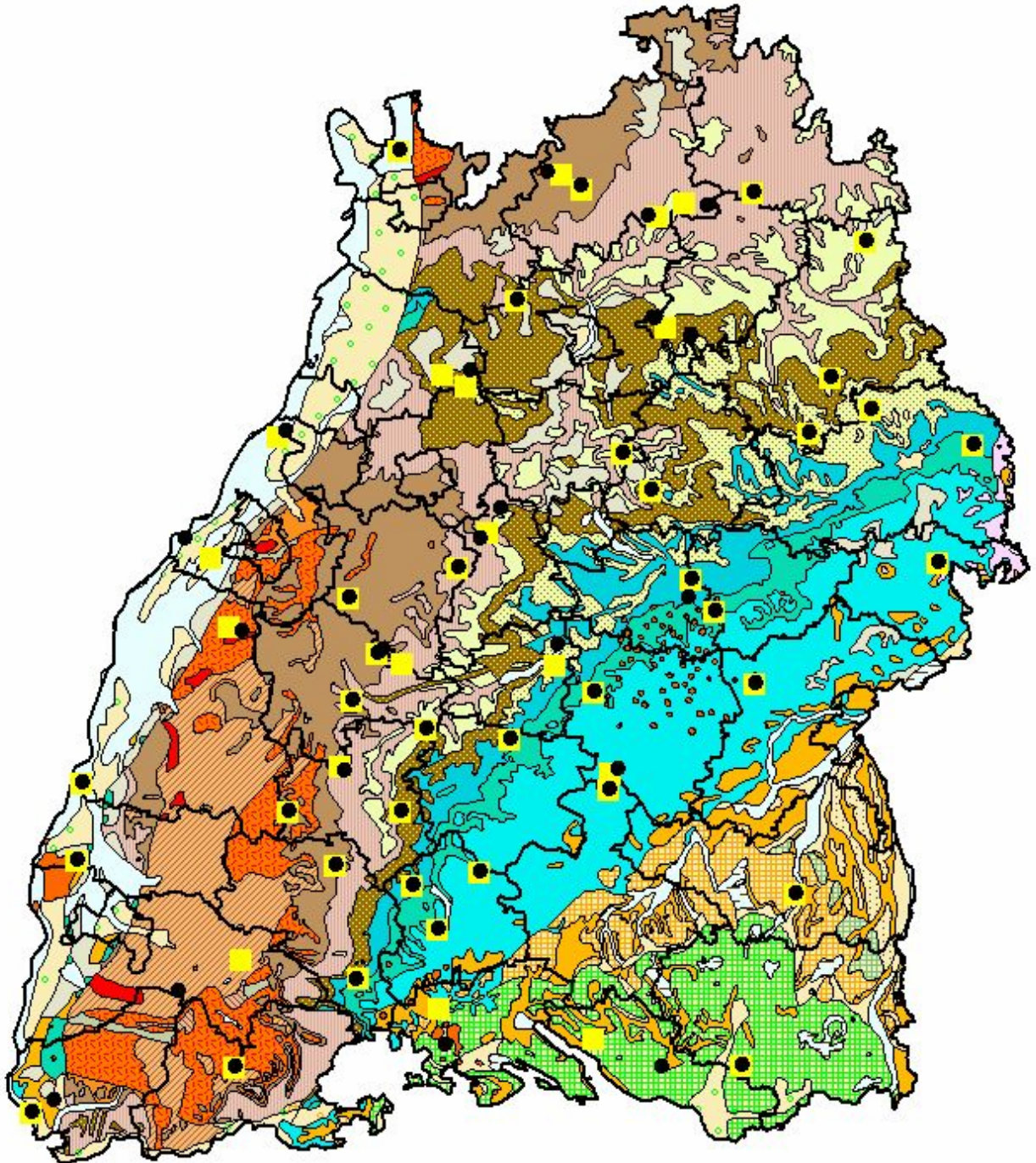
Zudem sollten die ausgewählten Deponien die wesentlichen geologischen Großeinheiten abdecken, die in Baden-Württemberg zu finden sind.

Die Probenahme erfolgte nach Absprache mit den zuständigen Überwachungsbehörden. Für Gemeindedepo­nien sind die Landkreise und für Landkreisdeponien die Regierungspräsidien zuständig. In Anwesenheit des Deponiewärterers bzw. des Deponiebetreibers wurden insgesamt 59 Proben entnommen. In einzelnen Fällen wurde auf Hinweis des Deponiepersonals eine Baustelle, an der gerade Bodenaushub anfiel, direkt angefahren und das Bodenmaterial vor Ort beprobt.

Die Proben wurden von der LfU, Referat 35 in Anlehnung an die LAGA-Richtlinie PN98 [7] entnommen. Beprobt wurden separate Haufwerke, die in den meisten Fällen (bei rund 90 % der Proben) nach Hinweis des Deponiepersonals einer bestimmten Baustelle zugeordnet werden konnten. Über das jeweilige Haufwerk verteilt wurden Einzelproben entnommen, zu Mischproben vereint und vor Ort durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz auf die erforderliche Laborprobe verjüngt. Die spätere Zuordnung einer Probenahmestelle zu einer geologischen Großeinheit erfolgte dann mit den Koordinaten der jeweiligen Baustelle, ansonsten mit den Koordinaten der beprobten Deponie. Wurde auf einer Deponie ein weiteres Haufwerk vorgefunden, das sich in der Zusammensetzung, Beschaffenheit oder Farbe deutlich unterschied, wurde auch davon eine Mischprobe entnommen.

Die Geologische Schulkarte Baden-Württemberg (vgl. Kap. 3.2) ist in digitaler Form verfügbar, so dass das Bodenmaterial mit den Koordinaten des Herkunftsortes bzw. des Deponiestandortes einer geologischen Großeinheit in der Schulkarte zugeordnet werden konnte. In Abbildung 2 sind die 53 angefahrenen Bodenaushubdeponien als gelbe Quadrate in die Geologische Schulkarte eingezeichnet. Die schwarzen Punkte stellen die tatsächlichen Herkunftsorte des beprobten Bodenmaterials dar. Für die wenigen Fälle (rund 10 % der Proben), in denen der genaue Herkunftsort nicht bekannt war, wurde die Herkunft mit dem Deponiestandort gleichgesetzt.

Abbildung 2: Geologische Schulkarte Baden-Württemberg mit den angefahrenen 53 Bodenaushubdeponien (gelbe Vierecke) und den Herkunftsorten der 59 beprobten Bodenaushubmaterialien (schwarze Punkte); Landkreisgrenzen sind als schwarze Linien eingezeichnet



Die Proben wurden teilweise durch das Zentrallabor der LfU, teilweise durch die Firma Berghof Analytik und Umweltengineering GmbH, 72074 Tübingen, untersucht. Die zu untersuchenden Parameter wurden aus der Liste der Zuordnungswerte der TR Boden (Stand 5.11.2004) ausgewählt. Bestimmte dort aufgeführte Parameter sind geogen ohne Bedeutung, z. B. LHKW, EOX, BTX, Cyanide und Phenolindex, und wurden deshalb nicht bestimmt. Kohlenwasserstoffe, PCB und PAK wurden mit bestimmt, da sie am ehesten auf mögliche anthropogene Belastungen hinweisen können. Somit wurden folgende Parameter untersucht:

Im Feststoff:

Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr_{gesamt}, Cu, Ni, Tl, Hg, Zn),
 polyzyklische, aromatische Kohlenwasserstoffe PAK₁₆,
 Kohlenwasserstoffe (C₁₀-C₂₂ und C₁₀-C₄₀),
 TOC (gesamter organischer Kohlenstoff).

Im Eluat:

Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr_{gesamt}, Cu, Ni, Hg, Zn),
 pH, Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat.

Entsprechend den Vorgaben der DIN ISO 11464:1996-12 für die Probenvorbehandlung bei Bodenuntersuchungen wurde der Grobanteil der homogenisierten Proben (Steine) abgetrennt und nur der Feinanteil der Untersuchung zugeführt. Die Eluate wurden nach DIN 38414-4:1984-10 hergestellt. Für die Untersuchungen wurden die Normen nach Tabelle 6 angewandt. Sie entsprechen den Verfahren der LAGA M20, Teil III (Stand 5.11.2004) oder sind gleichwertig zu diesen.

Tabelle 6: Angewandte Analysenverfahren

Parameter	Analyseverfahren
Trockenrückstand	DIN ISO 11465:1996-12 bzw. DIN EN 12880
pH-Wert	DIN 38404-5:1984-01
Elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888:1993-11
Chlorid und Sulfat	DIN EN ISO 10304:1996-11
Königswasseraufschluss	DIN 38414-7:1983-01 (gleichwertig zu DIN ISO 11466:1997-06) bzw. DIN EN 13346
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn, Hg	DIN 38406-29:1999-05
Arsen	DIN EN ISO 11969:1996-11
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	DIN ISO 11047:2003-05
Quecksilber	EN 1483:1997-08
PAK	Handbuch Altlasten, Bd. 7, Teil 1 (HLUG, 1998) bzw. in Anlehnung an DIN ISO 13877:2000-01
PCB	DIN ISO 10382:2003-05
TOC	DIN EN 13137: 2001-12
Kohlenwasserstoffe	E DIN EN 14039:2000-12, in Verbindung mit LAGA KW/04:2004-11
Hauptbodenart	Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., 1994

5 Ergebnisse

5.1 ERGEBNISÜBERSICHT

Die Einzelergebnisse aller 59 Bodenproben sind tabellarisch im Anhang aufgeführt. Die Tabelle enthält auch die Mittelwerte, Mediane, 80-Perzentile, 90-Perzentile, Minimal- und Maximalwerte der untersuchten Parameter. Zudem sind dort diejenigen Werte markiert, die unter Berücksichtigung der Bodenart den jeweiligen Z0-Wert des Entwurfs der TR Boden vom 05.11.2004 (vgl. Kapitel 2.1) überschreiten.

In den Tabellen 7 und 8 sind von allen 59 Proben die Mittelwerte, Mediane (50-Perzentile) und 90-Perzentile der analysierten Parameter zusammengestellt. Tabelle 7 enthält die Feststoffparameter, Tabelle 8 die Parameter im Eluat.

Tabelle 7: Mittelwert, Mediane und 90-Perzentile für die Feststoffgehalte der 59 Bodenproben

Parameter	Dimensi- on	Messwerte		
		Mittel	Median (50-Perz.)	90-Perz.
As	mg/kg TS	14,8	11,0	29,5
Pb	mg/kg TS	26,4	20,6	42,7
Cd	mg/kg TS	0,25	0,20	0,50
Cr	mg/kg TS	40,3	38,9	59,9
Cu	mg/kg TS	22,7	20,1	36,5
Ni	mg/kg TS	36,7	35,3	61,0
Tl	mg/kg TS	0,27	0,30	0,42
Hg	mg/kg TS	0,12	0,03	0,18
Zn	mg/kg TS	72,3	62,1	119,6
PAK ₁₆	mg/kg TS	0,7	0,2	1,1
PCB ₆	mg/kg TS	0,001	0,002	0,015
TOC	Masse-%	1,6	1,0	3,5
Kohlen- wasserstoffe C ₁₀ -C ₂₂ (C ₁₀ -C ₄₀)	mg/kg TS	< 50 (56)	< 50 (< 50)	< 50 (51)

Tabelle 8: Mittelwert, Mediane und 90-Perzentile für die Eluatkonzentrationen der 59 Bodenproben

		Messwerte		
Parameter	Dimension	Mittel	Median (50-Perz.)	90-Perz.
pH-Wert	-	7,7	7,8	8,0
Leitfähigkeit	µS/cm	121	114	191
Chlorid	mg/l	1,3	< 0,5	2,6
Sulfat	mg/l	12,0	5,4	34,9
As	µg/l	1,5	0,8	3,4
Pb	µg/l	0,2	< 0,2	0,3
Cd	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cr	µg/l	1,1	0,9	1,6
Cu	µg/l	2,7	2,1	4,9
Ni	µg/l	1,0	0,7	2,0
Hg	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zn	µg/l	18,2	15,0	28,2

Tabelle 9 zeigt die Gesamtzahl der Überschreitungen je Parameter. Bei den Feststoffparametern sind die bodenartspezifischen Z0-Werte sowie die Z0*-Werte berücksichtigt.

