

# Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels

Fachgutachten für das Handlungsfeld Boden

- Langfassung -

im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg

Autoren: Dr. Norbert Billen, bodengut -  
Büro für nachhaltige Bodennutzung, Stuttgart  
Prof. Dr. Karl Stahr, Universität Hohenheim,  
Institut für Bodenkunde und Standortlehre



Stand: August 2013

Vorliegendes Gutachten dient der Erstellung einer Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für das Land Baden-Württemberg. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Genehmigung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren erlaubt.



**Auftraggeber:** © Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg, Stuttgart

**Fachliche Begleitung:** LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg, Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe  
Ref. 23 – Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klima-  
wandel  
Dr. Kai-Achim Höpker  
Dagmar Berberich  
Daniel Schulz-Engler

Ressortarbeitskreis Boden unter Leitung von  
Frau Stefanie Groh, LUBW Ref. 22 Boden, Altlasten  
und Mitwirkung von

Swantje Apel, UM, Ref. 54  
Werner Borho, LUBW, Ref. 22  
Dr. Peter Dreher, LUBW, Leiter Ref. 22  
Dr. Holger Flaig, LTZ, Ref. 12  
Heinz-Otto Kühl, LUBW, Ref. 22  
Dr. Thomas Nöltner, LUBW, Ref. 22  
Dr. Frank Waldmann, Regierungspräsidium Freiburg, Ref. 93

**Auftragnehmer** bodengut - Büro für nachhaltige Bodennutzung, Stuttgart

**Bearbeitet von** bodengut - Büro für nachhaltige Bodennutzung, Stuttgart  
Dr. Norbert Billen  
Prof. Dr. Karl Stahr, Universität Hohenheim  
Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
Fachgebiet Allgemeine Bodenkunde  
unter Mitarbeit von Dipl. Geogr. Stefan Klett



**Stand:** August 2013

Vorliegendes Gutachten dient der Erstellung einer Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für das Land Baden-Württemberg. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Genehmigung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren erlaubt.



## Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Zusammenfassung .....	2
3	Fachkapitel zum Handlungsfeld Boden (Teil A) .....	4
3.1	Beschreibung des Handlungsfeldes Boden.....	4
3.1.1	Böden im Klimawandel.....	4
3.1.2	Teilbereiche beim Handlungsfeld Boden .....	4
3.1.3	Räumliche Differenzierung .....	6
3.1.4	Verteilung von Böden und Landnutzung.....	7
3.2	Wirksame Klimafaktoren (Exposition).....	9
3.3	Vulnerabilität (Verwundbarkeit) .....	13
3.3.1	Analyse- und Bewertungsverfahren.....	13
3.3.2	Erosion durch Wasser .....	17
3.3.3	Auswaschung nicht sorbierbarer Stoffe .....	27
3.3.4	Organische Bodensubstanz (Humus-C) .....	38
3.3.5	Moorböden .....	47
3.3.6	Bodenlebensgemeinschaften .....	58
3.3.7	Bodenverdichtung .....	67
3.3.8	Gesamtvulnerabilität und –bewertung .....	75
4	Wissenschaftlicher Hintergrund (Teil B).....	78
4.1	Anpassungswissen .....	78
4.2	Finanzielle und gesamtökonomische Aspekte der Anpassung .....	84
4.3	Beschreibung von weiteren Anpassungsoptionen .....	84
4.3.1	Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen.....	84
4.3.2	Ausgewählte Ergänzungsmaßnahmen für Boden-Teilbereiche .....	86
4.4	Beschreibung der Kenntnisdefizite und Identifizierung von Forschungsbedarf .....	90
5	Maßnahmenformblätter .....	91
6	Anhang .....	92
6.1	Hintergrundinformationen.....	92
6.2	Ergebnistabellen .....	95
6.3	Literatur und Referenzen .....	100
6.4	Glossar .....	106
6.5	Abkürzungsverzeichnis .....	107



## 1 Einleitung

Der Klimawandel kann zu veränderten Bodeneigenschaften führen, die wiederum die Leistungsfähigkeit von Böden als Bestandteil des Naturhaushaltes beeinträchtigen. Ein verändertes Niederschlagsregime kann eine Zunahme von Bodenerosion und Wasserabfluss, veränderte Auswaschungsrisiken von Nähr- und Schadstoffen oder ein zunehmendes Risiko von Bodenverdichtungen verursachen. Zunehmende Temperaturen führen möglicherweise zu einem Abbau des kohlenstoffspeichernden Humus und zu einer Veränderung der Diversität oder der Aktivität von Bodenorganismen.

Vor diesem Hintergrund gilt es im Rahmen der Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels in Baden-Württemberg für das Handlungsfeld Boden auf Grundlage der aktuellen Kenntnisse von Wissenschaft und Praxis sowie neuester regionaler Klimaprojektionen die Vulnerabilität der Böden möglichst fundiert abzuschätzen. Hieraus abzuleiten sind die Anpassungserfordernisse, die mit den Maßnahmenvorschlägen der Handlungsfelder Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz und Wasserhaushalt abzugleichen und deren Wirkung auf Böden zu bewerten sind. Die Arbeit wurde von einem Ressortarbeitskreis begleitet, der auch die folgenden methodischen und inhaltlichen Vorgaben zur Vulnerabilitätsanalyse erarbeitet hat:

- Das Handlungsfeld Boden umfasst die Teilbereiche Erosion, Auswaschung, Humus, Moorböden, Bodenleben und Verdichtung
- Die Analyse und Bewertung erfolgt mit halbquantitativen Methoden, es werden keine Berechnungen mit Simulationsmodellen durchgeführt
- Es werden bekannte und etablierte Methoden mit Verweisen auf die Quelle verwendet. Deshalb werden keine methodischen Hintergründe dargestellt. Bei landesorientierten Anpassungen erfolgen jedoch kurze Erläuterungen
- Bei den gewählten Methoden sind die Anforderungen an die boden- bzw. standortkundlichen und klimatischen Eingangsdaten weitgehend vergleichbar, um gleichwertige Ergebnisse zu erzielen
- Die Vulnerabilitätsanalysen basieren auf Informationen zur aktuellen Landnutzung, soweit die gewählten Methoden diese Differenzierung ermöglichen
- Die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Teilbereichen können aufgrund der bewusst einfach gehaltenen Berechnungsmethoden nicht berücksichtigt werden
- Bei der Bewertung wird die Vulnerabilität in drei Klassen eingeteilt
- Es wird allein das Ausmaß der Vulnerabilitätszunahme bewertet, unabhängig vom gegenwärtigen Risiko, das jedoch begleitend kurz erläutert wird.

## 2 Zusammenfassung

### *Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels – Fachgutachten zum Handlungsfeld Boden*

Der Klimawandel kann zu veränderten Bodeneigenschaften führen, die wiederum die Leistungsfähigkeit von Böden als Bestandteil des Naturhaushaltes und als Funktionsträger verschiedener Nutzungsansprüche beeinträchtigen. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels in Baden-Württemberg für das Handlungsfeld Boden eine halbquantitative Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt. Dies geschah nach Absprache mit einem begleitenden Ressortarbeitskreis auf Grundlage von Auswertungs- und Bewertungsregeln, die in der Bodenschutzpraxis etabliert sind. Basisdaten sind die Ergebnisse neuester regionaler Klimaprojektionen, die Eigenschaften und die räumliche Verteilung repräsentativer Bodentypen sowie die Landnutzungsverteilung in Baden-Württemberg. Die Landschaftsvielfalt erforderte aufgrund der regionalen Unterschiede bei Exposition und Sensitivität, d.h. Klima, Böden und Landnutzung, eine Aggregation in acht Landschaftsökologische Regionen. Die Analyse dieser Regionen umfasste die Teilbereiche Bodenerosion durch Wasser, Auswaschungsrisiko nicht sorbierbarer Stoffe, organische Bodensubstanz (Humus), Moorböden, Bodenlebensgemeinschaften und Bodenverdichtungsrisiko. Mittels eines dreistufigen Klassifikationssystems wurde allein das Ausmaß einer Vulnerabilitätszunahme bewertet, unabhängig vom gegenwärtigen Risiko.

Die Klimakennwerte, welche eine maßgebliche Wirkung auf die Bodenvulnerabilität aufweisen und in die Auswertungen eingehen, sind die Jahreslufttemperatur, die Jahresevaпотranspiration, die klimatische Wasserbilanz von Mai bis Oktober, die Jahresniederschlagssumme, die Sommerniederschläge von April bis September, die maximale Starkniederschlagsmenge pro Jahr und die Anzahl der Starkniederschlagstage pro Jahr. Bei allen Kennwerten bleiben die aktuell bestehenden klimatischen Unterschiede in den Regionen tendenziell auch in der Zukunft bestehen. Somit bleiben die Regionen Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue und Bauland/Hohenlohe, die im nördlichen und westlichen Baden-Württemberg liegen, auch in Zukunft die wärmeren und niederschlagsärmeren. Die kühleren Regionen Donau-Iller-Lech, Hügel-/Moorland, Schwarzwald und Schwäbische Alb/Baar, die im südlichen und östlichen Teil des Landes liegen, erreichen zukünftig ähnliche Temperaturen wie gegenwärtig die wärmeren Regionen. Die Differenzen der Klimakenngrößen zwischen den Regionen bleiben meist bestehen oder nehmen wie beim Niederschlag zu.

Bei den Teilbereichen organische Bodensubstanz und Moorböden besteht im Flächenmittel höchste Vulnerabilität und Gefährdung und somit auch die höchste Dringlichkeit für eine An-

passungsstrategie. Beide Teilbereiche weisen gleichzeitig den engsten Bezug zum klimarelevanten CO<sub>2</sub> auf. Aufgrund verstreut vorliegender Risikobereiche mit mittlerer bis hoher Dringlichkeit, die aus naturräumlichen Unterschieden resultieren, sollten aber auch die Teilbereiche Bodenerosion und Auswaschungsrisiko berücksichtigt werden. Bei allen Teilbereichen ist in der fernen Zukunft zumeist ein größerer Flächenanteil in den landschaftsökologischen Regionen von hoher Vulnerabilität betroffen als in der nahen Zukunft. Die größere Betroffenheit gilt bei den Teilbereichen Erosion, Auswaschung und Niedermoorböden für das 85. Perzentil, bei der organischen Bodensubstanz für das 50. Perzentil und bei den Hochmoorböden sowie den Bodenlebensgemeinschaften für das 15. Perzentil. Die Teilbereiche Bodenlebensgemeinschaften und Verdichtungsrisiko weisen großflächig eine geringe Vulnerabilität und teilweise sogar eine geringfügige Verbesserung der Ausgangssituation auf. Allerdings konnten hier die Vulnerabilitätsanalysen mangels Alternativen nur stark vereinfachend durchgeführt werden.

Die Maßnahmen für die Anpassungsstrategien wurden aus dem Vorschlagskatalog der nutzungsorientierten Handlungsfelder Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz sowie Wasserhaushalt ausgewählt und besitzen eine ausgewiesene Querverbindung zum Handlungsfeld Boden. Anschließend wurde die tendenzielle Wirkungsrichtung jeder Maßnahme auf die sechs Teilbereiche bewertet. Dabei wiesen einige der Maßnahmen Synergieeffekte bzw. starke Überschneidungen auf, so dass eine gemeinsame Realisierung durch die Handlungsfelder empfehlenswert ist. Weiterhin ist die Wirkung einiger Maßnahmen großflächig, und deshalb von besonderer Bedeutung für einen flächendeckenden Bodenschutz. Andere Maßnahmen werden mittel bis kleinflächig umgesetzt, so dass zielgerichtet auch auf lokale Risikobereiche reagiert werden kann. Über die ausgewählten und bewerteten Maßnahmen hinaus wurde das Potenzial zusätzlicher Anpassungsoptionen wie bodenkundliche Baubegleitung, Flächenmanagement und Bodenschutzgesetz qualitativ bewertet.

Die Maßnahmenauswahl basiert auf den Ergebnissen der regionalen Vulnerabilitätsanalysen. Mit einer höheren Kartenauflösung und der zusätzlichen Verschneidung von Landnutzung und Bodentypen könnten die Informationen zu lokalen Risikobereichen konkretisiert werden und für verschiedene Querschnittsdisziplinen wie Landwirtschaft oder Wasserwirtschaft in einem planungsrelevanten Maßstab verfügbar sein. Allerdings weisen die Vulnerabilitätsanalysen zu den Teilbereichen Bodenlebensgemeinschaften und Verdichtungsrisiko sowie bedingt auch zur organischen Bodensubstanz aufgrund fehlender Alternativen große Unsicherheiten auf, so dass im Vorfeld methodische Verbesserungen erforderlich sind. Darüber hinaus konnten weitere umweltrelevante Teilbereiche wie z.B. Stickstoffumsatz oder Phosphoraustrag aufgrund von gegenwärtigen Defiziten bei den halbquantitativen Methoden nicht bewertet werden. Dies ist im Zusammenhang mit Regelungen wie Wasserrahmenrichtlinie oder Trinkwasserverordnung aber auch zukünftig von Bedeutung.

## 3 Fachkapitel zum Handlungsfeld Boden (Teil A)

### 3.1 Beschreibung des Handlungsfeldes Boden

#### 3.1.1 Böden im Klimawandel

Böden besitzen eine zentrale Stellung in der Umwelt und stehen in wechselseitiger Beziehung mit dem Klima. Es findet ein Austausch von Spurengasen wie z.B. CO<sub>2</sub> zwischen Böden und Atmosphäre statt sowie eine Speicherung von Kohlenstoff im Bodenhumus oder Torf. Deshalb wird sich wahrscheinlich auch der Kohlenstoffkreislauf von Böden beim Klimawandel ebenso verändern wie die Bodenentwicklung, die Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen.

So führen gemäß einer Zusammenfassung des Umweltbundesamtes (UBA 2011c) die voraussichtlich zunehmenden Starkniederschlagsereignisse zu einem größeren Erosionsrisiko für die Böden. Damit verbunden ist der Verlust an Humus, Nähr- und Schadstoffen, die nach Auswaschung zu Belastungen des Grundwassers oder nach Oberflächenabfluss zur Belastungen von Oberflächengewässern führen können. Außerdem können wärmere und trockenere Sommer sowie mildere und feuchtere Winter regional zu einer Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers oder der Sickerwassermengen während des Sommers führen.

Erhöhte Temperaturen können bei ausreichender Feuchte weiterhin zu Humus- oder Torfabbau und zu Nährstofffreisetzung durch verstärkte Mineralisierung der organischen Bodensubstanz führen. Die vielfältigen Wechselwirkungen mit anderen Faktoren erschweren jedoch eine verlässliche Vorhersage der Entwicklungsrichtung. Das gleiche gilt auch für Vorhersagen zur Entwicklung der Diversität und Aktivität von Bodenorganismen, die eine zentrale Rolle bei der Freisetzung oder Festlegung von Nähr- und Schadstoffen in Böden spielen.

Die erwartete Zunahme von Winterniederschlägen und die Abnahme von Frosttagen haben darüber hinaus auch Wirkungen auf physikalische Bodeneigenschaften. So kann das Risiko für Bodenverdichtung zunehmen mit der Folge von Ertragseinbußen, Luftmangel oder Erosionszunahme, weil das Zeitfenster für die unkritische Befahrbarkeit von Böden enger wird.

#### 3.1.2 Teilbereiche beim Handlungsfeld Boden

Der Klimawandel kann zu Veränderungen der Böden und ihrer Eigenschaften führen, wodurch die Leistungsfähigkeit der Böden im Naturhaushalt beeinträchtigt würde. Das wiederum kann sich auf andere Handlungsfelder auswirken.

Tabelle 1: Teilbereiche bzw. Problemfelder des Handlungsfeldes Boden für die Vulnerabilitätsbewertung gegenüber dem Klimawandel sowie Kriterien für den Ausschluss von Teilbereichen (ausgewählte Teilbereiche sind grün hinterlegt)

diskutierter Teilbereich	differenzierter Teilbereich	Auswahl	Kommentar
Verdichtung  Verschlämmung	Verdichtung	ja	Die Vulnerabilität ist voraussichtlich weniger durch Klimawandel als durch klimawandelbedingte Bodenbewirtschaftung beeinträchtigt.
	Verschlämmung	nein	Beeinträchtigt Infiltration, Transpiration und Gasaustausch. Kann als Teilprozess der Wasser-Erosion betrachtet werden und wird deshalb nicht gesondert bewertet.
Erosion und Abfluss	Wasser-Erosion	ja	Beinhaltet auch Verschlämmung.
	Wind-Erosion	nein	Hat Bedeutung bei häufigen Starkwinden bei großflächig vorkommenden Bodensubstraten in weiten Ebenen (z.B. vererdetes Niedermoor). Die Kombination ist in BW kaum verbreitet.
	Oberflächenabfluss / Retentionspotenzial	nein	Wird indirekt bei Wasser-Erosion berücksichtigt.
	Oberflächenaustrag (Phosphor)	nein	Die Bewertung ist in diesem Bericht nicht zielführend, denn es wird kein Risiko für Böden bewertet, sondern die Wirkung auf Oberflächengewässer.
Stoffhaushalt und Stoffaustrag ins Grundwasser	Auswaschung nicht sorbierbarer Stoffe (z.B. Nitrat)	ja	-
	Grundwasserneubildung	nein	Wird als Funktionsteil des Teilbereichs Auswaschung berücksichtigt.
	Stickstoffumsatz/-mineralisierung	nein	Hängt stark ab von klimatischen, standortkundlichen und bewirtschaftungsbedingten Faktoren. Die Beziehung dieser Faktoren untereinander ist sehr komplex, und bleibt bei den ausgewählten Methoden (siehe Kapitel 3.3.1.1) unberücksichtigt, so dass eine Bewertung nicht möglich ist.
	Versalzung	nein	Im betrachteten Zeitraum bis 2100 wird natürliche Versalzung kein messbares Bodenrisiko darstellen. Versalzungsrisiko aufgrund Bewässerung gehört ggf. zum Handlungsfeld Landwirtschaft.
	Treibhausgasemissionen	nein	Die Bewertung ist in diesem Bericht nicht zielführend, denn es wird kein Risiko für Böden bewertet, sondern der Einfluss auf Treibhausgasbilanzen.
Abbau von Humus bzw. Torf	Veränderung des C- bzw. Humusvorrats	ja	Abbau organischer Bodensubstanz.
	Moorgefährdung / -risiken	ja	Sonderstatus wg. hoher Bedeutung als Kohlenstoffspeicher.
Biodiversität	Bodenlebensgemeinschaften	ja	Umfasst Mikro- und Makrofauna anhand von Leit-/Indikator-Arten. Aufgrund der Themenkomplexität ist eine halbquantitative Bewertung in diesem Gutachten nicht möglich, so dass der Lebensraum für Bodenorganismen analysiert und bewertet wird.
	Biotoppotenzial	nein	Die Bewertung ist in diesem Bericht nicht zielführend, denn es wird kein Risiko für Böden bewertet, sondern die Wirkung in anderen Handlungsfeldern (z.B. Naturschutz und Biodiversität).

Eine besonders enge Querverbindung besteht zur Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Naturschutz, die im Gegensatz zum „Boden“ echte Handlungsfelder darstellen und über die wesentlichen Ansatzpunkte zu Anpassungsmaßnahmen verfügen. Aus den zahlreichen und teilweise auch regionalen Studien zur Vulnerabilität von Böden wurde eine Vorauswahl von Teilbereichen getroffen, die voraussichtlich eine besonders große Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel aufweisen. In Absprache mit dem arbeitsbegleitenden Ressortarbeitskreis fand die endgültige Auswahl von sechs Teilbereichen bzw. Problemfeldern statt (siehe Tabelle 1).

### 3.1.3 Räumliche Differenzierung

Die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf Böden ergeben sich aus der Kombination von Exposition, charakterisiert durch ausgewählte Klimakennwerte, und Sensitivität, charakterisiert durch ausgewählte Bodenkennwerte und Landnutzungstypen.

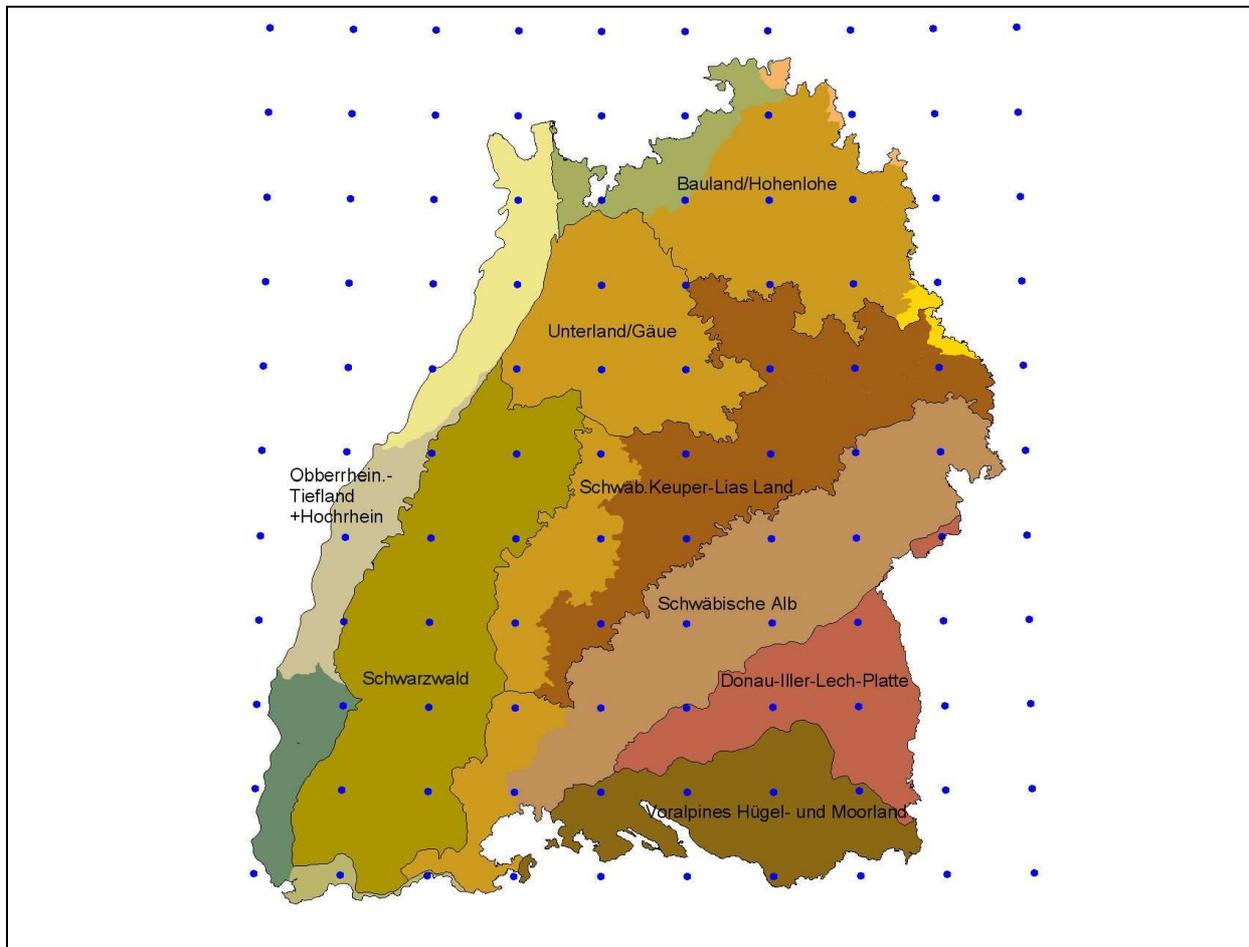


Abbildung 1: Die 13 Großlandschaften von Baden-Württemberg nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962, siehe farbige Flächen, Naturräume siehe Abbildung 23 im Anhang) und deren Aggregation zu 8 Landschaftsökologischen Regionen in schwarz umrahmter Darstellung; die blauen Punkte bilden das 25-km-Raster der Klimaprojektion ab

Dabei ist hinsichtlich der Kennwerte eine regionale Unterscheidung erforderlich, denn die landesweiten Differenzen bei Böden, Landnutzung und Klima sind bedeutend. Als Grundlage der regionalen Differenzierung wurden die von der LUBW empfohlenen Naturräume 3. Ordnung nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962) herangezogen. Diese weisen 13 Großlandschaften in Baden-Württemberg aus. Weil damit allerdings in einigen Großlandschaften zu wenig oder keine Klimaprojektionspunkte aus dem 25-km-Raster liegen und somit die Projektionssicherheit abnimmt, wurde eine Reduzierung zu 8 Landschaftsökologischen Regionen (LÖR) vorgenommen. Die dafür erforderliche Aggregation orientiert sich an den räumlichen Grenzen der ursprünglichen Großlandschaften (siehe Abbildung 1 und Tabelle 3).

Die Regionen sind näherungsweise vergleichbar mit den landwirtschaftlichen Vergleichsgebietsgruppen, welche die Kulisse für das Handlungsfeld Landwirtschaft bilden (Flaig 2013). Für die Identifizierung und räumliche Zuordnung von kleineren Gebieten mit hohem Vulnerabilitätsrisiko wurden die Naturräume 4. Ordnung nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962) herangezogen (siehe im Anhang Abbildung 23).

#### **3.1.4 Verteilung von Böden und Landnutzung**

Die Beschreibung der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf Böden findet zum einen unter Berücksichtigung der Bodenvielfalt in Baden-Württemberg statt. Räumliche und inhaltliche Datengrundlage hierfür ist die Bodenübersichtskarte im Wasser-Boden-Atlas (WaBoA: UM-BW 2004, 2012) mit 394 verschiedenen Bodeneinheiten. Diese Datenbasis wurde ergänzt um Informationen von rund 450 Bodenprofilen aus der Bodendatenbank des Instituts für Bodenkunde und Standortlehre. Eine Übersicht über weit verbreitete und charakteristische Böden in den einzelnen Regionen zeigt Abbildung 2.

Zum anderen wurde die sensitivitätsbeeinflussende Landnutzungsverteilung mit 11 unterschiedlichen Nutzungseinheiten aus dem WaBoA (UM-BW 2004, 2012) den vier Landnutzungstypen Acker, Grünland, Wald und Dauerkultur zugeordnet wie z.B. Laubwald zu Wald (Flächenanteile in den LÖR siehe Abbildung 3). Durch die Verschneidung von den Bodeneinheiten mit den Landnutzungstypen wurden 545 standortkundliche Einheiten erzeugt wie z.B. Parabraunerde unter Acker, die neben den klimatischen Kennwerten als Basis für die Vulnerabilitätsanalysen dienen.

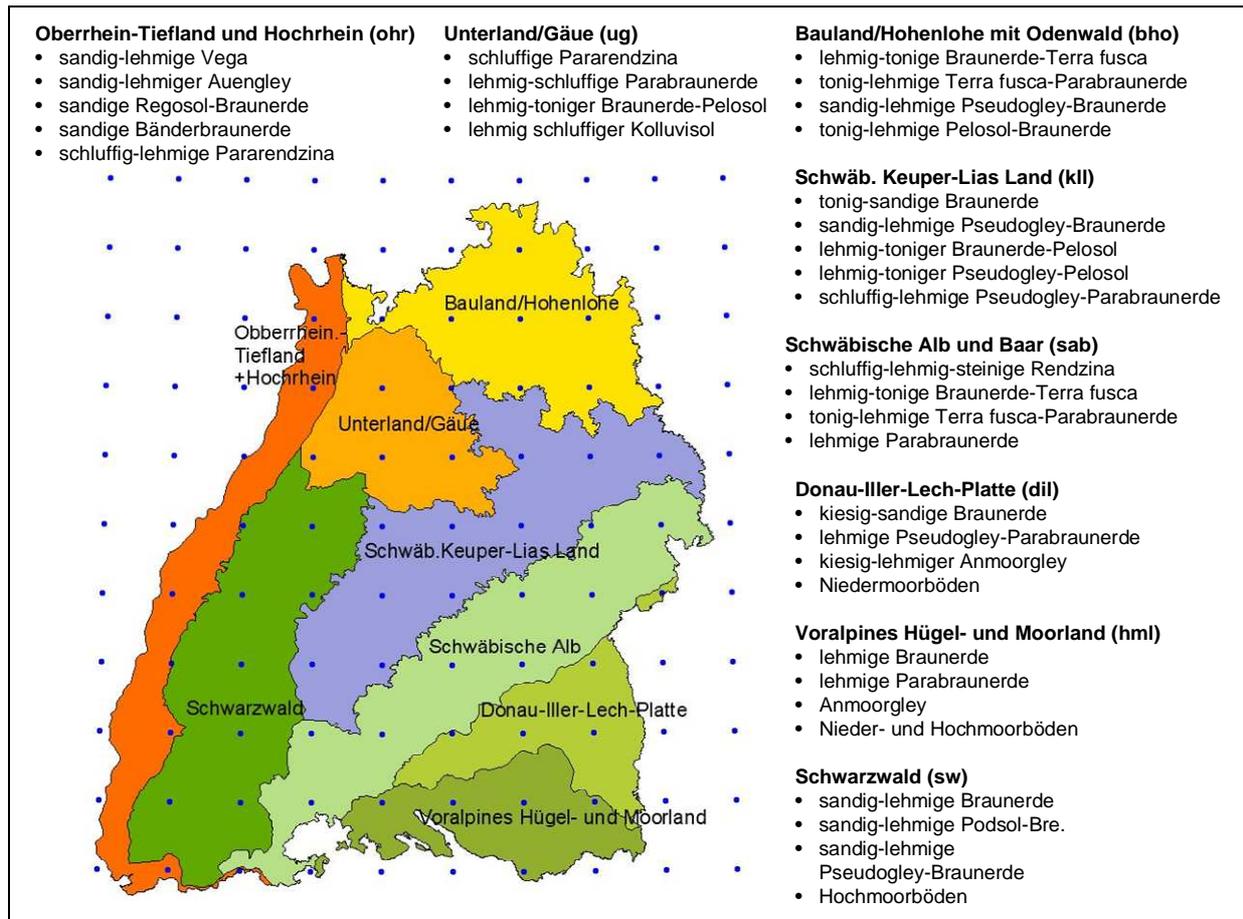


Abbildung 2: Weit verbreitete und charakteristische Böden in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs sowie Klimaprojektionspunkte. Die nördlich-westlichen Regionen zeigen höhere Temperaturen und geringere Niederschläge; die südlich-östlichen Regionen zeigen niedrigere Temperaturen und höhere Niederschläge

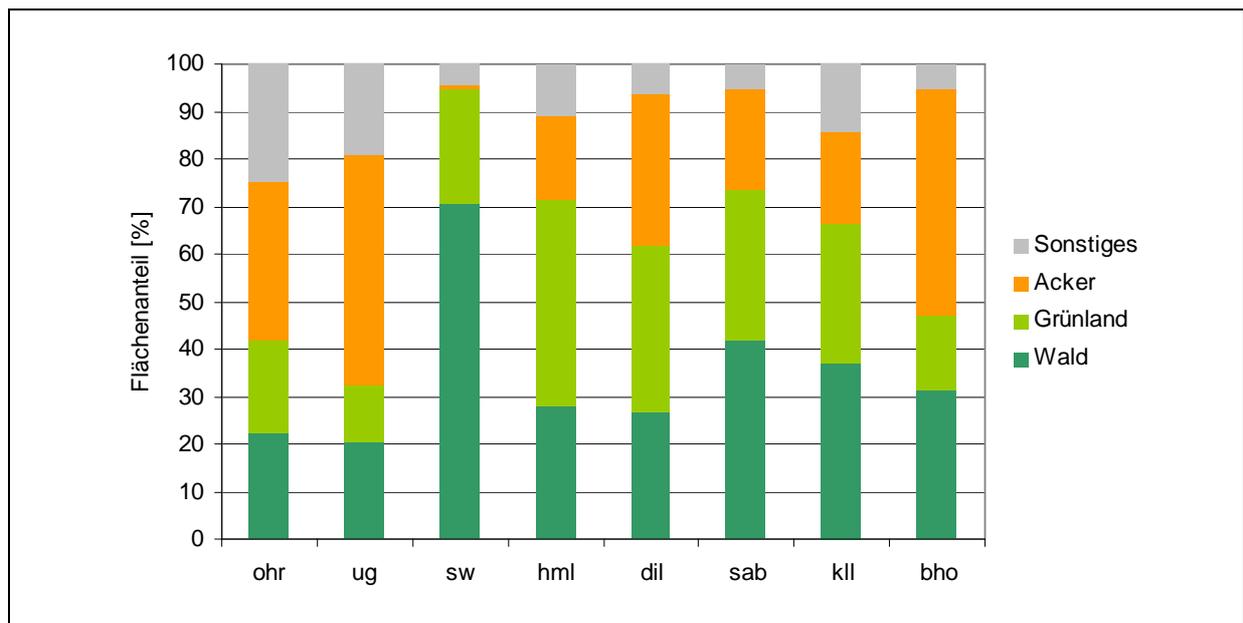


Abbildung 3 Flächenanteile der wichtigsten Landnutzungskategorien in den acht landschaftsökologischen Regionen (Sonstiges = Dauerkultur, Siedlungsflächen u.a.)

### 3.2 Wirksame Klimafaktoren (Exposition)

Für die ausgewählten Teilbereiche des Handlungsfeldes Boden fand zunächst eine Sondierung von Klimakennwerten statt, die den größten Einfluss auf die veränderbaren Bodeneigenschaften haben. Anschließend wurde ein Abgleich mit deren Verfügbarkeit aus den Klimamodellierungen der LUBW (2012a) und der praktischen Verwendbarkeit für Prognosen berücksichtigt (Ergebnis s. Tabelle 2). Die klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode ist dabei eine Vorstufe der Bodenkundlichen Feuchtestufe.

Tabelle 2: Abhängigkeit der Teilbereiche des Handlungsfeldes Boden von den wichtigsten Klimakennwerten. Aufgeführt sind nur jene Kennwerte, die aus den Klimamodellierungen verfügbar sind sowie in die Auswertung- und Bewertungsmethoden eingehen

klimatischer Kennwert [Projektionsgüte] <sup>1)</sup>	Erosion (Wasser)	Auswaschung	organische Substanz	Moorböden	Bodenleben	Verdichtung
Jahresniederschlag, mittlerer [bz]	X	X	X			
Starkniederschlagstage, Anzahl [bz]	X					
Starkniederschlagshöhe [bz]	X					
Sommerniederschlag, mittl. (Apr.-Sept.) [bz-nz]		X				
Durchschnitttemperatur, Jahr [z]			X			
potenzielle Evapotranspiration, Jahr <sup>2)</sup> [bz-nz]		X				
Klimatische Wasserbilanz (Mai-Okt.) [bz]				X <sup>3)</sup>	X	X

1) z = zufriedenstellend, bz = bedingt zufriedenstellend, nz = nicht zufriedenstellend, n. LUBW (2012a),

2) Berechnung: ETP = N – KWB

3) nur für Hochmoorböden, andere Moorböden nur indirekt beeinflusst

Für das Gutachten werden die Klimakennwerte der 25-km-Modellierungen herangezogen, weil hierbei das größere Ensemble für die Klimamodellierungen zur Verfügung steht. Die erforderlichen Klimakennwerte für die einzelnen LÖR werden durch Berechnung der Mittelwerte aller Klimaprojektionspunkte innerhalb einer LÖR und an den Landesgrenzen bis zu max. 10 km neben einer LÖR erzeugt. Somit ergibt sich die in der Tabelle 3 genannte Anzahl an Klimaprojektionspunkten je LÖR.