Tabelle 9: Anzahl und prozentualer Anteil der Bodenproben (Probenanzahl N = 59), bei denen der Z0- bzw. Z0*-Wert des jeweiligen Parameters überschritten ist

Parameter	Proben über Z0				Quote	Proben über Z0*	Quote
	Sand (3 Proben)	Lehm/Schluff (48 Proben)	Ton (8 Proben)	Summe			
Arsen	2	8	2	13	22,0 %	12	20,3 %
Blei	2	1	1	4	6,8 %	0	0
Cadmium	0	2	0	2	3,4 %	2	3,4 %
Chrom	2	5	0	7	11,9 %	0	0
Kupfer	1	3	1	5	8,5 %	1	1,7 %
Nickel	3	8	0	11	18,6 %	0	0
Quecksilber	1	2	0	3	5,1 %	1	1,7 %
Zink	3	2	0	5	8,5 %	0	0
Thallium	0	0	0	0	0	0	0
TOC	38			38	64,4 %	38	64,4 %
Sulfat	10			10	16,9 %	10	16,9 %

Lässt man die TOC-Überschreitungen außer Betracht, halten von den 59 Proben 27 Proben (46 %) alle Z0-Werte ein, 32 Proben (54 %) liegen mit zumindest einem Wert über Z0, davon 25 Proben (42 %) auch über Z0*. Zu letzteren tragen im Wesentlichen Arsen (Feststoff) und Sulfat (Eluat) bei.

Über den ubiquitären Hintergrund erhöhte PAK-Gehalte in Böden gelten als Indikator für spezifische Kontaminationen. Von den 59 untersuchten Proben wiesen 18 Proben PAK-Gehalte größer 0,5 mg/kg auf. Eine dieser 18 Proben und eine weitere waren aufgrund erhöhter Quecksilbergehalte auffällig. Bei den restlichen 40 Proben ergibt sich (ohne Berücksichtigung der TOC-Überschreitungen) folgendes Bild: 20 Proben (50 %) liegen unter Z0, bei 20 Proben (50 %) liegt mindestens einer der Parameter über Z0, bei 16 Proben (40 %) auch über Z0*. Damit ergibt sich, was den prozentualen Anteil der Überschreitungen betrifft, auch bei Ausgrenzung der Proben mit erhöhten PAK-Gehalten ein fast identisches Bild.

5.2 EINZELERGEBNISSE

5.2.1 BESTIMMUNG DER BODENARTEN

Das beprobte Bodenaushubmaterial war bei 48 der 59 Proben der Bodenart Lehm/Schluff zuzuordnen. Der Bodenart Sand konnten 3 Proben, der Bodenart Ton 8 Proben zugeordnet werden. Da es sich bei Bodenaushubmaterial um Gemische handelt, war eine eindeutige Zuordnung nicht immer problemlos. Nach den Vorgaben in Kapitel 1.2.3.2 der TR Boden (Stand 05.11.2004) gelten für Bodenmaterial, das nicht bodenartspezifisch zugeordnet werden kann bzw. als Gemisch verschiedener Bodenarten bei Baumaßnahmen anfällt, die Zuordnungswerte für die Bodenart Lehm/Schluff.

5.2.2 SCHWERMETALLE IM FESTSTOFF

Gemäß Tabelle 9 lagen die Schwermetallgehalte im Feststoff in 50 Fällen über den jeweiligen Zuordnungswerten Z_0 und in 16 Fällen über den Z_0^* -Werten der TR Boden (Stand 05.11.2004). Die meisten Überschreitungen gab es bei Arsen, gefolgt von Nickel und Chrom. Für diese drei Parameter sind in den Abbildungen 3, 4 und 5 jeweils die Analysenwerte aller 59 Proben getrennt nach den Bodenarten Sand, Lehm/Schluff und Ton in steigender Reihenfolge dargestellt. Die verschiedenen Z_0 - und Z_0^* -Werte für den jeweiligen Parameter und ggf. Bodenart sind als Linien in die Diagramme eingezeichnet.

Abbildung 3: Arsengehalte der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge, getrennt nach Bodenarten) in Relation zu den Z_0 -Werten der TR Boden vom 05.11.2004 (L/S = Lehm/Schluff)

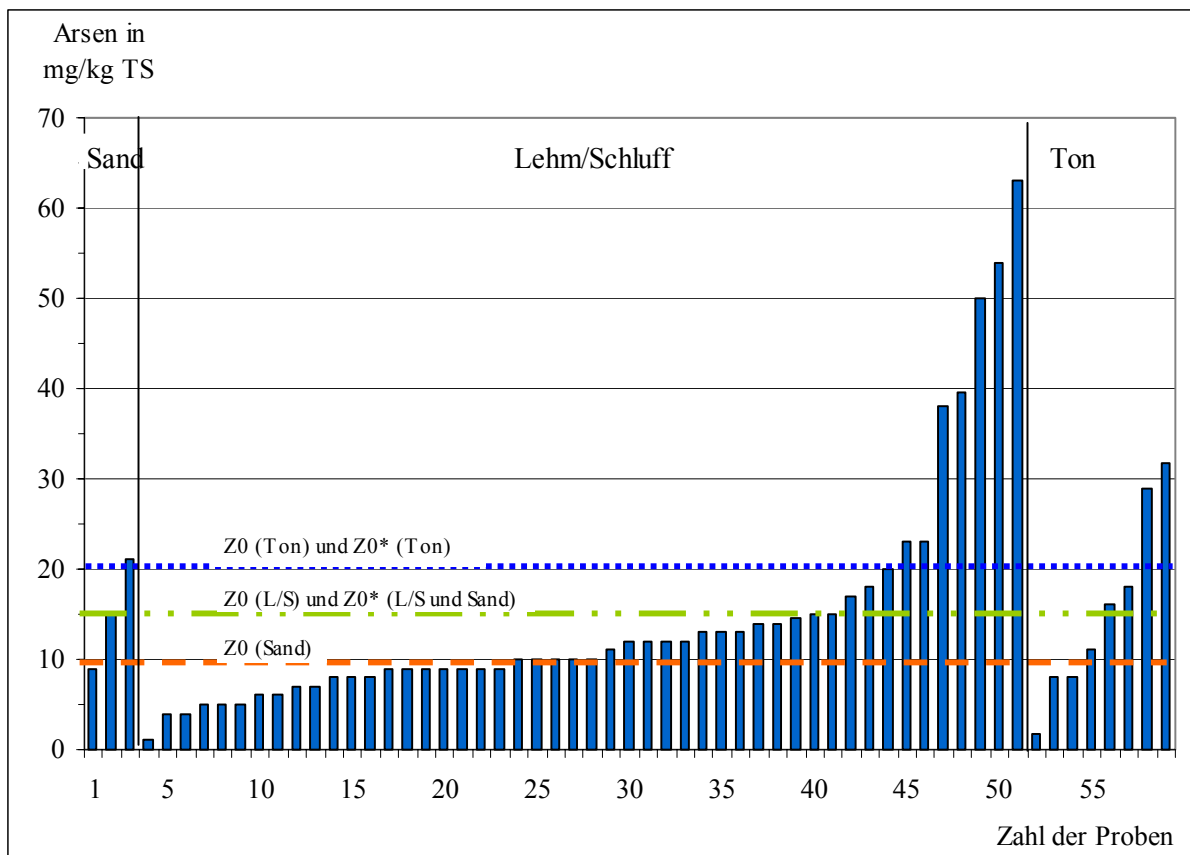


Abbildung 4: Chromgehalte der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge, getrennt nach Bodenarten) in Relation zu den Z0-Werten der TR Boden vom 05.11.2004

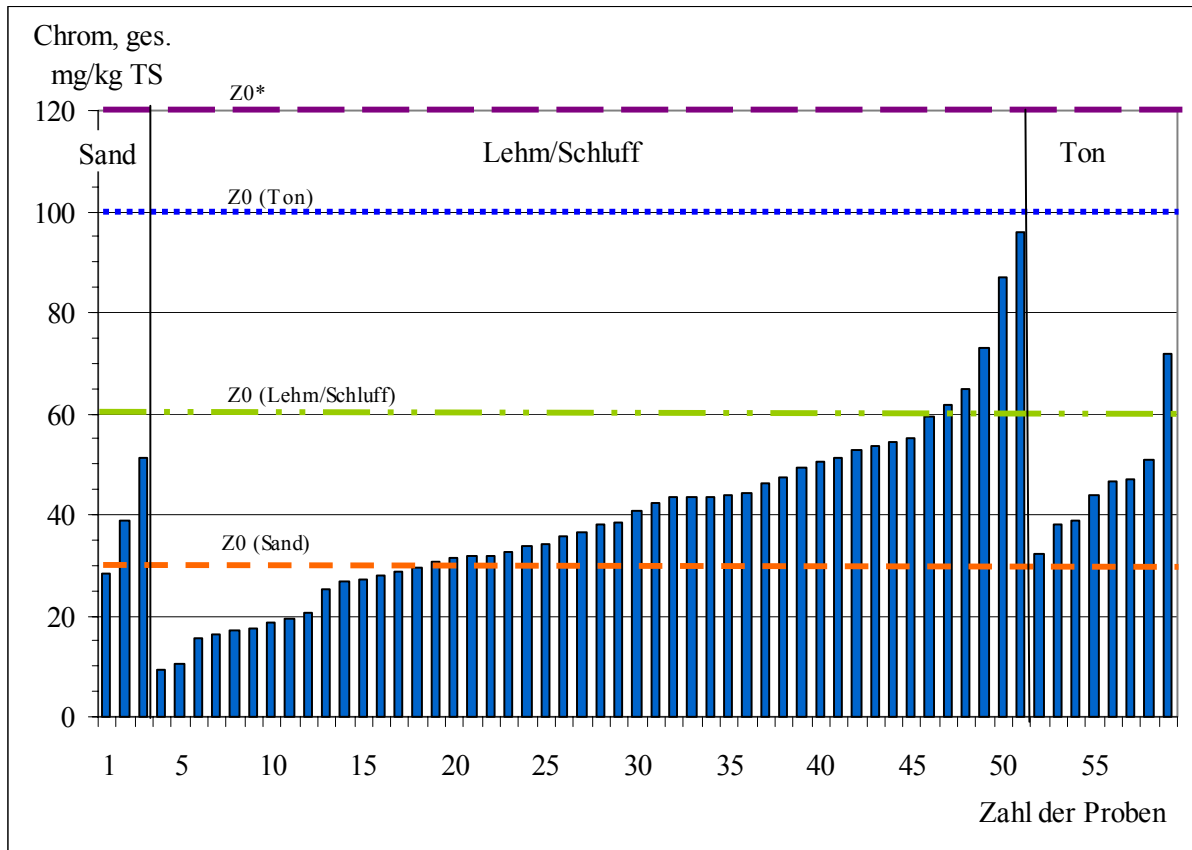
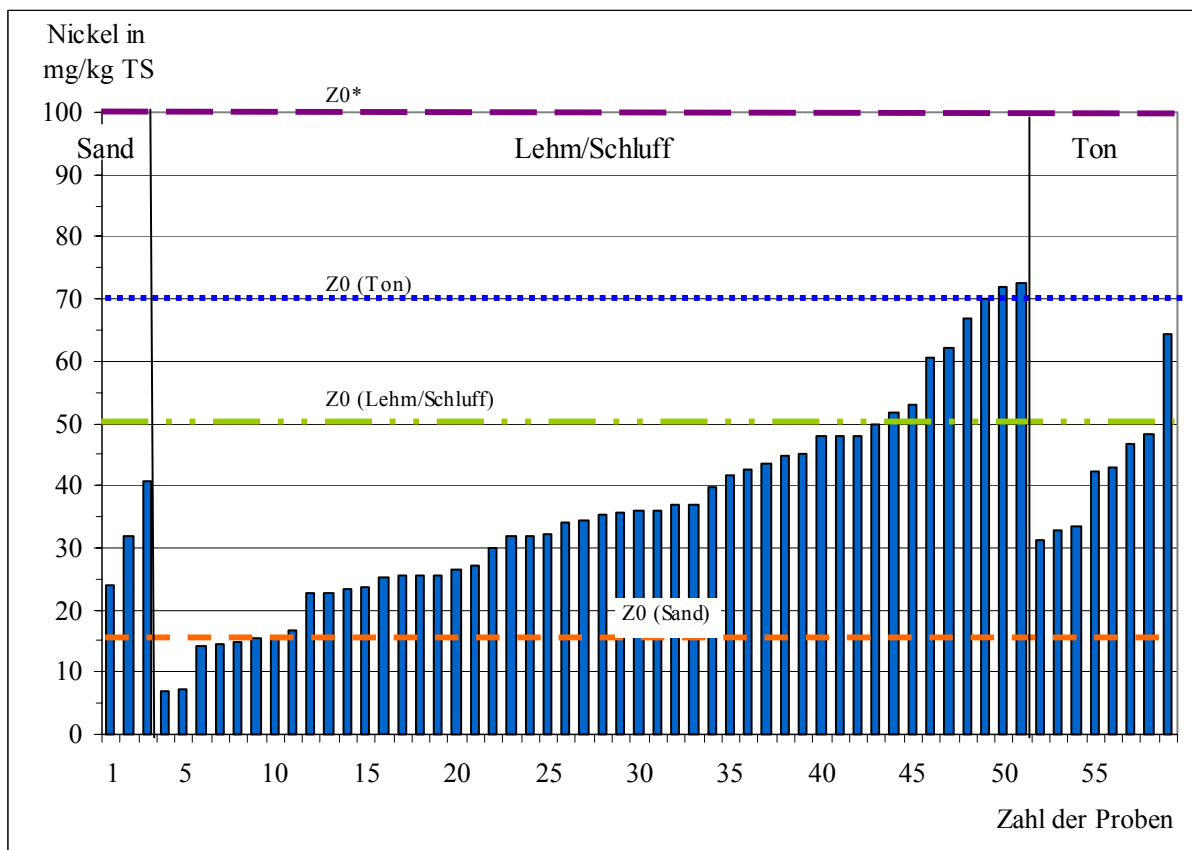