Die erforderliche Unterscheidung hinsichtlich der klimatischen Differenzen in acht LÖR bleibt auch zukünftig bestehen. So sind die bereits gegenwärtig bestehenden Differenzen bei den relevanten Klimakennwerten zwischen den LÖR häufig vergleichbar oder vergrößern sich sogar. In der Abbildung 4 und in der Abbildung 5 ist die Variation der wirksamen Klimakenn-

werte über die acht landschaftsökologischen Regionen in Abhängigkeit der Klimaprojektionen jeweils beim 15., 50. und 85. Perzentil dargestellt (s. Glossar).

Tendenziell bleiben die derzeit schon wärmeren und niederschlagsärmeren Regionen Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue und Bauland/Hohenlohe im nördlichen und westlichen Baden-Württemberg auch in Zukunft die wärmeren und niederschlagsärmeren Regionen. Die kühleren Regionen Donau-Iller-Lech, Hügel-/Moorland, Schwarzwald und Schwäbische Alb/Baar im südlichen und östlichen Baden-Württemberg erreichen zukünftig ähnliche Temperaturen, wie gegenwärtig die wärmeren Regionen. Die Unterschiede in der Temperatur zwischen den Regionen bleiben bestehen während sie bei den Niederschlägen zunehmen. In allen Regionen nehmen beim 15. Perzentil der Klimaprojektionen für die nahe und ferne Zukunft die Niederschläge ab, so dass die niederschlagsreicheren Regionen auf das gegenwärtige Niveau der niederschlagsärmeren Regionen abfallen. Beim 50. Perzentil der Klimaprojektionen nehmen die Niederschläge leicht und beim 85. Perzentil stärker zu, so dass in den Regionen mit gegenwärtig geringeren Niederschlägen zukünftig das Niveau der Regionen mit gegenwärtig höheren Niederschlägen erreicht werden kann. Die klimatische Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode von Mai bis Oktober zeigt ein vergleichbares Bild.

Tabelle 3: Anzahl der Klimaprojektionspunkte aus dem 25 km-Raster je landschaftsökologischer Region (LÖR) für die Mittelwertberechnungen der erforderlichen Klimakennwerte

LÖR Nr.	LÖR	LÖR Code	Klima projektionspunkte
1	Oberrhinesisches Tiefland und Hochrhein	ohr	13
2	Unterland-Gäue	ug	5
3	Schwarzwald	sw	9
4	Voralpines Moor- und Hügelland	hml	7
5	Donau-Iller-Lech-Platte	dil	8
6	Schwäbische Alb und Baar	sab	11
7	Schwäbisches Keuper-Lias-Land	kll	11
8	Bauland, Hohenlohe und Odenwald	bho	12

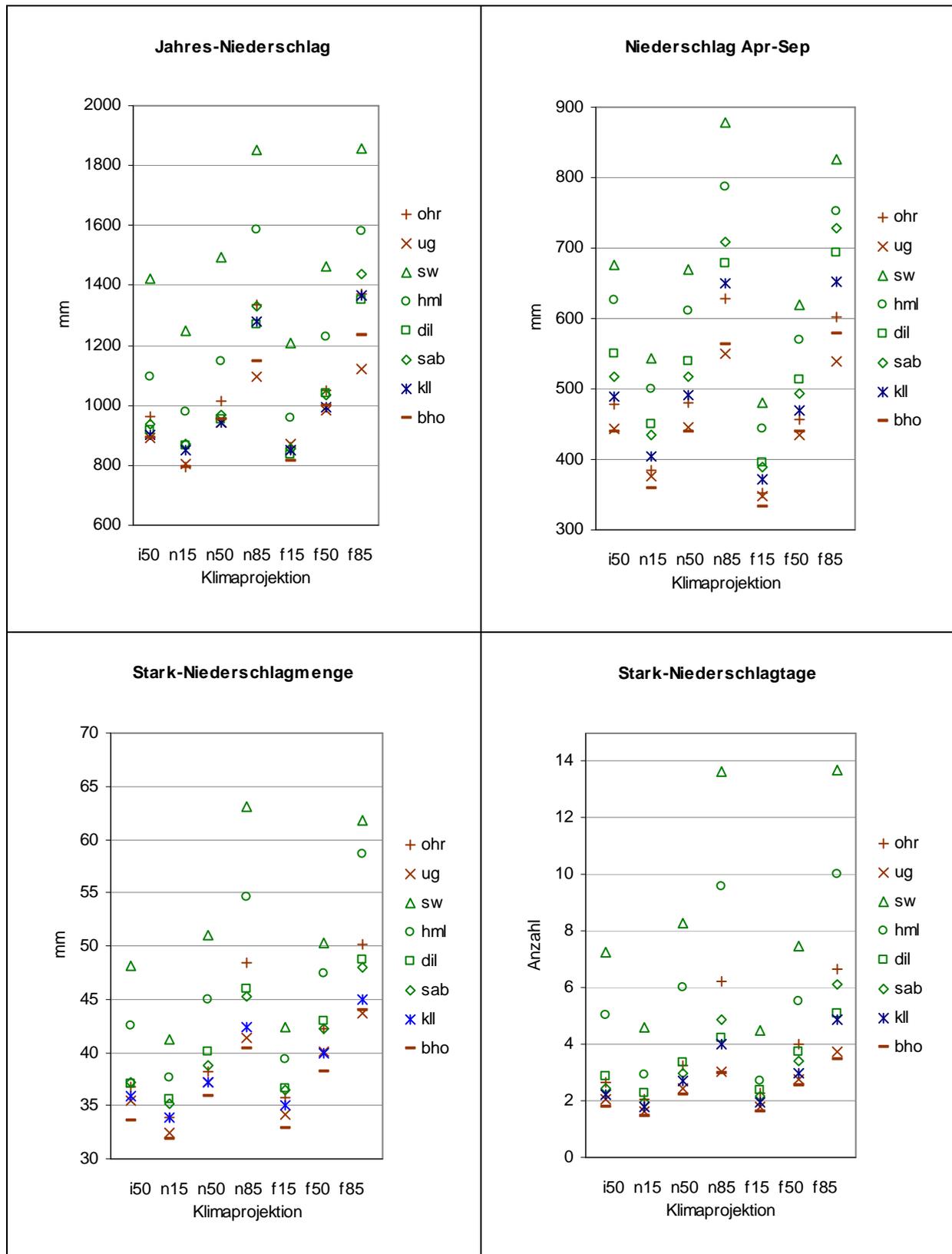


Abbildung 4: Variation von vier ausgewählten, vulnerabilitätssteuernden Klimakennwerten zwischen den landschaftsökologischen Regionen differenziert nach den verschiedenen Klimaprojektionen. Dargestellt sind Mittelwerte je landschaftsökologischer Region (siehe Abbildung 2). i50 = Gegenwart, n15 = 15. Perzentil nahe Zukunft 2021-2050, f85 = 85. Perzentil ferne Zukunft 2071-2100 etc.

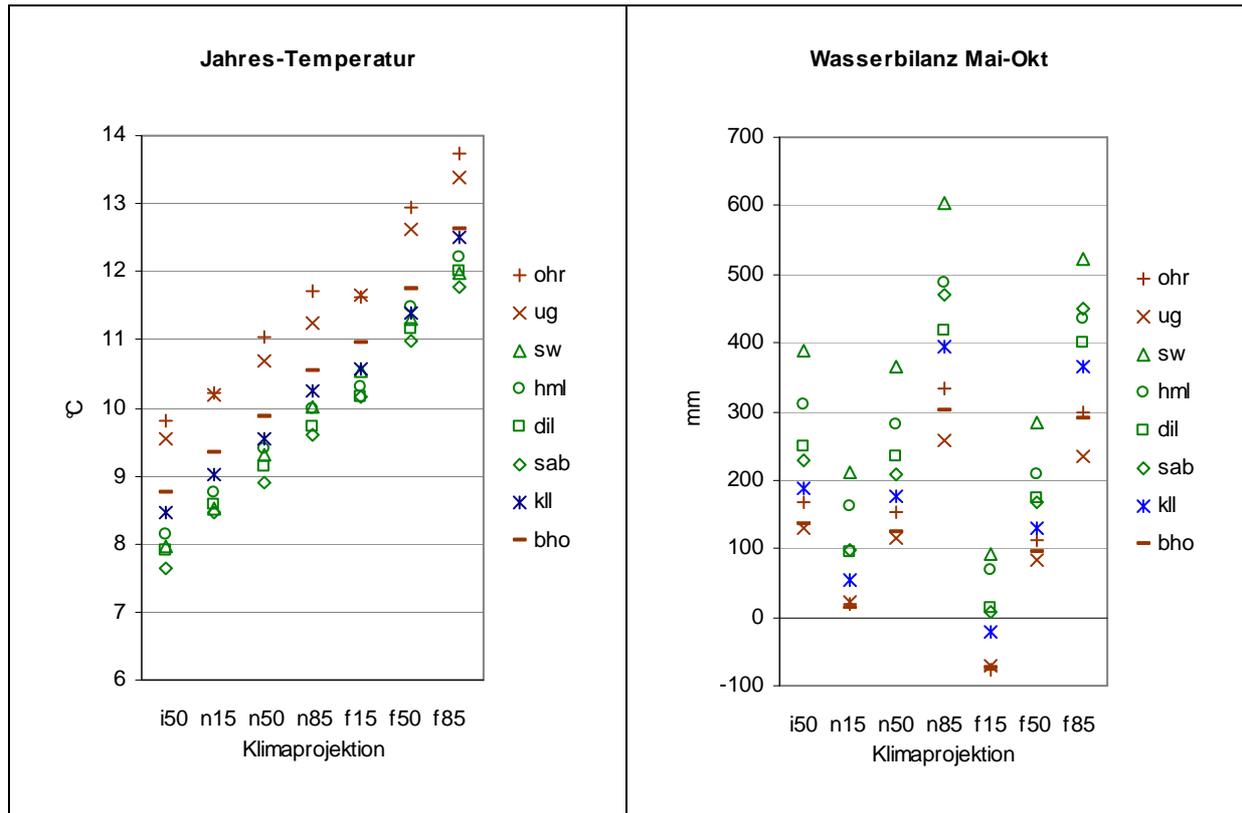


Abbildung 5: Variation von zwei ausgewählten, vulnerabilitätssteuernden Klimakennwerten zwischen den landschaftsökologischen Regionen differenziert nach den verschiedenen Klimaprojektionen. Dargestellt sind Mittelwerte je landschaftsökologischer Region (siehe Abbildung 2). i50 = Gegenwart, n15 = 15. Perzentil nahe Zukunft 2021-2050, f85 = 85. Perzentil ferne Zukunft 2071-2100 etc.

### 3.3 Vulnerabilität (Verwundbarkeit)

Die Vulnerabilität ist neben der Exposition (siehe Kapitel 3.2) auch von der Sensitivität der Böden abhängig. Die folgende Tabelle 4 listet die erforderlichen Sensitivitäts-Kennwerte für die Vulnerabilitätsanalyse in Abhängigkeit der Teilbereiche des Handlungsfeldes Boden auf. Die erforderlichen Boden- und Standortinformationen stammen aus der für Südwestdeutschland repräsentativen Datensammlung des Instituts für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim sowie dem WaBoA (UM-BW 2004, 2012).

Tabelle 4: Die bodenkundlichen Sensitivitäts-Kennwerte bzw. Einflussgrößen für die Vulnerabilitätsanalysen der Teilbereiche. Aufgeführt sind nur Kennwerte, die in die Auswertungs- und Bewertungsregeln einfließen

pedologischer Kennwert	Erosion (Wasser)	Auswaschung	organische Substanz	Moorböden	Bodenleben	Verdichtung
Bodenart	X					X
Tongehalt [%]			X			
Torfmächtigkeit [cm]				X		
Hangneigung [%]	X					
Hanglänge [m]	X					
bodenkd. Feuchtestufe <sup>1)</sup>					X	X
pH-Wert					X	
nFKWe [l/m <sup>2</sup> ]		X				
FKWe [l/m <sup>2</sup> ]		X				
Durchwurzelungstiefe [dm]		X				

1) bodenkundliche Feuchtestufe, abgeleitet aus KWBv (s. Exposition) und Grund- bzw. Stauwasserverhältnissen

#### 3.3.1 Analyse- und Bewertungsverfahren

##### 3.3.1.1 Analyseverfahren

Zahlreiche Publikationen beschreiben die Sensitivität von Böden gegenüber dem Klimawandel. Dies geschieht häufig nur qualitativ-beschreibend wie z.B. im LABO-Positionspapier (2010) oder im UBA-Themenblatt „Klimawandel Boden“ (UBA 2011c). Weil die Aussagen zur Sensitivität jedoch über qualitative Angaben hinausgehen sollen, wurde die Verwendbarkeit weiterer Analyseoptionen vergleichend bewertet. Dazu gehören:

- analytische Beschreibungen, d.h. quantitative und halbquantitative Untersuchungsergebnisse von anderen Bundesländern oder von der Bundesebene, deren Übertragbarkeit auf Baden-Württemberg an dieser Stelle zu prüfen ist

- klassifizierende Bewertungen, d.h. einfache Bewertungsinstrumente, die ohne Spezialkenntnisse und Rechenmodelle mit den verfügbaren Klimakennwerten gutachterlich einsetzbar sind
- EDV gestützte Rechenmodelle, d.h. komplexe Bewertungsinstrumente, die zumeist Spezialkenntnisse verlangen aber im Vergleich zu den anderen Bewertungsoptionen die genauesten Prognosen zulassen.

Beispiele für die verglichenen Bewertungsoptionen sind in Tabelle 35 genannt. Die Abwägung von Übertragbarkeit, Aufwand und Ergebnisqualität ergibt die beste Eignung der halbquantitativen und klassifizierenden Bewertungen für die Ziele des Gutachtens. Weil die Analysen und Bewertungen auf anerkannten und etablierten Verfahren beruhen, werden die methodischen Hintergründe in diesem Bericht nicht beschrieben.

#### Fazit zur Methodenauswahl:

- Die halbquantitativen und klassifizierenden Analyse- und Bewertungsmethoden sind nach Abwägung verschiedener Kriterien (siehe Tabelle 35) am besten für die Gutachtenziele geeignet
- Die erforderlichen Klimakennwerte sind verfügbar LUBW (2012a)
- Die ausgewählten Methoden weisen zwar einige Nachteile auf, ermöglichen aber über bisher erfolgte qualitative Beschreibungen hinausgehende Analysen und Bewertungen. Zu den Nachteilen zählen z.B. die Entwicklung von empirischen Regressionsgleichungen oder Klassifikationszuordnungen mit Klimakennwerten aus der Vergangenheit oder der Gegenwart, der Beschränkung der Gültigkeit auf ein engeres bzw. anderes Standort- und Klimaspektrum, als in Baden-Württemberg vorhanden, oder auf die fehlende Integrierbarkeit saisonaler Aspekte bzw. Veränderungen
- Das Ausmaß von Bodeneigenschaften und –risiken ist neben den Klimawirkungen auch maßgeblich vom Typ der Landnutzung wie Acker, Grünland oder Wald und der Intensität der Landnutzung wie Bodenbewirtschaftung oder Düngung abhängig. Weil diese Aspekte neben dem Klimawandel aber entscheidend von politischen Rahmenbedingungen abhängen, liegen keine befriedigenden Entwicklungsprognosen vor. Deshalb finden die Analysen und Bewertungen zum Handlungsfeld Boden auf der Basis der derzeitigen Landnutzungsverteilung und gegenwärtig konventionellen Bewirtschaftungsformen statt
- Die ausgewählten Teilbereiche beim Handlungsfeld Boden unterliegen einer Reihe von Wechselwirkungen. So resultiert z.B. aus einer Veränderung der organischen Bodensubstanz voraussichtlich eine Veränderung der Bodenlebensgemeinschaften oder des Erosionsrisikos. Dies lässt sich allerdings selbst mit EDV gestützten Rechenmodellen gegenwärtig kaum befriedigend abbilden.

Tabelle 5: Klassifizierende und quantifizierende Bewertungsoptionen mit Beispielen für Bewertungsinstrumente und gutachtenorientierter Eignungsbewertung

Teilbereich / Problemfeld	Bewertungsoptionen mit Beispielen		
	analytische Beschreibungen	halbquantitative u. klassifizierende Bewertungen	EDV gestützte Rechenmodelle
Wasser-Erosion	UBA-Bericht (Wurbs & Steininger 2011) SN-Bericht (König et al. 2009), KLIWA-Projekt (Kempf et al. 2012)	DIN 19708 (ABAG)	LISEM, Erosion 3D, WEPP, EPIC
Auswaschung	N-Projekt BW (LUBW 2012b)	NIBIS (2011) DBG (1992), DIN 19732 (2011)	MONERIS, HERMES, STOFFBILANZ, Expert-N
org. Substanz <sup>1)</sup>	UBA-Projekt (2011b) EU-Report ClimSoil (Schils et al. 2008) CarboEurope-Projekt (z.B. Freibauer 2010)	LfL-BY (Capriel 2010) LfULG-SN (Kolbe 2009) LUBW (LUBW 2006)	CENTURY/EPIC, DNDC, ROTH-C
Bodenlebewesen	UBA-Bericht (Römbke et al. 2002), Biodiversitäts-Exploratorien (Birkhofer et al. 2012)	NIBIS (2011) Sommer et al. (2002)	n. UBA keine (CENTURY/EPIC)
Verdichtung	UBA-Projekt (UBA 2011a)	NIBIS (2011)	lfd. Recherchen
<b>Eignungsbewertung <sup>3)</sup></b>			
Übertragbarkeit auf BW	selektiv (0)	gut (1)	gut - sehr gut (1,5) <sup>2)</sup>
Aufwand für Analysen	mittel (2)	mittel (2)	sehr hoch (0)
Qualität der Ergebnisse	qualitativ (0)	halbquantitativ (1)	quantitativ (2)
Eignung (Summe)	2	4	3,5

1) Moorböden besitzen Sonderstatus

2) Rechenmodelle sind für BW z.T. nicht kalibriert

3) Die Ziffern in Klammern sind Punkte für die zielgerichtete Eignungsbewertung: von 0 = ungeeignet bis 2 = gut geeignet

### 3.3.1.2 Bewertungsverfahren

Die **Vulnerabilität** von jedem Teilbereich wird mit etablierten, teilbereichsorientierten Verfahren mit den drei Stufen hohe, mittlere und geringe Vulnerabilität bewertet. Dies geschieht für die acht landschaftsökologischen Regionen und zusammenfassend für die baden-württembergische Landesebene. Dabei werden auch die Flächenanteile der einzelnen Vulnerabilitätsstufen innerhalb der LÖR dargestellt. Die je nach Teilbereich unterschiedlich gewählten Klassifikationsgrenzen werden bei den einzelnen Teilbereichen erläutert.

Weil darüber hinaus für die zusammenfassende Darstellung der Teilbereiche am Ende der Vulnerabilitätsanalyse ein einziger Vulnerabilitätswert für eine LÖR bzw. für BW stehen soll,

werden die drei Vulnerabilitätsstufen entsprechend ihrem Flächenanteil in jeder LÖR gewichtet und zu einer „aggregierten Vulnerabilitätsstufe“ aufsummiert. Unter anschließender Berücksichtigung des Flächenanteils mit hoher Vulnerabilität wird ein Kennwert für die Gesamtvulnerabilität einer Landschaft abgeleitet (siehe Tabelle 6). Dieses Verfahren wird für alle Teilbereiche gleichermaßen angewendet. Beispiel:

- Hohe Vulnerabilität (= Stufe 3) auf 17 % der Fläche =  $3 \times 0,17 = 0,51$
- Mittlere Vulnerabilität (= Stufe 2) auf 13 % der Fläche =  $2 \times 0,13 = 0,26$
- Geringe Vulnerabilität (= Stufe 1) auf 70 % der Fläche =  $1 \times 0,70 = 0,70$
- Aggregierte Vulnerabilitätsstufe = Summe der gewichteten Vulnerabilitäten = 1,47
- Gesamtvulnerabilität bei aggregierter Vulnerabilität mit 1,47 und Flächenanteil von 17 % bei hoher Vulnerabilität = mittlere Vulnerabilität der Stufe 2 gemäß Tabelle 6.

Tabelle 6: Bestimmung einer aggregierten der Vulnerabilitätsstufen zur Klassifikation und Bewertung der Gesamtvulnerabilität der landschaftsökologischen Regionen aus in Abhängigkeit des Flächenanteils mit hoher Vulnerabilität

Kennzeichnung	aggregierte Vulnerabilitätsstufe				
	<1,5		1,5 – 2,25		>2,25
	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität				
	< 15 %	≥ 15 %	< 33 %	≥ 33 %	-
Klassifikation	1	2	2'	3	3'
Gesamtvulnerabilität	gering	mittel	mittel	hoch	hoch

Ein Wert für die **Dringlichkeit** wird sowohl für jede LÖR als auch für Baden-Württemberg unter Berücksichtigung des Klimaprojektionsrahmens und der aggregierten Vulnerabilitätsstufe vorgenommen. Bei regionalen und lokalen Risikobereichen wird die Bewertungsstufe zusätzlich mit einem „+“ markiert.

Tabelle 7: Dringlichkeitsstufen für Maßnahmen in Abhängigkeit von Klimaprojektion und aggregierter Vulnerabilitätsstufe

Höchste Vulnerabilität bei...	aggregierte Vulnerabilitätsstufe					
	<1,25	1,25-1,50		1,51-2,25		>2,25
	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität					
	-	< 15 %	≥ 15 %	< 33 %	≥ 33 %	-
n15	2	2	2	3	3	3
n50	1	2	2	2	3	3
n85	1	1	2	2	3	3
f15	1	1	2	2	3	3
f50	1	1	2	2	3	3
f85	1	1	1	1	2	3

Eine Bewertung möglicher **Anpassungsstrategien** findet aufgrund der vielfältigen Querbezüge des Handlungsfeldes Boden zu anderen Handlungsfeldern nicht statt. Allerdings wird auf die zuständigen Handlungsfelder und auf Potenziale von Handlungsstrategien aus Sicht des Bodenschutzes hingewiesen.

Der **Handlungsdruck** als Zusammenschau von Vulnerabilität, Dringlichkeit und Anpassungsstrategie wird aufgrund der fehlenden Anpassungsstrategien nicht bewertet. Weil die Dringlichkeit bei dem gewählten Bewertungsverfahren bereits eine Kombination von Vulnerabilität und Ausmaß der klimatischen Veränderungen ist, kann diese auch als „fachtechnische“ Vorstufe für den Handlungsdruck gelten.

### 3.3.2 Erosion durch Wasser

Erosion ist der Abtrag und Abtransport von Bodenmaterial durch Kräfte des Wassers und des Windes (BGR 2005). Am Ort des Bodenabtrags können die Erträge von Nutzpflanzen abnehmen oder ausfallen, das Wasserrückhaltevermögen von Böden sinken oder der Austrag von Nähr- und Schadstoffen zunehmen. Am Ort des Bodeneintrags können Gebäudeschäden und Reinigungskosten entstehen oder die Gewässergüte abnehmen. Die Bodenerosion ist ein natürlicher Prozess, der oftmals durch menschliche Aktivitäten ausgelöst oder verstärkt wird. Das Risiko von Bodenerosion durch Wasser nimmt im Wesentlichen zu, je intensiver der Niederschlag, je schluffiger die Bodenart, je größer die Hangneigung, je länger ein barrierefreier Hang oder je weniger ein Boden durch Pflanzen bzw. Pflanzenreste bedeckt ist. So weisen in Baden-Württemberg die Landschaften mit vorrangiger Ackernutzung und schluffigen Böden aktuell das höchste Erosionsrisiko auf wie Unterland/Gäue oder Teillandschaften des Ober-/Hochrheins. Landschaften mit hohem Waldanteil wie Schwarzwald oder hohem Grünlandanteil wie Hügel-/Moorland sind hingegen trotz der dort hohen Niederschläge geringer gefährdet (näheres siehe im WaBoA des UM-BW (2004, 2012)).

#### 3.3.2.1 Methodik und Daten für die Analyse der Vulnerabilität durch Erosion

Zum Abbilden des Erosionsrisikos von Böden durch Wasser liegt eine große Anzahl an Bewertungsinstrumenten vor (Beispiele siehe Tabelle 5 in Kapitel 3.3.1.1). Halbquantitative Ergebnisse mit vertretbarem Rechenaufwand liefert die ABAG (= Allgemeine Bodenabtragungsgleichung, entspricht weitgehend DIN 19708), die als Analyseverfahren auf einer empirischen Regressionsgleichung basiert.

Sensitiver Bestandteil der ABAG hinsichtlich Klimawandel ist der R-Faktor, der die Erosivität der Niederschläge berücksichtigt. Der R-Faktor kann mittels einer Regressionsgleichung aus dem Jahresniederschlag abgeschätzt werden. Weil bei der Berechnung des R-Faktors jedoch nur die Veränderung der Jahresniederschlagssumme, aber nicht die Veränderung der erosiv wirksamen Anzahl an Starkniederschlagstagen und die Starkniederschlagssummen

berücksichtigt wird, wurde ein entsprechender Anpassungsfaktor für den R-Faktor berechnet. Hierzu wurde für jeden Klimaprojektionspunkt ein funktionaler Zusammenhang aus dem Produkt der Niederschlagsmenge, der Anzahl Starkniederschlagstage und der Starkniederschlagsmenge gemäß der klimatischen Gegenwartsprojektion beim 50. Perzentil mit dem aktuellen R-Faktor ermittelt (Details siehe im Anhang Kapitel 6.1). Die Qualität der drei berücksichtigten Klimakennwertprojektionen wird von LUBW (2012a) mit „bedingt zufriedenstellend“ beschrieben aufgrund der großen Streuung und Richtungsunsicherheit, so dass auch der angepasste R-Faktor höchstens eine „bedingt zufriedenstellende“ Qualität erreichen kann.

Aus dem gewählten Berechnungsansatz mithilfe der ABAG resultieren sieben Eingangsparameter für die Sensitivitäts- / Vulnerabilitätsanalyse (Übersicht zu Datenquellen siehe Tabelle 8):

- mittlerer Jahresniederschlag (für angepassten R-Faktor)
- Anzahl Starkniederschlagstage (für angepassten R-Faktor)
- Starkniederschlagsmenge (für angepassten R-Faktor)
- Bodenart (für K-Faktor)
- Hanglänge (für L-Faktor)
- Hangneigung (für S-Faktor)
- ggf. Landnutzung bzw. Landbewirtschaftung (für C-Faktor).

Tabelle 8: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Analyse der Sensitivität / Vulnerabilität von Böden durch Erosion

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
ABAG (DIN 19708: 2005)	Klimaprojektionen (LUBW 2012a)	WaBoA (UM-BW 2004, 2012) IBS-Datenbank (IBS 2012) BWPLUS-Projekt (Angenendt et al. 2011)	Modifikation R-Faktor	Klimaprojektionen (LUBW 2012a)

Die aus der Regression zwischen **R-Faktor** nach DIN19708 und Produkt der Kennwerte aus den Gegenwartsszenarien (Jahresniederschlag, Starkniederschlagstage, Starkniederschlagsmenge) resultierenden Abhängigkeitsexponenten und Anpassungsfaktoren für den R-Faktor sind in Tabelle 9 dokumentiert.

Tabelle 9: Anpassungsfaktoren für die R-Faktoren zur Beschreibung der Erosivität von Niederschlägen nach DIN 19708 (arithmetischer Mittelwerte von jeweils 110 Klimaprojektionspunkten des 25-km-Rasters für BW)

Klima- projek- tion	Nj [l/m <sup>2</sup> ]	Starknie- derschlag [tage]	Starknie- derschlag [l/m <sup>2</sup> ]	Abhängig- keitsexpo- nent	Anpas- sungs- faktor	R-Faktor korrigiert	R-Faktor DIN
i15	842	1,8	32,8	-	-	-	80
n15	866	2,1	34,2	0,2706	1,0594	85	83
f15	875	2,2	35,6	0,2706	1,1005	88	84
i50	967	2,9	37,1	-	-	-	93
n50	1012	3,4	39,1	0,2265	1,0694	99	98
f50	1054	3,6	41,6	0,2265	1,1247	104	102
i85	1236	4,5	42,9	-	-	-	121
n85	1283	5,2	45,7	0,2214	1,0611	128	126
f85	1338	5,8	48,0	0,2214	1,1186	135	132

Der **K-Faktor** als Kennwert für die Verschlammungsneigung von Böden wurde aus der Bodenart der Leitböden aller Bodenkartiereinheiten aus dem WaBoA (UM-BW 2004, 2012) nach DIN 19708 abgeleitet. Der **L-Faktor** als Kennwert für erosionsbeeinflussende Hanglänge wurde für eine Standardhanglänge von 100 m nach DIN 19708 berechnet. Der **S-Faktor** als Kennwert für die erosionsbeeinflussende Hangneigung wurde aus der dominanten Hangneigung der Leitböden, die in einer Datenbank des IBS vorlagen, für alle Bodenkartiereinheiten des WaBoA nach DIN 19708 ermittelt.

Die Ermittlung des **C-Faktors** als Kennwert für den Einfluss von Landnutzung und Landwirtschaft auf die Erosion basiert sowohl für die Ist- als auch die Zukunftsszenarien auf der gegenwärtigen Landnutzung und –bewirtschaftung, weil deren zukünftige Veränderungen von kaum vorhersehbaren Entwicklungen wie z.B. globale Angebot und Nachfrage oder Agrar- und Umweltpolitik abhängig sind.

Für Wald und Dauerkulturen incl. Weinbau mit und ohne Begrünung wurden mittlere C-Faktoren ohne regionale Differenzierung von Stumpf und Auerswald (2006) übernommen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Die repräsentativen Fruchtfolgen, deren Flächenanteile und C-Faktoren in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs

LÖR-Nr	LÖR	Landnutzungstyp	Vegetations-Belegung <sup>1)</sup>	C-Faktor	Flächenanteil [%]	C-Faktor <sub>gew</sub>	C-Fakt. <sub>gew</sub> in LÖR
1	ohr	Acker	KM	0,38	23,1	0,088	0,280
1	ohr	Acker	WW-KM+WW-KM-SG-KM	0,27	62,8	0,170	
1	ohr	Acker	WW-SG-SM	0,16	14,1	0,023	
2	ug	Acker	WW-KM-SG-ZR	0,27	48,5	0,131	0,211
2	ug	Acker	WW-WR-KM	0,16	44,7	0,072	
2	ug	Acker	WW-SG-ZR	0,12	6,7	0,008	
3	sw	Acker	WW-SM-SG-ZR	0,27	10,9	0,030	0,146
3	sw	Acker	WW-SG-SM	0,16	60,3	0,096	
3	sw	Acker	WW-SG-KG-KG	0,07	28,8	0,020	
4	hml	Acker	WW-SM-SM	0,38	45,8	0,174	0,292
4	hml	Acker	WW-SM-SG-SM	0,27	28,4	0,077	
4	hml	Acker	WW-SG-SM	0,16	25,8	0,041	
5	dil	Acker	WW-SM	0,27	12,5	0,034	0,125
5	dil	Acker	WW-WG-SM	0,16	26,7	0,043	
5	dil	Acker	WW-SG-Ra	0,08	60,8	0,049	
6	sab	Acker	WW-WG-SM	0,16	3,4	0,005	0,090
6	sab	Acker	WW-SM-SG-Ra	0,13	21,4	0,028	
6	sab	Acker	WW-SG+WW-SG-WR	0,08	41,5	0,033	
6	sab	Acker	WW-SG-KG-KG	0,07	33,7	0,024	
7	kl	Acker	WW-SG-SM	0,16	29,5	0,047	0,112
7	kl	Acker	WW-WG-Ra-SM	0,13	17,3	0,023	
7	kl	Acker	WW-SG-Ra	0,08	53,1	0,043	
8	bho	Acker	WW-WG-ZR-KM	0,27	6,7	0,018	0,111
8	bho	Acker	WW-WG-SM	0,16	9,5	0,015	
8	bho	Acker	WW-WG-Ra-Sm	0,13	20,5	0,027	
8	bho	Acker	WW-SG-Ra	0,08	63,3	0,051	
1-8	BW	Dauerkultur	incl. Wein	0,31	-	-	0,310
1-8	BW	Grünland	Wiesen, Weiden	0,004	-	-	0,004
1-8	BW	Wald	incl. Gebüsch	0,004	-	-	0,004

1) KG = Klee gras      SG = Sommergerste      WR = Winterroggen  
 KM = Körnermais      SM = Silomais      WW = Winterweizen  
 Ra = Winter-Raps      WG = Wintergerste      ZR = Zuckerrübe

Bei der Ackerbewirtschaftung wurden Fruchtfolgen mit konventioneller Bodenbearbeitung, also Pflugbewirtschaftung ohne Zwischenfrüchte und mit mittlerem Oberflächenzustand nach DIN 19708 angenommen. Dies entspricht einer konservativen Annahme, die gewählt wurde, weil keine umfassenden Angaben zum Ausmaß erosionsschützender Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen in Baden-Württemberg vorliegen und potenzielle Schutzmaßnahmen den Einfluss des Klimawandels auf die Bodenerosion überlagern würden. Die Definition der Acker-Fruchtfolgen beruht auf Angenendt et al. (2011), weil dort repräsentative Fruchtfolgen für acht landwirtschaftliche Vergleichsgebietsgruppen Baden-Württembergs (LEL 2010), die gut mit den LÖR übereinstimmen, definiert wurden. Diese basieren auf Flächenangaben der Agrarstatistik und einer damit durchgeführten, optimierten Fruchtfolgeverteilung auf der Ackerfläche. Zur Auswahl kamen dann die 3-4 umfangreichsten Fruchtfolgen jeder LÖR. Anschließend wurde für jede Fruchtfolge der C-Faktor nach DIN 19708 ermittelt, entsprechend des Flächenanteils der Fruchtfolge innerhalb einer LÖR gewichtet und abschließend über jede LÖR aufsummiert (siehe Tabelle 10).

Als Vorstufe zur Darstellung der Vulnerabilität wurde schließlich für jeden Standortkomplex und jeder Klimaprojektionsvariante die Bodenerosion nach DIN 19708 berechnet. Die Ergebnisse wurden innerhalb jeder LÖR entsprechend dem Flächenanteil der Standortkomplexe gewichtet und aussummiert. Die Vulnerabilität wird dann dargestellt mit Hilfe der Veränderungen der Klima-Nah- und Fernprojektionen mit ihren 50. und 85. Perzentilen gegenüber der Klima-Istprojektion mit 50. Perzentil. Dazu wird die in Tabelle 11 genannte Klassifizierung durchgeführt.

Tabelle 11: Klassifizierung der Zunahme von Bodenerosion aufgrund des Klimawandels in Abhängigkeit von Landnutzung (in Anlehnung an die Gefährdungsklassifikation nach DIN 19708)

Vulnerabilität	Vulnerabilitätsstufe	DIN-Klasse der Erosionsgefährdung	t/ha*a ohne Landnutzung und Hanglänge, d.h. o. C- und L-Faktor	t/ha*a mit Landnutzung und Standardhanglänge (100 m), d.h. m. C- und L-Faktor
gering	1	0 und 1	< 2,5	< 1,0
mittel	2	2 und 3	2,5 - 7,5	1,0 - 3,0
hoch	3	4 und 5	> 7,5	> 3,0

### 3.3.2.2 Ergebnisse zur Analyse der Vulnerabilität von Böden durch Erosion

Die höchste Vulnerabilität wurde für die Böden der LÖR Unterland/Gäue und teilweise auch für die Böden der LÖR Ober-/Hochrhein ermittelt. In Abbildung 6 ist deshalb für die LÖR Unterland/Gäue das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse für die Klimaprojektionsvarianten beim 50. und 85. Perzentil dargestellt.

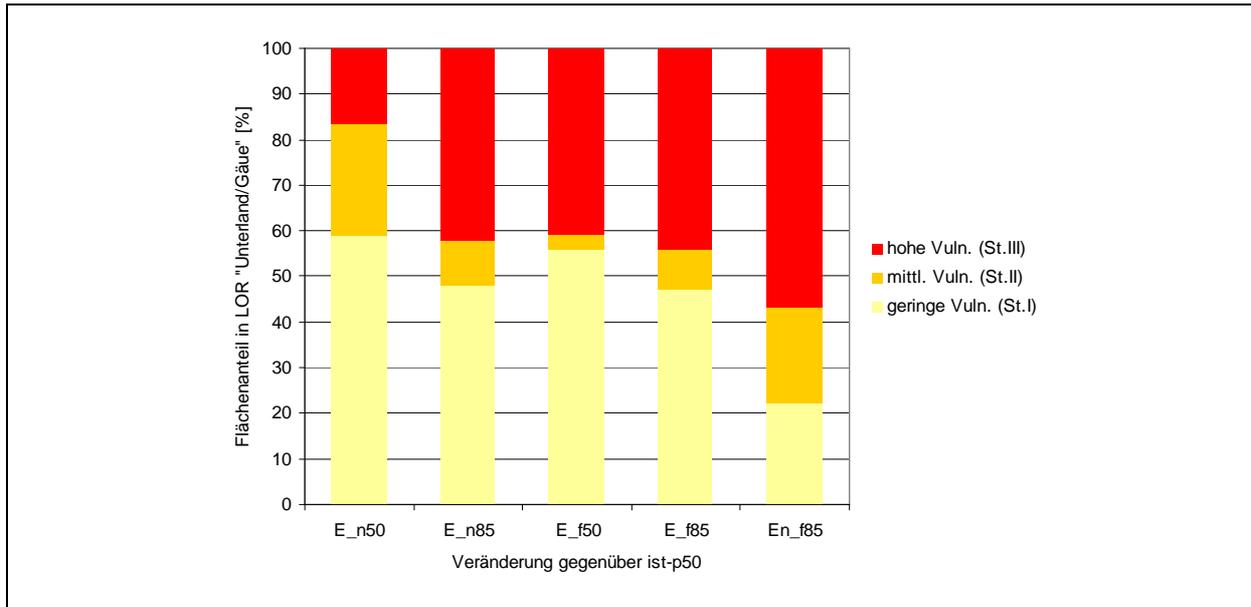


Abbildung 6: Variabilität der Flächenanteile mit unterschiedlicher Vulnerabilität von Böden durch Erosion gegenüber dem Klimawandel in Abhängigkeit der Klimaprojektionen am Beispiel der erhöht vulnerablen Landschaft „Unterland/Gäue“

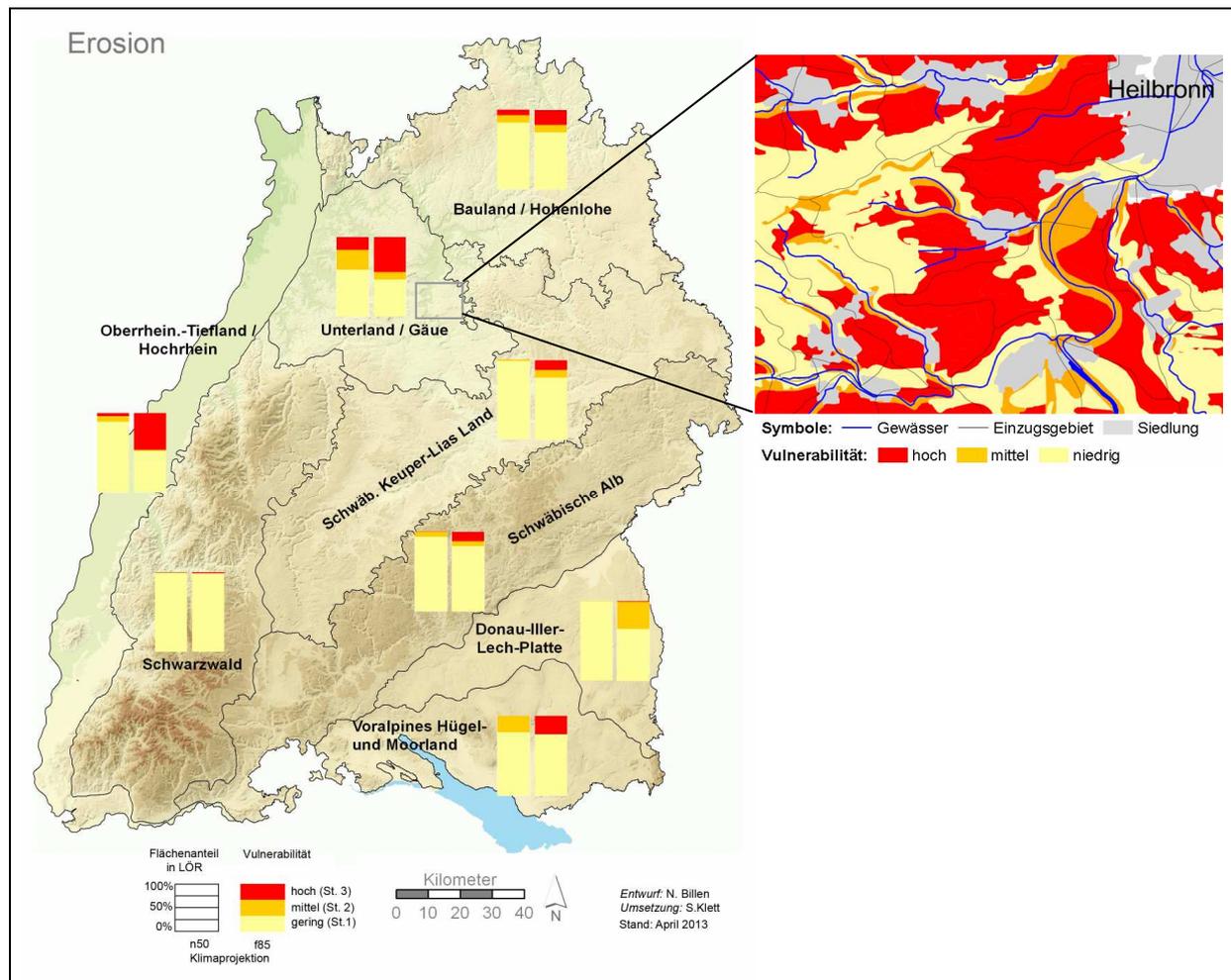


Abbildung 7: Vulnerabilität von Böden durch Erosion bei aktueller Landnutzung gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs und größermaßstäbiger Landschaftsausschnitt (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

Ergänzend wird in Abbildung 6 auch das Ergebnis zum 85. Perzentil der Fernprojektion ohne aktuelle Landnutzung abgebildet, um die potenzielle Erosions-Sensitivität der Böden gegenüber dem Klimawandel aufzuzeigen.

Die höchste Vulnerabilität der LÖR Unterland/Gäue wird deutlich beim Vergleich aller Landschaften (Abbildung 7). Hier ist die mittlere Wahrscheinlichkeitsvariante der Klimaprojektion beim 50. Perzentil für die nahe Zukunft und für die Variante mit den größten Veränderungen (ferne Zukunft 85. Perzentil) dargestellt (Details siehe Anhangstabelle 2). Bei den Varianten zum 15. Perzentil wurden keine Veränderungen ermittelt. In Abbildung 7 bleiben allerdings die hoch vulnerablen Bereiche innerhalb einer landschaftsökologischen Region unerkannt, wie der exemplarische Landschaftsausschnitt in dieser Abbildung zeigt. Basierend auf dem räumlichen Verteilungsmuster von Böden und Landnutzung (Standortkomplexe, siehe Kapitel 3.3.2.1) werden deshalb in der Tabelle 12 die Naturräume mit größeren Flächenanteilen an hoher Vulnerabilität beim ungünstigsten Szenario (85. Perzentil ferne Zukunft) aufgeführt sowie dem gegenwärtigen Erosionsrisiko gegenübergestellt. So wird einerseits eine hohe Vulnerabilität einzelner Naturräume schnell erkennbar, andererseits jedoch auch ein gegenwärtig hohes Erosionsrisiko, das unabhängig von der Vulnerabilität künftig fortbesteht.

Tabelle 12: Naturräume in den Landschaftsökologischen Regionen mit erhöhtem Gegenwartsrisiko von Bodenerosion (n. UM-BW 2004, 2012) und hoher Vulnerabilitätszunahme auf mehr als 15 % der Fläche

LÖR-Nr.	Landschaftsökologische Region	Naturräume mit regionalen Risikobereichen	Gegenwärtig erhöhtes Risiko <sup>1)</sup>	Vulnerabilitätszunahme <sup>1)</sup>
1	Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	Kaiserstuhl	+	+
		Vorberge	+	+
		Markgräfler Land	+	+
		Nördl. Oberrhein	-	+
2	Unterland/Gäue	Kraichgau	+	+
		Neckarbecken	-	+
		Strom-/Heuchelberg	+	-
3	Schwarzwald	/	/	/
4	Voralpines Hügel- und Moorland	Hegau	-	+
		Bodenseebecken	-	+
		Oberschwaben	-	+
5	Donau-Iller-Lech	/	/	/
6	Schwäbische Alb / Baar	Alb-Wutach	+	-
7	Keuper-Lias-Land	Obere Gäue	+	-
8	Bauland/Hohenlohe	Hohenloher-Haller Ebene	-	+
		Tauberland	+	-
		Kocher-Jagst Ebene	+	-

1) + = zutreffend, - = unzutreffend, / = kein hohes Gegenwartsrisiko bzw. keine hohe Vulnerabilität

Insgesamt höchste Risiken aufgrund der Kombination von gegenwärtig hohem Erosionsrisiko und zusätzlich hoher Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel ergibt sich für die LÖR Unterland/Gäue (Kraichgau) und Ober-/Hochrhein (Kaiserstuhl, Vorberge, Markgräfler Land). In anderen Naturräumen liegt ebenfalls gegenwärtig ein hohes Erosionsrisiko vor, aber höchstens mittlere Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel (z.B. Obere Gäue in der LÖR Keuper-Lias-Land) oder umgekehrt (z.B. Bodenseebecken in der LÖR Hügel-/Moorland).

Bei einer Betrachtung der Vulnerabilität über alle Klimaprojektion hinweg bleibt die hohe Vulnerabilität der LÖR Unterland/Gäue und Ober-/Hochrhein bestehen, wie die zusammenfassenden Vulnerabilitätsstufen der einzelnen LÖR zeigen (siehe Tabelle 13). Andere Risikobereiche wie im Hügel-/Moorland oder Bauland/Hohenlohe führen bei der Klima-Fernprojektion aufgrund vorhandener aber weniger verbreiteter Risikobereiche beim 85. Perzentil der Fernprojektion zu einer mittleren Vulnerabilität der LÖR (siehe Tabelle 13, Details s. Anhangstabelle 3). Die zusammenfassende Betrachtung der baden-württembergischen Landesfläche ergab insgesamt eine mittlere Vulnerabilität der Böden gegenüber der Bodenerosion. Die exemplarische Darstellung der Vulnerabilität der Klima-Fernprojektion beim 85. Perzentil ohne aktuelle Landnutzung zeigt, dass diese bei der potenziell-natürlichen Erosion durchgängig hoch ist.

Insgesamt ergab sich für den Teilbereich Bodenerosion die höchste Vulnerabilität beim 85. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Besonders betroffen sind davon einige Naturräume der LÖR Unterland/Gäue und Ober-/Hochrhein, die aufgrund ihrer erosionsempfindlichen Böden aus Löß (Parabraunerden, Pararendzinen) unter Ackernutzung auch schon gegenwärtig zu den erosionskritischen Regionen gehören. Demgegenüber weisen einige Naturräume in anderen LÖR eine hohe Vulnerabilität bei geringem bis mittlerem Erosionsrisiko auf und umgekehrt.

Tabelle 13: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen der Landschaftsökologischen Regionen für den Teilbereich Bodenerosion in Abhängigkeit der Klimaprojektionsvarianten

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	n50	n85	f50	f85	f85 o.LN <sup>1)</sup>
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1	3	2'	3	3'
Unterland/Gäue	2	2'	3	3	3	3'
Schwarzwald	3	1	1	1	1	3'
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1	2	1	2	3'
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1	1	1	1	3'
Schwäbische Alb/Baar	6	1	1	1	1	3'
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	1	1	1	3'
Bauland/Hohenlohe	8	1	2	1	2	3
Baden-Württemberg	1-8	1	2	1	2	3'

1) ohne aktuelle Landnutzung = potenzielle Vulnerabilität

### 3.3.2.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Erosion

Für den Teilbereich Bodenerosion ergibt sich die in Tabelle 14 dargestellte Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen in den landschaftsökologischen Regionen. Die landschaftsunabhängige Dringlichkeitsbewertung der Gesamtfläche Baden-Württembergs wird mit der maximalen Dringlichkeit aus den acht Regionen beschrieben. Beim Teilbereich Bodenerosion ergibt sich somit für die Landesfläche im Durchschnitt eine mittlere Dringlichkeit+. Das „plus“ ist mit dem relativ großen Flächenanteil einer hohen Vulnerabilität in einigen Gebieten auf regionaler und lokaler Ebene begründet (siehe Tabelle 12). Daraus resultiert eine naturräumlich bedingte, d.h. lokal hohe Dringlichkeit für Maßnahmen in verstreut vorliegenden Risikobereichen innerhalb der LÖR Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein, Unterland/Gäue und Voralpines Hügel- und Moorland.

Tabelle 14: Regional differenzierte Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen beim Teilbereich Bodenerosion

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste aggregierte Vulnerabilität	Klimaprojektionsrahmen	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität	gemittelte Dringlichkeit
Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	1	1,94	f85	46,4	2
Unterland/Gäue	2	1,97	f85	44,1	2
Schwarzwald	3	1,03	f85	1,3	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1,47	f85	23,2	1
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1,35	f85	0,5	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1,30	f85	11,9	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1,34	f85	12,1	1
Bauland/Hohenlohe	8	1,47	f85	18,8	1
Baden-Württemberg	1-8	1,48	f85	16,2	2+

+ aufgrund regionaler und lokaler Risikobereiche mit hoher Vulnerabilität

### 3.3.2.4 Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zur Bodenerosion

Die **Plausibilität** der Vulnerabilitätsanalyse durch qualitative Vergleiche mit anderen Untersuchungen ist nur eingeschränkt möglich, weil vergleichbare Untersuchungen z.B. lediglich mit ein oder zwei Klimamodellen arbeiten, andere Zeiträume für die Klimaprojektionen gewählt oder unterschiedliche Landnutzungsszenarien definiert wurden. Dennoch zeigen sich auch bei einer regionalen Betrachtung gleichgerichtete Tendenzen (s. Vergleich mit Wurbs und Steininger 2011 in Abbildung 8).

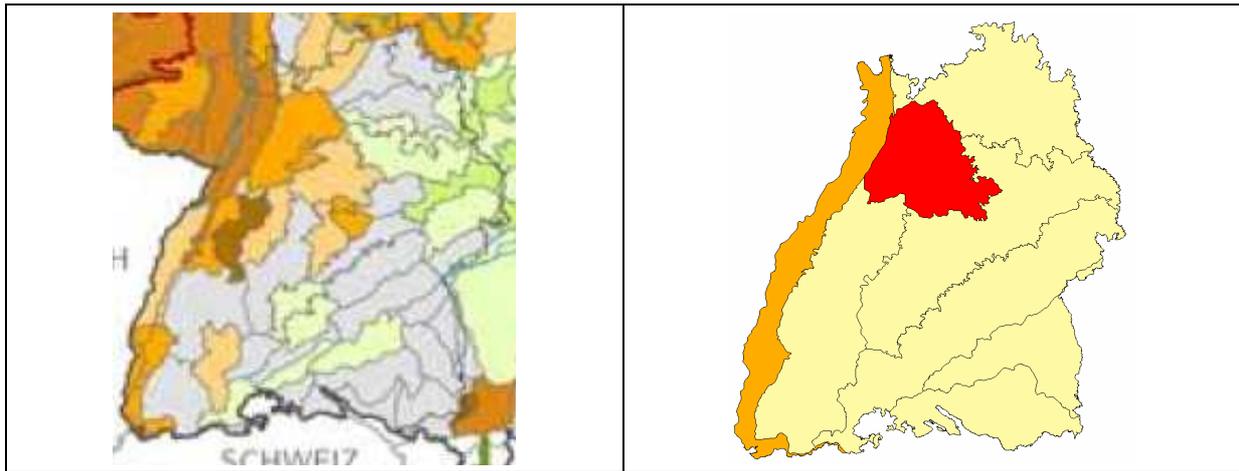


Abbildung 8: Vergleich der Veränderung von Bodenerosion durch Wasser basierend auf WETTREG-Modellierung für 2041-2070 bei konventioneller Bodenbearbeitung ohne Stilllegungsflächen (links, Wurbs & Steiniger 2011) mit der Ensemble-Modellierung für 2021-2050 (50. Perzentil) bei aktueller Landnutzung und konventioneller Bodenbearbeitung (rechts)

Der **Geltungsbereich** bzw. die Sicherheit der berechneten Ergebnisse zur Erosion ist u.a. aufgrund des ungeprüften Korrekturwertes für den R-Faktor offen. Denn der R-Faktor wird nach DIN 19708 mittels einer Regressionsgleichung ermittelt, die mit Niederschlagsdaten von vor 1995 erstellt wurde und somit die projizierte Erhöhung der Niederschläge nicht einschließt. Außerdem können mit der DIN 19708 keine gezielten Aussagen zur Wirkung von Starkniederschlagsereignissen und zum Wasserabfluss gemacht werden. Dies ist hinsichtlich der Bodenerosion, aber auch des Gewässer- und Hochwasserschutzes von großer Bedeutung, lässt sich allerdings nur mit aufwändigeren Modellierungen darstellen. Kritische Faktoren für den Geltungsbereich der Rechenergebnisse sind u.a. somit:

- Die Statisch-empirische Regressionsgleichung für die Erosivität des Niederschlags beruht auf der Niederschlagscharakteristik der Vergangenheit, so dass hohe Niederschlagssummen den Geltungsbereich überschreiten
- Der Korrekturfaktor für den die Regen-Erosivität beschreibenden R-Faktor bleibt ungeprüft
- Aussagen zum Wasserabfluss sind mit der DIN 19708 nicht möglich.

### 3.3.2.5 Fazit zur Erosion

Im Rahmen des Klimawandels ist aufgrund der projizierten Veränderung der Starkniederschlagscharakteristik regional eine hohe Vulnerabilität und im Landesdurchschnitt eine mittlere Vulnerabilität beim Teilbereich Bodenerosion zu erwarten. Dies gilt in besonderem Maße für das 85. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Für das 50. und 15. Perzentil der Nah- und Fernprojektion ist im Landesdurchschnitt mit einigen lokalen Ausnahmen keine erhöhte

Vulnerabilität zu erwarten. Innerhalb der beiden hoch vulnerablen Regionen Unterland/Gäue und Ober-/Hochrhein sind einige Naturräume von der hohen Vulnerabilität besonders betroffen. Dabei handelt es sich um Gebiete, die aufgrund ihrer erosionsempfindlichen Böden aus Löss (Parabraunerden, Pararendzinen) unter Ackernutzung auch gegenwärtig schon erosionsgefährdet sind. Andere Naturräume, die gegenwärtig ebenfalls erosionsgefährdet sind, weisen keine hohe Vulnerabilität auf, sind aufgrund des hohen Grundrisikos jedoch auch zukünftig gefährdet. Ebenfalls besteht in der Zukunft ein hohes Erosionsrisiko in den Naturräumen mit gegenwärtig geringem Risiko aber hoher Vulnerabilität. Aufgrund der regional hohen Vulnerabilität ergibt sich auf dieser Ebene für einige Gebiete eine hohe, im Landesdurchschnitt hingegen eine mittlere Dringlichkeit für Anpassungsstrategien.

Die berechnete Vulnerabilität ist mit anderen Untersuchungen vergleichbar. Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus der bedingt zufrieden stellenden Streuung und Richtungssicherheit der modellierten Klimasignale der verwendeten Kennwerte, der verbesserungswürdigen Integration von zunehmenden Starkniederschlagsereignissen in die Berechnungen und der unvorhersehbaren Landnutzung, die einen entscheidenden Einfluss auf das tatsächliche Erosionsrisiko in der Zukunft hat.

### 3.3.3 Auswaschung nicht sorbierbarer Stoffe

Die Auswaschung nicht resorbierbarer Stoffe aus Böden wie z.B. Nitrat kann ein Risiko für das Grund- und somit häufig auch für das Trinkwasser darstellen. Sie nimmt im Wesentlichen umso mehr zu, je mehr Sickerwasser die durchwurzelten Bodenhorizonte verlässt. Das Sickerwasser nimmt in der Regel zu mit abnehmender Wasserspeicherkapazität von Böden sowie mit hohen Niederschlägen und geringer Verdunstung, also einer zunehmend positiven Wasserbilanz. Kennwert für das Auswaschungsrisiko ist die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers. Dies ist ein Quotient, der beschreibt, wie häufig das Sickerwasser innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens austauscht (BGR 2005). Beträgt der Quotient mehr als 100 % in einem Jahr, wird das Bodenwasser mehrfach ausgetauscht. Damit steigt auch das Risiko der vollständigen Auswaschung gelöster Nähr- oder Schadstoffe. In Baden-Württemberg weisen aktuell die Landschaften mit höheren Niederschlagssummen und kühleren Jahrestemperaturen Austauschhäufigkeiten von über 150 % auf (UM-BW 2004, 2012) wie z.B. Schwarzwald, nördliches Bauland/Hohenlohe (Odenwald), Nordwestflanke (Albtrauf) und östliche Alb/Baar, östliches Keuper-Lias-Land und Hügel-/Moorland. Unter 100 % liegt die Austauschhäufigkeit z.B. im nördlichen Oberrhein (Region Mannheim) und südlichen Oberrhein (Kaiserstuhl) oder südlichem Unterland/Gäue (Region Stuttgart) [näheres siehe im WaBoA (UM-BW 2004, 2012)].

### 3.3.3.1 Methodik und Daten für die Analyse der Vulnerabilität durch Auswaschung

Die Darstellung des veränderten Auswaschungsrisikos von Stoffen aus Böden gilt prinzipiell für alle nicht sorbierbaren Stoffe, also auch Nitrat. Neben der Klimatischen Wasserbilanz, die eine einfachste Methode ohne Bezug zu Standort- und Bodeneigenschaften darstellt, bietet z.B. die Methode nach Ad-hoc-AG Boden (2003), ergänzt um Müller & Waldeck (2011), einen besser differenzierenden und somit auch sensibleren Ansatz (siehe auch Tabelle 5). Diese Methode gliedert sich in zwei Arbeitsschritte:

- Berechnung der Sickerwasserrate mittels multipler Regressionsgleichungen, die nach Landnutzungstyp und pflanzenverfügbarem Wasser differenzieren (nach Ad-hoc-AG Boden 2003)
- Berechnung und Klassifizierung der relativen Austauschhäufigkeit des Bodenwassers als Quotient von Gesamtbodenwasser (FKWe) und Sickerwasser (nach Müller & Waldeck 2011), der das Auswaschungsrisiko charakterisiert.

Die erforderlichen Eingangsdaten für die Berechnungen und Vulnerabilitätsanalyse sind (Übersicht zu Datenquellen siehe Tabelle 15):

- mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr ( $N_s$  = April-September)
- mittlerer Jahresniederschlag ( $N_j$ )
- mittlere potenzielle Evapotranspiration pro Jahr ( $ETP_j$  = FAO Gras-Referenzverdunstung)
- Pflanzenverfügbares Wasser ( $WV_{pfl} = nFKWe + GW\text{-Nachlieferung} + N_s$ )
- Speicherbares Bodenwasser (FKWe)
- Grundwasserstand
- Landnutzungstyp (Acker, Grünland, Nadelwald, Laubwald)

Tabelle 15: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Analyse der Sensitivitäts- / Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
Ad-hoc-AG Boden (2003) NIBIS: VR 6.1.13 6.1.14 (Müller & Waldeck 2011)	Klimaprojektionen (LUBW 2012a), damit auch Berechnung der ETP	WaBoA (UM-BW 2004, 2012) IBS-Datenbank (IBS 2012)	Generalisierungen bei Klassifikation des Grundwasserstands und der nFKWe	-

Die Auswahl der standortspezifischen Regressionsgleichung (Ad-hoc-AG Boden 2003) basiert auf dem pflanzenverfügbaren Wasser (WVpfl):

- Beim pflanzenverfügbaren Wasser ist der kapillare Aufstieg entscheidend von Bodenart und **Grundwasserstand** abhängig (Verknüpfungsregel 6.1.13 n. Müller & Waldeck 2011). Aufgrund der nur grobklassifizierenden Informationen zum Grundwasserstand im WaBoA konnten die Böden lediglich in zwei Grundwasserkategorien eingeteilt werden (basierend auf UM-BW 1995, siehe Tabelle 16). Beim GW-Stand von  $\leq 80$  cm wird eine Grundwassernachlieferung von  $>5$  mm/Tag über einen Zeitraum von 100 Tagen angenommen (entsprechend Verknüpfungsregel 6.1.13 und 6.1.14 bei Müller & Waldeck 2011). Zusammen mit einem Sommerniederschlag von mindestens 200 mm, der auch zukünftig in BW überall erreicht wird, sind unabhängig von der nFKWe bereits  $>700$  l/m<sup>2</sup> pflanzenverfügbares Wasser vorhanden. Für alle anderen Standorte wird die Sickerwasserrate den Regressionsgleichungen für  $\leq 700$  l/m<sup>2</sup> zugeordnet.
- Die **nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums** wird bei allen Böden auf die Gründigkeit bezogen, die aus den vorliegenden Bodeninformationen abgeleitet wurde. Als maximale Gründigkeit gelten 100 cm.

In Abhängigkeit vom **Landnutzungstyp** stehen Regressionsgleichungen für Acker, Grünland, Laubwald und Nadelwald zur Verfügung. Weil bei den Vulnerabilitätsanalysen zum Handlungsfeld Boden jedoch keine Differenzierung der Waldkategorien vorgenommen wurde, wird zunächst für jede Waldkategorie die Sickerwasserrate berechnet. Anschließend findet eine Gewichtung der Sickerwasserraten entsprechend den Flächenanteilen des CORINE Land Cover im WaBoA (UM-BW 2004, 2012) statt mit Bezug auf die LÖR (siehe Tabelle 17). Beträgt also beispielsweise die Sickerwasserrate unter Laubwald 200 l/m<sup>2</sup> und unter Nadelwald 150 l/m<sup>2</sup> und beträgt der Flächenanteil an Laubwald und Nadelwald jeweils 50 %, was einem Gewichtungsfaktor von 0,5 entspricht, wird die Sickerwasserrate folgendermaßen berechnet:  $200 \text{ l/m}^2 \times 0,5 + 150 \text{ l/m}^2 \times 0,5 = 175 \text{ l/m}^2$ .

Tabelle 16: Vereinfachte Gruppierung von Böden der Standorteinheiten hinsichtlich Grundwasseranschluss als Entscheidungskriterium für die Auswahl der Regressionsgleichung zur Berechnung der Sickerwasserrate, die ein Eingangswert zur Vulnerabilitätsanalyse ist

Grundwassergruppe	Obergrenze Gr-Horizont [cm]	Bodentypen (Beispiele)	Zuordnung für Auswahl der Regressionsgleichung
GWG1	$\leq 80$	(X)Moor-Gley, (X)Gley, Gley	Grundwasserbeeinflusst mit nFKWe bis 40 cm
GWG0	$> 80$	alle Anderen	Grundwasserfern mit nFKWe bis 100 cm

Tabelle 17: Flächenanteile der Waldkategorien im CORINE Land Cover nach UM-BW (2004, 2012) und daraus abgeleitete Gewichtungsfaktoren für die Ergebnisse der Sickerwasserberechnungen für zwei Waldkategorien

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	Flächenanteil n. CORINE <sup>1)</sup> [%]			Gewichtungsfaktor <sup>2)</sup>	
		Laubwald	Mischwald	Nadelwald	Laubwald	Nadelwald
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	62	20	18	0,7	0,3
Unterland/Gäue	2	69	29	3	0,8	0,2
Schwarzwald	3	3	30	67	0,2	0,8
Voralpines Hügel- und Moorland	4	2	38	60	0,2	0,8
Donau-Iller-Lech-Platte	5	2	6	92	0,0	1,0
Schwäbische Alb/Baar	6	30	43	27	0,5	0,5
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	14	42	44	0,3	0,7
Bauland/Hohenlohe	8	35	45	20	0,6	0,4

1) CORINE-Nr.: Laubwald = 311, Nadelwald = 312, Mischwald = 313

2) keine Regressionsgleichung für Mischwald verfügbar, deshalb Mischwald mit je 50 % bei Laub- und Nadelwald

Jeder der 545 Standorteinheiten, die aus den Boden- und Landnutzungsinformationen des WaBoA (UM-BW 2004, 2012) erzeugt worden sind, wurde die passende Regressionsgleichung aus zur Sickerwasserberechnung zugewiesen (siehe Tabelle 18). Aufgrund des Fehlens der potenziellen Evapotranspiration als eine erforderliche Eingangsvariable bei den Sickerwasserberechnungen wurde sie wie folgt nachberechnet:

$$\text{potenzielle Evapotranspiration: } ETP_j \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1} = N_j \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1} - KWB_j \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1}$$

Damit konnten anschließend für die gegenwärtige und alle zukünftigen Klimaprojektionen mittels Regressionsgleichungen die Sickerwasserraten (SWR) berechnet werden. Mit diesen Ergebnissen folgte die Berechnung der Austauschhäufigkeit (AH) und deren Klassifikation nach Müller & Waldeck (2011, siehe Tabelle 19).

$$AH \% \text{ a}^{-1} = (SWR \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1} / FKWe \text{ mm}) \times 100$$

Wird das Bodenwasser zu weniger als 100 % in einem Jahr ausgetauscht, ist die Auswaschungsgefahr nicht sorbierbarer Stoffe geringer. Übersteigt die Austauschhäufigkeit 100 %, wird das Bodenwasser mehrfach jährlich ausgetauscht und somit steigt auch die Wahrscheinlichkeit der vollständigen Auswaschung gelöster oder nachgelieferter Nähr- oder Schadstoffe. Die Vulnerabilität des Auswaschungsrisikos (AW\_Vu) berechnet sich wie folgt:

$$\text{Auswaschung\_Vulnerabilität} = AH_{\text{zukunft}} - AH_{\text{ist}}$$

Die Klassifikation der Vulnerabilität wird abschließend nach Tabelle 20 vorgenommen, ein Bewertungsbeispiel befindet sich in Tabelle 21.

Tabelle 18: Entscheidungskriterien zur Auswahl standortspezifischer Regressionsgleichungen

Grundwassereinfluss	Pflanzenverfügbares Wasser	Landnutzungstyp	Gleichungs-Nr. nach Ad-hoc-AG Boden (2003)
ja ( $\leq 80$ cm)	$>700 \text{ l / m}^2 \cdot \text{a}$	Acker	1
		Grünland	5
		Nadelwald	9
		Laubwald	10
nein ( $>80$ cm)	$\leq 700 \text{ l m}^2 \cdot \text{a}$	Acker	4
		Grünland	8
		Nadelwald	15
		Laubwald	16

Tabelle 19: Klassifikation der Austauschhäufigkeit von Bodenwasser

Austauschhäufigkeit (AH)	AH-Klasse	AH-Einstufung [ $\% \text{ a}^{-1}$ ]
sehr gering	1	$<70$
gering	2	$70-<100$
mittel	3	$100-<150$
hoch	4	$150-<250$
extrem hoch	5	$\geq 250$

Tabelle 20: Klassifikation der Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung

Vulnerabilität	Vulnerabilitätsstufe	Veränderung AH-Klasse	Klassifikation
gering	1	$\leq -1$ oder 0	Verringerung um mindestens eine Klassenstufe oder keine Veränderung
mittel	2	+1	Erhöhung um eine Klassenstufe
hoch	3	+2 oder $>+2$	Erhöhung um zwei oder mehr Klassenstufen

Tabelle 21: Beispiel zur Klassifikation der Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung in Abhängigkeit der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers

Klimaprojektion	AH in %	AH-Klasse	Klassendiff. zu i50	Vulnerabilität
i50	80	2	-	-
n15	65	1	-1	gering
n85	110	3	+1	mittel
f85	165	4	+2	hoch

### 3.3.3.2 Ergebnisse zur Analyse der Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung

Die höchste Vulnerabilität beim Teilbereich Auswaschung wurde für das Keuper-Lias-Land und Donau-Iller-Lech berechnet, gefolgt vom Oberrhein-/Hochrhein. Zur Illustration der Vulnerabilitätsunterschiede aufgrund der einzelnen Klimaprojektionsvarianten ist in Abbildung 9 das Ergebnis für das Keuper-Lias-Land dargestellt. Die erhöhte Vulnerabilität der drei genannten Regionen wird deutlich beim Vergleich aller Regionen (siehe Abbildung 10). In der Abbildung 10 ist eine Klimaprojektion mit mittleren Auswirkung (50. Perzentil der Klimanahprojektion) und die Projektion mit den größten Auswirkungen (85. Perzentil der Klimafernprojektion) dargestellt. Beim 15. Perzentil der Nah- und Fernprojektion werden keine Veränderungen festgestellt (siehe Anhangstabelle 4).