Abbildung 5: Nickelgehalte der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge, getrennt nach Bodenarten) in Relation zu den Z0-Werten der TR Boden vom 05.11.2004



Beim Parameter Arsen gab es für alle drei Bodenarten Proben, die über dem jeweiligen bodenartspezifischen Z_0 -Wert lagen. Insgesamt war bei 13 der 59 Proben der jeweilige Z_0 -Wert, bei 12 Proben auch der Z_0^* -Wert überschritten. Beim Nickel wurden von 11 Proben und beim Chrom von 7 Proben die jeweiligen bodenartspezifischen Z_0 -Werte überschritten, die Z_0^* -Werte jedoch eingehalten.

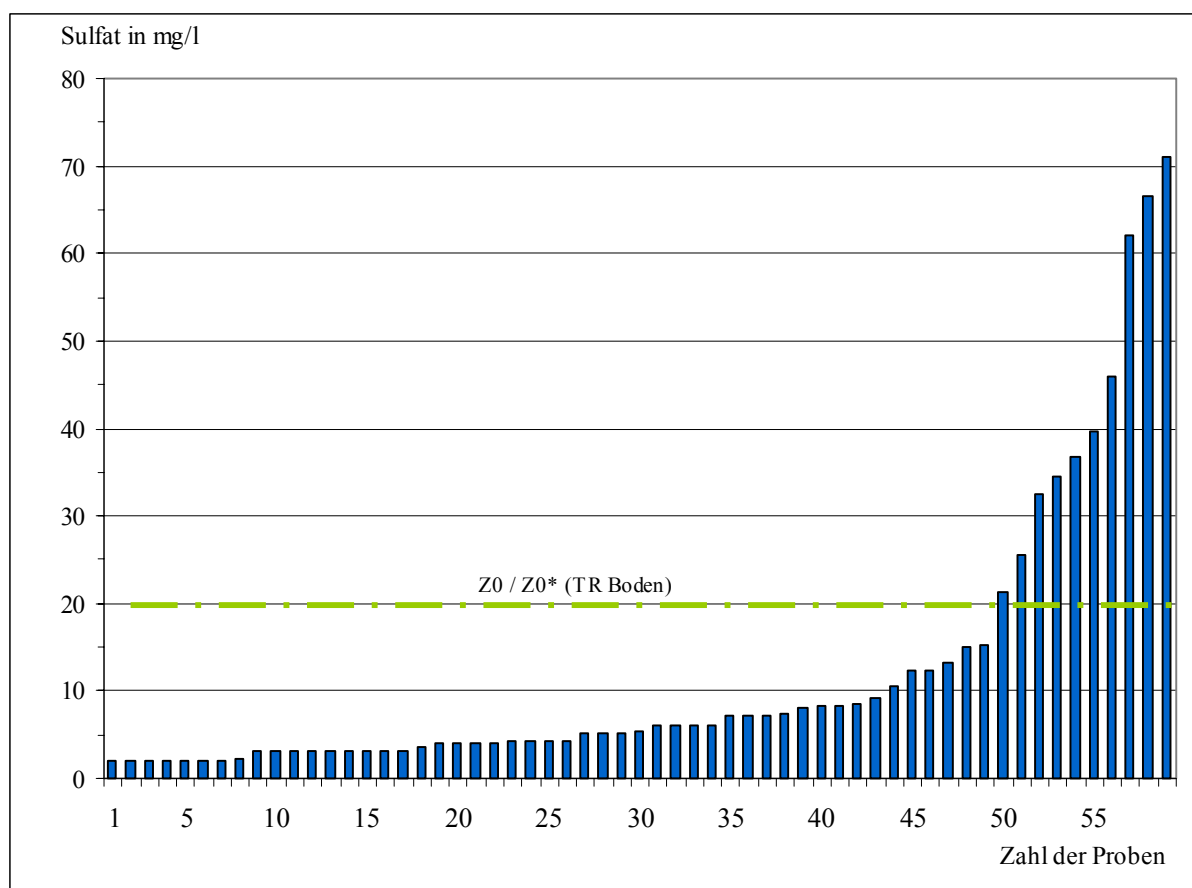
5.2.3 SCHWERMETALLE IM ELUAT

Die Schwermetallgehalte der 59 Proben im Eluat lagen alle unterhalb der Z_0/Z_0^* -Werte der TR Boden (Stand 05.11.2004). Dem jeweiligen Z_0 -Wert am nächsten kam der Maximalwert der Arsengehalte im Eluat, der $7,4 \mu\text{g/l}$ betrug ($Z_0 = 14 \mu\text{g/l}$ nach TR Boden). Deutlich unterhalb der jeweiligen Z_0 -Werte lagen die Maximalwerte der Blei-, Cadmium- und Zinkgehalte im Eluat, die nicht einmal 10 % der Z_0 -Werte erreichten (vgl. hierzu auch die Maximalwerte der Tabelle 11 im Anhang).

5.2.4 SULFAT, CHLORID, LEITFÄHIGKEIT, pH-WERT

Beim Parameter Sulfat (Abbildung 6) lagen zehn Werte der 59 Proben über dem Z_0/Z_0^* -Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004).

Abbildung 6: Sulfatgehalte der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge) in Relation zu dem Z_0/Z_0^* -Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004)

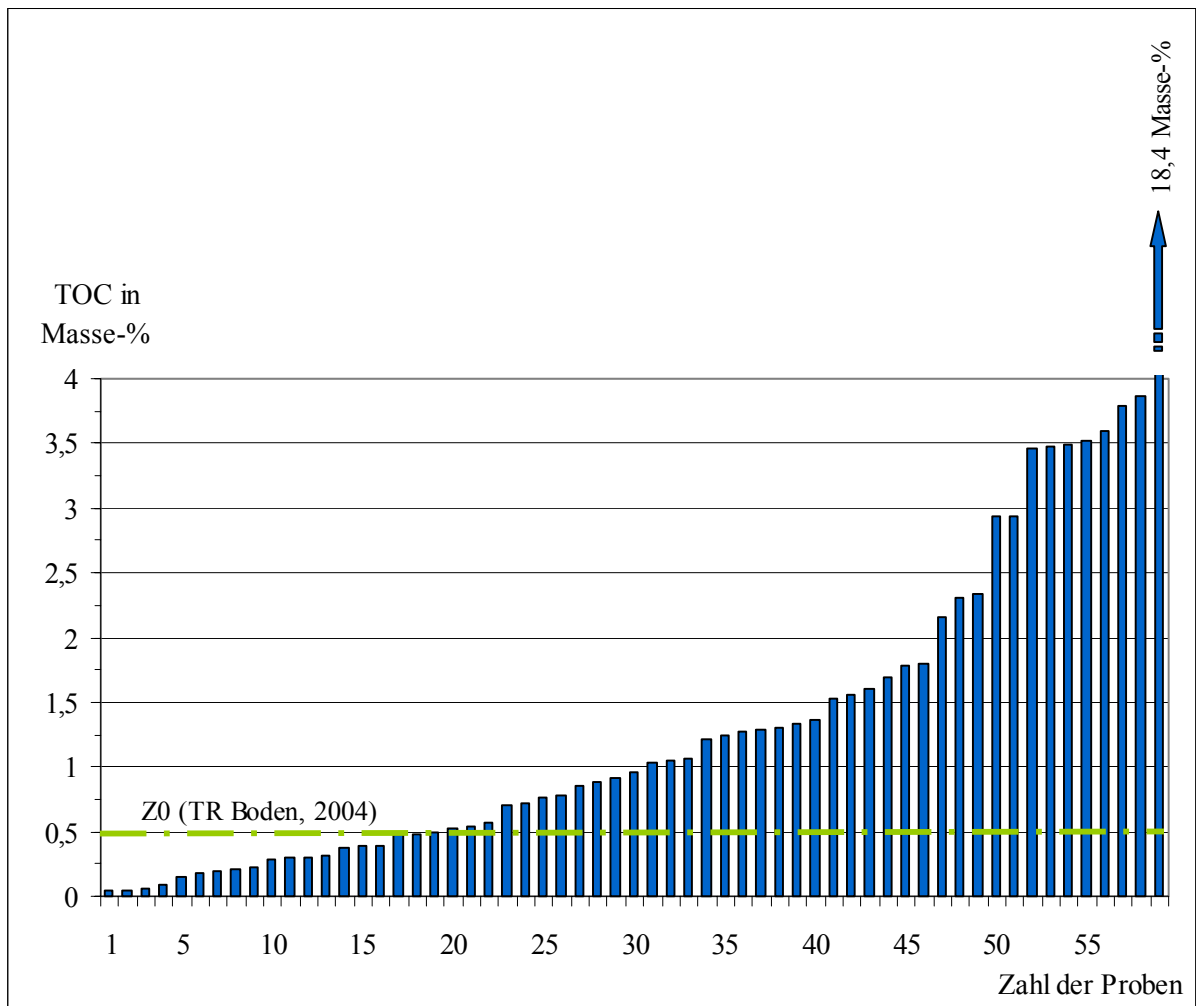


Beim Parameter Chlorid lag keiner der Werte über dem Z_0/Z_0^* -Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004). Der Z_0/Z_0^* -Wert für die Leitfähigkeit wurde von zwei Proben überschritten. Der pH-Wert lag bei zwei Proben unterhalb des für Z_0/Z_0^* zulässigen Mindestwertes von $\text{pH} = 6,5$.