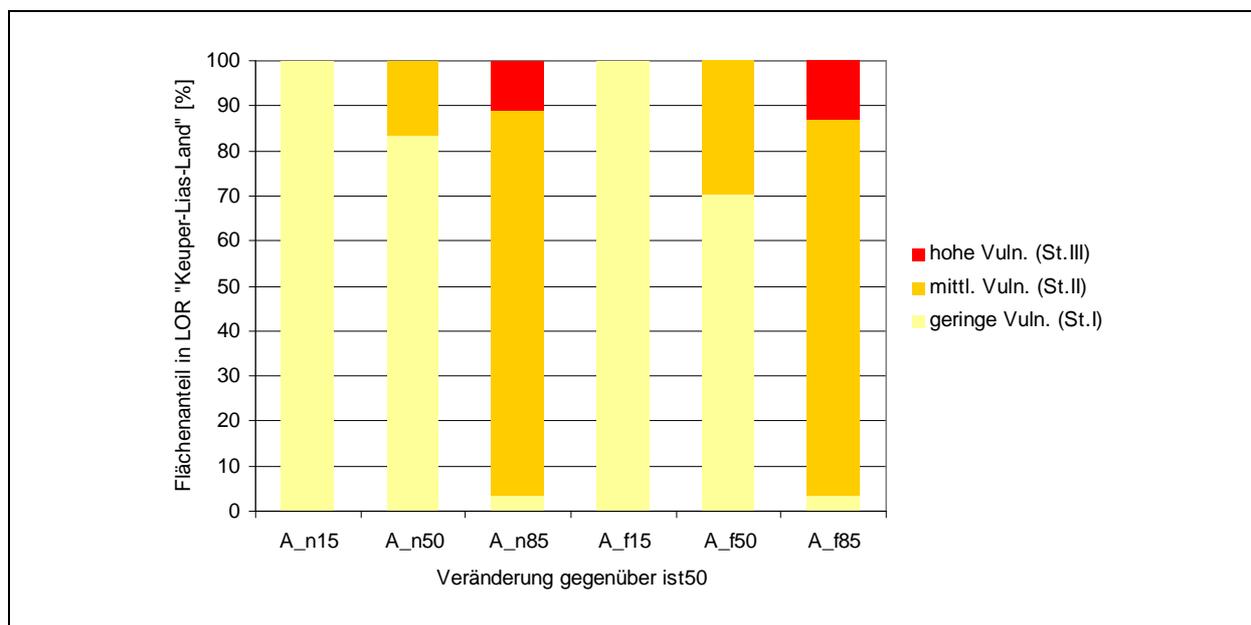


Abbildung 9: Variabilität der Flächenanteile mit unterschiedlicher Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung gegenüber dem Klimawandel in Abhängigkeit der Klimaprojektionen am Beispiel der erhöht vulnerablen Landschaft „Keuper-Lias-Land“

Die Verteilung der hoch vulnerablen Bereiche innerhalb einer LÖR bleiben in Abbildung 10 jedoch unerkant. Deshalb werden basierend auf dem räumlichen Verteilungsmuster von Böden und Landnutzung (Standortkomplexe) in der Tabelle 22 die Naturräume mit größeren Flächenanteilen an hoher Vulnerabilität beim ungünstigsten Szenario (85. Perzentil der Fernprojektion) aufgeführt sowie dem gegenwärtigen Auswaschungsrisiko gegenübergestellt. So wird einerseits eine hohe Vulnerabilität einzelner Naturräume schnell erkennbar, andererseits jedoch auch ein gegenwärtig hohes Auswaschungsrisiko, das unabhängig von der Vulnerabilität künftig fortbesteht. Insgesamt höchste Risiken aufgrund der Kombination von gegenwärtig hohem Auswaschungsrisiko und hoher Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel ergibt sich für die Hohenloher-Haller Ebene im Bauland/Hohenlohe und dem Allgäu im Hügel-/Moorland. Gegenwärtig hohes Auswaschungsrisiko aufgrund der hohen Nie-

derschläge verbunden mit geringer Vulnerabilität besteht für alle Naturräume des Schwarzwaldes und einige Naturräume der Alb/Baar. Gegenwärtig geringes Auswaschungsrisiko aufgrund einer Austauschhäufigkeit unter 100 % kombiniert mit einer hohen Vulnerabilität sind verstreut z.B. im Ober-/Hochrhein, auf der Ostalb in der Alb/Baar, auf den Fildern im Keuper-Lias-Land und im Tauberland des Bauland/Hohenlohe wahrscheinlich. In allen betroffenen Gebieten steht eine erhöhte Vulnerabilität in keinem offensichtlichen Zusammenhang mit der Landnutzung, lediglich ackerbaulich genutzte Flächen sind tendenziell etwas stärker betroffen. Vergleichbar ist die Situation bei den unterschiedlichen Bodentypen. Tendenziell sind aber verschiedene schluffig-lehmige Parabraunerde-Typen bei unterschiedlicher Landnutzung geringfügig stärker betroffen.

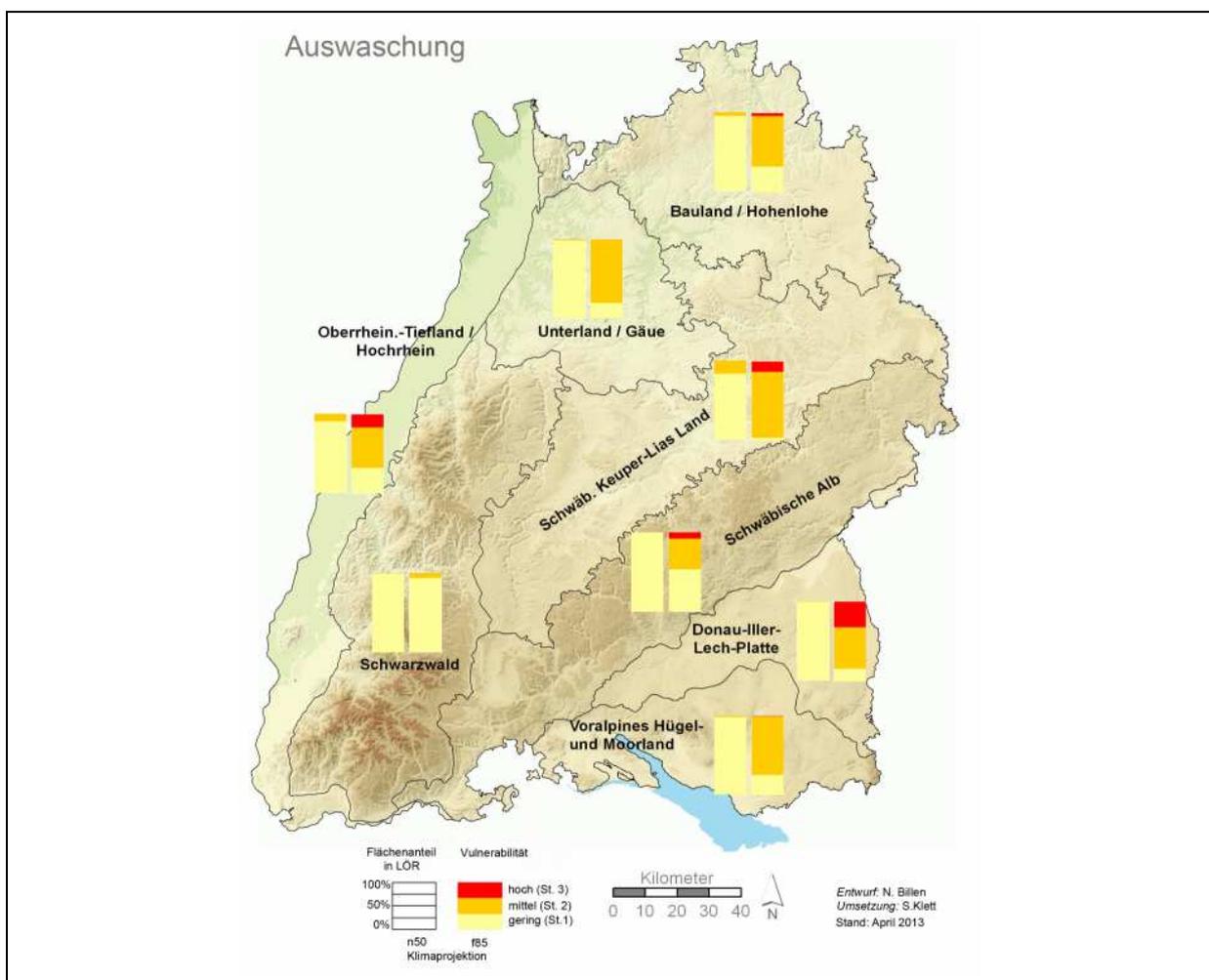


Abbildung 10: Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung bei aktueller Landnutzung gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs ,n85 ist mit Ausnahme von Schwäbische Alb/Baar vergleichbar (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

Tabelle 22: Naturräume in den Landschaftsökologischen Regionen mit erhöhtem Gegenwartsrisiko von Auswaschung ( $AH \geq 250 \%$ , n. UM-BW 2004, 2012: hier nur für Acker) und hoher Vulnerabilitätszunahme auf mehr als 15 % der Fläche

LÖR-Nr.	Landschaftsökologische Region	Naturräume mit regionalen Risikobereichen	Gegenwärtig erhöhtes Risiko <sup>1)</sup>	Vulnerabilitätszunahme <sup>1)</sup>
1	Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	alle	-	+
2	Unterland/Gäue	Kraichgau Neckarbecken Strom-/Heuchelberg	- - -	+ + -
3	Schwarzwald	alle	+	-
4	Voralpines Hügel- und Moorland	Allgäu sonstige	+ -	+ +
5	Donau-Iller-Lech	Donau-Ablach Riß-Aitrach Holzstöcke	- - -	+ + +
6	Schwäbische Alb / Baar	Schwabenalb Kuppenalb Lonetal Albuch/Härtsfeld	+ + - -	- - + +
7	Keuper-Lias-Land	Filder Albvorland schw.-fränk. Wald	- - -	+ + +
8	Bauland/Hohenlohe	Hohenloher-Haller Ebene Kocher-Jagst Ebene Odenwald	+ - +	+ + -

1) + = zutreffend, - = unzutreffend, / = kein hohes Gegenwartsrisiko bzw. keine hohe Vulnerabilität

Tabelle 23: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen der Landschaftsökologischen Regionen für den Teilbereich Auswaschungsrisiko in Abhängigkeit der Klimaprojektionsvarianten

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	n50	n85	f50	f85
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1	2'	1	2'
Unterland/Gäue	2	1	2'	1	2'
Schwarzwald	3	1	1	1	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1	2'	1	2'
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1	2'	2'	2'
Schwäbische Alb/Baar	6	1	1	1	2'
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	2'	1	2'
Bauland/Hohenlohe	8	1	2'	1	2'
Baden-Württemberg	1-8	1	2'	1	2'

Für das 85. Perzentil der Fernprojektion ergibt sich mit Ausnahme des Schwarzwaldes bei allen LÖR und somit auch für die Landesfläche eine mittlere Vulnerabilität des Auswaschungsrisikos, beim 15. und 50. Perzentil der Nah- und Fernprojektion eine geringe Vulnerabilität (siehe Tabelle 23, Details siehe Anhangstabelle 3).

Insgesamt ergab sich für den Teilbereich Auswaschungsrisiko die höchste Vulnerabilität beim 85. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Dabei wurde mit Ausnahme des gegenwärtig schon auswaschungsgefährdeten Schwarzwaldes für alle landschaftsökologischen Regionen im Durchschnitt eine mittlere Vulnerabilität ermittelt, die insbesondere im Keuper-Lias-Land, im Donau-Iller-Lech und im Oberrhein-/Hochrhein regional auch eine höhere Vulnerabilitätsstufe erreichen kann. Tendenziell weisen Böden unter Ackernutzung und unterschiedliche Parabraunerden unter verschiedenen Landnutzungstypen eine erhöhte Vulnerabilität auf, aber auch andere Boden-Landnutzungskombinationen können einem erhöhten Auswaschungsrisiko unterliegen.

### 3.3.3.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Auswaschung

Für den Teilbereich Auswaschungsrisiko ergibt sich die in Tabelle 24 dargestellte Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen in den landschaftsökologischen Regionen. Die Dringlichkeitsbewertung der Gesamtfläche Baden-Württembergs wird mit dem Mittelwert aus den acht Regionen beschrieben, so dass eine geringe Dringlichkeit besteht. Die Notwendigkeit einer über die LÖR-Differenzierung hinausgehenden lokalen Differenzierung wird aufgrund der starken Unterschiede in der räumlichen Verteilung beim Teilbereich Auswaschungsrisiko besonders deutlich (siehe Tabelle 22). Demnach zählen insbesondere Ober-/Hochrhein,

Tabelle 24: Regional differenzierte Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen beim Teilbereich Auswaschungsrisiko

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste aggregierte Vulnerabilität	Klimaprojektionsrahmen	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität	gemittelte Dringlichkeit
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1,84	f85	16,6	1
Unterland/Gäue	2	1,80	f85	0,0	1
Schwarzwald	3	1,06	f85	0,0	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1,74	n85	0,0	2
Donau-Iller-Lech-Platte	5	2,17	f85	31,9	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1,54	f85	7,6	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	2,09	f85	13,0	1
Bauland/Hohenlohe	8	1,72	f85	3,9	1
Baden-Württemberg	1-8	1,75	f85	8,0	1+

+ aufgrund regionaler und lokaler Risikobereiche mit hoher Vulnerabilität, die auf Regionsebene nicht darstellbar sind

Donau-Iller-Lech und Keuper-Lias-Land zu den landschaftsökologischen Regionen mit naturräumlich bedingter, d.h. lokal hoher Dringlichkeit, die allerdings mit geringen Flächenanteilen sehr verstreut vorliegt.

#### **3.3.3.4 Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zum Auswaschungsrisiko**

Das Prüfen der **Plausibilität** der Ergebnisse kann u.a. durch eine Vergleich mit LBEG (2009) stattfinden, das ebenso wie in diesem Gutachten eine halbquantitative Analyse auf Basis des NIBIS (Müller & Waldecke 2011) eine Projektion von 2070 bis 2100 durchführte. Demnach treten in Niedersachsen Gebiete mit erhöhtem und mit verringertem Auswaschungsrisiko auf, keine Veränderung wird jedoch auf ca. 75 % der Landesfläche erwartet. Somit ist das Ergebnis tendenziell mit der Bewertung des 50. Perzentils der Fernprojektion in dieser Studie vergleichbar. Auch andere Studien erkennen im Rahmen qualitativer Schlussfolgerungen eine Zunahme des Auswaschungsrisikos. Zurückgeführt wird dies auf erhöhte Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr oder eine höhere Niederschlagsintensität (LABO 2010, Schuchardt et al. 2011, Kropp et al. 2009). In wenigen Fällen wird darüber hinaus auch auf den Einfluss von Bodeneigenschaften hingewiesen wie z.B. auf das höhere Risiko bei sandigen Böden oder auf das geringere Risiko bei tonigeren Böden und Stauwasserböden (Schuchardt et al. 2011, Böhm 2008). Zumeist wird das Auswaschungsrisiko jedoch im Zusammenhang mit dem trinkwassergefährdenden Nitrat betrachtet (Schuchardt et al. 2011, LBEG 2009, Böhm 2008). Nur selten wird auch auf die Risiken für andere Prozesse hingewiesen wie z.B. Bodenversauerung durch verstärkte Auswaschung säurepuffernder Stoffe (Böhm 2008).

Bei den Wechselwirkungen mit weiteren Klimafaktoren steht in der Regel die Temperatur im Vordergrund. Hier wird zum einen die Gefahr zunehmender Stickstoffmineralisierung genannt, zum anderen die geringere Pflanzenaufnahme von Nitrat aufgrund zunehmender Trockenheit (MKULNV-NRW 2011, MUNLV-NRW 2009). Beides führt zu mehr Nitrat im Boden, das im Winterhalbjahr ausgewaschen wird. Bestätigen konnten solche Annahmen z.B. Rinker et al. (2008) mit exemplarischen Simulationsrechnungen in Schleswig-Holstein. Allerdings weisen sie auf die gegensätzliche Wirkung von höheren Niederschlägen und höheren Verdunstungsraten hin, die eine endgültige Prognose erschweren.

Komplexer stellt sich die prinzipielle Einordnung der zunehmenden Gefährdung dar. Denn je höher die Austauschhäufigkeit ist, desto höher ist einerseits die vollständige Auswaschungsgefahr, andererseits aber auch der mögliche Verdünnungseffekt für einen gelösten Stoff (Frede & Dabbert 1998), woraus auch eine geringere Grundwassergefährdung resultieren kann. Dadurch ergibt sich in der Zukunft möglicherweise sogar eine Entspannung für die Problem- und Sanierungs-Wasserschutzgebiete in den Regionen Bauland/Hohenlohe, Unterland/Gäue und Ober-Hochrhein. Auf der anderen Seite zieht eine Austauschhäufigkeit von

unter 100 % eine höhere Konzentration gelöster Stoffe nach sich, so dass eine Grundwassergefährdung zunimmt. Die Wechselwirkungen lassen sich kaum unabhängig voneinander betrachten. Zunehmende Unsicherheit erlangen die Ergebnisse, falls die direkten Wirkungen auf eine Nitratauswaschung aufgezeigt werden sollen. Denn die Mineralisierung, Düngung und Pflanzenaufnahme von Stickstoff wird von einer weiteren Vielzahl klimatischer und bodenkundlicher Faktoren gesteuert, so dass eine halbquantitative Vorhersage nicht möglich ist, sondern Simulationsrechnungen erfordert.

Für den **Geltungsbereich** der berechneten Vulnerabilität besteht eine Unsicherheit bei der Ergebnisqualität in der regelwerkabweichenden Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Penman statt nach FAO-Gras-Referenzverdunstung. Eine andere Unsicherheit verursacht einerseits das Fehlen der eigenständigen Analyse von sickerwasserreduzierenden Stauwasserböden in dem gewählten Verfahren. Andererseits werden Grundwasserböden gesondert bewertet, die bei der Bewertung des Klimawandels auf Teilbereiche des Bodens in anderen Studien unberücksichtigt bleiben. Die höhere Vulnerabilität, die für sandige Böden vorhergesagt wird, kann generell mit den Analysen in dieser Studie bestätigt werden, die geringere von tonigen Böden nur eingeschränkt (Schuchardt et al. 2011, Böhm 2008), zumal zunehmende und sickerwasserfördernde Trockenrissbildung aufgrund verlängerter Trockenperioden (LUBW 2011c) unberücksichtigt bleibt. Kritische Faktoren für den Geltungsbereich der Analyseergebnisse sind u.a. weiterhin:

- statisch-empirische Regressionsgleichung gilt nicht für alle Niederschlagssummen oder Hangneigungen
- Eine Differenzierung von Stoffmenge und Stoffkonzentration ist zwar erforderlich, kann aber nicht vorgenommen werden
- Sickerwasserabnahme aufgrund Zunahme von Erosion und Abfluss bleibt unberücksichtigt
- Prognosen zur klima- und bewirtschaftungsabhängigen Stickstoffmineralisierung bleiben unberücksichtigt.

### **3.3.3.5 Fazit zum Auswaschungsrisiko**

Aufgrund der projizierten Veränderung der Niederschläge und der klimatischen Wasserbilanzen wird im Rahmen des Klimawandels im Landesdurchschnitt mit einer mittleren Vulnerabilität beim Teilbereich Auswaschungsrisiko gerechnet. Dies gilt in besonderem Maße für das 85. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Für das 50. und 15. Perzentil der Nah- und Fernprojektionen ist im Landesdurchschnitt mit einigen Ausnahmen auf regionaler und lokaler Ebene keine erhöhte Vulnerabilität zu erwarten. Von der hohen Vulnerabilität besonders betroffen sind einige Naturräume der landschaftsökologischen Regionen Keuper-Lias-Land, Donau-Iller-Lech und Ober-/Hochrhein. Im Schwarzwald und einigen Naturräumen der

Alb/Baar liegt bereits gegenwärtig das höchste Auswaschungsrisiko vor, so dass hier aktuell bereits die ungünstigste Klassifizierung erreicht wird. Eine primäre Abhängigkeit der Vulnerabilität von Bodentypen und Landnutzung ist nicht erkennbar. Tendenziell sind jedoch Böden unter Acker und verschiedenen Parabraunerdetypen unter allen Landnutzungstypen häufiger betroffen als andere Boden-Landnutzungs-kombinationen. Vereinzelt kommen Risikobereiche mit hoher Vulnerabilität auf lokaler Ebene vor, regional und landesweit ergibt sich jedoch im Durchschnitt eine geringe Dringlichkeit für Anpassungsstrategien. Durch erhöhte Auswaschung kann sich zukünftig sogar eine Verdünnung der Stoffe ergeben, was zur Risikoabnahme in heutigen Problemgebieten z.B. in der Region Bauland/Hohenlohe führen könnte.

Die berechnete Zunahme des Auswaschungsrisikos bestätigt tendenziell die qualitativen Schlussfolgerungen in Berichten aus anderen Bundesländern, obwohl die Methoden Anpassungen und Annahmen nicht validiert sind. Weitere Unsicherheit ist u.a. zu begründen mit der bedingt zufrieden stellenden Streuung und Richtungssicherheit der Klimasignale aus den Klimaprojektionen zu den Niederschlägen und zur Wasserbilanz als Teilgröße der Evapotranspiration oder des eingeschränkten Gültigkeitsbereiches der verwendeten Regressionsformeln.

### **3.3.4 Organische Bodensubstanz (Humus-C)**

Organische Bodensubstanz oder auch Humus ist die Gesamtmenge der organischen Umwandlungsprodukte im Boden einschließlich der abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe (BGR 2005, verändert). Der Humus ist Lieferant und Speicher für viele Nähr- und Schadstoffe, verbessert die Bodenstruktur und damit auch die Wasser- und Luftversorgung sowie Fruchtbarkeit von Böden. Er wird durch Bodenorganismen fortlaufend auf-, um- und abgebaut. Der Gehalt an organischer Substanz von Böden nimmt neben einer Vielzahl von Faktoren, insbesondere der Bodennutzung, mit erhöhtem Niederschlag, kühlerer Temperatur und zunehmenden Tongehalt im Boden häufig zu. So sind aktuell in Baden-Württemberg die höchsten Humusgehalte in den Oberböden des Schwarzwaldes, der Alb/Baar (Schwäbisch Alb) und des Hügel-/Moorlandes zu finden, die geringsten im nördlichen Unterland/Gäue (Kraichgau), Bauland/Hohenlohe und südlichem Oberrhein-/Hochrhein [näheres siehe im WaBoA (UM-BW 2004, 2012)].

#### **3.3.4.1 Methodik und Daten für Vulnerabilitätsanalyse der org. Bodensubstanz**

Zur Analyse der Wirkungen des Klimawandels auf die organische Bodensubstanz (Humus-C) sind mehrere Verfahren verfügbar, die zu halbquantitativen oder quantitativen Ergebnissen führen (siehe Tabelle 35). Einige davon basieren auf empirischen, multiplen oder einfa-

chen Regressionsgleichungen (Thimm 1979, Kolbe 2009, Capriel 2010). Diese wurden jedoch teilweise nur für Ackerstandorte ermittelt oder erfordern Eingangsdaten, die im Rahmen dieser Studie nicht zur Verfügung stehen. Die LUBW (2006) zeigt zwar darüber hinaus auch Abhängigkeiten von Grünland und Wald auf, stützt sich jedoch allein auf die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur. Aufgrund der unbefriedigenden und ungleichen Verfügbarkeit von zielgerichteten Regressionsgleichungen wurde entsprechend dem Ansatz von Capriel (2010) eine Auswertung der Boden-/Standort-Datenbank des Instituts für Bodenkunde und Standortlehre durchgeführt (IBS 2012). Mit den 452 verfügbaren Bodendatensätzen wurde mittels mehrerer Testrechnungen jeweils für Acker, Grünland und Wald eine lineare, multiple Abhängigkeit der Humus-C - Gehalte in Oberböden von den Parametern Jahresdurchschnittstemperatur, mittlerer Jahresniederschlagsmenge (Messwerte nach DWD) und Tongehalt nach folgendem Gleichungsprinzip ermittelt:

$$\text{Humus-C [\%]} = a \cdot \text{Jahresniederschlag} + b \cdot \text{Jahresdurchschnittstemp.} + c \cdot \text{Tongehalt} + d$$

Die ermittelten Koeffizienten a, b und c für die Abhängigkeitsparameter, die Gleichungskonstante d und statistische Kennwerte der ermittelten Regressionsgleichungen sind in Tabelle 25 dargestellt. Die niedrige Gewichtung des Niederschlags beim Grünland ist möglicherweise auf die schwerpunktmäßige Verbreitung des Grünlands in einem engeren Niederschlagspektrum zurückzuführen. Weitere Testrechnungen mit C-Mengen statt C-Gehalten oder mit der Einbeziehung organischer Auflagehorizonte ergaben insgesamt zwar ebenfalls höchste Signifikanzen als Kennwert für die Unwahrscheinlichkeit eines zufälligen Zusammenhangs ( $p < 0,001$ ), aber schlechtere Bestimmtheitsmaße als Kennwert für den Zusammenhang zwischen den Variablen ( $r^2 < 0,58$  für Acker,  $r^2 < 0,24$  für Grünland und Wald).

Tabelle 25: Kennwerte der verwendeten Regressionsgleichungen zur Prognose der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte in mineralischen Oberböden aus der Profildatenbank des IBS (2012)

Landnutz.-Typ	a (f. Nieders.)	b (f. Temp.)	c (f. Ton)	d (Konstante)	Anz.	$r^2$	p
Acker <sup>1)</sup>	0,00160855	-0,12616261	0,03093756	0,68897895	125	0,5828	<0,001
Grünland <sup>2)</sup>	0,00008624	-0,33809290	0,03883739	5,11821237	88	0,2364	<0,001
Wald <sup>3)</sup>	0,00131201	-0,49601524	0,04289773	6,28785390	239	0,2878	<0,001

1) errechnet für Standorte mit Humus-C < 4 %

2) errechnet für Standorte mit Humus-C von 0,5 - 8,2 % und Jahresniederschlag < 1300 mm

3) errechnet für Standorte mit Humus-C < 10 % und ohne Streuauflagen

Die erforderlichen Eingangsdaten für die Vulnerabilitätsanalyse auf Grundlage der ermittelten Regressionsgleichungen sind (Übersicht zu Datenquellen siehe Tabelle 26):

- Jahresdurchschnittstemperatur [°C]
- mittlerer Jahresniederschlag [mm]
- Tongehalt (%)

Tabelle 26: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Sensitivitäts- / Vulnerabilitätsanalyse der organischen Bodensubstanz

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
Capriel (2010)	Klimaprojektionen (LUBW 2012a)	WaBoA (UM-BW 2004, 2012) IBS-Datenbank (IBS 2012)	Neuberechnung von Regressionen	Jahres-Temperatur und –Niederschlag (DWD 2012) Tongehalt aus IBS-Datenbank (IBS 2012)

Die Humus-C – Gehalte im Boden für die gegenwärtige Klimasituation wurden durch Einsetzen der Kennwerte aus der klimatischen Istprojektion (50. Perzentil) in die Regressionsgleichungen berechnet. Dies geschah für alle Standorteinheiten, die aus den Boden- und Landnutzungsinformationen des WaBoA (UM-BW 2004, 2012) erzeugt wurden. Entsprechend wurden auch die Humus-C - Gehalte für die klimatischen Zukunftsprojektionen berechnet. Somit liegen Humus-C - Gehalte vor, die sich langfristig unter den projizierten Klimakennwerten einstellen werden. Die Veränderungen der Humus-C - Gehalte ergibt sich aus der Differenz von den Berechnungen der Istprojektion und den Zukunftsprojektionen. Weil für die Bewertung der zukünftigen Humus-C - Gehalte oder der erwarteten Humus-C - Veränderungen keine standortgerechten und allgemeingültigen Klassifizierungsverfahren in der erforderlichen Genauigkeit vorliegen, wird die Bewertung anhand der jährlichen Veränderung von Humus-C - Mengen vorgenommen. Dies entspricht der gängigen Humusbilanzierungspraxis nach VDLUFA (2004, siehe Tabelle 27). Die Kennwerte zur Umrechnung der C-Gehalte in C-Mengen wurden der Bodendatenbank des IBS entnommen (s. Tabelle 27). Für die Berechnung der jährlichen Humus-C – Veränderung wurde berücksichtigt, dass bei veränderten Rahmenbedingungen einerseits das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes der Humusvorräte bis zu 100 Jahre dauern kann, andererseits zu Beginn des Zeitraumes die größten Veränderungen stattfinden. Für die Projektion der nahen Zukunft (2021-2050) wurde deshalb ein mittlerer Anpassungszeitraum von 50 Jahren gewählt, für die zukunftsferne Projektion (2071-2100) wurde hingegen ein Anpassungszeitraum von 80 Jahren angenommen, weil das Projektionsende näherungsweise auch entsprechend weit in der Zukunft liegt:

$$\text{jährl. Humus-C-Bilanz} = (\text{Ist-Humus-C-Vorrat} - \text{Zukunft-Humus-C-Vorrat}) / 50 \text{ bzw. } 80$$

Tabelle 27: Kennwerte zur Berechnung der veränderten Humus-C - Mengen im Boden aus der Profildatenbank des IBS

Landnutzung	Anzahl	Mittlere Tiefe des Oberbodens [cm]	Mittlere Lagerungsdichte des Oberbodens [kg/dm <sup>3</sup> ]	Mittlerer Steingehalt im Oberboden [Volumen-%]
Acker	118	25,3	1,36	4
Dauerkultur <sup>1)</sup>	-	21,0	1,22	7
Grünland	82	16,6	1,07	7
Wald	218	9,7	1,06	8

1) Mittelwert aus Acker und Grünland, da keine Daten verfügbar

Tabelle 28: Klassifizierung der Vulnerabilität mittels Humusbilanzierung in Anlehnung an VDLUFA (2004)

Vulnerabilität	Vulnerabilitätsstufe	VDLUFA-Klasse des Humus-C - Saldos	Bewertung (n. VDLUFA 2004)	Humus-C – Saldo in kg/ha*a
gering	1	C	optimal für Ertragssicherheit bei geringem Verlustrisiko	> -75
mittel	2	B	mittelfristig (nur) tolerierbar auf humusreichen Böden	-200 bis -75
hoch	3	A	Bodenfunktionen u. Ertragsleistung ungünstig beeinflusst	< -200

### 3.3.4.2 Ergebnisse zur Vulnerabilitätsanalyse der organischen Bodensubstanz

Die höchste Vulnerabilität beim Teilbereich Humus-C wurde für das Hügel-/Moorland berechnet, die sich jedoch nicht wesentlich von den anderen landschaftsökologischen Regionen unterscheidet. In Abbildung 11 ist deshalb für das Hügel-/Moorland das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse für alle Klimaprojektionen dargestellt. Die mittlere bis hohe Vulnerabilität aller Landschaften wird deutlich in Abbildung 12. Dort wird die Variante mit den größten Veränderungen (50. Perzentil der Fernprojektion) verglichen mit der mittleren Wahrscheinlichkeitsvariante der Klimaprojektion beim 50. Perzentil für die nahe Zukunft. Das 15. und 85. Perzentil der Nahprojektion führt im Durchschnitt zu vergleichbarer oder geringfügig niedrigerer Vulnerabilität in allen Landschaften. Beim 15. Perzentil der Fernprojektion sind nahezu alle Böden von einer mittleren Vulnerabilität betroffen, 85. Perzentil der Fernprojektion sind hingegen 20 bis 50 % der Böden von keiner und 15 bis 45 % von einer hohen Vulnerabilität betroffen.

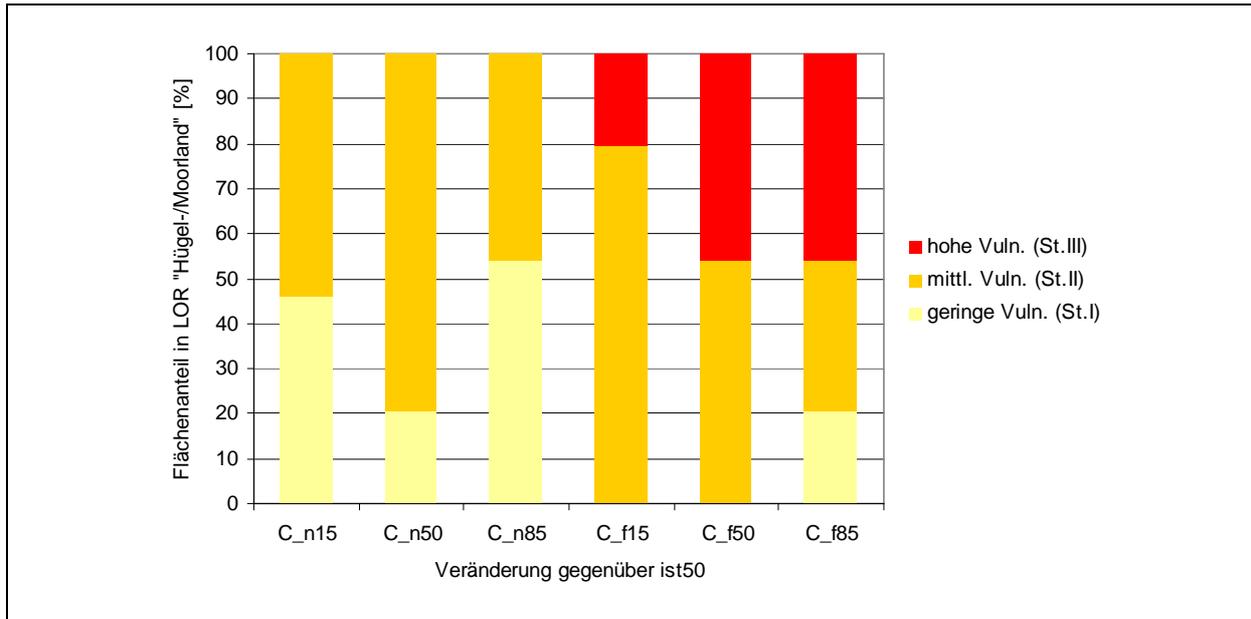


Abbildung 11: Variabilität der Flächenanteile mit unterschiedlicher Vulnerabilität der Humus-C - Gehalte in Böden gegenüber dem Klimawandel in Abhängigkeit der Klimaprojektionen am Beispiel der erhöht vulnerablen Region „Hügel-/Moorland“

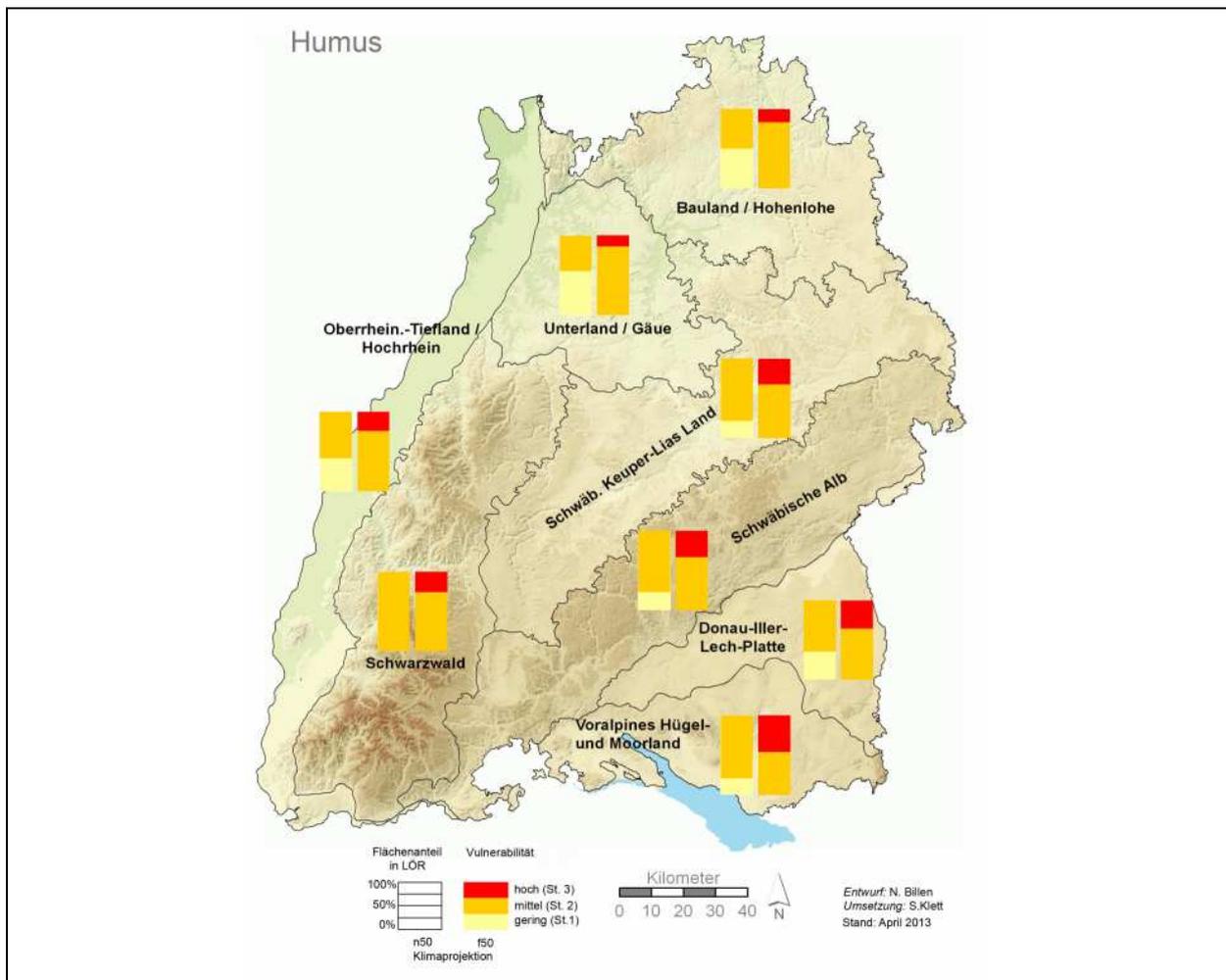


Abbildung 12: Vulnerabilität des Teilbereiches „organische Bodensubstanz“ bei aktueller Landnutzung gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

Damit wird deutlich, dass die Vulnerabilität der Boden-Humusvorräte gegenüber dem Klimawandel keinem geradlinigen Muster folgt. Dies ist zum einen neben den Tongehalten vorrangig auf die multiple Abhängigkeit der Humusvorräte von Temperatur und Niederschlag zurückzuführen, zum anderen auf die Landnutzungstypen Acker, Grünland und Wald, die mit unterschiedlicher Sensitivität reagieren und unterschiedliche Flächenanteile in den LÖR belegen. Beispiele hierfür stellen sich folgendermaßen dar (siehe auch Tabelle 29):

- falls Jahresniederschlag relativ gleich sinkt wie Jahrestemperatur steigt wie z.B. bei n15, ist mit höheren Humusverlusten unter Acker sowie geringeren unter Grünland und zumeist auch Wald zu rechnen
- falls Jahrestemperatur relativ stärker steigt als der Jahresniederschlag, wie z.B. bei f85, ist mit höheren Humusverlusten unter Grünland und Wald sowie geringeren oder keinen unter Acker. (z.T. auch Zunahme) zu rechnen
- falls Jahresniederschlag relativ stärker steigt als Jahrestemperatur wie z.B. bei n85, ist mit höheren Humusverlusten unter Grünland, mit weniger starken unter Wald sowie geringeren oder keinen unter Acker (z.T. auch Zunahme) zu rechnen.

Die relativ geringe Vulnerabilität unter Acker ist möglicherweise begründet in den bereits gegenwärtig schon höheren Kohlenstoffumsätzen aufgrund der Bewirtschaftung, so dass die klimatischen Einflüsse eher sekundär sind.

Tabelle 29: Beispiel zur Abhängigkeit der Humus-C - Veränderungen vom Ausmaß und Verhältnis der Klimakennwert-Veränderungen für das Hügel-/Moorland auf Basis der in Tabelle 25 dargestellten Funktionen bei einem Bodentongehalt von 25 %

Klima-Projektion	mittl. Jahresniederschlagssumme [mm]	mittl. Jahresdurchschnittstemperatur [°C]	Humus-C		
			Acker	Grünland	Wald
Ist-Zustand					
i50	1094	8,1	2,1	3,4	4,7
relative Veränderung [%]					
n15	-10,3	8,6	-9,5	-5,9	-8,5
n50	4,8	16,0	0,0	-11,8	-10,6
n85	45,1	23,5	33,3	-17,6	-4,3
f15	-12,2	27,2	-19,0	-20,6	-25,5
f50	12,3	42,0	-4,8	-32,4	-29,8
f85	44,5	50,6	23,8	-29,4	-17,0

Aufgrund der potenziellen Reaktionsvielfalt werden basierend auf dem räumlichen Verteilungsmuster von Böden und Landnutzung (Standortkomplexe) in der Tabelle 30 die Naturräume mit größeren Flächenanteilen an hoher Vulnerabilität beim ungünstigsten Szenario (50. Perzentil der Fernprojektion) den gegenwärtigen Humusgehalten gegenübergestellt. Dabei liegt in keinem Naturraum mit gegenwärtig niedrigen Humus-C - Gehalten großflächig

eine hohe Vulnerabilität vor. Hohe Vulnerabilität auf mehr als 50 % der Fläche liegen im Allgäu des Hügel-/Moorlandes, im Riß-Aitrach-Gebiet der Donau-Iller-Lech Region oder in der Offenburger Rheinebene und den Vorbergen des Ober-/Hochrheins vor. Es handelt sich zu meist um Böden unter Grünland, wobei keine Abhängigkeit von bestimmten Bodentypen erkennbar ist. Dadurch erklärt sich auch z.B. die hohe Vulnerabilität des Hügel-/Moorlandes, das einen hohen Grünlandanteil, eine mäßige Niederschlagszunahme und eine relativ hohe Temperaturzunahme aufweist.

Tabelle 30: Naturräume in den Landschaftsökologischen Regionen mit gegenwärtig niedrigen Humus-C - Gehalten (<1,2 % C, n. UM-BW 2004, 2012) und hoher Vulnerabilitätszunahme auf mehr als 33 % der Fläche

LÖR-Nr.	Landschaftsökologische Region	Naturräume mit regionalen Risikobereichen	Gegenwärtig niedrigere Gehalte <sup>1)</sup>	Vulnerabilitätszunahme <sup>1)</sup>
1	Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	Hardtebene	+	-
		Markgräfler Land	+	-
		Kaiserstuhl	+	-
		Offenburger Rheinebene	-	+
		Vorberge	-	+
2	Unterland/Gäue	Kraichgau	+	-
3	Schwarzwald	/	/	/
4	Voralpines Hügel- und Moorland	Allgäu	-	+
5	Donau-Iller-Lech	Riß-Aitrach	-	+
6	Schwäbische Alb / Baar	mittl. Kuppenalb	-	+
7	Keuper-Lias-Land	östl. Albvorland	-	+
8	Bauland/Hohenlohe	/	/	/

1) + = zutreffend, - = unzutreffend, / = kein hohes Gegenwartsrisiko bzw. keine hohe Vulnerabilität

Die aggregiert-gewichtete Zusammenfassung der Vulnerabilitätsklassen in den einzelnen LÖR ergibt für das 50. Perzentil der Fernprojektion eine hohe Vulnerabilität im Schwarzwald, Hügel-/Moorland, Donau-Iller-Lech Gebiet, Schwäbische Alb/Baar und Keuper-Lias-Land (siehe Tabelle 31, Details siehe Anhangstabelle 6 und Anhangstabelle 7). Dieses Ergebnis ist auch auf die Landesfläche Baden-Württembergs übertragbar. Bei allen anderen Klimaprojektionen ergab sich landesweit eine mittlere Vulnerabilität, die lokal und regional jedoch auch höher ausfallen kann.

Insgesamt ergab sich für den Teilbereich organische Bodensubstanz die höchste Vulnerabilität beim 50. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Am stärksten davon betroffen sind fünf landschaftsökologische Regionen mit weniger Ackerbau, die anderen drei Regionen sind ackerbaulich stärker geprägt und weisen im Durchschnitt eine mittlere Vulnerabilität auf. Eine Abhängigkeit der Vulnerabilität von bestimmten Bodentypen konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 31: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen der Landschaftsökologischen Regionen für den Teilbereich „organische Bodensubstanz“ in Abhängigkeit der Klimaprojektionsvarianten

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	n15	n50	n85	f15	f50	f85
Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	1	3	2'	2'	2'	2'	2'
Unterland/Gäue	2	2'	1	1	2'	2'	2'
Schwarzwald	3	2'	2'	2'	2'	3'	2'
Voralpines Hügel- und Moorland	4	2'	2'	1	2'	3'	3'
Donau-Iller-Lech-Platte	5	2'	2'	2'	2'	3'	3
Schwäbische Alb/Baar	6	2'	2'	3	2'	3'	3
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	2'	2'	2'	3'	2'
Bauland/Hohenlohe	8	2'	2'	2'	2'	2'	2'
Baden-Württemberg	1-8	2'	2'	2'	2'	3'	2'

### 3.3.4.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich org. Substanz

Aufgrund der hohen aggregiert-gewichteten Vulnerabilität besteht in fünf der acht Landschaften eine hohe Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen. Mittlere Dringlichkeit weisen die Landschaften mit höherem Anteil an Ackerflächen auf (Oberrhein / Hochrhein, Unterland / Gäue, Bauland / Hohenlohe, siehe Tabelle 32). Somit ergibt sich für die Landesfläche eine hohe Dringlichkeit, die regional aber in Abhängigkeit der Nutzung stark zu differenzieren ist, denn Grünland und teilweise auch Wald ist stärker betroffen als Ackerbau.

Tabelle 32: Regional differenzierte Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen beim Teilbereich „organische Bodensubstanz“

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste aggregierte Vulnerabilität	Klimaprojektionsrahmen	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität	gemittelte Dringlichkeit
Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	1	2,24	f50	23,8	2
Unterland/Gäue	2	2,14	f50	13,7	2
Schwarzwald	3	2,26	f50	25,5	3
Voralpines Hügel- und Moorland	4	2,46	f50	46,0	3
Donau-Iller-Lech-Platte	5	2,35	f50	35,4	3
Schwäbische Alb/Baar	6	2,33	f50	33,2	3
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	2,33	f50	32,6	3
Bauland/Hohenlohe	8	2,17	f50	16,6	2
Baden-Württemberg	1-8	2,28	f50	28,0	3

### 3.3.4.4 *Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zur organischen Bodensubstanz*

Das prüfen der **Plausibilität** der Ergebnisse ist nicht problemlos möglich, weil einerseits zwar in Deutschland zumeist von einer Abnahme der Humusgehalte im Boden allein aufgrund des projizierten Klimawandels ausgegangen wird (LBEG 2009, Böhm 2008, LABO 2010, Kropp et al. 2009). Andererseits weisen die Autoren aber gleichzeitig darauf hin, dass keine eindeutige Prognose der Entwicklungsrichtung möglich ist aufgrund der überlagernden Einflüsse von Temperaturanstieg, erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, erhöhter Pflanzenproduktion sowie veränderten Niederschlags- und Grundwasserverhältnissen. So werden besonders die Böden in Regionen mit zunehmenden Durchschnittstemperaturen und weiterhin ausreichender Wasserversorgung betroffen sein, worauf Kropp et al. (2009) aufgrund von Literaturrecherchen hinweisen. Sinkende Niederschläge und eine damit abnehmende klimatische Wasserbilanz könnten diese Wirkungsbeziehung abschwächen. Genau dies spiegelt sich auch in der geringeren Vulnerabilität der LÖR Ober-/Hochrhein und Unterland/Gäue mit geringerer Zunahme der Niederschläge wider gegenüber der höheren Vulnerabilität in Landschaften wie Schwarzwald oder Hügel-/Moorland mit höherer Wasserverfügbarkeit und gleichzeitig höheren Temperaturen.

Der **Geltungsbereich** für die berechneten Veränderungen der organischen Bodensubstanz (Humus) unterliegt Unsicherheiten, weil zum einen die Aussagen auf Regressionsgleichungen mit bedingt zufrieden stellenden Bestimmtheitsmaßen und Niederschlagskennwerten basiert. Zum anderen unterliegen Humusbilanzen den im folgenden genannten Faktoren, die im Rahmen des pragmatischen Analyseansatzes nicht berücksichtigt werden können, sondern nur bei Simulationen mit Rechenmodellen:

- Die empirischen Regressionsgleichungen sind hoch signifikant, weisen aber nur mäßig starke bis schwache Bestimmtheitsmaße auf
- Hohe und niedrige Humusgehalte befinden sich außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Regressionsgleichungen
- Die Verfügbarkeit der Daten zum Grünland lag schwerpunktmäßige in einem relativ engen Niederschlagsspektrum. Dies führte möglicherweise zu einer geringeren Gewichtung des Niederschlagseinflusses in der ermittelten Berechnungsfunktion gegenüber Acker und Wald
- Modifizierende Faktoren durch die Landwirtschaft wie Bodenbewirtschaftungsverfahren, Fruchtfolgen, Düngermenge, Düngerart (organisch, mineralisch) bleiben unberücksichtigt
- Der beim Grünland wichtige und die Humusgehalte beeinflussende Bodenwasserhaushalt bleibt unberücksichtigt

- Modifizierende Faktoren bei Forstwirtschaft wie Baumarten, Bodenversauerung, Bodenwasserhaushalt bleiben unberücksichtigt.

#### **3.3.4.5 Fazit zur organischen Bodensubstanz**

Aufgrund der projizierten Veränderung der Niederschläge und der Temperaturen wird im Rahmen des Klimawandels im Landesdurchschnitt mit einer hohen Vulnerabilität beim Teilbereich organische Bodensubstanz gerechnet. Dies gilt insbesondere für das 50. Perzentil der Fernprojektion des Klimas. Für die anderen Nah- und Fernprojektionen ist im Landesdurchschnitt eine mittlere Vulnerabilität zu erwarten. Allerdings ergibt sich auf regionaler und lokaler Ebene ein stark variierendes Bild der Vulnerabilität. Denn steigende Temperaturen führen zwar zu Humusverlusten, was anderenorts durch steigende Niederschläge jedoch wieder kompensiert werden oder sogar zur Humusmehrung führen kann. Außerdem weisen die Böden unter Ackernutzung eine geringere Sensitivität auf, so dass in den drei ackerbaulich geprägten Regionen Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue sowie Bauland/Hohenlohe eine mittlere Vulnerabilität und in den fünf anderen Regionen eine hohe Vulnerabilität besteht wie z.B. im Grünland dominierten Hügel-/Moorland. Eine entscheidende Abhängigkeit der Vulnerabilität von Bodentypen ist nicht erkennbar. Aufgrund der hohen Vulnerabilität beim 50. Perzentil der Fernprojektion in fünf Regionen ergibt sich dort und auch im Landesdurchschnitt eine hohe Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen.

Die verschiedenen Richtungsänderungen, die in diesem Bericht festgestellt wurden, bestätigen tendenziell die qualitativen Schlussfolgerungen in Berichten aus anderen Bundesländern, obwohl die Berechnungsfunktionen und Annahmen nicht validiert wurden. Weitere Unsicherheit ist u.a. zu begründen mit der bedingt zufrieden stellenden Streuung und Richtungssicherheit des Klimasignals aus den Klimaprojektionen zu den Niederschlägen oder dem unbefriedigenden Bestimmtheitsmaß der verwendeten Regressionsformeln insbesondere für Grünland und Wald.

#### **3.3.5 Moorböden**

Moorböden sind Böden aus mindestens 30 cm mächtigen Horizonten mit über 30 % organischer Bodensubstanz (Torf), die aus Resten moortypischer und torfbildender Pflanzen unter Wasserüberschuss gebildet werden (BGR 2005, verändert). Handelt es sich dabei zunächst um verlandende Seen und später um nährstoffhaltiges Grundwasser, entstehen Niedermoo-re. Geht durch fortlaufendes Wachstum und Absterben der Pflanzen der Grundwasseranschluss verloren, kann bei ausreichend positiver Wasserbilanz ein Hochmoor entstehen, das allein durch nährstoffarmes Regenwasser versorgt wird. Die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung von Moorböden ist erst nach einer Entwässerung möglich, die das Wasserrückhal-

tepotenzial des Torfkörpers verringert. Außerdem kommt es dabei durch Mineralisierung der organischen Bodensubstanz zum Struktur- und Substanzverlust der Moorböden sowie Freisetzung großer Mengen klimarelevanten Kohlendioxids und anderer Gase. In Baden-Württemberg sind die Moorböden am stärksten verbreitet im Hügel-/ Moorland und im Donau-Iller-Lech-Gebiet. Aber auch im Ober-/Hochrhein, im Schwarzwald und im Südwesten der Alb/Baar (Baar-Hegau) sind Moorböden anzutreffen.

### 3.3.5.1 Methodik und Daten für Vulnerabilitätsanalyse der Moorböden

Zur Bewertung der Vulnerabilität bzw. Reaktion von Moorböden auf den Klimawandel kann lediglich eine qualitative Einschätzung vorgenommen werden, die auf empirischen Schlussfolgerungen beruht, denn für eine halbquantitative Analyse sind keine pragmatischen Bewertungsansätze verfügbar (Übersicht siehe Tabelle 33).

Tabelle 33: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Sensitivitäts- / Vulnerabilitätsschätzung von Moorböden

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
fehlend	-	-	<u>Hochmoorböden</u> Klimatische Wasserbilanz von Mai–Okt >200 mm Flächenbilanz <u>Niedermoorböden</u> Torfverlust von 0,5 cm/a Klimawandel-Korrekturfaktor Bohrlochanalyse	Klimaprojektionen (LUBW 2012a) Moorkataster BW (LUBW 2012c) Literaturrecherche (s. Kapitel 3.3.5.4) exemplarische Simulationsrechnung mit DNDC Moorkataster BW (LUBW 2012c)

Bei den grundwasserabhängigen **Niedermoorböden** stützt sich die Schätzung auf wenige Untersuchungen zum Torfverlust (Torfsackung und –abbau) von Moorböden in den letzten Jahrzehnten bei denen jedoch die Variation des Torfverlustes sehr groß ist. Um trotzdem Hinweise auf mögliche Veränderungen in der Zukunft bei unveränderter Moornutzung zu erhalten, basieren die folgenden Schätzungen auf einem retrospektiven Torfverlust von durchschnittlich 0,5 cm/Jahr (zur Plausibilität siehe Kapitel 3.3.5.4). Bei der Schätzung wird also der Fortbestand der gegenwärtigen Landnutzung in der Zukunft angenommen. Darüber hinaus wurde eine exemplarische Simulation mit dem Rechenmodell DNDC (IEOS 2009) für das Maß der klimabedingten Veränderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen als Parameter für den Torfverlust bei unveränderter Moorbewirtschaftung durchgeführt (siehe Tabelle 34). Dabei ergab sich gegenüber der Gegenwart (i50) bei der klimatischen Fernprojektion (f15, f50, f85) eine

gemäßigte Zunahme aufgrund der erhöhten Temperaturen in Kombination mit einer verbesserten Bodendurchfeuchtung nach erhöhten Niederschlägen. Diese exemplarische Rechnung für die Region Donau-Iller-Lech basiert auf einem repräsentativen Niedermoorboden der Region (nach IBS 2012), der dominanten Bewirtschaftung von Moorböden als intensives Grünland (nach Angenendt et.al. 2013) und den Daten einer benachbarten Klimastation des DWD, die mit den Ergebnisse der Klimaprojektionen zu Jahrestemperatur und Jahresniederschlag nach LUBW (2012a) angepasst wurden.

Tabelle 34: Klimawandel-Korrekturfaktor für Niedermoorböden in Abhängigkeit der Veränderung der Kohlenstoffbilanz, d.h. Torfverluste aufgrund des Klimawandels gegenüber der Gegenwart (i50 = 100 %) bei unverändert intensiver Grünlandbewirtschaftung eines Niedermoorbodens. Angaben basieren auf einer exemplarischen Rechensimulation mit DNDC

Vergleichsgröße	f15	f50	f85
Veränderung gegenüber i50 in %	+6,8	+9,7	+12,0
Klimawandel-Korrekturfaktor	1,068	1,094	1,120

Für die Vulnerabilitätsschätzung erfolgt die Berechnung des verbleibenden Torfkörpers nach den Mineralisierungsverlusten auf Basis der Bohrlochbeschriebe des Moorkatasters BW (LUBW 2012c, Göttlich 1967-1979). Zur Bestimmung der Torfmächtigkeit wurde die Untergrenze des untersten Bodenhorizonts mit Torfbestandteilen von jedem Bohrloch ermittelt (17589 Bohrpunkte). Darauf basierend wurde ein möglicher Torfschwund bis zum Jahr 2050 (nahe Zukunft) und 2100 (ferne Zukunft) ermittelt:

- 0,5 cm/a Torfverlust x 40 Jahre bis 2050 = 20 cm;
- 0,5 cm/a Torfverlust x 90 Jahre bis 2100 = 45 cm.

Zusätzlich werden diese Torfverluste bei gleich bleibender Moorbewirtschaftung mit dem Klimawandel-Korrekturfaktor (siehe Tabelle 34) modifiziert und anschließend einer Gefährdungskategorie zugeordnet (siehe Tabelle 35). Der Grundwasserstand muss aufgrund fehlender Informationen unberücksichtigt bleiben, obwohl die Niedermoorböden im Allgemeinen stark gefährdet sind bei mittleren Jahresgrundwasserständen mit mehr als 50 bis 100 cm Tiefe sowie mit zunehmenden Grundwasserschwankungen. Dem derzeitigen Kenntnisstand zufolge wird zwar nicht mit stärkerer Veränderung des mittleren Grundwasserstandes gerechnet, allerdings mit zunehmenden Schwankungen, die voraussichtlich zu verstärktem Moorbodenverlust infolge von Torfmineralisierung führen.

Die grundwasserfernen und deshalb allein vom Regenwasser abhängigen **Hochmoorböden** brauchen für Entwicklung und Erhalt ganzjährig eine hinreichend positive klimatische Wasserbilanz. Dies ist in BW im Winterhalbjahr gewährleistet, in der Vegetationsperiode ist die Wasserbilanz hingegen häufig nur schwach positiv oder negativ. Beim derzeitigen Klima sind

Hochmoore nur bei einer klimatischen Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode (KWBv: Mai bis Oktober) bei  $>200 \text{ l/m}^2$  anzutreffen, so dass dies auch als orientierender Schwellenwert für die Gefährdung bzw. für Bestand und Wachstum von Hochmoorböden herangezogen wird (siehe Tabelle 35). Zwischen 0 und  $200 \text{ l/m}^2$  ist die KWBv zwar auch noch positiv, allerdings sind primär die torfbildenden Pflanzen und sekundär die daraus entstehenden Hochmoorböden hierbei aufgrund der projizierten Zunahme von Trockenperioden (LUBW 2012) bereits gefährdet. Eine sehr hohe Gefährdung liegt mit Sicherheit bei einer KWBv von  $<0 \text{ l/m}^2$  vor. Dieser Wert wird im Mittel jeder LÖR mit Hochmooren zukünftig jedoch nicht unterschritten (siehe Abbildung 13).

Tabelle 35: Gefährdungsklassifikation der Moorböden aufgrund von klimawandelbeeinflusster Wasserbilanz sowie Torfverlust, der großenteils bewirtschaftungsbedingt und nur geringfügig klimawandelbeeinflusst ist

Bodentyp	Gefährdung	Kennwert	orientierender Schwellenwert	Einstufung der Gefährdung
Niedermoorboden	GW-Schwankung ↑ Nutzung	Torfmächtigkeit nach Torfverlust (0,5 cm/a)	vollständiger Torfverlust	extrem hoch
			$<30 \text{ cm}$ Torfmächtigkeit	sehr hoch
			$\geq 30 \text{ cm}$ Torfmächtigkeit	hoch
		kein Torfverlust	-	gering <sup>1)</sup>
Hochmoorboden	Temperatur ↑ Trockenperioden ↑ Niederschlag ↓ <sup>3)</sup>	klimat. Wasserbilanz Mai-Okt	$< 0$	extrem hoch
			0 - 200 mm	hoch
			$>200 \text{ mm}$	mittel-gering <sup>2)</sup>

1) solange Moorbodenverlust durch Torfmineralisierung vorliegt, kann die geringe Gefährdung nicht erreicht werden

2) solange eine Entwässerung nicht gestoppt ist, kann keine geringe Gefährdung erreicht werden

3) nur beim 15. Perzentil der Klimaprojektionen

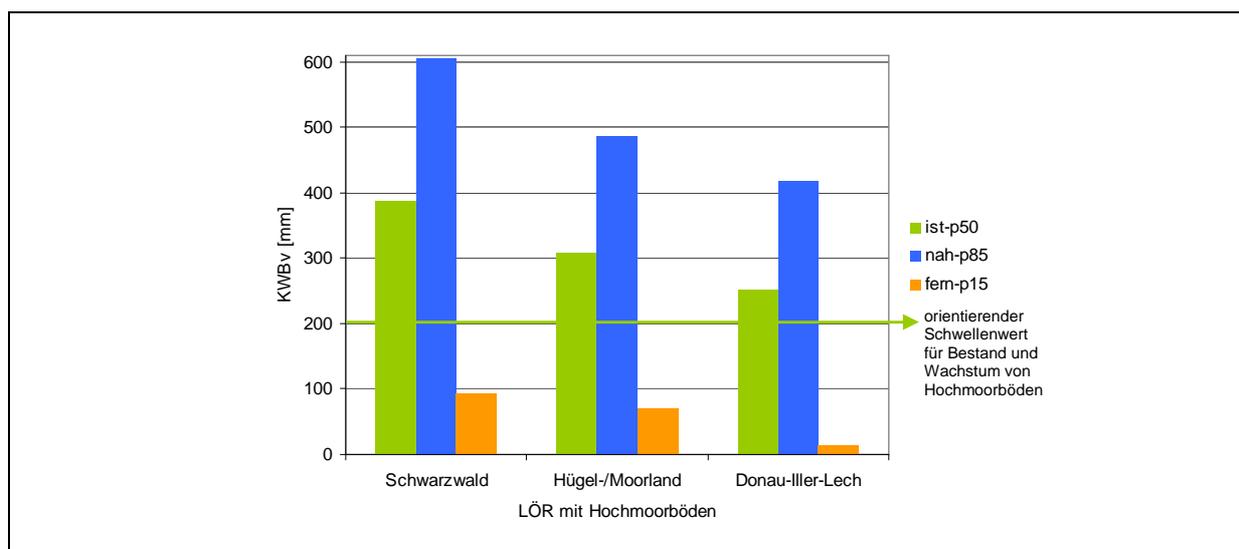


Abbildung 13: Klimatische Wasserbilanz in Hauptvegetationsperiode (KWBv) in den LÖR mit Hochmoorböden für die Gegenwart (ist-p50), die Klimaprojektion mit höchster KWBv (85. Perzentil bei Nah) und mit niedrigster KWBv (15. Perzentil bei Fern)

Der potenzielle Torfverlust durch die intensive Moorbewirtschaftung wird bei der Vulnerabilitätsschätzung nicht berücksichtigt, weil die meisten Hochmoorböden Baden-Württembergs in Schutzgebieten liegen und deshalb höchstens extensiv bewirtschaftet werden.

### 3.3.5.2 Ergebnisse zur Vulnerabilitätsanalyse der Moorböden

Bei den **Niedermoorböden** ergibt sich durch anhaltende Torfmineralisierung auf allen Standorten eine hohe bis extrem hohe Vulnerabilität, sofern die gegenwärtige Moorbodenentwässerung und -bewirtschaftung in der gleichen Intensität fortbesteht. Der Einfluss des Klimawandels ist auf diesem Niveau gering (siehe Abbildung 14). Beim Nah-Szenario bis 2050 unterschreiten, rein nutzungsbedingt, d.h. ohne Einfluss des Klimawandels, über 10 % der Niedermoorböden die Torfmächtigkeit von 30 cm. Böden mit weniger als 30 cm Torf werden nicht mehr als Niedermoorböden klassifiziert. Die ermittelte Reduktionsangabe bezieht sich auf 17589 Bohrlochbeschreibungen, die jedoch als flächenrepräsentativ für die ca. 33600 ha Niedermoorböden in BW angenommen wurden. In der fernen Zukunft bis zum Jahr 2100 erhöht sich der absolute Moorbodenverlust mit Berücksichtigung der Fernprojektion des Klimas beim 85. Perzentil auf fast 20 % und die Unterschreitung der 30 cm Schwelle ebenfalls auf gut 20 %, so dass 40 % nicht mehr als Niedermoorböden klassifiziert werden können. Der Einfluss der anderen Klimaprojektionen auf die Vulnerabilität der Moorböden ist hingegen etwas geringer, die hohe Gefährdung der Moorböden bleibt aber bestehen. Dies gilt flächendeckend für alle Regionen mit Niedermoorböden, also Ober-/Hochrhein, Schwarzwald, Hügel-/Moorland und Donau-Iller-Lech.

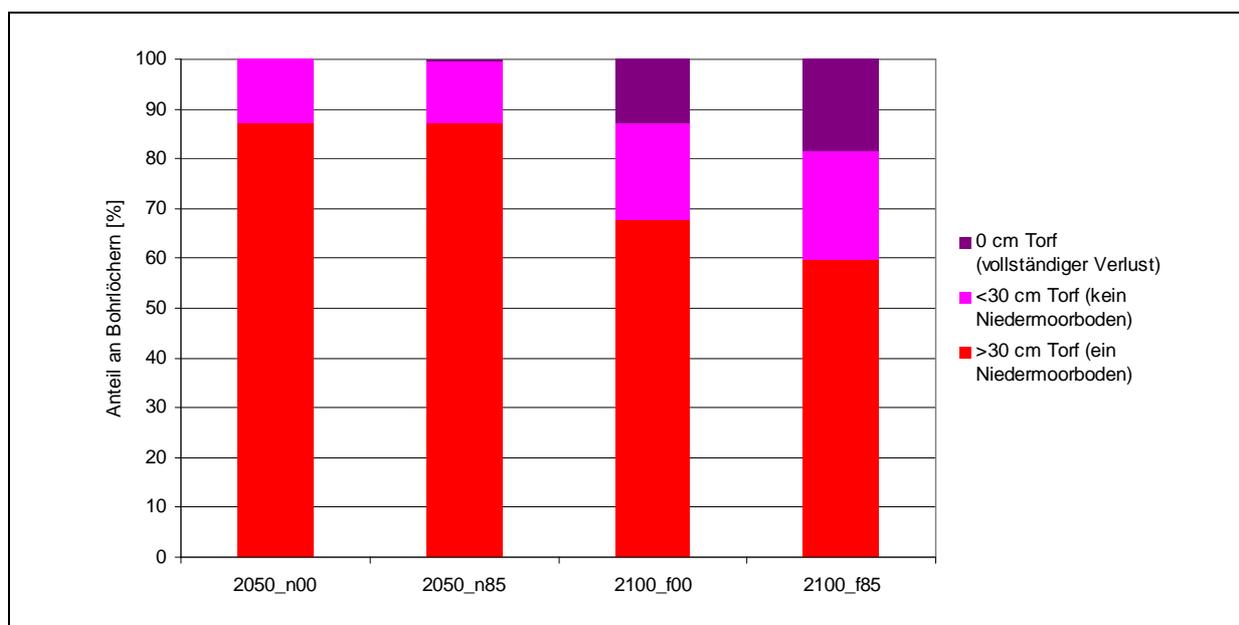


Abbildung 14: Einschätzung der Gefährdung von Niedermoorböden in Baden-Württemberg anhand der zukünftig verbleibenden Torfreste bei unveränderter Moornutzung ohne (n00, f00) bzw. mit (n85, f85) Wirkungen des Klimawandels in naher bzw. ferner Zukunft mit der am stärksten wirksamen Klimaprojektionen beim 85. Perzentil

Besonders stark zu Geltung kommt die extrem hohe Vulnerabilität bei flachen Moorböden, welche die Bezugsgrenze von 30 cm bis zum Jahr 2100 unterschreiten und die häufig in Randlagen von Mooren vorkommen. Hierbei handelt es sich um Moorböden mit aktuellen Torfmächtigkeiten von ca. 30 bis 150 cm, die von Göttlich (1967-1979) zumeist als Niedermoor beschrieben wurden. Eine Interpolation der ausgewerteten Bohrlochbeschriebe mittels Kriging-Verfahren kann ein kartografisches Bild der Vulnerabilitätsverteilung innerhalb eines Moores ergeben. Dies wurde deshalb exemplarisch für einen Teilbereich des Pfrunger-Burgweiler Rieds im Hügel-/Moorland durchgeführt (siehe Abbildung 15). Demnach sind die Randlagen gegenüber den Kernbereichen extrem hoch gefährdet, allerdings nimmt nach dem Verlust der Moorböden in den Randlagen auch die Gefährdung der Kernzonen zu.

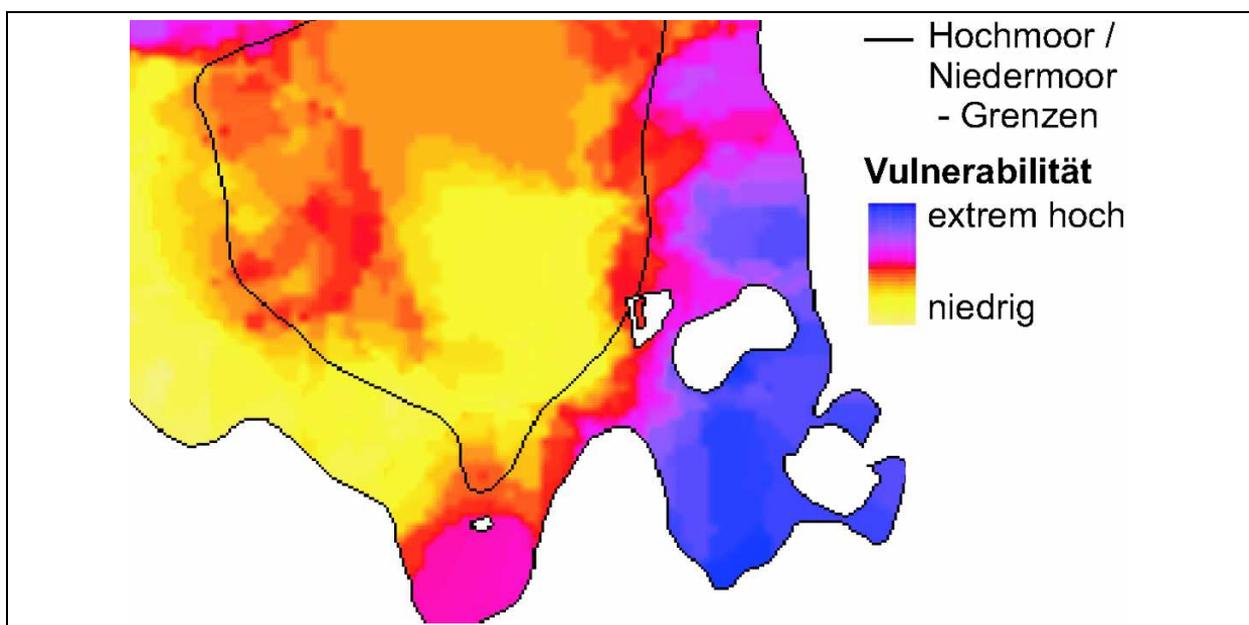


Abbildung 15: Geschätzter Vulnerabilität von Moorböden bis zum Jahr 2100 (hier bei einem erhöhten Torfverlust von 1,0 cm/Jahr) am Beispiel des südwestlichen Pfrunger-Burgweiler Rieds in der Region Hügel- /Moorland. Extrem hohe Vulnerabilität entspricht vollständigem Torfverlust, niedrige Vulnerabilität kennzeichnet hier bei kontinuierlichen Torfverlust den Bestand von Moorböden mit >30 cm Torf im Jahre 2100, Hochmoor-Niedermoor-Grenze nach Göttlich (1967-1979)

Die Vulnerabilität bei den **Hochmoorböden** wurde durch räumlichen Abgleich von Klimaprojektionspunkten zur klimatischen Wasserbilanz von Mai bis Oktober mit der gegenwärtigen Hochmoorboden - Verbreitung in einem Geografischen Informationssystem ermittelt (Beispiel siehe Abbildung 16). Bezogen auf die baden-württembergischen Hochmoorböden, die auf die Regionen Schwarzwald, Hügel-/Moorland und Donau-Iller-Lech beschränkt sind, liegt die höchste Vulnerabilität beim 15. Perzentil der Fernprojektion vor, denn dabei sind aufgrund der projizierten Wasserbilanzen zwischen 0 und 200 l/m<sup>2</sup>, die auch in Kombination mit torf-mineralisierungsfördernden Trockenperioden vorkommen können, alle Hochmoorböden hoch gefährdet (siehe Abbildung 17). Weil bei den Hochmoorböden des Moorkatasters (LUBW

2012c) keine negativen Wasserbilanzen projiziert werden, ergibt sich auch keine extrem hohe Gefährdung dieser Standorte in den Regionen.