5.2.5 ORGANISCHE PARAMETER

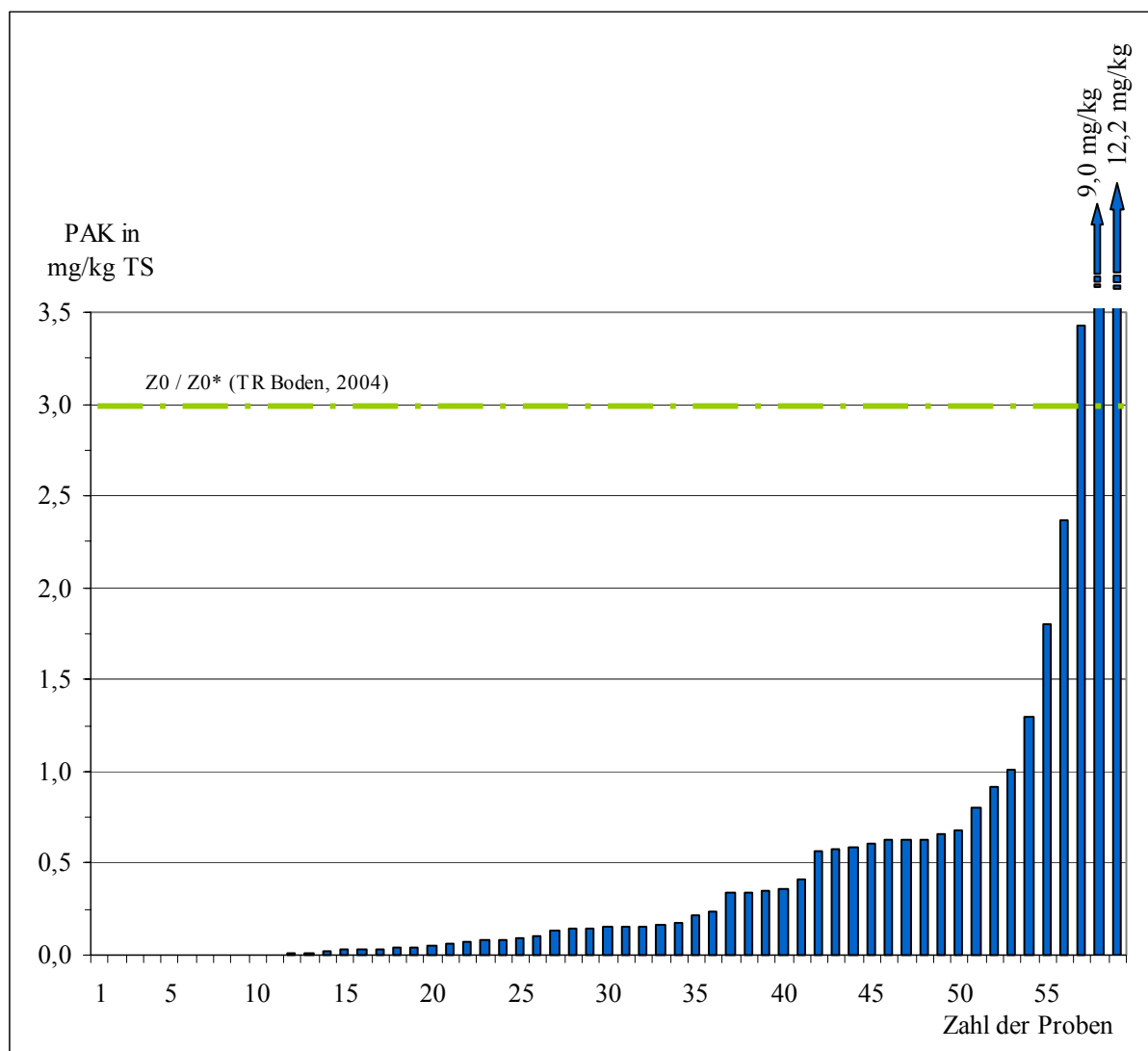
Beim Parameter TOC (Abbildung 7) lagen 38 Proben und damit rund zwei Drittel der Proben über dem Z0-Wert von 0,5 Masse-%, der in der TR Boden vom 05.11.2004 festgelegt ist. Ein Wert bis 1,0 Masse-% wäre nach TR Boden zulässig, sofern das C/N-Verhältnis des Bodenmaterials über 25 liegt. Das C/N-Verhältnis wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht bestimmt.

Abbildung 7: TOC-Werte der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge) in Relation zu dem Z0-Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004)



Beim Parameter PAK₁₆ (Abbildung 8) gab es drei Werte oberhalb des Z0-Wertes der TR Boden (Stand 05.11.2004).

Abbildung 8: PAK-Gehalt der 59 Einzelproben (in steigender Reihenfolge) in Relation zu dem Z0-Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004)



Beim Parameter PCB wurde der Z0-Wert der TR Boden (Stand 05.11.2004) von keiner der Proben überschritten.

5.3 ERGEBNISSE IN BEZUG ZU GEOLOGISCHEN GROßEINHEITEN

Wie in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben, wurden die Z0-Werte der TR Boden vom 05.11.2004 am häufigsten im Feststoff, besonders bei Arsen, Nickel und Chrom, überschritten. Im Folgenden ist für diese drei Parameter dargestellt, wie die Proben auf die geologischen Großeinheiten verteilt sind.

Die Abbildungen 9, 10 und 11 enthalten jeweils alle 59 Untersuchungsergebnisse, dargestellt in Bezug zu den geologischen Großeinheiten am Herkunftsort des Bodenmaterials bzw. am Deponiestandort nach der Geologischen Schulkarte von Baden-Württemberg im Maßstab 1:1.000.000 [3] (vgl. Kap. 3). Zur Orientierung sind die bodenartbezogenen Z0-Werte eingezeichnet.

Abbildung 9: Arsengehalte der 59 Bodenproben mit Zuordnung zu den geologischen Großeinheiten am Herkunftsort des Bodenmaterials bzw. am Deponiestandort

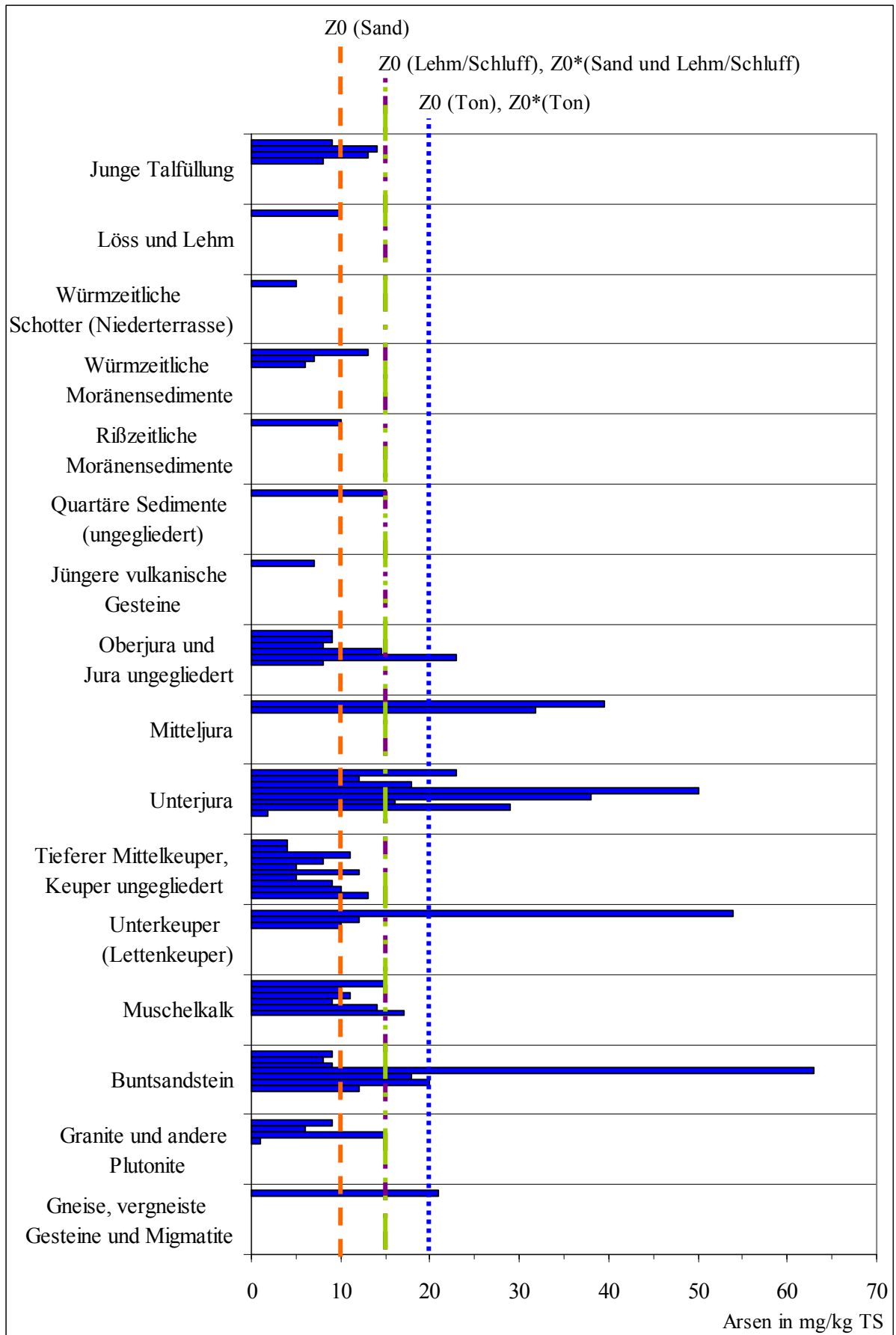


Abbildung 10: Chromgehalte der 59 Bodenproben mit Zuordnung zu den geologischen Großeinheiten am Herkunftsort des Bodenmaterials bzw. am Deponiestandort

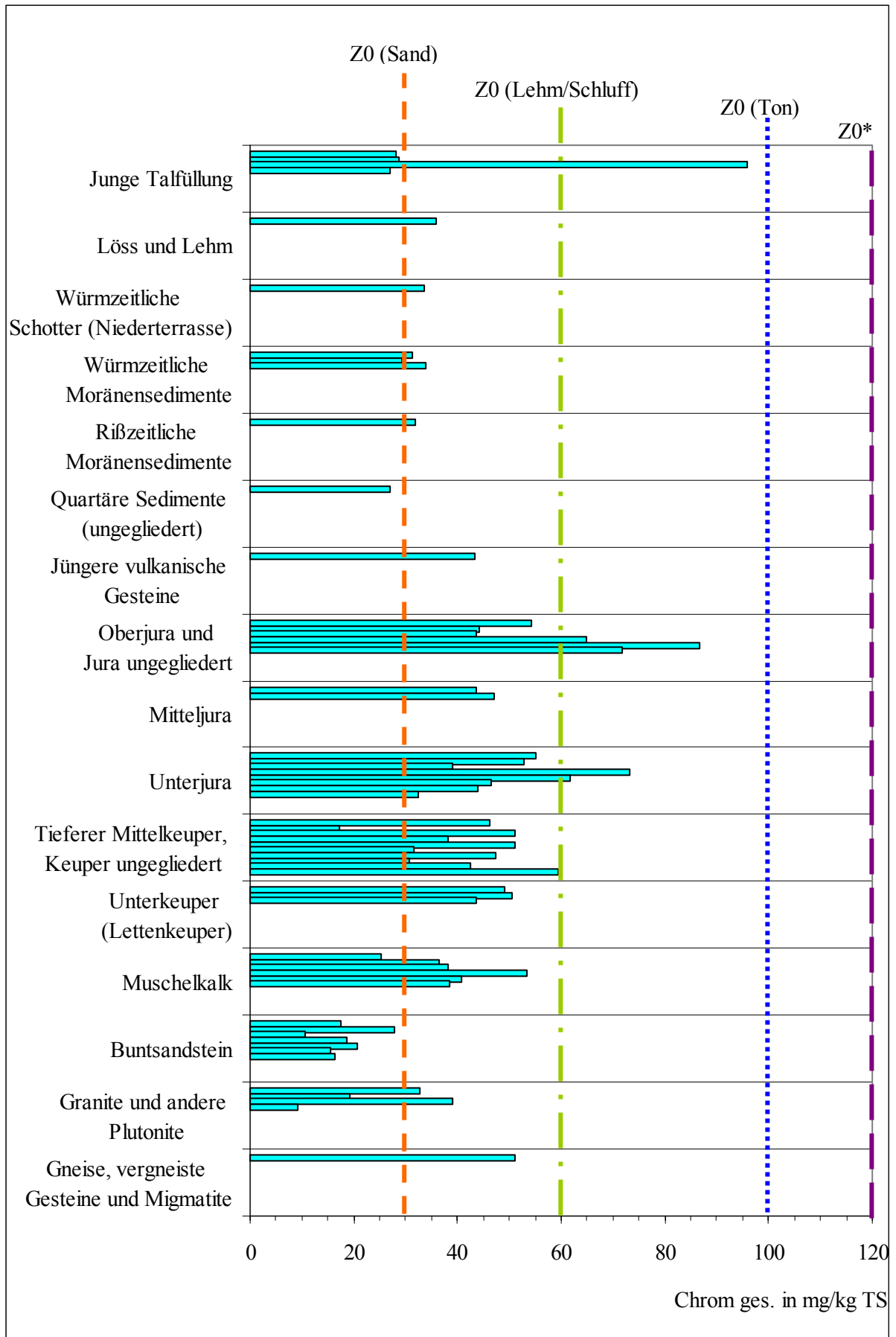
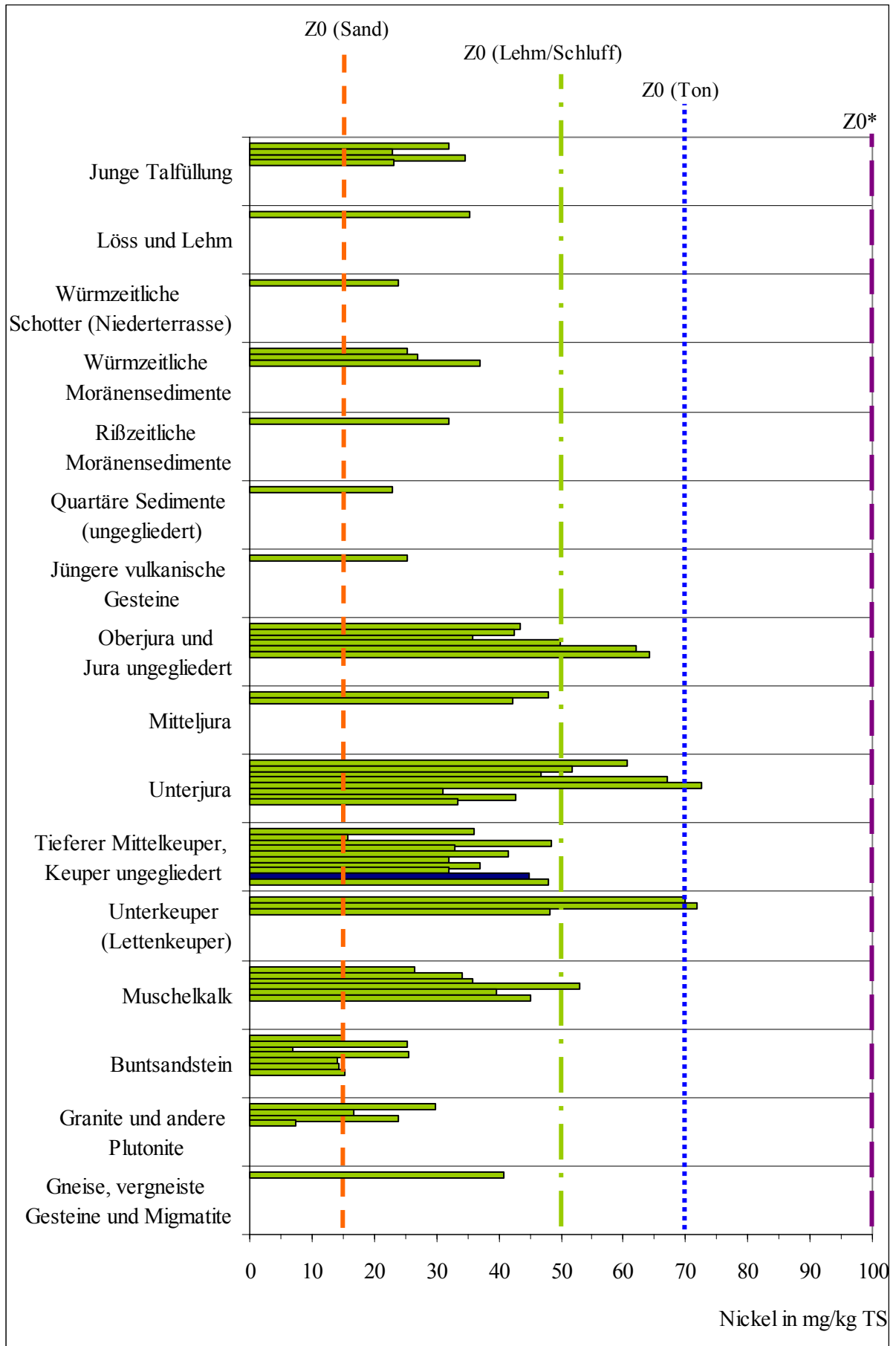


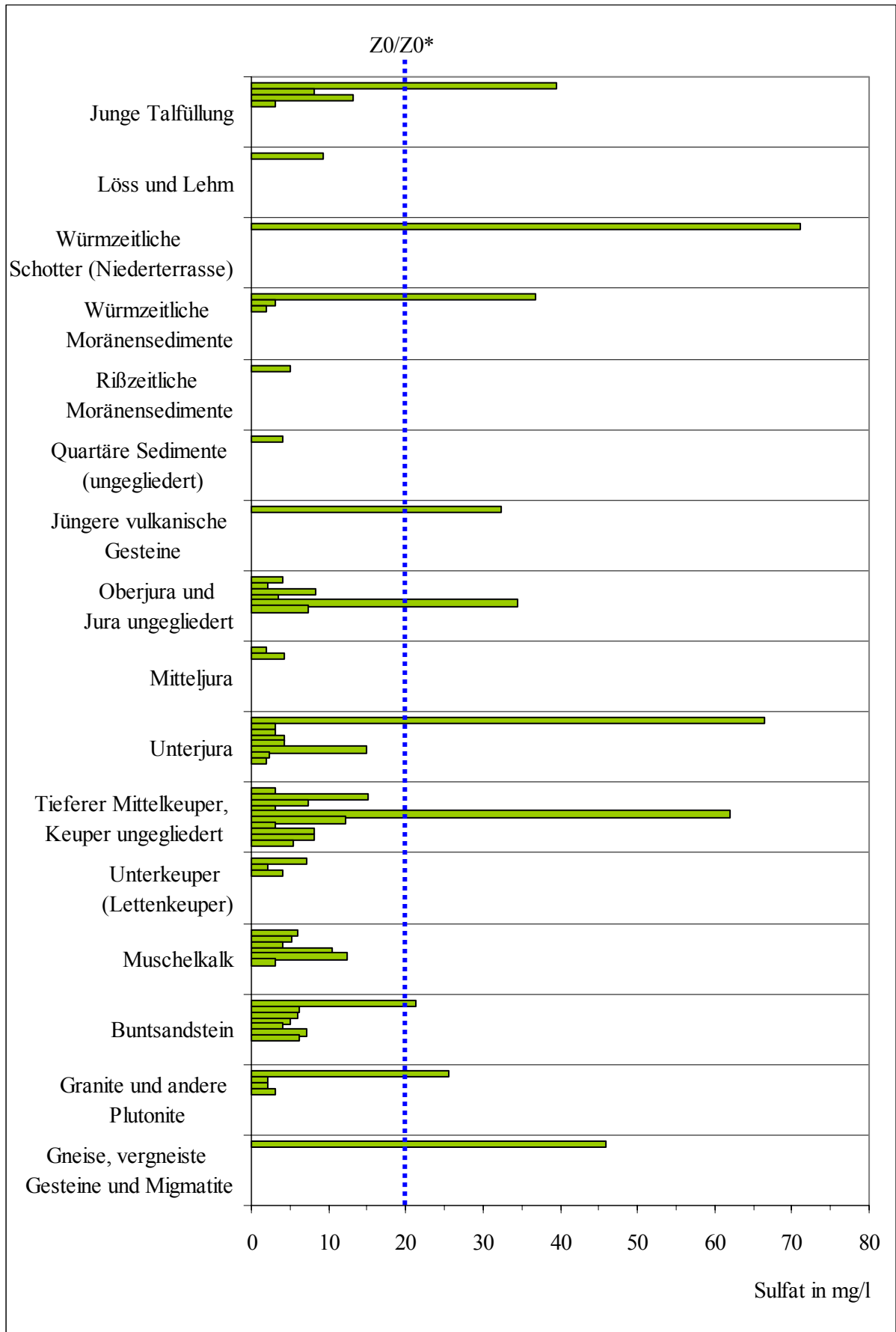
Abbildung 11: Nickelgehalte der 59 Bodenproben mit Zuordnung zu den geologischen Großeinheiten am Herkunftsort des Bodenmaterials bzw. am Deponiestandort



Aufgrund der geringen Probenanzahl sind statistische Aussagen zur Abhängigkeit der Schadstoffgehalte von der geologischen Formation nicht möglich. Bei allen drei dargestellten Schwermetallen (Arsen, Chrom und Nickel) sind höhere Werte in Gebieten des Jura erkennbar, einzelne höhere Werte treten aber auch in Gebieten mit anderen geologischen Formationen auf. Konkretere Aussagen können erst mit einer breiteren Datengrundlage gemacht werden.

Als weiteres Beispiel ist in Abbildung 12 die Sulfatkonzentration der 59 Bodenproben den geologischen Formationen am Herkunftsort zugeordnet. Auch hier ist aufgrund der geringen Datenmenge keine statistische Aussage möglich. Jedoch fällt auf, dass bei fast jeder geologischen Formation einzelne höhere Sulfatwerte auftreten. Der höhere Sulfatwert bei der Formation „tieferer Mittelkeuper/Keuper ungegliedert“ ist plausibel, da es sich um eine Bodenprobe am Standort eines Gipssteinbruches handelt. Die Probe wurde aus Bodenmaterial zwischen Oberboden und Gipskeuperschicht gewonnen. In Graniten, Gneisen und Buntsandstein im Mittleren und Südlichen Schwarzwald können Schwespatgänge (Bariumsulfat) auftreten, die ebenfalls zu höheren Sulfatwerten im Eluat führen.