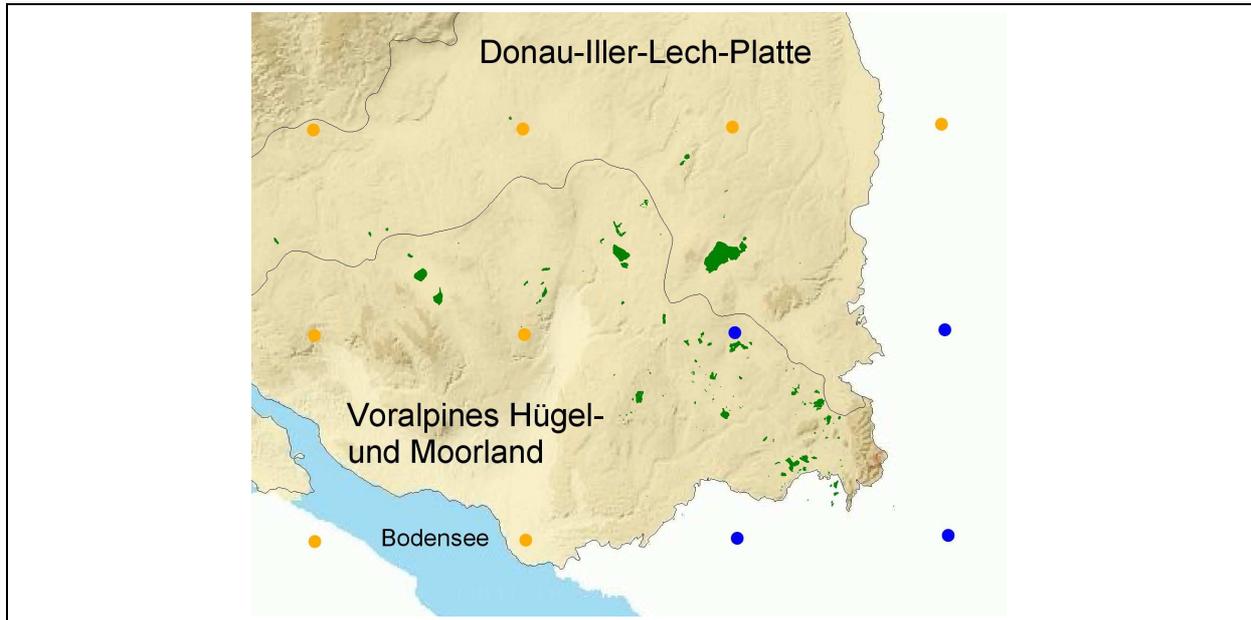


Abbildung 16: Beispiel zur Verteilung der Hochmoorböden n. LUBW 2012 c (= grüne Flächen) im Südosten Baden-Württembergs und Projektionspunkte des 15. Perzentils des Nahprojektion (2020-2050) zur Klimatischen Wasserbilanz von Mai-Oktober. Unter  $200 \text{ l/m}^2$  (= orangene Punkte) liegt eine hohe klimatische Gefährdung der Hochmoorböden vor (hier ca. 30 %), über  $200 \text{ l/m}^2$  (blaue Punkte) höchstens eine geringe Gefährdung

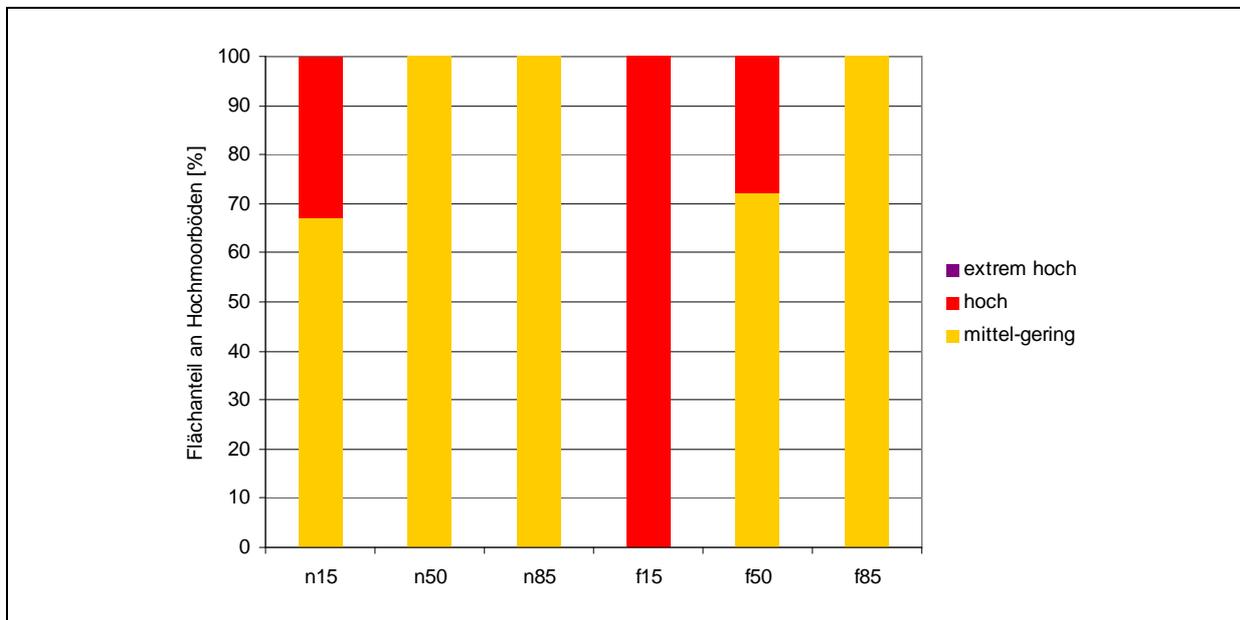


Abbildung 17: Geschätzter Flächenanteil der Hochmoorböden in Baden-Württemberg mit hoher Gefährdung aufgrund einer reduzierten Wasserbilanz beim Klimawandel in Abhängigkeit verschiedener Klimaprojektionen

### 3.3.5.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Moorböden

Für den Teilbereich Moorböden ergibt sich die in Tabelle 36 dargestellte Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen. Letztendlich ist die Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen jedoch sehr stark abhängig von den lokalen Standortbedingungen und in jedem Einzelfall zielgerichtet zu prüfen. Denn neueren BWPLUS- und BMBF -Projekten zufolge (Drösler et al. 2011, Angenendt et al. 2013) sind die Moorböden gegenwärtig sehr stark durch die Art und Intensität der Landnutzung, Bewirtschaftung und Entwässerung gefährdet. Dadurch treten die Wirkungen des Klimawandels in den Hintergrund und die Dringlichkeit von Anpassungsstrategien sollte zunächst bei der gegenwärtigen Moorbewirtschaftung ansetzen.

Tabelle 36: Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen beim Teilbereich Moorböden

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	Niedermoorboden		Hochmoorboden		Dringlichkeit
		Klimaprojektionsrahmen	Flant <sup>1)</sup> mit hoher bis extrem hoher Vuln	Klimaprojektionsrahmen	Flant <sup>1)</sup> mit hoher bis extrem hoher Vuln	
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	f85	100	-	-	3
Schwarzwald	3			f15	100	
Voralpines Hügel- und Moorland	4					
Donau-Iller-Lech-Platte	5					
Unterland/Gäue	2	-	-	-	-	-
Schwäbische Alb/Baar	6					
Schwäb.Keuper-Lias Land	7					
Bauland/Hohenlohe	8					
Baden-Württemberg	1-8	f85	100	f15	100	3

1) Flant = Flächenanteil, Vuln = Vulnerabilität

### 3.3.5.4 Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zu den Moorböden

Die **Plausibilität** der Vulnerabilitätsanalyse durch qualitative Vergleiche mit anderen Untersuchungen ist nur eingeschränkt möglich, denn die Vulnerabilität von Moorböden gegenüber dem Klimawandel wurde bisher nur qualitativ beschrieben. Demnach führen zunehmende Temperatur und Trockenheit oder abnehmende Niederschläge durch Abbau der organischen Substanz zur Degradierung und Sackung von Moorböden mit erhöhter Stofffreisetzung wie z.B. CO<sub>2</sub> oder NO<sub>3</sub> (z.B. LfU-BY 2007, LBEG 2009, LABO 2010, UBA 2011c). Dies stimmt zumindest mit der in diesem Bericht ermittelten Vulnerabilität von Hochmoorböden beim 15. Perzentil der Nah- und Fernprojektion überein, bei denen zunehmende Temperatur und Trockenheit vorliegen.

Quantitative Aussagen beziehen sich zumeist auf die Bedeutung von Moorböden beim Klimaschutz (z.B. Drösler 2011, UBA 2012a) und beruhen wie andere Untersuchungen vorrangig auf der Beobachtung der Entwicklung von Moorböden in den letzten Jahrzehnten. Deshalb kann die Plausibilität der Vulnerabilitätsschätzung kaum bewertet werden. Eine Qualitätssteigerung könnte jedoch z.B. mit der Vertiefung von quantitativen Modellrechnungen erzielt werden, die die Wechselwirkung von Klima- und Standortfaktoren sowie Informationen zur Moorbewirtschaftung integrierend berücksichtigen können.

Der **Geltungsbereich** bzw. die Sicherheit der geschätzten Vulnerabilität von den Moorböden ist im Wesentlichen stark beeinflusst dadurch, dass

- kein halbquantitatives Verfahren zur Bewertung der Vulnerabilität verfügbar ist
- die Abschätzungen zum Torfverlust auf Untersuchungen in der Vergangenheit beruhen, deren Rahmenbedingungen (z.B. Entwässerung) nicht immer gut beherrschbar sind und deshalb Prognosen für die Zukunft ungewiss machen
- die Bewertung des zukünftigen Vorkommens von Moorböden auf ca. 40 Jahre alten Untersuchungen zur Torfmächtigkeit beruhen, die aufgrund des fortschreitenden Torfverlustes häufig nicht mehr erreicht und somit zu einer unsicheren Klassifikation führen
- keine Informationen zu Grundwasserstand und –schwankungen in der Zukunft vorliegen und somit die Schätzung insbesondere für Niedermoorböden sehr unsicher ist.

Im Detail unterliegt die Unsicherheit der Vulnerabilitätsschätzung einer Reihe von Einzelkriterien, die im Folgenden erläutert werden. Zum ersten basieren die Schätzungen zur Vulnerabilität von Niedermoorböden allein auf Informationen, die aus Untersuchungen zur Moorbodenentwicklung in der Vergangenheit oder Gegenwart stammen:

- Der SRU (2012) zitiert z.B. Berichte, demzufolge der eintretende Höhenverlust durch die Torfmineralisierung in Abhängigkeit von Moortyp, Nutzungsweise und Standortbedingungen bis zu 3 cm pro Jahr betragen kann
- Werden hingegen aktuelle Messungen der THG-Emissionen aus Moorböden unter intensiv genutztem Grünland nach Drösler et al. (2011) von rund 8 t C/ha\*a auf Torfverlust umgerechnet, ergibt sich im Durchschnitt der den Vulnerabilitätsschätzungen zugrunde gelegte Torfchwund von rund 0,5 cm/Jahr
- Das gleiche Ergebnis resultiert aus der Umrechnung der gemittelten Emissionsfaktoren aus dem Nationalen Inventarbericht zum Treibhausgasinventar (UBA 2012a) für Moorböden (5 t C/ha\*a bei Grünland, 11 t C/ha\*a bei Acker). Auch das UBA (2012) hält die genannten Ergebnisse für vergleichbar. Diese Zahlen beruhen allerdings auf bundesweiten Untersuchungen, so dass bei den südwestdeutschen Moorböden abweichende Emissionen möglich sind, insbesondere in Mittelgebirgen (z.B. Schwarzwald) oder un-

ter Wald. Genauere Informationen zu den aktuellen Emissionen von südwestdeutschen Moorböden werden Ende 2014 nach Abschluss der BW-Plus-Projekte BWM11001, 11003, 11005 von Streck et al. (2013) vorliegen

- Stichprobenartige Kartierungen der Torfmächtigkeit im BWPLUS-Projekt Moore-BW (Angenendt et al. 2013) ergaben gegenüber den zumeist 30-50 Jahre alten Moorkartierungen von Göttlich (1967-79), die im Moorkataster BW (LUBW 2012c) vorgehalten werden, einen Torfschwund von durchschnittlich 23 cm, also ebenfalls fast 0,5 cm/Jahr
- Weitere Ergebnisse zum Torfverlust liefern Weinzierl et al. (2013). Danach liegt der am häufigsten vermessene Höhenverlust von Mooren in BW bei 20 bis 40 cm seit ca. 40 Jahren, d.h. durchschnittlich 0,5 bis 1,0 cm/Jahr.

Zum zweiten ergibt sich eine weitere Unsicherheit bei der Schätzung der Vulnerabilität von Niedermoorböden durch das Kriterium der Torfmächtigkeit. Hierzu liegen zwar in BW umfangreiche Informationen in Form von Bohrlochbeschrieben im Moorkataster-BW (LUBW 2012c) vor. Aber trotz der sehr großen Anzahl an Bohrlochbeschrieben ergeben sich Unsicherheiten für die Berechnung der zukünftigen Torfmächtigkeit sowie der daraus abzuleitenden Vulnerabilität von Moorböden:

- Die Bohrlochbeschriebe wurden über einen längeren Zeitraum erhoben und sind deshalb unterschiedlich alt. Das jeweilige Erhebungsdatum liegt in der Moorkataster-Datenbank (LUBW 2012c) jedoch nicht vor. Genauere Angaben zu den aktuellen Torfmächtigkeiten werden Ende 2013 nach Abschluss der BW-Plus-Projektes BWM10004 von Weinzierl et al. (2013) vorliegen. Ansätze zur flächendeckenden Erfassung von Torfmächtigkeiten in Moorrandbereichen wurden im BWPLUS-Projekt BWM10002 (Angenendt et al. 2013, Kern 2012) erfolgversprechend getestet, müssten allerdings noch kalibriert und praxisingerecht fortentwickelt werden
- Bei den Berechnungen mit den pauschalen Torfverlustraten bleibt die große Variabilität aufgrund unterschiedlicher Moornutzung und besonders der Grundwasserstände unberücksichtigt
- Bei den flachgründigeren Moorböden in den Randlagen ist einerseits die Vulnerabilität erhöht, andererseits auch die Unsicherheit der Vorhersagen. Denn bei geringeren Torfmächtigkeiten können die verwendeten Torfverlustraten bereits den Verlust eines Moorbodens indizieren, obwohl aktuelle Nutzung oder Grundwasserstand einen langsameren Torfverlust bewirken oder umgekehrt
- Obwohl über 20000 Bohrlochbeschriebe vorliegen, sind die Moorböden Baden-Württembergs damit nicht flächendeckend erfasst. Darüber hinaus unterlagen die Er-

hebungen keiner Zufallsauswahl, so dass die Repräsentativität möglicherweise nicht gewährleistet ist.

Zum dritten ergibt sich aufgrund der eingeschränkten Informationen zu Klima- und Standortkennwerten eine weitere Unsicherheit bei der Vulnerabilitätsschätzung:

- Die Auswirkungen der veränderten Temperaturen finden sich zwar indirekt in der klimatischen Wasserbilanz wieder, ein direkter Einfluss kann aufgrund fehlender Berechnungsalgorithmen in diesem Gutachten jedoch nicht dargestellt werden
- Die generelle Abhängigkeit der Hochmoorböden von Wasserbilanz und Temperatur ist zwar bekannt, eine praxistaugliche Gewichtung der Einzelfaktoren jedoch nicht. So bleibt beispielsweise ungeklärt, ob die beim 85. Perzentil der Nah- und Fernprojektion indizierte Zunahme der KWBv dominanter ist als die zunehmende Jahresdurchschnittstemperatur. Falls zutreffend, würde dies auf verbesserte Bedingungen für das Wachstum von Hochmoorböden hinweisen
- Bei Niedermoorböden konnte der mittlere Grundwasserstand als klimaabhängiger Standortfaktor aufgrund fehlender Informationen und Berechnungsalgorithmen nicht in die Vulnerabilitätsschätzung einfließen. Deshalb ist das Szenario zum Torfschwund bei Niedermoorböden eine Fortschreibung der Entwicklung in den letzten Jahrzehnten. Diese Unsicherheit ist jedoch akzeptabel, sofern die Landnutzung dominanter Faktor für die Gefährdung der Niedermoorböden ist und der mittlere Grundwasserstand kaum Veränderung zeigt
- Die Grundwasserschwankungen werden voraussichtlich zunehmen, so dass häufigeres Austrocknen der Moorböden eine höhere Vulnerabilität bewirkt. Diese nicht quantifizierten Schwankungen erhöhen die Unsicherheit der Vulnerabilitätsschätzung. Sie werden je nach Einzugsgebiet stark unterschiedlich ausfallen, so dass die endgültige Vulnerabilität von Niedermoorböden sehr stark von der regionalen und lokalen Geologie, Hydrologie und Topografie abhängig ist.

### **3.3.5.5 Fazit zu Moorböden**

Die Wirkung des Klimawandels auf die zukünftige Verbreitung von Niedermoorböden ist erheblich geringer als die Wirkung der aktuellen Moornutzung und –bewirtschaftung. Allein durch die aktuelle Moornutzung sind die Niedermoorböden in Baden-Württemberg nahezu flächendeckend hoch gefährdet. Lediglich beim 85. Perzentil der Fernprojektion führt der Klimawandel zu einem nochmals geringfügig beschleunigten Torfverlust. Die Vulnerabilität von Hochmoorböden ist aufgrund der projizierten Abnahme der klimatischen Wasserbilanz unter 200 l/m<sup>2</sup> beim 15. Perzentil der Fernprojektion flächendeckend hoch. Bei allen anderen Projektionsvarianten ist bei 0 % bis maximal 30 % der Hochmoorböden mit einer hohen Vul-

nerabilität zu rechnen, weil sich die klimatischen Wasserbilanzen zukünftig auch positiv entwickeln werden. Tendenziell unterliegen die nordwestlich gelegenen Hochmoore in den Regionen Donau-Iller-Lech und Hügel-/Moorland einer höheren Vulnerabilität als die südöstlich und im Schwarzwald gelegenen. Aufgrund der sehr hohen und extrem hohen Vulnerabilität von bis zu 40 % der Niedermoorböden und einer hohen Vulnerabilität von bis zu 100 % sowohl der Nieder- als auch Hochmoorböden bei den Nahprojektionen besteht eine hohe Dringlichkeit für Anpassungs- bzw. Schutzmaßnahmen.

Die geschätzte Vulnerabilität stimmt mit anderen Untersuchungen darin überein, dass zunehmende Temperaturen und abnehmende Niederschläge zu Torfverlusten führen werden. Die positive Wirkung von zunehmenden Wasserbilanzen wird allerdings nicht thematisiert. Die bisher bestehende Unsicherheit bei der Vulnerabilitätsschätzung konnte nicht wesentlich gemindert werden. Dies ist zu begründen u.a. mit der bedingt zufrieden stellenden Streuung und Richtungssicherheit der Klimasignale aus den Klimaprojektionen, dem gänzlichen Fehlen von Informationen zu den zukünftigen Grundwasserschwankungen oder der großen Unsicherheit beim Abschätzen des Torfverlustes.

### 3.3.6 Bodenlebensgemeinschaften

Eine Bodenlebensgemeinschaft ist eine von den Umweltbedingungen abhängige Artenkombination von Mikroorganismen und Tieren im Boden. Sie leisten einen wichtigen Beitrag zur Nährstoffbereitstellung, den Stoffflüssen und der Freisetzung klimarelevanter Spurengase von Böden. Zur Kennzeichnung einer Bodenlebensgemeinschaft werden oftmals Indikatorarten wie Regenwürmer oder bestimmte Mikroorganismen verwendet. Ein anderer Ansatz ist die abiotische Charakterisierung des Lebensraums, denn die Diversität und Aktivität bzw. Leistungsfähigkeit von Bodenlebensgemeinschaften ist zumeist am größten bei frischer bis stark frischer Bodenfeuchte und moderater Bodentemperatur. Weiterhin modifizierend wirkt z.B. die Art der Pflanzengesellschaft, die Bodenbewirtschaftung oder der Säuregrad eines Bodens mit einem Optimum im schwach sauren bis neutralen Bereich ( $\text{pH} > 6$ ). Tendenziell ist in Baden-Württemberg mit einer höheren Diversität und Leistungsfähigkeit zu rechnen bei höheren Niederschlägen und ungestörten Böden wie im Hügel-/Moorland mit hohem Grünlandanteil oder in der Nordhälfte der Alb/Baar (Flächige Kuppenalb) mit höherem Laubwaldanteil. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen bestehen jedoch Kenntnislücken, so dass ein Zusammenhang zwischen Bodenlebensgemeinschaften und landschaftsökologischen Regionen nicht belegbar ist.

**3.3.6.1 Methodik u. Daten für Vulnerabilitätsanalyse der Bodenlebensgemeinschaften**

Zur halbquantitativen Analyse der Wirkungen des Klimawandels auf Bodenlebensgemeinschaften in Mineralböden sind lediglich klassifizierende Methoden für den Lebensraum verfügbar (Römbke 2012, mdl. Mittlg), die alle jedoch nur mit Einschränkungen geeignet sind. Dies sind z.B. Römbke et al. (2002, UBA-Studie), Birkhofer et al. (2012, aktuelles DFG-Forschungsprojekt), Sommer et al. (2002, Uni Hohenheim / IBS), Müller & Waldeck (2011, NIBIS-Verknüpfungsregel 6.3.2, S. 189) basierend auf Beylich, Broll et al. (2005, BVB-Studie).

Lediglich die Verfahren nach Sommer et al. (2002) und Müller & Waldeck (2011) bieten die erforderliche Klassifizierungsmöglichkeit und die Berücksichtigung der bodenkundlichen Feuchtestufe (BKF) als Reaktionsindikator für mögliche Klimaauswirkungen. Ausgangsbasis für die folgenden Klassifizierungen ist deshalb das Verfahren nach Sommer et al. (2002), bei dem die bodenkundliche Feuchtestufe und der Boden-pH zur fünfstufigen Bewertung des Bodens als Lebensraum herangezogen werden. Weil diese Klassifizierung allerdings auf Waldböden beschränkt ist, wurden die bei Müller & Waldeck (2011) in Abhängigkeit von Feuchtestufe und pH-Wert genannten Gruppen für Acker und Grünlandböden in das Schema von Sommer et al. (2002) nach Rücksprache mit Römbke (pers. Mitt., 18.1.2013) integriert (siehe Tabelle 38). Erforderliche Eingangsdaten für die Vulnerabilitätsanalyse sind hiernach (Übersicht zu Datenquellen siehe Tabelle 37):

- Klimatische Wasserbilanz Mai-Oktober (für bodenkundliche Feuchtestufe)
- Grund- / Stauwasser – Stufen (für bodenkundliche Feuchtestufe)
- Bodenart (für bodenkundliche Feuchtestufe)
- pH-Wert

Tabelle 37: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Sensitivitäts- / Vulnerabilitätsanalyse des Lebensraums für Bodenlebensgemeinschaften

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
Sommer et al. (2002) NIBIS VR 6.3.2 (Müller & Waldeck 2011)	Klimaprojektionen (LUBW 2012a)	WaBoA (UM-BW 2004, 2012) IBS-Datenbank (IBS 2012)	qualitative Methodenkombination (Bodenkundliche Feuchtestufe, Boden-pH) Generalisierungen bei Grund-/Stauwasserstufen für BKF	Expertenwissen Römbke (pers. Mitt.)

Im Vordergrund bei der gewählten Methode steht der Lebensraum für Bodenorganismen in Mineralböden, der nach Sommer et al. (2002) am günstigsten zu bewerten ist bei stark frischen und schwach sauren bis neutralen Bodenverhältnissen. Hier kann mit der höchsten Diversität und Aktivität von Bodenlebensgemeinschaften gerechnet werden. Zunehmende Nässe, Trockenheit oder Säure verschlechtern den Lebensraum. Da die Vulnerabilitätsanalyse Veränderungen für Bodenlebensgemeinschaften durch den Klimawandel aufzeigen soll, müssen mögliche Veränderungen des Lebensraums in negativer oder positiver Richtung klassifiziert werden. Dabei wird von einem Optimum bei BKF6 entsprechend einem stark frischen Bereich ausgegangen (Sommer et al. 2006, Römbke pers. Mitt. 18.1.2013, siehe Tabelle 39). Die Gesamtspanne der bodenkundlichen Feuchtstufe reicht von BKF0 (dürr) bis BKF10 (nass).

Die Ermittlung der bodenkundlichen Feuchtstufe wurde nach Müller & Waldeck (2011, Verknüpfungsregel 6.5.8) durchgeführt und um die Zuweisungsregeln für KWBv >200 l/m<sup>2</sup> nach UM-BW (1995) ergänzt. Eingangsgrößen für die Ermittlung sind die Bodenart und eine grundwasserstandsabhängige Grundwasserstufe (GWS), so dass das Wassernachlieferungspotenzial aus dem Grundwasser, das die Bodenfeuchte entscheidend beeinflusst, prognostiziert werden kann. Weil aber nur unzureichende Bodeninformationen zu grundwasserbeeinflussten Standorten vorliegen, wurde ein mittlerer GW-Stand von 40 cm angenommen (vgl. Tabelle 16). Im Detail erfolgte somit bei grundwasserbeeinflussten Standorten die Zuweisung der BKF anhand der zweiten GWS nach Müller & Waldeck (2011) und bei allen anderen Standorten wurde die BKF mittels der siebten GWS für grundwasserferne Standorte nach UM-BW (1995) zugeordnet. Für die weitere Zuordnung wurde allein die Bodenart des Oberbodens berücksichtigt, weil dies der entscheidende Bezugsraum in Böden für den Lebensraum von Bodenlebensgemeinschaften ist.

Tabelle 38: Klassifizierung des Lebensraums für Bodenlebensgemeinschaften in Mineralböden, basierend auf Sommer et al. (2002), ergänzt um Angaben nach Müller & Waldeck (2011) und Römbke (pers. Mitt. 18.1.2013). Bewertungsspanne von 1 = sehr geringe bis 5 = sehr hohe Leistungsfähigkeit

Bodenkundliche Feuchtstufe	pH - Wert			
	<4	4 - 5	5 - 6	>6
0 - 1	1	1	2	2
2 - 3	1	2	3	3
4 - 5	2	3	3	4
6	2	3	4	5
7 - 8	2	3	3	4
9 - 10	1	2	3	3

Die BKF werden für die Gegenwart und alle Klimaprojektionen ermittelt. Wird beispielsweise eine gegenwärtige BKF4 und eine zukünftige BKF3 ermittelt, dann wird bei einem Boden-pH 6 der Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften um -1 Stufe ungünstiger und es besteht eine mittlere Vulnerabilität (siehe Tabelle 40). Liegt zukünftig hingegen BKF6 vor, dann wird der Lebensraum um +1 Stufe günstiger und es besteht keine Vulnerabilität, die entsprechend Tabelle 40 der Vulnerabilitätsstufe 1 (niedrig) zugeordnet wird.

Tabelle 39: Veränderungsklassifikation der bodenkundlichen Feuchtestufe (BKF) als Indikator für den Lebensraum von Bodenlebensgemeinschaften bei Boden-pH >6 (Listung aller pH-Bereiche siehe Anhangstabelle 1)

BKF-nah BKF-fern	BKF-ist					
	0 - 1	2 - 3	4 - 5 <sup>1)</sup>	6 <sup>2)</sup>	7 - 8	9 - 10
0 - 1	0	-1	-2	-3	-2	-1
2 - 3 <sup>1)</sup>	+1	0	-1	-2	-1	0
4 - 5	+2	+1	0	-1	0	+1
6 <sup>2)</sup>	+3	+2	+1	0	+1	+2
7 - 8	+2	+1	0	-1	0	+1
9 - 10	+1	0	-1	-2	-1	0

1) Ablesebeispiel: der Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften ändert sich bei pH6 von BKF4 auf BKF3, d.h. verschlechtert sich um eine -1 Stufe.

2) Dunkelgraue Markierung zeigt das das Optimum an für die Bodenlebensgemeinschaften bei BKF6 (= stark frisch)

Tabelle 40: Klassifikation der Vulnerabilität von Bodenlebensgemeinschaften

Vulnerabilität	Vulnerabilitätsstufe	Bewertung	Veränderungsklasse der BKF
gering	1	positive oder keine Veränderung der BKF gegenüber der Gegenwart	>= 0
mittel	2	negative Veränderung der BKF um eine Stufe gegenüber der Gegenwart	= -1
hoch	3	negative Veränderung der BKF um 2 und mehr Stufen gegenüber der Gegenwart	<= -2

### 3.3.6.2 Ergebnisse zur Vulnerabilitätsanalyse der Bodenlebensgemeinschaften

Die höchste Vulnerabilität beim Teilbereich Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften wurde für das Ober-/Hochrhein-Gebiet berechnet. Deshalb ist für diese LÖR in Abbildung 18 das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse für alle Klimaprojektionsvarianten dargestellt. Die höhere Vulnerabilität gegenüber den anderen LÖR wird in Abbildung 19 erkennbar. Hier ist die mittlere Wahrscheinlichkeitsvariante der Klimaprojektion beim 50. Perzentil für die nahe Zukunft und für die Variante mit den größten Veränderungen (15. Perzentil der Fernprojektion) dargestellt (Details siehe Anhangstabelle 8 und Anhangstabelle 9). Etwas weniger Fläche ist beim 15. Perzentil der Nahprojektion von höchstens mittlerer Vulnerabilität betroffen.

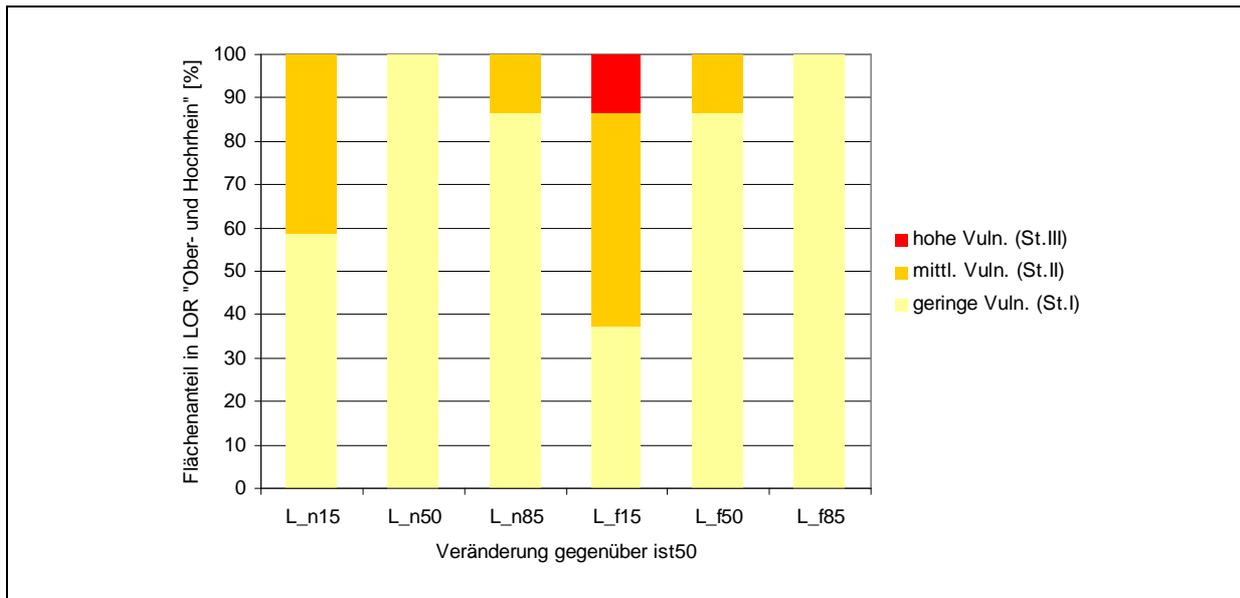


Abbildung 18: Variabilität der Flächenanteile mit unterschiedlicher Vulnerabilität von Bodenlebensgemeinschaften gegenüber dem Klimawandel aufgrund veränderter Bodenfeuchtstufen in Abhängigkeit der Klimaprojektionen am Beispiel der erhöht vulnerablen Landschaft „Ober-/Hochrhein“

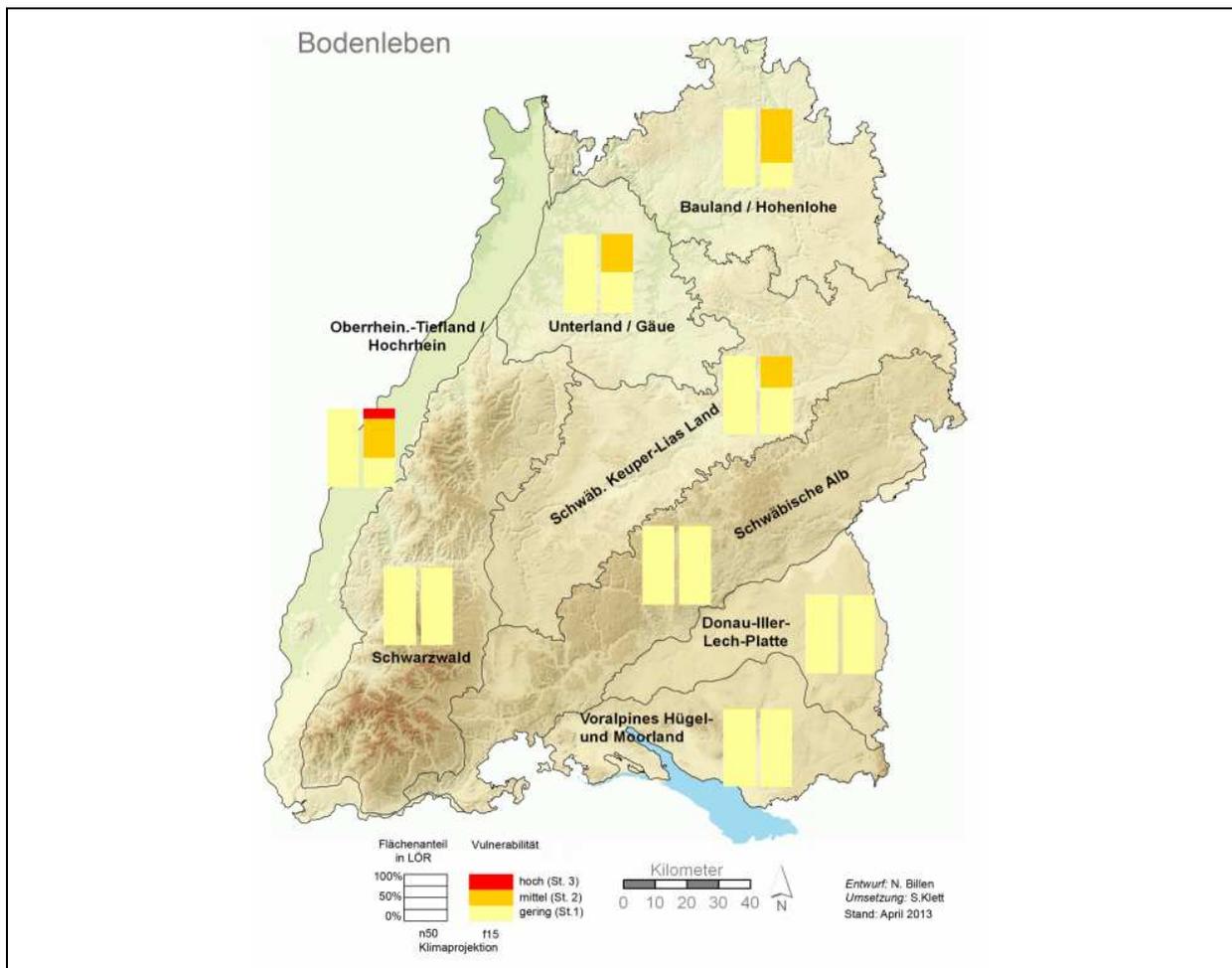


Abbildung 19: Vulnerabilität der Bodenlebensgemeinschaften gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

Beim 50. oder 85. Perzentil der Nah- und Fernprojektionen ergibt sich hingegen nur für die drei LÖR Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue und Bauland/Hohenlohe eine mittlere Vulnerabilität auf maximal 35 % der Fläche. In den anderen LÖR ist die Vulnerabilität ganzflächig gering, was sogar eine Verbesserung des Lebensraums beinhalten kann.