Abbildung 12: Sulfatkonzentrationen der 59 Bodenproben mit Zuordnung zu den geologischen Groß-einheiten am Herkunftsort des Bodenmaterials bzw. am Deponiestandort



6 Bewertung

6.1 SCHADSTOFFGEHALTE IN RELATION ZU DEN Z0-WERTEN

Eine große Anzahl an Proben überschritt den TOC-Wert (Z0) von 0,5 Masse-%, der im Entwurf der TR Boden (Stand 05.11.2004) festgelegt ist. Auch der Z0-Wert (TOC) von 1,0 Masse-%, der für Bodenmaterial mit einem C/N-Verhältnis größer 25 gilt, wurde von 28 der 59 Proben überschritten. Die Ursache für die erhöhten TOC-Werte dürfte in einer Vermischung der untersuchten Materialien mit größeren Anteilen an humosem Oberboden liegen. In einzelnen Fällen ist es auch denkbar, dass Unterbodenmaterial erhöhte Humusgehalte aufweisen (u.a. Schwarzerden oder Moorböden). Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob ein systematischer Messfehler in der vorgeschriebenen Analysenmethode, z. B. bei stark karbonathaltigen Bodenmaterialien, vorliegen kann. Daher sollte eine alternative Methode zur Bestimmung des Humusgehaltes für Bodenaushubmaterial geprüft werden. Statt einer TOC-Messung könnte eine visuelle Ansprache des Bodenmaterials verpflichtend werden. Dies würde den Untersuchungsaufwand verringern und potentielle Fehler der Analysenmethode vermeiden.

Lässt man die TOC-Überschreitungen außer Betracht und nimmt vereinfacht die Z0-Werte des Entwurfs der TR Boden (Stand 05.11.2004) als Maßstab, könnten von den 59 untersuchten Proben 32 Proben (54 %) nicht als Z0-Material verwertet werden. 25 Proben (42 %) könnten nicht als Z0*-Material verwertet werden. Ausnahmen von den genannten Zuordnungswerten gelten nach der TR Boden nur für Böden mit naturbedingt (geogen) oder flächenhaft siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten. Tabelle 9 in Kapitel 5 zeigt die Gesamtzahl der Überschreitungen von Z0 und Z0* je Parameter. Überschreitungen von Z0* wurden vor allem bei Arsen im Feststoff sowie Sulfat im Eluat festgestellt.

Übliche Hintergrundgehalte bei PAK in Oberböden Baden-Württembergs werden mit 0,1 - 0,5 mg/kg (16 Einzelkomponenten nach EPA) angegeben [8]. Da PAK im Wesentlichen über die Luft ubiquitär in den Oberboden gelangen, liegen die Hintergrundgehalte in Unterböden noch deutlich darunter. Dies weist darauf hin, dass bei einem Teil der Proben Anteile von Oberbodenmaterial eingemischt waren, die in der Regel zur Erhöhung des PAK-Gehalts beitragen. Hinweise auf Anteile von Oberboden in den untersuchten Proben haben sich auch anhand der Verteilung der TOC-Gehalte ergeben (vgl. Abb. 7).

Die Arsen- und Schwermetallkonzentrationen im Eluat lagen ebenso wie die Gehalte an Thallium im Feststoff und die Gehalte an Chlorid und PCB bei allen 59 Proben unterhalb des jeweiligen Z0-Wertes der TR Boden (Stand 05.11.2004).

Die erhöhten Schwermetallgehalte decken sich mit Ergebnissen früherer Untersuchungen, die in Kap. 3.2 zusammengestellt sind. Insbesondere wurden in Unterböden Baden-Württembergs für bestimmte Ausgangsgesteine ebenfalls für Nickel und Chrom Hintergrundgehalte festgestellt, deren Mittelwerte über dem Z0-Wert (Lehm/Schluff) der TR Boden (Stand 05.11.2004) liegen. Solche erhöhten Gehalte sind auf Gebiete begrenzt, in denen die entsprechenden Bodenausgangsgesteine oberflächennah anstehen. Bei den anderen damals untersuchten Schwermetallen gibt es zumindest Einzelwerte, die größer als Z0 (Lehm/Schluff) sind (Arsen wurde damals nicht untersucht).

Die teilweise erhöhten, über Z0/Z0* liegenden Sulfatkonzentrationen waren nicht unerwartet, da in Baden-Württemberg gipsreiche Gesteinsformationen vorliegen. 10 Bodenproben lagen über dem Z0/Z0*-Wert von 20 mg/l, der höchste Sulfatwert war 71,1 mg/l. Erstaunlicherweise war jede der 10 Proben, die mehr als 20 mg/l Sulfat im Eluat enthielten, jeweils einer anderen geologischen Großeinheit zuzuordnen. Erhöhte Sulfatkonzentrationen traten also nicht nur in bekanntermaßen sulfatreichen Regionen wie z. B. in Gebieten des Gipskeuper auf.

In einem ersten Vergleich wurden die Stoffgehalte der hier untersuchten Bodenaushubproben den Gehalten von Proben natürlicher Unterböden an Standorten verschiedener landesweiter, flächenrepräsentativer Mess- und Erhebungsprogramme gegenübergestellt (Bodendauerbeobachtung, Ökologisches Wirkungskataster der Landesanstalt für Umweltschutz; bodenkundliche Landesaufnahme des Regierungspräsidiums Freiburg). Aus den landesweiten Erhebungsprogrammen wurden dabei zu-

nächst solche Standorte ausgewählt, die einerseits möglichst in der Umgebung der untersuchten Erdaushubdeponien lagen und andererseits Böden aus den Bereichen der flächenbedeutenden geologischen Groseinheiten in Baden-Württemberg repräsentieren. Dieser Vergleich hat ergeben, dass die natürlichen in-situ Unterböden nur in sehr wenigen Einzelfällen die Z0- bzw. Z0*-Werte der TR LAGA überschreiten. Für eine abschließende Wertung sollte ein weiterer Datenabgleich unter Einbezug der in Baden-Württemberg insgesamt vorliegenden Bodendaten erfolgen.

6.2 ZUORDNUNG ZU DEN BODENARTEN

Aufgrund der gestaffelten Zuordnungswerte der TR Boden (Stand 05.11.2004) wurden die entnommenen Bodenproben den Bodenarten Sand, Lehm/Schluff oder Ton zugeordnet. Insgesamt waren die meisten (48) der 59 Proben der Bodenart Lehm/Schluff zuzuordnen. Die Zuordnung zu den Bodenarten war jedoch teilweise problematisch. Die beprobten Haufwerke stellten Bodenaushub einer bestimmten Baustelle dar und waren daher zum Teil Mischungen verschiedener Bodenhorizonte und -abschnitte. Im Gegensatz zu gängigen Bodenproben, die aus einem bestimmten Bodenhorizont einer Probenahmestelle stammen, handelt es sich hierbei um Mischproben, deren eindeutige Zuordnung zu einer der drei Bodenarten schwierig sein und aufwändige Laboruntersuchungen (Sieb-/Schlammanalysen) erforderlich machen kann.

In der TR Boden (Stand 05.11.2004) ist hierzu geregelt, dass für Bodenmaterial, das nicht bodenart-spezifisch zugeordnet werden kann bzw. als Gemisch verschiedener Bodenarten bei Baumaßnahmen anfällt, die Zuordnungswerte für Lehm/Schluff angewendet werden sollen. Aus Praktikabilitätsgründen sollte eine Konkretisierung dieser Regelung wie folgt in Betracht gezogen werden: "Bodenmaterial, das bei der Probennahme vorort nicht bodenartspezifisch zugeordnet werden kann, z. B. wenn es bei Baumaßnahmen als Gemisch verschiedener Bodenarten anfällt, wird der Gruppe Schluff/Lehm zugeschlagen".

6.3 BEZUG DER SCHADSTOFFGEHALTE ZUR GEOLOGIE

In Kap. 5.3 sind einzelne Ergebnisse in Bezug zu den geologischen Groseinheiten am Beprobungsort dargestellt. Aufgrund der geringen Probenanzahl nach dieser ersten Projektphase und der nur ungefähren geologischen Einordnung der Proben sind noch keine belastbaren Aussagen zum Zusammenhang der Schadstoffgehalte mit der Geologie am Herkunftsort des Bodens möglich. Dies ist verständlich, weil innerhalb der diversen Groseinheiten unterschiedliche Gesteinstypen auftreten können. Die teilweise erhöhten Schadstoffgehalte in den Proben sind deshalb auch bei keinem der untersuchten Parameter eindeutig auf eine geologische Formation beschränkt. Tendenzen, z. B. höhere Schwermetallgehalte in Gebieten des Jura, sind erkennbar. Bestimmte stratigraphische Abschnitte des unteren Jura (z.B. im Lias alpha, epsilon und zeta) sind für das Vorkommen schwermetall- und arsenreicher, z.T. bituminöser Schiefertone bekannt, ebenso wie die Gebiete, in denen diese Gesteine im oberflächennahen Untergrund anstehen.

7 Quellenverzeichnis

- [1] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - Stand: 6.11.2003. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 20 (LAGA M20), Erich Schmidt Verlag, 5. Aufl., 2003.
- [2] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Teil II: Technische Regeln für die Verwertung, 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), Stand 05.11.2004.
- [3] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg: Geologische Schulkarte von Baden-Württemberg, Maßstab 1:1000000. Freiburg 1998.
- [4] LfU Baden-Württemberg: Schwermetallgehalte in Böden aus verschiedenen Ausgangsgesteinen Baden-Württembergs. Handbuch Boden, Band 3; Karlsruhe 1994.
- [5] Lotze, T.: Geochemische Grundlagen zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Gesteinen in Baden-Württemberg. Dissertation, TU Braunschweig, 1999.
- [6] Jahn, R., Zauner, G.: Geogene Schwermetalle in Gesteinen und Böden der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. PWAB Forschungsprojekt PW 86013, Universität Hohenheim, 1992.
- [7] GABl. Baden-Württemberg: LAGA PN 98, Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, GABl. Nr. 1, 2004.
- [8] LABO (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Schadstoffe in Böden. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage; 170 S.

8 Anhang

Tabelle 10: Geologische Formation, Bodenart und Analysenergebnisse der organischen Parameter der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Tabelle 11: Analysenergebnisse der Eluat-Parameter der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Tabelle 12: Analysenergebnisse der Schwermetalle im Feststoff der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Tabelle 10: Geologische Formation, Bodenart, Trockenrückstand und Analyseergebnisse der organischen Parameter der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Nr.	Geologische Formation am Herkunftsort	Bodenart	Trockenrückstand	TOC	Kohlenwasserstoffe		PAK ₁₆	PCB ₆
					(C ₁₀ - C ₂₂)	(C ₁₀ - C ₄₀)		
			%	Masse-%	mg/kg TS			
1	Muschelkalk	Lehm/Schluff	87,7	2,16	< 50	< 50	0,09	n.b.
2	Unterkeuper (Lettenkeuper)	Lehm/Schluff	83,4	1,05	< 50	< 50	0,63	n.b.
3	Unterjura	Lehm/Schluff	84,5	0,49	< 50	< 50	0,14	0,010
4	Unterjura	Lehm/Schluff	79,6	0,19	< 50	< 50	n.b.	0,011
5	Löss und Lehm	Lehm/Schluff	82,9	0,78	< 50	< 50	0,66	0,002
6	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	84,4	0,52	< 50	< 50	0,01	n.b.
7	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	81,3	1,06	60	122	0,24	0,040
8	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Ton	81,7	0,19	< 50	< 50	n.b.	n.b.
9	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Ton	86,1	0,21	< 50	< 50	n.b.	0,001
10	Unterkeuper (Lettenkeuper)	Lehm/Schluff	80,8	0,73	< 50	< 50	0,06	0,011
11	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	82,1	0,32	< 50	< 50	0,08	0,009
12	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	84,4	3,52	< 50	< 50	0,17	0,008
13	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	83,5	0,15	< 50	< 50	0,05	0,007
14	Muschelkalk	Lehm/Schluff	82,4	0,06	< 50	< 50	n.b.	n.b.
15	Oberjura und Jura ungegliedert	Lehm/Schluff	78,2	1,56	< 50	< 50	0,91	0,026
16	Unterjura	Ton	80,8	0,88	< 50	< 50	0,15	0,009
17	Höherer Mittel- und Oberkeuper	Lehm/Schluff	85,5	0,39	< 50	< 50	0,02	0,008
18	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	85,3	1,37	< 50	< 50	3,43	0,049
19	Junge Talfüllung	Sand	80,3	1,53	< 50	< 50	0,58	0,009
20	Würmzeitliche Schotter (Niederterrasse)	Lehm/Schluff	71,8	3,86	< 50	< 50	2,37	0,009
21	Buntsandstein	Lehm/Schluff	84,5	0,28	< 50	< 50	0,22	0,001
22	Buntsandstein	Lehm/Schluff	83,2	0,56	< 50	< 50	0,04	n.b.
23	Muschelkalk	Lehm/Schluff	84,0	0,37	< 50	< 50	0,80	0,001
24	Muschelkalk	Lehm/Schluff	77,3	1,33	< 50	< 50	0,59	0,001

Nr.	Geologische Formation am Herkunftsort	Bodenart	Trockenrückstand	TOC	Kohlenwasserstoffe		PAK ₁₆	PCB ₆
					(C ₁₀ - C ₂₂)	(C ₁₀ - C ₄₀)		
			%	Masse-%	mg/kg TS			
25	Junge Talfüllung	Lehm/Schluff	86,4	0,85	< 50	< 50	0,41	0,002
26	Muschelkalk	Lehm/Schluff	81,8	1,78	< 50	< 50	1,01	0,012
27	Buntsandstein	Lehm/Schluff	87,3	<0,05	< 50	< 50	0,01	0,019
28	Buntsandstein	Lehm/Schluff	87,2	2,33	< 50	50	0,63	0,011
29	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	82,6	1,28	< 50	102	1,30	0,003
30	Buntsandstein	Lehm/Schluff	84,3	0,48	< 50	< 50	0,03	0,010
31	Buntsandstein	Lehm/Schluff	83,8	1,30	< 50	128	12,23	0,038
32	Unterkeuper (Lettenkeuper)	Lehm/Schluff	82,5	0,92	< 50	< 50	0,16	0,015
33	Gneise, vergneiste Gesteine und Migmatite	Sand	77,1	3,79	< 50	167	8,95	0,010
34	Jüngere vulkanische Gesteine	Lehm/Schluff	81,6	2,30	< 50	< 50	0,68	0,005
35	Junge Talfüllung	Lehm/Schluff	86,5	1,03	< 50	< 50	0,34	0,005
36	Granite und andere Plutonite	Lehm/Schluff	82,1	0,76	< 50	< 50	0,15	0,002
37	Granite und andere Plutonite	Lehm/Schluff	88,6	0,09	< 50	< 50	n.b.	n.b.
38	Muschelkalk	Lehm/Schluff	85,0	1,69	< 50	< 50	0,61	n.b.
39	Tieferer Mittelkeuper, Keuper ungegliedert	Lehm/Schluff	79,5	2,94	< 50	< 50	0,18	0,001
40	Unterjura	Lehm/Schluff	75,2	3,49	< 50	< 50	0,10	n.b.
41	Buntsandstein	Lehm/Schluff	89,4	0,47	< 50	< 50	0,04	n.b.
42	Unterjura	Lehm/Schluff	89,4	0,70	< 50	< 50	0,03	n.b.
43	Oberjura und Jura ungegliedert	Lehm/Schluff	83,5	3,46	< 50	< 50	0,62	0,001
44	Oberjura und Jura ungegliedert	Lehm/Schluff	80,0	3,60	< 50	63	1,80	0,003
45	Würmzeitliche Moränensedimente	Lehm/Schluff	82,1	1,80	< 50	< 50	0,13	0,003
46	Quartäre Sedimente (ungegliedert)	Lehm/Schluff	83,8	0,30	< 50	< 50	0,01	0,001
47	Junge Talfüllung	Lehm/Schluff	86,2	1,29	< 50	< 50	0,16	0,002
48	Granite und andere Plutonite	Sand	86,9	0,54	< 50	< 50	0,05	n.b.
49	Oberjura und Jura ungegliedert	Lehm/Schluff	81,1	18,40	< 50	< 50	0,36	n.b.
50	Mitteljura	Lehm/Schluff	87,5	2,94	< 50	< 50	0,35	n.b.

Nr.	Geologische Formation am Herkunftsort	Bodenart	Trockenrückstand	TOC	Kohlenwasserstoffe		PAK ₁₆	PCB ₆
					(C ₁₀ - C ₂₂)	(C ₁₀ - C ₄₀)		
			%	Masse-%	mg/kg TS			
51	Mitteljura	Ton	84,6	0,39	< 50	< 50	n.b.	n.b.
52	Unteljura	Ton	79,3	0,30	< 50	< 50	n.b.	n.b.
53	Unteljura	Ton	84,8	0,23	< 50	< 50	n.b.	n.b.
54	Unteljura	Ton	82,6	<0,05	< 50	< 50	n.b.	n.b.
55	Oberjura und Jura ungegliedert	Lehm/Schluff	76,5	0,96	< 50	< 50	0,34	0,039
56	Rißzeitliche Moränensedimente	Lehm/Schluff	72,4	3,48	< 50	< 50	0,08	0,002
57	Würmzeitliche Moränensedimente	Lehm/Schluff	82,4	1,25	< 50	< 50	0,57	0,004
58	Würmzeitliche Moränensedimente	Lehm/Schluff	89,8	1,22	< 50	< 50	n.b.	n.b.
59	Oberjura und Jura ungegliedert	Ton	79,5	1,61	< 50	< 50	0,07	n.b.
Min			71,80	< 0,05	< 50	< 50	0,01	0,001
Max			90,10	18,40	60	167	12,23	0,049
Mittel			82,99	1,61	< 50	56	0,74	0,007
Median			83,3	1,04	< 50	< 50	0,16	0,002
80%-Perz.			86,24	2,24	< 50	< 50	0,63	0,010
90%-Perz.			87,52	3,48	< 50	51	1,10	0,015

n.b. = nicht bestimmbar

Fett und rot markiert = Überschreitungen der Z0-Werte der TR Boden (2004) unter Berücksichtigung der Bodenart

Grau hinterlegt = Proben der Bodenart Sand

Ockerfarben hinterlegt = Proben der Bodenart Ton

Ohne Hintergrundfarbe = Proben der Bodenart Lehm/ Schluff

Tabelle 11: Analysenergebnisse der Eluat-Parameter der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Nr.	pH-Wert	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
		µS/cm	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
1	7,7	84,0	1,8	6,1	<0,5	<0,2	<0,1	0,7	0,9	<0,5	<0,05	9,0
2	7,8	125,0	<0,5	7,2	1,1	0,2	<0,1	0,9	2,9	0,8	<0,05	13,0
3	7,8	239,0	<0,5	66,5	<0,5	<0,2	<0,1	0,8	0,6	0,5	<0,05	21,0
4	7,8	73,0	<0,5	3,1	<0,5	<0,2	<0,1	1,3	0,5	0,6	<0,05	15,0
5	8,0	117,0	0,9	9,3	1,2	<0,2	<0,1	0,9	2,2	0,7	<0,05	7,0
6	7,7	86,0	<0,5	3,2	1,4	<0,2	<0,1	0,7	2,1	<0,5	<0,05	11,0
7	7,6	134,0	0,6	15,2	1,1	0,2	<0,1	0,7	3,7	1,7	<0,05	28,0
8	7,0	34,0	<0,5	7,3	<0,5	0,5	<0,1	0,6	1,6	<0,5	<0,05	135,0
9	7,9	85,0	1,0	3,1	<0,5	<0,2	<0,1	0,6	0,6	<0,5	<0,05	4,0
10	7,9	113,0	<0,5	2,0	<0,5	<0,2	<0,1	1,6	1,2	0,7	<0,05	13,0
11	7,8	224,0	<0,5	62,0	1,7	<0,2	<0,1	0,8	2,8	0,7	<0,05	19,0
12	7,9	115,0	<0,5	12,3	1,1	<0,2	<0,1	0,9	2,0	0,6	<0,05	5,0
13	7,9	107,0	<0,5	3,1	0,6	<0,2	<0,1	0,6	1,7	<0,5	<0,05	7,0
14	7,0	21,0	<0,5	5,2	<0,5	<0,2	<0,1	0,5	0,2	<0,5	<0,05	17,0
15	7,8	98,0	<0,5	4,2	0,8	0,3	<0,1	2,2	2,1	1,7	<0,05	12,0
16	7,8	128,0	0,5	3,1	2,3	<0,2	<0,1	1,2	2,5	1,1	<0,05	11,0
17	8,0	42,0	<0,5	3,0	0,5	0,3	<0,1	0,7	3,0	1,0	<0,05	15,0
18	7,7	113,0	2,5	8,1	7,0	<0,2	<0,1	1,0	4,9	1,4	<0,05	6,0
19	7,5	266,0	8,7	39,6	7,8	<0,2	<0,1	0,9	3,9	1,1	<0,05	13,0
20	7,7	285,0	1,2	71,1	1,7	0,7	0,1	1,2	4,8	1,3	<0,05	18,0
21	7,7	142,0	3,9	21,3	1,0	<0,2	<0,1	0,9	1,2	<0,5	<0,05	18,0
22	6,1	30,0	<0,5	6,1	<0,5	<0,2	<0,1	0,2	0,3	<0,5	<0,05	15,0
23	8,0	112,0	3,2	4,1	4,0	<0,2	<0,1	4,6	4,9	2,2	<0,05	8,0
24	7,3	121,0	0,6	10,4	0,5	<0,2	<0,1	0,8	5,5	1,4	<0,05	29,0
25	7,7	117,0	<0,5	8,2	4,1	0,2	<0,1	1,0	4,1	1,6	0,1	26,0