Die Verteilung der hoch und mittel vulnerablen Bereiche innerhalb einer LÖR bleiben in Abbildung 19 jedoch unerkant. Deshalb wurden basierend auf dem räumlichen Verteilungsmuster von Böden und Landnutzung (Standortkomplexe) in der Tabelle 41 die Naturräume mit größeren Flächenanteilen an hoher und mittlerer Vulnerabilität beim ungünstigsten Szenario (15. Perzentil der Fernprojektion) aufgeführt sowie den gegenwärtigen Lebensraumbedingungen gegenübergestellt. Die höchste Gefährdung aufgrund der Kombination von gegenwärtig ungünstigerem Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften und hoher Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel ergibt sich demnach für die Hardtebene im Ober-/Hochrhein und für Teilbereiche des Baulands in Bauland/Hohenlohe. Gegenwärtig günstigere Lebensräume kombiniert mit einer mittleren Vulnerabilität des Lebensraums sind zu finden in einigen Naturräumen von Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue, Bauland/Hohenlohe und Keuper-Lias-Land.

Tabelle 41: Naturräume in den Landschaftsökologischen Regionen mit gegenwärtig mittlerer bis hoher Ungunst als Lebensraum für Bodenorganismen (Stufen 1 und 2 nach Tabelle 38) und mittlerer bis hoher Vulnerabilität auf mehr als 33 % der Fläche

LÖR-Nr.	Landschaftsökologische Region	Naturräume mit regionalen Risikobereichen	gegenwärtig mittl. bis hohe Ungunst <sup>1)</sup>	Vulnerabilitätszunahme <sup>1)</sup>
1	Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	Hardtebene	+	+
		Markgräfler Land	-	+
		Hochrhein	-	+
2	Unterland/Gäue	Strom- u. Heuchelberg	+	-
		Kraichgau	-	+
3	Schwarzwald	Grinden-Schwarzwald	+	-
		Schwarzwaldrandplatten	+	-
4	Voralpines Hügel- und Moorland	/	/	/
5	Donau-Iller-Lech	Donau-Ablach	+	-
		Riß-Aitrach	+	-
6	Schwäbische Alb / Baar	/	/	/
7	Keuper-Lias-Land	Schönbuch u. Glemswald	+	-
		Voralb	-	+
		Obere Gäue	-	+
8	Bauland/Hohenlohe	Bauland	+	+
		Tauberland	-	+
		Kocher-Jagst Ebene	-	+

1) + = zutreffend, - = unzutreffend, / = kein hohes Gegenwartsrisiko bzw. keine hohe Vulnerabilität

Die anderen vier Regionen, welche südlich und östlich gelegen sind, weisen nur geringe bis keine Vulnerabilität auf. In den von einer mittleren Vulnerabilität betroffenen Gebieten besteht kein offensichtlicher Zusammenhang mit der Landnutzung. Das gleiche gilt für die Böden, obwohl tendenziell lehmige Parabraunerden und tonige Pelosol-Braunerden etwas häufiger betroffen sind als andere Bodentypen. Bei der aggregiert-gewichteten Zusammenfassung der unterschiedlichen Vulnerabilitäten in den einzelnen LÖR ergibt sich beim 15. Perzentil der Fernprojektion als ungünstigstes Szenario lediglich für die Regionen Ober-/Hochrhein und Bauland/Hohenlohe gesamtlandschaftlich eine mittlere Vulnerabilität mit Tendenz zu hoch (siehe Tabelle 42). Somit ergibt sich auch für den Landesdurchschnitt eine geringe Vulnerabilität.

Insgesamt ergab sich bei dem Teilbereich Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften zu meist eine mittlere und nur vereinzelt eine hohe Vulnerabilität beim 15. Perzentil der Nahprojektion des Klimas. Davon betroffen sind einige Naturräume in den nördlichen und westlichen Regionen Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue, Bauland/Hohenlohe und Keuper-Lias-Land. Eine Ursache dafür ist der tendenziell trockenere Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften, indiziert durch eine abnehmende BKF in diesen Regionen. Die südlichen und östlichen Regionen Schwarzwald, Alb/Baar, Donau/Iller/Lech und Hügel-/Moorland, die bereits gegenwärtig höhere Niederschläge aufweisen, zeigen bei allen Nah- und Fernprojektionen keine erhöhte Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel. So führt in diesen Landschaften die tendenziell eher zunehmende BKF teilweise sogar zu einer geringfügigen Verbesserung des Lebensraums für Bodenlebensgemeinschaften. In den von einer mittleren Vulnerabilität betroffenen Gebieten besteht kein offensichtlicher Zusammenhang mit der Landnutzung und den Böden, obwohl lehmige Parabraunerden und tonige Pelosol-Braunerden tendenziell etwas häufiger betroffen sind.

Tabelle 42: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen der Landschaftsökologischen Regionen für die Bodenlebensgemeinschaften in Abhängigkeit der Klimaprojektionsvarianten

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	n15	n50	n85	f15	f50	f85
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1	1	1	2'	1	1
Unterland/Gäue	2	1	1	1	1	1	1
Schwarzwald	3	1	1	1	1	1	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1	1	1	1	1	1
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1	1	1	1	1	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1	1	1	1	1	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	1	1	1	1	1
Bauland/Hohenlohe	8	1	1	1	2'	1	1
Baden-Württemberg	1-8	1	1	1	1	1	1

### 3.3.6.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Bodenleben

Zum Teilbereich Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften ergibt sich im Durchschnitt eine geringe Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen in den landschaftsökologischen Regionen (siehe Tabelle 43). Die Dringlichkeitsbewertung der Gesamtfläche Baden-Württembergs wird mit dem Mittelwert aus den acht Regionen beschrieben, so dass auch hier nur eine geringe Dringlichkeit besteht. Im Detail deuten sich jedoch regionale Besonderheiten aufgrund zunehmend trockener Böden für die nördlichen und westlichen Landschaften Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue, Bauland/Hohenlohe und Keuper-Lias-Land an, die mit gewählter Methodik und Maßstab aber nicht darstellbar und deshalb bei Bedarf nochmals differenzierter zu bewerten sind.

Tabelle 43: Regional differenzierte Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Bodenlebensgemeinschaften

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste aggregierte Vulnerabilität	Klimaprojektionsrahmen	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität	gemittelte Dringlichkeit
Oberrhein.-Tiefland+Hochrhein	1	1,76	f15	13,2	1
Unterland/Gäue	2	1,48	f15	0,0	1
Schwarzwald	3	1,01	f15	0,0	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1,01	f15	0,0	1
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1,00	f15	0,0	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1,01	f15	0,0	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1,40	f15	0,0	1
Bauland/Hohenlohe	8	1,69	f15	0,0	1
Baden-Württemberg	1-8	1,29	f15	1,2	1

### 3.3.6.4 Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zu Bodenlebensgemeinschaften

Die **Plausibilität** der Vulnerabilitätsbewertung kann nach derzeitigem Kenntnisstand kaum geprüft werden, denn in bisherigen Studien und Berichten für vergleichbare Untersuchungs-räume wurden die Bodenlebensgemeinschaften nur qualitativ oder gar nicht berücksichtigt (z.B. LABO 2010, LBEG 2009, Schuchardt et al. 2011). Auf die Bedeutung von Temperatur und Feuchtigkeitsänderungen wird dabei zwar eingegangen, aber die Richtung der Entwicklung wird widersprüchlich diskutiert. Aufgrund dieser Unsicherheit hat Ehrmann (2008) allein die Regenwürmer als Indikatorarten von Bodenlebensgemeinschaften hinsichtlich der Anpassungspotenziale an den Klimawandel untersucht. In Übereinstimmung mit den o.g. Berechnungsergebnissen zum Lebensraum kommt er dabei aufgrund zahlreicher Feldanalysen unter verschiedenen Klimaverhältnissen zu dem Ergebnis, dass sich in den Höhenlagen, die zumeist auch feuchter sind, der Klimawandel vielleicht sogar positiv auf die Regenwürmer auswirken könnte. In weiterer Übereinstimmung werden sich nach Ehrmann (2008) wärmere

und meist auch trockenere Sommer hingegen ungünstig auswirken, da trockene Standorte schon jetzt eine geringere Regenwurmpopulation aufweisen.

Für den **Geltungsbereich** bei der Bewertung von Bodenlebensgemeinschaften ergibt sich eine Unsicherheit durch die Annahme des Optimums bei BKF6, die letztendlich auf einer wissensbasierten aber nicht parametrisierten Einschätzung beruht und darüber hinaus den Optimumsbereich evtl. zu stark eingrenzt. Weiterhin sind in der Realität die Übergänge zwischen den einzelnen Stufen fließend, so dass eine gröbere Klassifikation erforderlich ist. Andererseits würde die Bewertung damit an Sensitivität verlieren und mögliche Veränderungstendenzen werden nicht erkannt, weshalb die Unsicherheiten des gewählten Bewertungsansatzes unter den gegebenen Voraussetzungen noch akzeptabel sind.

Modifizierend wirkt auch der Säuregrad, d.h. der pH-Wert des Bodens. Neutrale und schwach alkalische Böden bieten günstigeren Lebensraum und puffern Umweltveränderungen besser ab als saure. Dies wird durch eine differenzierte Bewertung in Abhängigkeit von vier pH-Stufen berücksichtigt (siehe Anhangstabelle 1).

Die eigentliche Leistungsfähigkeit von Bodenorganismen wird allerdings am Besten mit Parametern wie Abundanz oder Diversität beschrieben. Denn jeder Lebensraum weist eine spezifische Zusammensetzung mit optimaler Anpassung der Bodenorganismen an die Standortfaktoren auf. Außerdem weisen Bodenlebensgemeinschaften und Bodenorganismen eine hohe Flexibilität gegenüber Umweltveränderungen auf. Aufgrund der Komplexität lassen sich beim derzeitigen Kenntnisstand aber kaum halbquantitative Aussagen treffen zu Veränderungen bzw. optimierten Anpassungen der Lebensgemeinschaften an veränderte Standortfaktoren durch den Klimawandel und deren Leistungsfähigkeit. Durch weitere Einflussfaktoren wie z.B. Temperaturveränderungen oder größere Amplituden der Niederschlags- und Temperaturverläufe wird die Unsicherheit ebenso vergrößert wie durch veränderte Vegetation. Auch weitere Wechselwirkungen wie Veränderung des pH-Wertes oder des Humusgehaltes können mit dem verfügbaren Bewertungsansatz nicht dargestellt werden. Kritische Aspekte für den Geltungsbereich der Analyseergebnisse sind u.a. somit:

- Es werden nur relative Bewertungsergebnisse erzielt, weil die Leistungsfähigkeit von Bodenlebensgemeinschaften nur indirekt mit der Eignung ihres Lebensraums beschrieben werden kann.
- Es bleibt unberücksichtigt, dass jeder Lebensraum eine spezifische Zusammensetzung mit optimaler Anpassung der Bodenorganismen an die Standortfaktoren aufweist. Somit bleibt auch eine potenzielle Verschiebung des Artenspektrums unberücksichtigt.
- Es findet keine Rückkopplung mit Humusmenge und –art, Temperaturveränderungen oder größeren Amplituden der Niederschlags- und Temperaturverläufe statt.

Unabhängig davon ist das gewählte, halbquantitative Verfahren ein Fortschritt gegenüber den qualitativen Abschätzungen, die bisher die Basis für Vulnerabilitätsschätzungen waren.

### **3.3.6.5 Fazit zu Bodenlebensgemeinschaften**

Im Rahmen des Klimawandels wird im Landesdurchschnitt mit einer geringen Vulnerabilität beim Lebensraum für Bodenlebensgemeinschaften gerechnet. Lediglich beim 15. Perzentil der Fernprojektion des Klimas mit teilweise sogar negativer Wasserbilanz zeichnet sich auf ca. 65 % der Flächen in den westlichen und nördlichen Regionen (Ober-/Hochrhein, Unterland/Gäue, Bauland/Hohenlohe und Keuper-Lias-Land) eine zumeist mittlere und nur vereinzelt hohe Vulnerabilität ab, die aus abnehmenden Bodenfeuchten resultiert. Die Vulnerabilität in diesen Gebieten weist keinen offensichtlichen Zusammenhang mit der Landnutzung und den Böden auf, obwohl lehmige Parabraunerden und tonige Pelosol-Braunerden tendenziell etwas häufiger betroffen sind. In den südlichen und östlichen Regionen (Schwarzwald, Alb/Baar, Donau/Iller/Lech und Hügel-/Moorland), die gegenwärtig und auch zukünftig zumindest leicht positive Wasserbilanzen aufweisen, wird flächendeckend bei allen Klimaprojektionen eine geringe Vulnerabilität oder teilweise sogar eine Verbesserung des Lebensraums erwartet. Dadurch erklärt sich mit Ausnahme von einigen Naturräumen in zwei Regionen auch die regional weitgehende und landesweit geringe Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen.

Die trotz geringer Vulnerabilität festgestellten Tendenzen zur Abnahme der Eignung des Lebensraums von Bodenlebensgemeinschaften in zunehmend sommertrockeneren Regionen, aber auch die kleinräumige Möglichkeit einer Zunahme in feuchteren Regionen stimmen mit Untersuchungen zu Regenwürmern als Indikatororganismus von Bodenlebensgemeinschaften überein. Die Unsicherheit der Ergebnisse ist allerdings groß, denn das wissenschaftsbasierte Bewertungsverfahren ist nicht validiert, weist nur eine mittlere Sensitivität auf und die Streuung und Richtungssicherheit des Klimasignals zur verwendeten Wasserbilanz ist nur bedingt zufrieden stellend.

### **3.3.7 Bodenverdichtung**

Bodenverdichtung ist ein physikalischer Prozess, der mit Zunahme der Dichte und Abnahme des Porenvolumens einhergeht. Es wird unterschieden zwischen der Bodenverdichtung als Folge von zumeist anthropogen bedingten Belastungen und Einlagerungsverdichtung durch Einwandern von festen Stoffen (BGR 2005). Daraus können beispielsweise ein verschlechterter Wasser- und Lufthaushalt der Böden oder ein eingegengter Lebensraum für Bodenorganismen resultieren, die einhergehen mit verringerter Leistungsfähigkeit der Böden als Standort für Land- und Forstwirtschaft oder als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf. Böden

mit toniger oder lehmig-schluffiger Bodenart weisen nach Müller & Waldeck (2011) tendenziell eine höhere Verdichtungsempfindlichkeit als sandige Böden. Verstärkt ist die Empfindlichkeit bei stark feuchten und nassen Böden. Demnach ist in Baden-Württemberg die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit in Landschaften mit höheren Niederschlägen und tonigeren Böden wie Alb/Baar oder östliches Keuper-/Lias-Land (obere Gäue) größer als bei geringeren Niederschlägen und sandigeren Böden wie nördlicher Ober-/Hochrhein (Hardtebenen) oder nordöstliches Keuper-/Lias-Land (Schwäbisch-Fränkische Waldberge)

### 3.3.7.1 Methodik und Daten für Vulnerabilitätsanalyse der Bodenverdichtung

Der Klimawandel selbst führt zu keiner Bodenverdichtung. Allerdings wird häufig von einer Zunahme der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit berichtet, die vorrangig auf die Intensität und den Zeitpunkt der Bodennutzung zurückzuführen ist. Zur halbquantitativen Darstellung dieses Risikos sind jedoch nur wenig Bewertungsmethoden verfügbar (Lebert 2010). So ermöglicht die DIN 19688 (Entwurf) zwar eine Schätzung der sogenannten Vorbelastung, hat aber keinen Bezug zu klimatischen Kennwerten. Hingegen berücksichtigen Müller & Waldeck (2011, NIBIS-Verknüpfungsregel 6.6.5) zumindest die bodenkundliche Feuchtestufe, allerdings nur für das eher trockenere Sommerhalbjahr. Die erforderlichen Eingangsdaten hierfür sind (Übersicht zu Datenquellen siehe Tabelle 44):

- Klimatische Wasserbilanz Mai-Oktober (für bodenkundliche Feuchtestufe)
- Grund- / Stauwasser – Stufen (für bodenkundliche Feuchtestufe)
- Bodenart (für bodenkundliche Feuchtestufe, pot. Verdichtungsempfindlichkeit)

Tabelle 44: Methodenbasis und -anpassung sowie Datenquellen zur Analyse der Sensitivität / Vulnerabilität von Böden durch Bodenverdichtung

Methodenquelle / -basis	Datenquelle		Methodenanpassung	
	Klima	Boden / Standort	Kennwert	Datenbasis
NIBIS VR 6.6.5 (Müller & Waldeck 2011)	Klimaprojektionen (LUBW 2012a)	WaBoA (UM-BW 2004, 2012) IBS-Datenbank (IBS 2012)	GWS7 integriert für BKF von Böden ohne GW-Einfluss Generalisierungen bei Grund-/Stauwasserstufen für BKF	UM-BW (1995) Expertenwissen

Auf die modifizierenden, d.h. standortspezifischen Kennwerte wie Humusgehalt, Carbonatgehalt und Steingehalt wird verzichtet, da diese nur statisch und nicht unter klimatischen Aspekten in die Bewertung eingehen. Deshalb besteht auch kein Einfluss auf Ausmaß der Veränderung bzw. die Vulnerabilität aufgrund des Klimawandels. Die Ermittlung der BKF als

bodenkundliche Eingangsgröße in die Bewertung wurde bereits in Kapitel 3.3.6.1 beschrieben.

Die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit wird bei Müller & Waldeck (2011) in Abhängigkeit von der Bodenart bestimmt. Weil jedoch vier Bodenarten in der Zuordnungsregel für die Zu- und Abschläge nicht gelistet sind, wurde eine expertenbasierte Ergänzung basierend auf Sand- und Tongehalten sowie Einordnung in das Feinbodendreieck nach BGR (2005) vorgenommen:

- Neue Bodenartgruppe mit S, Su2 und Sl2 mit neu definierten Zu- bzw. Abschlägen zur Berücksichtigung der BKF (BKF0 bis BKF2 = -1, BKF3 bis BKF8 = 0, BKF9 = +1, BKF10 = +2)
- Zuordnung der Bodenart Su3 zur bestehenden Bodenartgruppe mit Sl3 und St2.

Nach der Zuordnung einer Verdichtungsempfindlichkeitsstufe (VE) zu den Böden jeder Standorteinheit wird entsprechend der BKF für die Gegenwart (BKFi) und die Zukunft (BKFn/f) in jeder Standorteinheit ein Zu- bzw. Abschlag vorgenommen und die Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit (VVE) berechnet:

$$VVE = (VE \text{ +/- Korrekturwert zu BKFn/f}) - (VE \text{ +/- Korrekturwert zu BKFi})$$

Die anschließende Klassifikation der Vulnerabilität erfolgt nach Tabelle 45.

Tabelle 45: Klassifikation der Vulnerabilität von Böden durch Verdichtung (Veränderung der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit) im Rahmen des Klimawandels

Vulnerabilität	Vulnerabilitätsstufe	Bewertung	Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit <sup>1)</sup>
gering	1	positive oder keine Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit gegenüber der Gegenwart	$\geq 0$
mittel	2	negative Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit um eine Stufe gegenüber der Gegenwart	$= -1$
hoch	3	negative Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit um 2 und mehr Stufen gegenüber der Gegenwart	$\leq -2$

1) positive Veränderung bedeutet abnehmende und negative Veränderung zunehmende Verdichtungsempfindlichkeit,

### 3.3.7.2 Ergebnisse zur Vulnerabilitätsanalyse der Bodenverdichtung

Die Vulnerabilitätsanalyse spiegelt die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit im Sommerhalbjahr wider. Die höchste Vulnerabilität wurde bei der mittleren Stufe 2 für das Keuper-Lias-Land und die Bauland/Hohenlohe – Region beim 85. Perzentil der Nahprojektion berechnet. Eine hohe Vulnerabilität wird in keiner Region bei keiner Klimaprojektion erreicht.

Stellvertretend für die Situation wird vom Keuper-Lias-Land in Abbildung 20 das Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse für alle Klimaprojektionsvarianten dargestellt. Die höhere Vulnerabilität dieser Region gegenüber den andern LÖR wird in Abbildung 21 erkennbar. Hier ist die mittlere Wahrscheinlichkeitsvariante der Klimaprojektion beim 50. Perzentil für die nahe Zukunft und für die Variante mit den größten Veränderungen (85. Perzentil der Nahprojektion) dargestellt (Details siehe Anhangstabelle 10 und Anhangstabelle 11). Vergleichbar ist die Vulnerabilität beim 85. Perzentil der Fernprojektion. Beim 15. und 50. Perzentil der Nah- und Fernprojektion werden jedoch für alle landschaftsökologischen Regionen keine bis geringe Vulnerabilitäten erwartet. Diese Klassenstufe kann darüber hinaus sogar ein abnehmendes Verdichtungsrisiko beinhalten. So ist z.B. beim 15. Perzentil der Nahprojektion in der Unterland/Gäue – Region mit zunehmender Trockenheit der schluffigen Böden im Sommerhalbjahr auf einem Flächenanteile von über 75 % ein Rückgang der Verdichtungsempfindlichkeit zu erwarten.

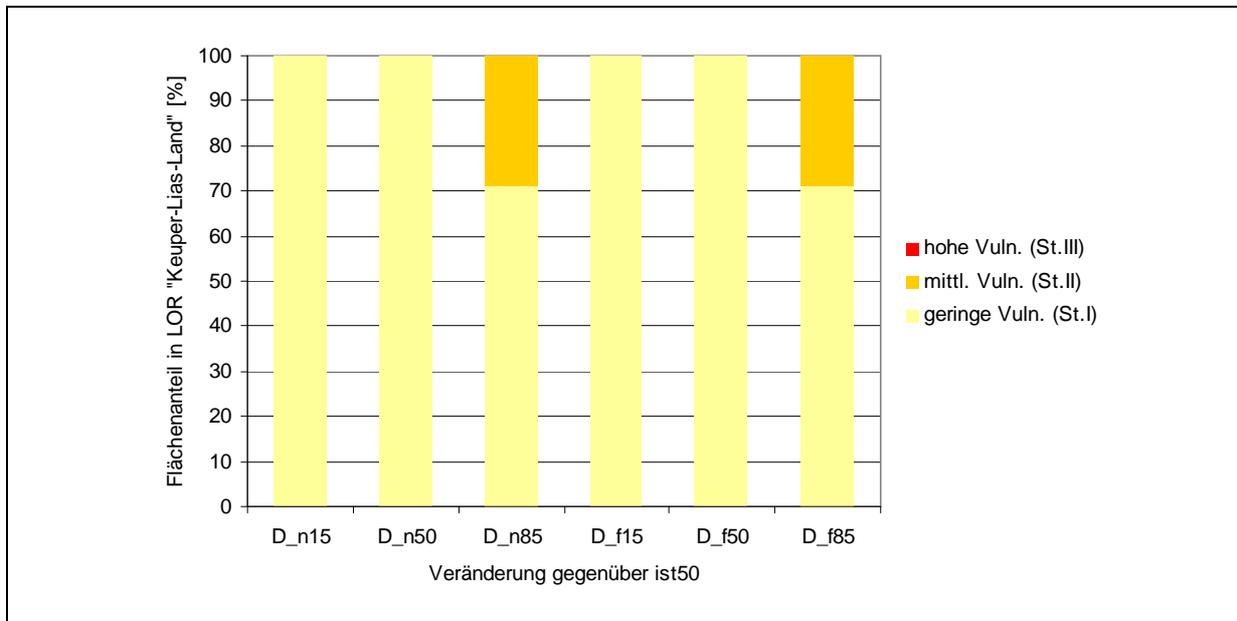


Abbildung 20: Variabilität der Flächenanteile mit unterschiedlicher Vulnerabilität von Böden durch Verdichtung gegenüber dem Klimawandel in Abhängigkeit der Klimaprojektionen am Beispiel der Region Keuper-Lias-Land, welche die höchste Vulnerabilität aufweist

Die Verteilung der mittel vulnerablen Bereiche innerhalb einer LÖR bleiben in Abbildung 21 jedoch unerkant. Deshalb wurden basierend auf dem räumlichen Verteilungsmuster von Böden und Landnutzung (Standortkomplexe) in der Tabelle 46 die Naturräume mit größeren Flächenanteilen an mittlerer Vulnerabilität beim ungünstigsten Szenario (85. Perzentil der Nahprojektion) aufgeführt sowie dem gegenwärtigen Verdichtungsrisiko gegenübergestellt. Die höchste Vulnerabilität aufgrund der Kombination von gegenwärtig hohem Verdichtungsrisiko und hoher Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel ergibt sich demnach z.B. für die Gebiete westliche Obere Gäue im Keuper-Lias-Land, Albuch und Härtsfeld oder Baar in der

Region Schwäbische Alb / Baar oder in einigen Naturräumen der Region Bauland/Hohenlohe. Gegenwärtig mittleres bis geringes Verdichtungsrisiko kombiniert mit einer mittleren Vulnerabilität sind vorrangig zu finden in einigen Naturräumen der Keuper-Lias-Landes (z.B. Voralb) und der Schwäbischen Alb / Baar (Lonetal-Flächenalb). Darüber hinaus weist die Region Schwäbische Alb / Baar gegenüber den anderen Regionen aufgrund der tonigen Böden und des kühl-feuchten Klimas gegenwärtig bereits die höchste Gefahr von Bodenverdichtungen auf, so dass eine weitere Zunahme des Risikos zu keiner höheren Gesamtklassifikation mehr führen kann.

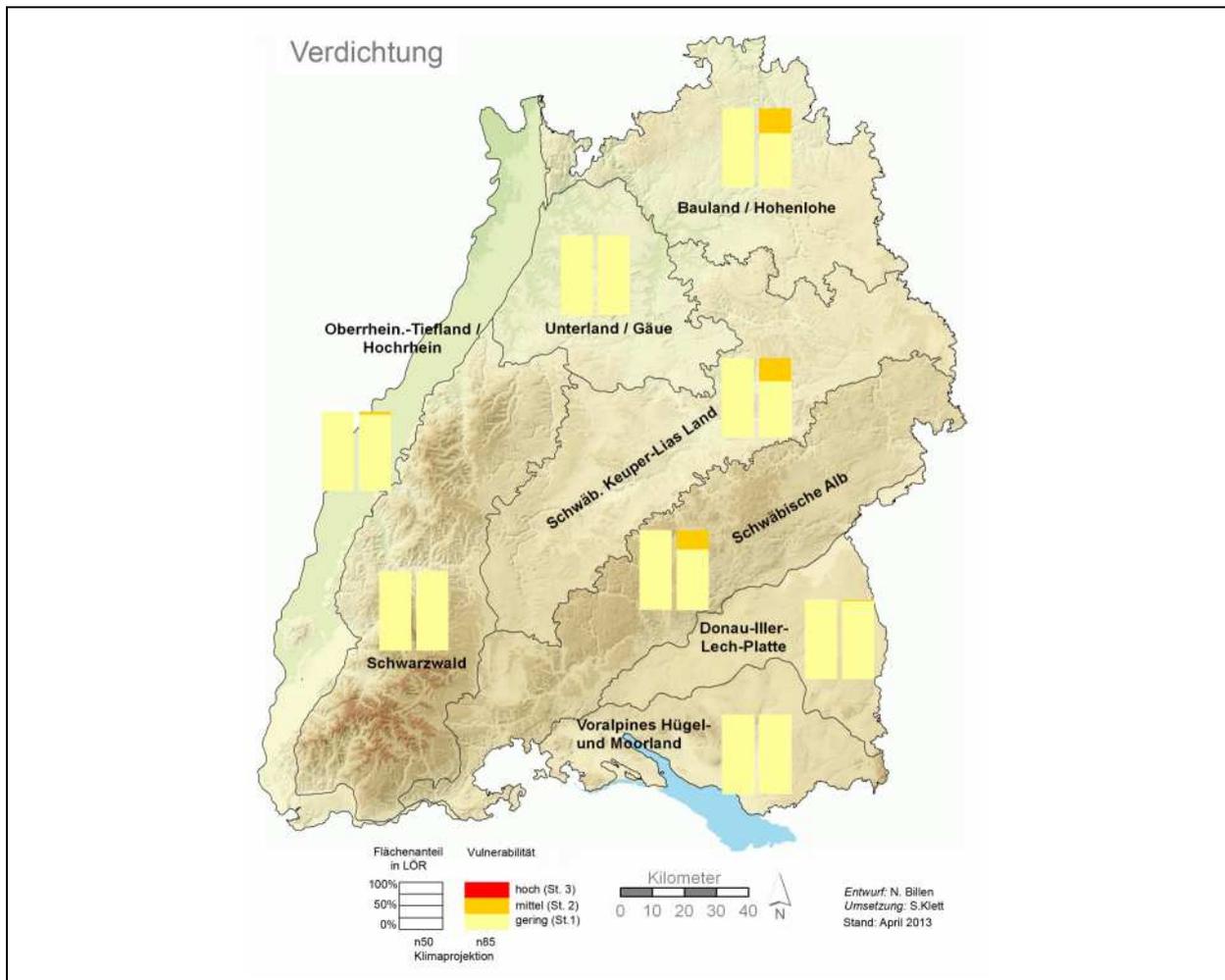


Abbildung 21: Vulnerabilität von Böden durch Bodenverdichtung (im Sommerhalbjahr) gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

Bei der aggregiert-gewichteten Zusammenfassung der unterschiedlichen Vulnerabilitäten in den einzelnen LÖR ergibt sich aufgrund der zumeist niedrigen Vulnerabilität bzw. der geringen Flächenanteile mit mittlerer Vulnerabilität für alle Regionen und somit auch der Landesfläche eine geringe Vulnerabilität (siehe Tabelle 47) bei allen Klimaprojektionen.

Tabelle 46: Naturräume in den Landschaftsökologischen Regionen mit gegenwärtig hohem Verdichtungsrisiko (Stufen 6 = äußerst hoch und 5 = hoch nach Müller & Waldeck 2011) und mittlerer Vulnerabilität auf mehr als 33 % der Fläche

LÖR-Nr.	Landschaftsökologische Region	Naturräume mit regionalen Risikobereichen	Gegenwärtig erhöhtes Risiko <sup>1)</sup>	Vulnerabilitätszunahme <sup>1)</sup>
1	Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	Freiburger Bucht	+	-
		Nördl. Oberrhein-Niederung	+	-
		Markgräfler Rheinebene	+	-
2	Unterland/Gäue	Neckarbecken	+	-
3	Schwarzwald	/	/	/
4	Voralpines Hügel- und Moorland	/	/	/
5	Donau-Iller-Lech	/	/	/
6	Schwäbische Alb / Baar	Lonetal-Flächenalb	-	+
		Albuch und Härtsfeld	+	+
		Baar	+	+
		alle anderen Naturräume	+	-
7	Keuper-Lias-Land	Obere Gäue (West)	+	+
		Voralb	-	+
8	Bauland/Hohenlohe	Tauberland	+	+
		Kocher-Jagst Ebene	+	+
		Hohenloher-Haller Ebene	-	+
		Bauland	-	+

1) + = zutreffend, - = unzutreffend, / = kein hohes Gegenwartsrisiko bzw. keine hohe Vulnerabilität

Insgesamt ergibt sich bei dem Teilbereich potenzielle Bodenverdichtung in drei Regionen (Schwäbische Alb / Baar, Keuper-Lias-Land, Bauland/Hohenlohe) auf weniger als 1/3 der Fläche höchstens eine mittlere Vulnerabilität beim 85. Perzentil der Nah- und Fernprojektion. Hierbei handelt es sich vorrangig um Naturräume mit einem großen Anteil an tonigeren Böden wie z.B. Pelosol-Braunerde oder Terra Fusca-Braunerde. Eine Abhängigkeit von der Landnutzung ist nicht erkennbar. In den anderen fünf Regionen dominiert fast flächendeckend eine geringe Vulnerabilität. Dies sind Regionen wie z.B. Ober-/Hochrhein, Schwarzwald oder Hügel-/Moorland mit vorherrschend sandigen, schluffigen oder lehmigen Böden wie z.B. Braunerden oder Parabraunerden, die tendenziell weniger verdichtungsempfindlich sind, insbesondere in Kombination mit zunehmender Sommertrockenheit wie z.B. in der Region Unterland/Gäue.

Tabelle 47: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen der Landschaftsökologischen Regionen für die potenzielle Bodenverdichtung (im Sommerhalbjahr) in Abhängigkeit der Klimaprojektionsvarianten

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	n50	n85	f50	f85
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1	1	1	1
Unterland/Gäue	2	1	1	1	1
Schwarzwald	3	1	1	1	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1	1	1	1
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1	1	1	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1	1	1	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	1	1	1
Bauland/Hohenlohe	8	1	1	1	1
Baden-Württemberg	1-8	1	1	1	1

### 3.3.7.3 Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich Verdichtung

Zum Teilbereich Bodenverdichtung ergibt sich im Durchschnitt eine geringe Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen in den landschaftsökologischen Regionen (siehe Tabelle 48). Die landschaftsunabhängige Dringlichkeitsbewertung der Gesamtfläche Baden-Württembergs wird mit dem Mittelwert aus den acht Regionen beschrieben, so dass auch hier nur eine geringe Dringlichkeit besteht. Im Detail ergibt sich jedoch in den Regionen Keuper-Lias-Land (Voralb) und Bauland/Hohenlohe aufgrund der tonigen Böden bereits in der nahen Zukunft eine mittlere Vulnerabilität, aus der auch eine mittlere Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen resultiert.