Nr.	pH-Wert	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
		µS/cm	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
26	7,9	153,0	0,9	12,4	5,3	0,3	<0,1	1,1	5,7	2,0	<0,05	10,0
27	7,9	86,0	<0,5	6,0	0,6	<0,2	<0,1	1,6	0,4	<0,5	<0,05	22,0
28	8,0	174,0	19,9	5,1	3,3	0,5	<0,1	1,0	3,1	1,2	<0,05	12,0
29	7,8	121,0	0,6	8,2	3,0	0,2	<0,1	1,5	6,2	5,4	0,1	16,0
30	7,6	65,0	<0,5	4,1	0,5	<0,2	<0,1	0,8	1,1	0,5	<0,05	14,0
31	7,8	108,0	2,9	7,1	2,4	0,3	<0,1	1,0	3,3	0,8	<0,05	17,0
32	8,0	112,0	<0,5	4,1	0,5	<0,2	<0,1	1,4	1,9	1,0	<0,05	13,0
33	7,0	159,0	2,7	45,8	0,7	0,6	<0,1	0,6	4,7	0,7	<0,05	37,0
34	8,0	190,0	1,5	32,4	<5,9	<0,2	<0,1	0,9	9,5	2,1	<0,05	9,0
35	7,6	111,0	0,8	13,2	4,0	<0,2	<0,1	1,5	4,1	0,7	0,1	23,0
36	7,1	96,0	<0,5	25,5	<0,5	<0,2	<0,1	0,3	0,9	<0,5	<0,05	28,0
37	9,4	8,0	<0,5	2,0	<0,5	<0,2	<0,1	0,6	<0,2	<0,5	<0,05	7,0
38	7,9	124,0	<0,5	3,1	0,8	0,3	<0,1	1,5	2,9	0,9	<0,05	8,0
39	7,8	191,0	0,5	5,4	1,0	0,3	<0,1	2,6	4,5	2,2	<0,05	16,0
40	7,6	153,0	<0,5	4,3	0,8	<0,2	<0,1	1,6	1,7	1,6	<0,05	25,0
41	7,0	67,0	0,6	6,1	<0,5	<0,2	<0,1	0,6	0,3	<0,5	<0,05	23,0
42	7,7	185,0	<0,5	4,2	0,8	<0,2	<0,1	0,5	1,1	<0,5	<0,05	20,0
43	7,7	114,0	<0,5	2,1	1,7	0,6	<0,1	4,0	3,4	2,4	<0,05	18,0
44	7,7	194,0	<0,5	8,4	2,7	0,2	<0,1	1,7	11,8	2,6	<0,05	24,0
45	7,7	159,0	<0,5	36,8	2,5	<0,2	<0,1	1,1	2,1	0,6	<0,05	13,0
46	7,5	67,0	1,0	4,0	1,0	<0,2	<0,1	0,6	0,9	0,6	<0,05	11,0
47	7,7	105,0	<0,5	3,1	2,2	<0,2	<0,1	0,5	4,0	0,7	<0,05	14,0
48	6,2	10,0	<0,5	2,0	<0,5	0,2	<0,1	0,3	1,4	<0,5	<0,05	17,0
49	7,7	230,0	<0,5	3,6	<0,5	<2	<0,2	<1	2,0	<2	<0,3	30,0
50	8,0	115,0	<0,5	2,0	<0,5	<2	<0,2	<1	2,0	<2	<0,3	<20
51	8,0	102,0	<0,5	4,2	<0,5	<2	<0,2	<1	1,0	<2	<0,3	<20

Nr.	pH-Wert	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
		µS/cm	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
52	7,9	130,0	<0,5	15,0	<0,5	<2	<0,2	<1	<1	<2	<0,3	<20
53	8,0	112,0	<0,5	2,3	<0,5	<2	<0,2	<1	<1	<2	<0,3	<20
54	8,0	95,9	<0,5	2,0	<0,5	<2	<0,2	<1	<1	<2	<0,3	<20
55	7,7	185,0	<0,5	34,4	1,0	<0,2	<0,1	0,9	2,2	0,8	<0,05	39,0
56	7,7	119,0	<0,5	5,1	1,1	<0,2	<0,1	0,8	2,7	1,0	<0,05	30,0
57	7,7	94,0	<0,5	3,0	2,0	<0,2	<0,1	0,5	4,3	0,6	<0,05	15,0
58	8,0	48,0	<0,5	2,0	<0,5	<0,2	<0,1	0,2	0,2	<0,5	<0,05	5,0
59	7,8	127,0	<0,5	7,3	0,5	<0,2	<0,1	0,6	1,5	0,5	0,1	22,0

Min	6,1	8,0	< 0,5	2,0	< 0,5	< 0,2	< 0,1	0,2	< 0,2	< 0,5	< 0,05	4,0
Max	9,4	285,0	19,9	71,1	7,8	0,7	0,1	4,6	11,8	5,4	0,1	135,0
Mittel	7,7	120,7	1,3	12,1	1,5	0,2	< 0,1	1,1	2,7	1,0	< 0,05	18,2
Median	7,8	114,0	< 0,5	5,4	0,8	< 0,2	< 0,1	0,9	2,1	0,7	< 0,05	15,0
80%-Perz.	7,9	159,0	1,0	13,9	2,2	0,2	< 0,1	1,5	4,1	1,4	< 0,05	23,0
90%-Perz.	8,0	191,6	2,6	34,9	3,4	0,3	< 0,1	1,6	4,9	2,0	< 0,05	28,2

Fett und rot markiert = Überschreitungen der Z0-Werte der TR Boden (2004) unter Berücksichtigung der Bodenart

Fett und blau markiert = Unterschreitungen des Z0-Wertes der TR Boden (2004) für den pH-Wert

Grau hinterlegt = Proben der Bodenart Sand

Ockerfarben hinterlegt = Proben der Bodenart Ton

Ohne Hintergrundfarbe = Proben der Bodenart Lehm/ Schluff

Tabelle 12: Analysenergebnisse der Schwermetalle im Feststoff der 59 Proben mit statistischer Auswertung

Nr.	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium
	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
1	15,0	19,4	0,10	25,4	15,8	26,5	<0,02	54,4	0,30
2	54,0	92,1	0,40	49,2	35,3	69,9	0,02	93,1	0,40
3	23,0	18,5	0,30	55,1	22,5	60,7	0,04	102,0	0,30
4	12,0	18,7	0,10	52,7	27,0	51,8	0,02	72,5	0,30
5	10,0	18,0	0,20	35,9	16,6	35,3	0,03	57,5	0,20
6	4,0	9,7	<0,1	46,1	47,7	36,1	<0,02	55,2	0,20
7	4,0	8,2	0,10	17,1	6,9	15,7	<0,02	26,6	0,10
8	11,0	124,0	0,10	51,0	98,3	48,4	0,02	74,7	0,30
9	8,0	14,9	0,10	38,1	18,5	32,9	<0,02	59,0	0,30
10	12,0	24,8	1,10	50,4	37,1	71,8	0,04	151,0	0,30
11	5,0	14,1	0,10	51,1	14,9	41,5	<0,02	52,6	0,30
12	12,0	43,7	0,60	31,7	21,2	31,9	0,02	67,4	0,40
13	5,0	14,2	<0,1	47,3	25,4	36,9	<0,02	87,6	0,50
14	10,0	17,3	0,10	36,5	16,9	34,1	0,02	52,2	0,20
15	9,0	18,6	0,30	54,3	16,0	43,4	0,08	73,6	0,30
16	18,0	42,4	0,40	38,9	20,3	46,8	0,03	126,0	0,30
17	1,0	11,0	0,10	9,2	5,0	7,4	<0,02	27,6	0,20
18	9,0	20,6	0,20	30,8	20,1	31,9	0,77	62,1	0,20
19	9,0	45,0	0,20	28,2	15,9	31,9	0,02	72,2	0,10
20	5,0	31,6	0,40	33,7	25,1	23,8	0,36	83,1	0,10
21	9,0	10,8	0,10	17,5	6,8	14,7	0,02	36,4	0,10
22	8,0	11,5	0,10	27,8	7,4	25,4	0,03	46,3	0,20
23	11,0	19,2	0,10	38,2	16,6	35,8	0,02	55,3	0,20
24	9,0	22,7	0,20	53,4	36,4	53,0	0,03	59,7	0,30
25	14,0	24,0	0,20	28,6	13,7	22,8	2,75	58,8	0,40

Nr.	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium
	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
26	14,0	37,1	0,50	40,8	29,3	39,6	0,07	118,0	0,50
27	9,0	3,6	0,10	10,6	2,5	6,9	<0,02	9,3	0,20
28	63,0	36,8	0,20	18,7	19,8	25,6	<0,02	55,9	0,30
29	10,0	19,7	0,20	42,5	23,6	44,9	0,04	88,5	0,20
30	18,0	12,1	0,10	20,7	15,0	14,1	0,04	26,5	0,30
31	20,0	23,9	0,20	15,5	16,8	14,4	0,03	54,1	0,20
32	10,0	19,2	0,10	43,5	24,9	48,1	0,03	45,5	0,50
33	21,0	84,0	0,30	51,2	36,7	40,8	0,15	175,0	0,40
34	7,0	22,3	0,20	43,4	26,1	25,4	0,05	75,4	0,10
35	13,0	26,4	0,20	95,8	42,3	34,5	0,09	213,0	0,20
36	9,0	19,1	0,10	32,7	17,0	29,9	0,04	64,9	0,30
37	6,0	5,8	<0,1	19,3	3,1	16,8	<0,02	34,0	0,40
38	17,0	29,6	1,20	38,6	34,6	45,1	0,04	111,0	0,50
39	13,0	44,2	0,40	59,5	35,0	48,0	0,03	80,9	0,40
40	50,0	33,4	0,20	73,1	26,9	67,0	0,03	87,2	0,40
41	12,0	9,9	0,10	16,5	5,8	15,3	0,04	34,0	0,40
42	38,0	30,8	0,20	61,6	29,0	72,6	0,04	103,0	0,30
43	9,0	27,4	0,70	44,1	24,0	42,6	0,04	130,0	0,30
44	8,0	34,8	0,60	43,5	58,5	35,9	0,09	143,0	0,20
45	13,0	16,1	0,20	31,3	11,7	25,2	0,02	61,2	0,20
46	15,0	24,1	0,10	27,0	9,4	22,8	0,02	40,9	0,20
47	8,0	15,9	0,20	26,9	12,9	23,2	0,03	48,4	0,20
48	15,0	12,8	0,10	39,0	11,6	23,9	0,03	68,5	0,30
49	14,6	31,5	0,46	64,9	25,2	49,9	0,18	91,8	<0,4
50	39,6	36,3	0,19	43,7	26,0	48,0	0,18	83,7	<0,4
51	31,8	20,9	<0,2	47,0	13,7	42,2	0,10	62,7	<0,4

Nr.	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom, gesamt	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium
	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
52	16,0	20,5	<0,2	46,5	19,7	31,1	0,12	43,4	<0,4
53	28,9	36,4	<0,2	43,9	25,0	42,8	0,08	55,9	<0,4
54	1,8	18,8	<0,2	32,4	12,2	33,5	0,06	26,3	<0,4
55	23,0	27,3	0,40	86,8	24,9	62,0	0,09	85,4	0,50
56	10,0	20,2	0,20	31,9	21,3	32,1	0,07	54,1	0,20
57	7,0	27,5	0,20	29,4	18,7	27,0	0,33	60,1	0,10
58	6,0	12,3	0,10	34,0	15,2	36,9	<0,02	37,1	0,10
59	8,0	21,0	0,50	71,9	31,7	64,3	0,18	87,9	0,50
Min	1,0	3,6	< 0,10	9,2	2,5	6,9	< 0,02	9,3	0,10
Max	63,0	124,0	1,20	95,8	98,3	72,6	2,75	213,0	0,50
Mittel	14,8	26,4	0,25	40,3	22,7	36,7	0,12	72,3	0,27
Median	11,0	20,6	0,20	38,9	20,1	35,3	0,03	62,1	0,30
80%-Perz.	18,0	34,0	0,40	51,1	29,1	48,0	0,09	89,8	0,40
90%-Perz.	29,5	42,7	0,50	59,9	36,5	61,0	0,18	119,6	0,42

Fett und rot markiert = Überschreitungen der Z0-Werte der TR Boden (2004) unter Berücksichtigung der Bodenart

Grau hinterlegt = Proben der Bodenart Sand

Ockerfarben hinterlegt = Proben der Bodenart Ton

Ohne Hintergrundfarbe = Proben der Bodenart Lehm/ Schluff