Tabelle 48: Regional differenzierte Dringlichkeit für Anpassungsstrategien beim Teilbereich potenzielle Bodenverdichtung

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste aggregierte Vulnerabilität	Klimaprojektionsrahmen	Flächenanteil mit hoher Vulnerabilität	gemittelte Dringlichkeit
Oberrhein.-Tiefeland+Hochrhein	1	1,04	n85	0,0	1
Unterland/Gäue	2	1,00	n85	0,0	1
Schwarzwald	3	1,00	n85	0,0	1
Voralpines Hügel- und Moorland	4	1,00	n85	0,0	1
Donau-Iller-Lech-Platte	5	1,01	n85	0,0	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1,24	n85	0,0	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1,29	n85	0,0	2
Bauland/Hohenlohe	8	1,32	n85	0,0	2
Baden-Württemberg	1-8	1,11	n85	0,0	1

### 3.3.7.4 Diskussion der Vulnerabilitätsanalyse zur Bodenverdichtung

Die Möglichkeit zur Prüfung der Ergebnis-**Plausibilität** ist stark eingeschränkt. Denn für die halbquantitative Vulnerabilitätsanalyse war lediglich ein Verfahren verfügbar, bei dem jedoch keine Winterfeuchteverhältnisse berücksichtigt werden, die jedoch einen maßgeblichen Einfluss haben. So hat auch z.B. LBEG (2009) die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit niedersächsischer Böden unter derzeitigen Klimabedingungen mit der Methodenbank des NI-BIS, das dem hier verwendeten Regelwerk von Müller & Waldeck (2011) entspricht, berechnet. Allerdings wird dort nur die aktuelle Gefährdung beschrieben, die ca. 1/3 der Landesfläche umfasst. Das Veränderungsrisiko als Vulnerabilität wird nicht dargestellt. Auch Böhm (2008) weist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieses Gutachtens darauf hin, dass die Gefahr einer Bodenverdichtung einerseits im Sommerhalbjahr abnehmen kann, andererseits im Winterhalbjahr aber zunehmen. Viele Studien und Berichte betrachten jedoch nur die kritische Phase im Winterhalbjahr und nicht die entgegengesetzte Entwicklung im Sommerhalbjahr (z.B. LABO 2010, LBEG 2009, Schuchardt et al. 2011). Eine Ausnahme findet sich jedoch bei UBA (2008). Hier wurde anhand weniger Modellstandorte die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit beim Klimawandel mit der gleichen Methode wie im vorliegenden Bericht ermittelt und ebenfalls keine Veränderung der Verdichtungsempfindlichkeit im Sommerhalbjahr festgestellt.

Der **Geltungsbereich** für die Vulnerabilitätsanalyse ist dadurch eingeschränkt, dass allein das Sommerhalbjahr mit dem gewählten Verfahren nach Müller & Waldeck (2011) berücksichtigt wird. Allerdings ist dieses Verfahren das einzige, welches ausgewählte Klimafaktoren berücksichtigt. Zusammengefasst gilt somit folgender Rahmen für den Geltungsbereich des gewählten Verfahrens:

- Die Methode wurde für Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung entwickelt. Die Übertragbarkeit auf Böden unter wald- und bauwirtschaftlicher Nutzung ist ungeprüft
- Die bodenkundliche Feuchtstufe als Eingangsgröße charakterisiert vorrangig die sommerlichen Wasserverhältnisse. Somit bleiben höhere Bodenfeuchten aufgrund erhöhter Winterniederschläge unberücksichtigt
- Die bodenkundlichen Feuchtestufen sind relativ grob klassifiziert und reagieren deshalb eher schwach auf veränderte Klimakennwerte
- Es bleibt unberücksichtigt, dass abnehmende Anzahl an Frosttagen die bodenstrukturfördernde Frostgare und die schadfreie Befahrbarkeit reduziert
- Die vermehrte Befahrung zu ungünstigen Zeitpunkten im Winterhalbjahr durch Land-, Forst- und Bauwirtschaft aufgrund verlängerter Vegetationsperiode bleibt unberücksichtigt.

### **3.3.7.5 Fazit zur Bodenverdichtung**

Im Rahmen des Klimawandels wird im Landesdurchschnitt mit einer geringen Vulnerabilität beim Risiko für Bodenverdichtungen im Sommerhalbjahr gerechnet. Lediglich in den Regionen Keuper-Lias-Land, Schwäbische Alb/Baar und Bauland/Hohenlohe zeichnet sich auf maximal 1/3 der Flächen einiger Naturräume mit tonigen Böden beim 85. Perzentil der Nah- und Fernprojektionen des Klimas eine mittlere Vulnerabilität ab, für die auch eine mittlere Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen besteht. In den anderen Regionen wie Ober-/Hochrhein, Schwarzwald oder Hügel-/Moorland mit vorherrschend sandigen, schluffigen oder lehmigen Böden, die tendenziell weniger verdichtungsempfindlich sind, ist eine geringe Vulnerabilität dominierend, für die keine Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen besteht. Dies gilt insbesondere in Kombination mit zunehmender Sommertrockenheit wie z.B. in der Region Unterland/Gäue, in der sich regional sogar eine Abnahme des Verdichtungsrisikos abzeichnet.

Die geringe Vulnerabilität, die in diesem Bericht ermittelt wurde, bestätigt tendenziell die zu meist qualitativen Schlussfolgerungen für Sommerhalbjahre in Berichten aus anderen Untersuchungen. Allerdings sind die Berechnungsalgorithmen und Annahmen für Baden-Württemberg nicht validiert, weisen eine mittlere Sensitivität auf und ist die Streuung und Richtungssicherheit des Klimasignals aus den Klimaprojektionen zur Wasserbilanz nur bedingt zufrieden stellend.

### **3.3.8 Gesamtvulnerabilität und –bewertung**

Für die zusammenführende Darstellung der Vulnerabilität wird in einem ersten Schritt von jedem Teilbereich die Klimaprojektion mit der höchsten Vulnerabilitätsstufe ausgewählt und einer gemeinsamen Tabelle zugeführt (siehe Tabelle 49). Im zweiten Schritt wird die Vulnerabilität auf Landesebene von jedem Teilbereich der Gesamtbewertung der Tabelle 50 zugeführt, ebenso die Dringlichkeit. Weil die möglichen Anpassungsstrategien zum Handlungsfeld Boden durch die nutzungsorientierten Handlungsfelder aufgezeigt werden, ergibt sich der Handlungsdruck aus der Perspektive des Handlungsfeldes Boden aus der Vulnerabilität und der Dringlichkeit (siehe Tabelle 50). In Abbildung 22 wird darüber hinaus für alle Teilbereiche nochmals die flächenmäßige Aufteilung von den drei Vulnerabilitätsstufen in den acht landschaftsökologischen Regionen bei den ungünstigsten Klimaprojektionen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 49: Die Gesamtvulnerabilität im Handlungsfeld Boden

Landschaftsökologische Region	LÖR Nr.	höchste Vulnerabilität bei Klimaprojektion...					
		f85 Erosion	f85 Auswaschung	f50 org. Substanz	f15/f85 <sup>1)</sup> Moorböden	f15 Bodenleben	f85 Verdichtung <sup>2)</sup>
Oberrhein. Tiefland+Hochrhein	1	3	2'	2'	3'	2'	1
Unterland/Gäue	2	3	2'	2'	-	1	1
Schwarzwald	3	1	1	3'	3'	1	1
Voralpines Hügel- u. Moorland	4	2	2'	3'	3'	1	1
Donau-Ille-Lech-Platte	5	1	2'	3'	3'	1	1
Schwäbische Alb/Baar	6	1	2'	3'	-	1	1
Schwäb.Keuper-Lias Land	7	1	2'	3'	-	1	1
Bauland/Hohenlohe	8	2	2'	2'	-	2'	1
Baden-Württemberg	BW	2	2'	3'	3'	1	1

1) f15 für Hochmoorböden, f85 für Niedermoorböden, Ober-/Hochrhein ohne Hochmoorböden

2) Gilt für Sommerhalbjahr

Insgesamt ergibt sich die höchste Vulnerabilität und somit auch die höchste Dringlichkeit für eine Anpassungsstrategie zu den beiden Teilbereichen organische Bodensubstanz und Moorböden, die gleichzeitig den engsten Bezug zum klimarelevanten CO<sub>2</sub> aufweisen. Aufgrund regionaler und lokaler Risikobereiche sollten aber auch die Teilbereiche Bodenerosion und Auswaschungsrisiko mit mittlerer bis hoher Dringlichkeit berücksichtigt werden. Deren niedrigere Bewertung hat sich aufgrund der zusammenfassenden und damit generalisierenden Klassifizierung ergeben, bei der die lokalen Risikobereiche unerkannt bleiben. Für die beiden Teilbereiche Bodenleben und Verdichtung wurde die geringste Dringlichkeit ermittelt, u.a. weil keine Risikobereiche mit hoher Vulnerabilität vorliegen. Dies resultiert möglicherweise aus dem verwendeten Berechnungs- und Bewertungsverfahren, das relativ unsensibel reagiert und auf ein Sommerhalbjahr beschränkt ist.

Tabelle 50: Gesamtbeurteilung auf baden-württembergischer Landesebene im Handlungsfeld Boden und vorläufige Querverweise zu den Handlungsfeldern mit geeigneten Anpassungsstrategien

	Vulnerabilität	Dringlichkeit	Anpassungsstrategie	Handlungsdruck <sup>1)</sup>
Erosion	2	2+	s. Landwirtschaft s. Forstwirtschaft s. Naturschutz s. Wasserwirtschaft s. Kapitel 4.1	2+
Auswaschung	2'	1+		1+
Humus	3'	3		3
Moorböden	3'	3		3
Bodenleben	1	1		1
Verdichtung <sup>2)</sup>	1	1		1

1) Aufgrund unbewerteter Anpassungsstrategien identisch mit Dringlichkeit, bei der die Vulnerabilität bereits berücksichtigt ist

2) Gilt für Sommerhalbjahr

+ = Regionale und lokale Risikobereiche weisen hohe Vulnerabilität und Dringlichkeit auf

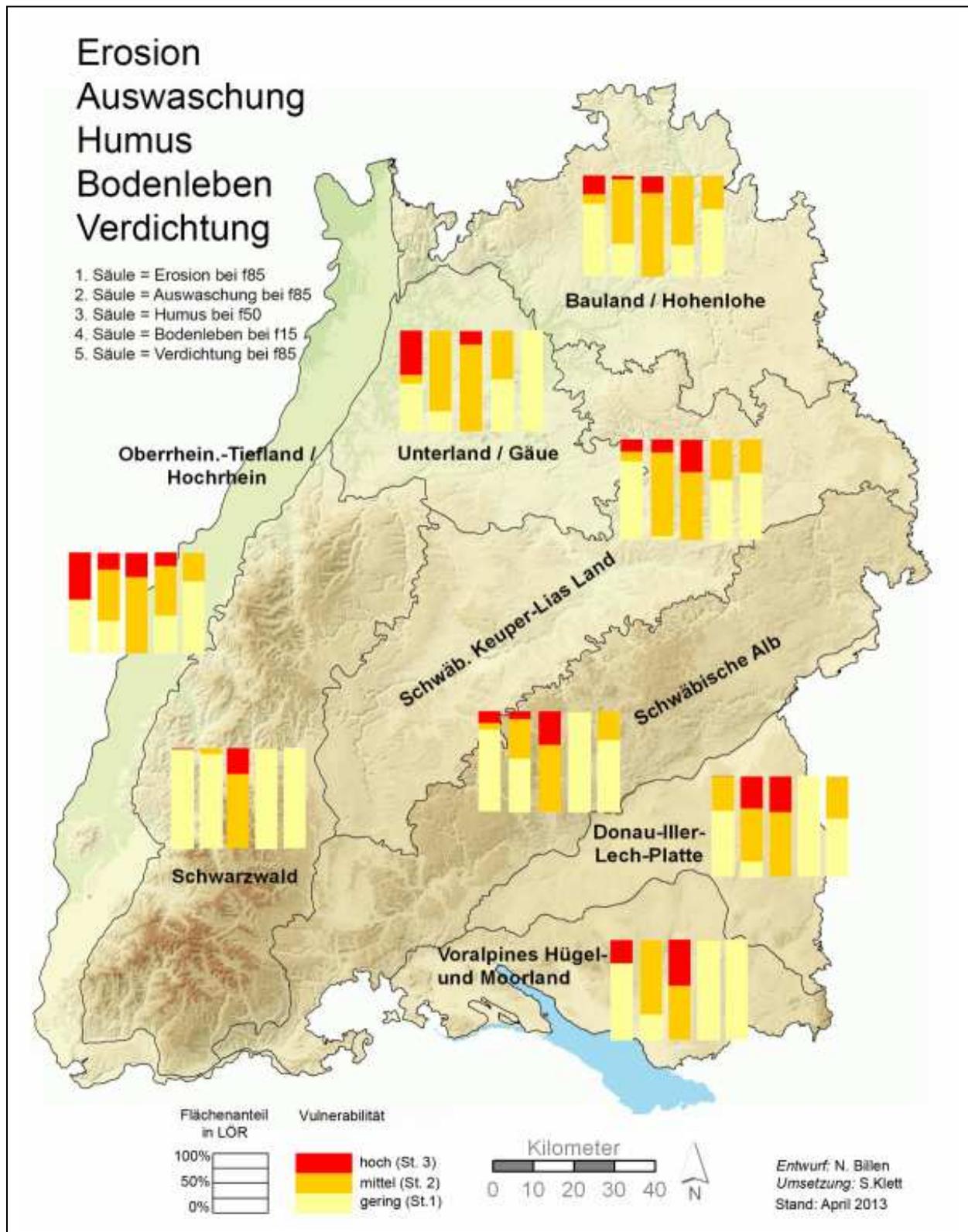


Abbildung 22: Die flächenmäßige Aufteilung der drei Vulnerabilitätsstufen in den acht landschaftsökologischen Regionen bei den ungünstigsten Klimaprojektionen (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

## 4 Wissenschaftlicher Hintergrund (Teil B)

### 4.1 Anpassungswissen

Das Anpassungswissen zum zukünftigen Schutz der Böden und ihrer Funktionen stützt sich zumeist auf Maßnahmen, die sich bereits in der Vergangenheit für den Bodenschutz bewährt haben. Weil diese Optionen handlungsorientiert sind, werden sie von den entsprechenden Handlungsfeldern beschrieben. In Tabelle 51 werden diejenigen Maßnahmen mittels Stichwort und Kurzbeschreibung vorgestellt, die in den Berichten der Handlungsfelder Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz und Wasserhaushalt mit einem direkten Querverweis zum Handlungsfeld Boden versehen sind bzw. bei denen darüber hinaus Wechselwirkungen mit Böden bestehen. Die in Tabelle 51 verwendeten Kurzbeschreibungen wurden aus den Maßnahmensteckbriefen der entsprechenden Handlungsfelder übernommen. Sie wurden um eine beispielsorientierte Bewertung von Chancen und Risiken für den Bodenschutz und –erhalt ergänzt, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Weitere Optionen für zusätzliche Maßnahmen aus Sicht des Handlungsfeldes Boden werden in Kapitel 4.3 genannt.

Die von den Handlungsfeldern Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz und Wasserhaushalt vorgeschlagenen Maßnahmen können auf die verschiedenen Teilbereiche des Handlungsfeldes Bodens positiv, neutral oder negativ wirken. Deshalb werden die tendenziellen Synergieeffekte oder weiterreichenden Chancen der ausgewählten Maßnahmen für die Belange des Handlungsfeldes Boden in der Tabelle 52 zusammengefasst dargestellt. Dabei handelt sich um eine qualitative Einschätzung unter generalisierender Berücksichtigung des aktuellen Wissensstands. Bei den Bewertungen wird eine erfolgreiche Maßnahmenumsetzung vorausgesetzt. Die Pfeile in Tabelle 52 weisen auf eine positive oder negative Wirkungsrichtung aber nicht auf den Wirkungsumfang der Maßnahmen im mittel- bis langfristigen Zeitraum der Klimaprojektionen hin. Außerdem unterliegen die Richtungen einer großen Variabilität bzw. Unsicherheit und können in Abhängigkeit von Standorteigenschaften und Qualität der Maßnahmenrealisierung im Einzelfall auch gegenläufig sein. So entfällt beispielsweise bei der konservierenden Bodenbearbeitung die Einarbeitung von Nährstoffen in den unteren Bereich der Ackerkrume, wodurch es dort zur Nährstoff- und Humusreduktion kommen kann. Auch bei den Bodenlebensgemeinschaften ist nicht von einer generellen Verbesserung des Lebensraums auszugehen, wie bei flachgrabenden Regenwürmern im Gegensatz zu tiefgrabenden beobachtet wurde. Darüber hinaus erfordert der Pflugverzicht zumeist auch den vermehrten Einsatz eines glyphosathaltigen Totalherbizids, dessen Wirkung auf Bodenlebensgemeinschaften, Bodenfruchtbarkeit und Wachstum bestimmter Pflanzen noch nicht abschließend geklärt ist.

Tabelle 51: Zusammenstellung der Maßnahmen aus den Handlungsfeldern Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz und Wasserhaushalt mit Querbezug zum Handlungsfeld Boden. Die Kurzbeschreibung wurde den Maßnahmensteckbriefen der entsprechenden Handlungsfelder (z.T. selektiv, siehe (...)) entnommen und um eine beispieldorientierte Bewertung der Chancen und Risiken für den Bodenschutz und –erhalt ergänzt

Handlungsfeld	
Stichwort	Kurzbeschreibung der Maßnahme im Bericht des Handlungsfeldes <i>Beispiele für Chancen und Risiken beim Bodenschutz / -erhalt</i>
Landwirtschaft	
konservierende Bodenbearbeitung	Konservierende Bodenbearbeitung: Mulchsaat und auf geeigneten Standorten und Betrieben Direktsaat statt wendender Bodenbearbeitung wie z.B. Pflugeinsatz [Maßnahmenblatt: Ackerbau / Blatt 1]. <i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch Bodenruhe und Bodenbedeckung die z.B. zu verringerter Bodenerosion und Verdichtungsneigung oder erhöhten Humusgehalt führen.</i>
Erweiterung der Fruchtfolge	Erweiterte Fruchtfolgen, Verwendung verschiedener Sorten pro Kulturart im Anbau: Statt nur ein bis drei Kulturarten pro Fruchtfolge werden 4-5 gliedrige Fruchtfolgen gefahren. Statt einer dominanten Hohertragsorte werden mehrere angebaut [Maßnahmenblatt: Ackerbau / Blatt 2]. <i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch verlängerte Bodenbedeckungsphasen sowie größerer Vielfalt bei Nährstoffentzügen und Pflanzenstreu die z.B. zu verringerter Bodenerosion und Auswaschungsgefährdung oder erhöhten Humusgehalt führen.</i>
Gezielte Grünlandverbesserung	Gezielte Grünlandverbesserung Verbesserung von durch Trockenheit oder Überschwemmung lückig gewordenen Grünlandnarben: In Zeiten des Klimawandels stehen für Verbesserungen wahrscheinlich nur noch sehr verkürzte Perioden mit optimalen Bedingungen zur Etablierung von Grünlandbeständen an bzw. die derzeitigen Methoden müssen zielgerichtet verändert werden. Neue, trockenheitsverträglichere Pflanzenarten, andere Düngesysteme und gezielte Maßnahmen der Folgenutzung sind erforderlich, um nachhaltig erfolgreich zu sein. Diese Methoden müssen erprobt und in die landwirtschaftliche Praxis transferiert werden [Maßnahmenblatt: Grünland / Blatt 9]. <i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch dichteren Pflanzenbestand und verbesserte Durchwurzelung die z.B. zu verringerter Auswaschungsgefährdung oder erhöhten Humusgehalt führen.</i>
Humusreproduktion	Humusreproduktion: Fruchtfolgegestaltung mit insgesamt ausgeglichener Humusbilanz (Integration Leguminosen), Belassen von Ernteresten im Boden, Zufuhr org. Substanz über Düngung (Wirtschaftsdünger, Gründüngung, Gärreste, Kompost), konservierende Bodenbearbeitung (Humus im Oberboden) [Maßnahmenblatt: Ackerbau / Humusreproduktion]. <i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch günstige Bodenstruktur, Wasser-/Nährstoffhaushalt und bodenbiologische Aktivität. Erhöhte Aktivität kann ggf. aber zu verstärkter Mineralisierung und Nährstoffauswaschung führen.</i>
Begrünung / Landschaftselemente	Erosionsschutz durch Begrünung und Landschaftselemente: Kombination verschiedener Maßnahmen je nach Standort, Betrieb und angebauten Kulturen: Begrünungsmaßnahmen in Dauerkulturen, Zwischenfrüchte, Untersaat, begrünte Tiefenlinien, Belassen von Ernteresten oder Aufbringen von Mulch, Fruchtfolgegestaltung mit dem Ziel einer langen Bodenbedeckung, Querbewirtschaftung am Hang, Teilung von Hängen und Schlägen durch Anbau unterschiedlicher Kulturen, Anlage linearer Landschaftselemente (Terrassen, Hecken, Randstreifen etc.), Rückhalteeinrichtungen, konservierende Bodenbearbeitung [Maßnahmenblatt: Ackerbau / Erosionsschutz durch Begrünung und Landschaftselemente], vgl. Naturschutz - Pufferzonen / Schutzstreifen. <i>Bodenschutz ist nur kleinflächig oder punktuell verbessert. Der Sediment und Nähr-/Schadstoffaustrag in Gewässer wird jedoch verringert, Bodenruhe und ganzjährige Bodenbedeckung verbessern lokal z.B. die Bodenstruktur, Humusgehalt und Wasserinfiltration.</i>

Forstwirtschaft	
Naturnaher Waldbau für Bodenfruchtbarkeit	<p>Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Verbesserung Durchwurzelung: Weiterentwicklung des Konzeptes Naturnaher Waldbau mit Fokus auf Bestandstypen, die zu Humusverbesserung und Versauerungsminderung auf gefährdeten Waldstandorten beitragen [Maßnahmenblatt 2: Standort und Baumwachstum / Detailziel Bodenfruchtbarkeit].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch Verbesserung des Lebensraums für Bodenorganismen oder der Humusqualität aufgrund größerer Vielfalt der Pflanzenstreu. Dadurch auch reduzierte Nähr- und Schadstoffauswaschung.</i></p>
standortdifferenzierte Kalkung	<p>Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Verbesserung Durchwurzelung: Standortdifferenzierte Kalkung als Stabilisierungsmaßnahme auf unnatürlich stark versauerten Flächen mit trockenheitsgefährdeten Waldbeständen. Im Zuge der Bodenschutzkalkung kann bei nachgewiesenem Kaliummangel die Verabeichung ernährungswirksamer Kaliumträger sinnvoll sein [Maßnahmenblatt 7: Standort und Baumwachstum / Detailziel Bodenfruchtbarkeit].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch Strukturstabilisierung und günstigerem Lebensraum für Bodenorganismen, was kurzfristig jedoch zu verstärkter Humus-/Torf-Mineralisierung und Auswaschung freigesetzter Stoffe führen kann. Kalkung von Moorböden darf nicht stattfinden.</i></p>
Stabilisierung von Biotopen	<p>Pflegemaßnahmen zur Stabilisierung der Biotope und Lebensstätten und Verhinderung massiver Beeinträchtigungen: Im Biotopverbund erforderlichenfalls Durchführung von Pflegemaßnahmen zur Entwicklung oder Erhaltung eines guten Erhaltungszustandes mittels einer Optimierung der Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur z.B. durch (...) Verhinderung massiver Beeinträchtigungen durch Wegebau, Entwässerung und Stoffeinträge (z.B. Eutrophierung; Kalkung) (...) Moorbülder: Erhaltung und womöglich Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushalts durch Beendigung von Entwässerungen, Schließen von Gräben, Verringerung bzw. Beendigung von Wasserentnahmen, Entfernung von unerwünschten Gehölzen (Pumpwirkung); Verzicht auf den Wasserhaushalt beeinträchtigende Freizeit- und Bewirtschaftungsaktivitäten (Wegebau, schwere Maschinen, Trittschäden...) [Maßnahmenblatt 12: Arten- und Lebensräume].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell leicht verbessert z.B. durch wiedervernässte Moorböden oder geringere Flächeninanspruchnahme für Infrastruktur. Evtl. Verschiebungen und neues Gleichgewicht z.B. bei Bodenlebensgemeinschaften.</i></p>
Monitoring (u.a. Bodenzustand)	<p>Monitoring: Fortführung von Langzeitbeobachtungen: Fortführung von Langzeitbeobachtungen zur Analyse der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen dem Wachstum und Absterben von Waldbäumen und den einwirkenden Klimafaktoren sowie des Wald- und Bodenzustandes [Maßnahmenblatt 5: Standort- und Baumwachstum].</p> <p><i>Bodenschutz wird höchstens indirekt erreicht durch nachgelagerte Maßnahmenrealisierung, die aus den Ergebnissen des Monitorings abzuleiten sind.</i></p>

Naturschutz	
Naturnaher Wasserhaushalt	<p>Förderung der allgemeinen Anpassungsfähigkeit von klimasensitiven und gefährdeten Arten: Die Maßnahmen umfassen auch (...) sowie die Wiederherstellung eines naturnahen Wasserhaushalts für Arten, die auf wasserabhängigen Biotop- und Ökosystem-Typen wie z. B. Moore, Nasswiesen, Streuwiesen, Feucht- und Sumpfwälder, Weich- und Hartholzauenwälder, Altarme und Altwässer angewiesen sind. [Maßnahmenblatt: Arten / M2].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell leicht verbessert, sofern die Maßnahme auf terrestrischen Flächen umgesetzt wird, z.B. durch wiedervernässte Moorböden. Ansonsten z.B. bei zukünftig feuchten Böden Verbesserung für Bodenlebensgemeinschaften, bei zukünftig nassen Böden aber Verschlechterung.</i></p>
Renaturierung von Mooren	<p>Die Intensivierung der Renaturierungsmaßnahmen (im Rahmen der zu erstellenden Moorschutz-Konzeption) dient der Erhaltung oder Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushalts von Mooren und Moorresten (auch degradiertes) mit dem Ziel der Wiederaufnahme des Torfwachstums, durch ein Bündel von Maßnahmen (z. B. Beendigung von Entwässerungen; Abdichtung, Schließen von Gräben, Verringerung bzw. Beendigung von Wasserentnahmen, Berücksichtigung des hydrologischen Einzugsgebiets). [Maßnahmenblatt: Vielfalt der Standorte erhalten / Moore – M4].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert z.B. durch wiedervernässte und damit wachsende Moorböden. Evtl. Verschiebungen und neues Gleichgewicht z.B. bei Bodenlebensgemeinschaften oder zunehmendes Verdichtungsrisiko, falls Pflegemaßnahmen auf nassen Moorböden durchgeführt werden.</i></p>
Förderung extensiver Nutzung	<p>Förderung der allgemeinen Anpassungsfähigkeit von klimasensitiven und gefährdeten Arten: Auch die Förderung spezifischer extensiver Nutzungen dient der Erhöhung der allgemeinen Anpassungsfähigkeit von gefährdeten Arten, z. B. Erhaltung und Förderung kleinräumig differenzierter Nutzungen in extensiver Form in Offenland und Wald, die den Fortbestand seltener oder hochgradig gefährdeter Arten und ihrer Lebensräume gewährleisten (z. B. feuchte bis nasse und auch trockene Wiesen, Bergwiesen, extensiv genutztes gemähtes oder beweidetes Grünland mittlerer Standorte; Nieder- oder Mittelwaldwirtschaft etc.). [Maßnahmenblatt: Arten - M2].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert in den extensivierten Flächen z.B. durch Bodenruhe, ganzjährige Pflanzenbedeckung oder verringerten Nährstoffeintrag, die z.B. zu erhöhtem Humusgehalt oder verringerter Nähr-/Schadstoffauswaschung führen. Ertragsausfälle werden aber ggf. durch intensivierete Bewirtschaftung anderer Flächen ausgeglichen, so dass Bodenschutz insgesamt reduziert wird.</i></p>
Pufferzonen / Schutzstreifen	<p>Verstärkte Umsetzung von Maßnahmen zum Erosionsschutz und zur Ausweisung von Pufferzonen oder Pufferstreifen, v. a. in besonders betroffenen Landesteilen mit hohem Anteil an Löß-Böden und Hanglagen. Insbesondere beinhaltet die Maßnahme eine bessere „Pufferung“ von nährstoffarmen Biototypen (nährstoffarmes feuchtes und nasses Grünland, Niedermoore, Riede und Röhrichte, Sümpfe, nährstoffarme Standgewässer aller Art) sowie Schutzgebieten (Natura 2000, NSG, FND), um die Standorte für nährstoffliebende Arten und Biototypen bzw. FFH-Lebensraumtypen zu erhalten. [Maßnahmenblatt: Vielfalt der Standorte erhalten / Wasserabhängige Lebensräume – M15], vgl. Landwirtschaft - Begrünung / Landschaftselemente.</p> <p><i>Bodenschutz ist nur sehr kleinflächig oder punktuell verbessert. Der Sediment und Nähr-/Schadstoffaustrag in Gewässer wird jedoch verringert, Bodenruhe und ganzjährige Bodenbedeckung verbessern lokal z.B. die Bodenstruktur, Humusgehalt und Wasserinfiltration.</i></p>

Naturschutz	
Bannwald	<p>Verstärkte Ausweisung von Waldentwicklungsflächen: Eine hohe Stabilität der künftigen Wälder könnte mit Baumarten erreicht werden, welche sich stärker an kleinräumig unterschiedlichen standörtlichen Bedingungen orientieren. Die Heterogenität von Waldökosystemen sollte daher gezielt gefördert werden. Hierzu dienen zwei Teil-Maßnahmen (...) b) Verstärkte Ausweisung von Flächen für ungestörte Entwicklungen, z. B. Erhöhung der Zielvorgaben für Bannwaldflächen bzw. Prozessschutzflächen [Maßnahmenblatt: Vielfalt der Standorte erhalten / Wald – M12].</p> <p><i>Bodenschutz ist tendenziell verbessert, denn Bodenruhe und ganzjährige Bodenbedeckung verbessern z.B. Bodenstruktur, Lebensraum für Bodenorganismen und Humusqualität, deren Entwicklung aber u.a. abhängig ist von aktuellem und zukünftigem Baumartenbestand.</i></p>
Stärkung Schutzgebietssystem	<p>Schutzgebiete als Kernflächen des Biotopverbunds erhalten: Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung des Schutzgebietssystems als Ganzes und von einzelnen Schutzgebieten, die Umsetzung von Pflegemaßnahmen sowie die wiederholte Überprüfung der Management- oder Pflegemaßnahmen und ihrer Wirkungen, und die ggf. erforderliche Optimierung von Maßnahmen. [Maßnahmenblatt: Stärkung des Schutzgebietssystems und des Biotopverbunds – M8].</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert in den Schutzgebieten z.B. durch Bodenruhe, ganzjährige Pflanzenbedeckung oder verringerte Nähr-/Schadstoffeinträgen die z.B. zu Bodenstrukturstabilisierung, erhöhten Humusgehalten oder verringerter Nähr-/Schadstoffauswaschung führen. Ertragsausfälle werden aber ggf. durch intensivierete Bewirtschaftung anderer Flächen ausgeglichen, so dass Bodenschutz reduziert wird.</i></p>
Wasserhaushalt	
Verminderung Oberflächenabfluss	<p>Durch dezentrale Versickerung und eine Verminderung des Oberflächenabflusses kann die Grundwasserneubildung gefördert werden.</p> <p><i>Bodenschutz tendenziell verbessert, falls großflächige Realisierung von Maßnahmen aus Land-/Forstwirtschaft und Naturschutz wie z.B. reduzierte Bodenbearbeitung, Stabilisierung von Biotopen oder Flächenkauf, die dann z.B. Erosion verringern oder Lebensraum für Bodenorganismen verbessern. Falls hohe Nähr-/Schadstoffgehalte in Böden vorliegen, steigt deren Auswaschungsrisiko.</i></p>
dezentrale Versickerung	<p>Durch dezentrale Versickerung und eine Verminderung des Oberflächenabflusses kann die Grundwasserneubildung gefördert werden.</p> <p><i>Bodenschutz ist nur sehr kleinflächig oder punktuell verbessert. Maßnahmen wie z.B. dezentrale Versickerung in lokalen Mulden oder Schutzstreifen an Ackerrändern sind zwar nicht bodenflächendeckend, der Sediment und Nähr-/Schadstoffaustrag in Gewässer wird aber verringert. Falls sich z.B. hohe Nähr-/Schadstoffgehalte mit Bodenabtrag in Sickermulden etc. anreichern, steigt deren Auswaschungsrisiko.</i></p>
Natürlicher Wasserrückhalt	<p>Durch Freihaltung und Wiederanbindung von Auen kann der natürliche Hochwasserrückhalt gefördert werden. Überschwemmungsgebiete können als natürliche Retentionsflächen dienen (...) Deichrückverlegungen können zu einer natürlicheren Gewässerentwicklung beitragen. Polderflächen, die durch ökologische Flutungen naturnah gestaltet werden, verbessern weiter den Rückhalt in der Fläche (...) Durch die Förderung von Aue, naturnahen Überflutungsflächen sowie forstwirtschaftlichen Maßnahmen kann der Rückhalt des Wassers in der Fläche gefördert werden (...) Eine naturnahe Gewässerstruktur kann die Resilienz gegenüber Hoch- und Niedrigwasserereignissen verbessern. Sie unterstützt den natürlichen Wasserrückhalt.</p> <p><i>Bodenschutz ist lokal verbessert, sofern in den natürlichen Rückhalteräumen z.B. Bodenruhe und ganzjährige Bodenbedeckung durch forst- bzw. landwirtschaftliche Pflanzen oder natürliche Vegetation gewährleistet ist. Dies führt z.B. zu Bodenstrukturstabilisierung oder erhöhtem Humusgehalt. Falls sich hohe Nähr-/Schadstoffgehalte mit Sedimenteintrag anreichern, steigt deren Auswaschungsrisiko.</i></p>

Tabelle 52: Mittel- bis langfristige Wirkungstendenzen von Maßnahmen auf Böden in den Handlungsfeldern Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz und Wasserhaushalt. Gelistet sind nur die Maßnahmen, die in den Berichten der Handlungsfelder mit einem direkten Querverweis zum Handlungsfeld Boden versehen worden sind bzw. bei denen darüber hinaus Querbezüge bestehen

Handlungsstrategie Handlungsfeld	Maßnahme	Eignung für Boden-Teilbereich					
		Erosion	Auswaschung	Humus	Moorböden	Bodenleben <sup>3)</sup>	Verdichtung
Landwirtschaft	konservierende Bodenbearbeitung	↑	→	↑	→	↑	↑
	Erweiterung der Fruchtfolge	↑	↑	↑	→	↑	↑
	Gezielte Grünlandverbesserung	→	↑	↑	→	↑	↑
	Humusreproduktion	↑	↑↓	↑	→/↓ <sup>4)</sup>	→	↑
	Begrünung / Landschaftselemente	↑	→	↑	↑	↑	↑
Forstwirtschaft	Naturnaher Waldbau f. Bodenfruchtbarkeit	→	↑	↑↓	↑	↑	○
	standortdifferenzierte Kalkung	↑	↑	→	↓ <sup>5)</sup>	↑	↑
	Stabilisierung von Biotopen	→	↑↓	→	↑	→	→
	Monitoring (u.a. Bodenzustand)	-	-	-	-	-	-
Naturschutz	naturnaher Wasserhaushalt	-	↑↓	→	↑	↑↓	↑↓
	Renaturierung von Mooren	-	↑↓	-	↑	→	↑↓
	Förderung extensiver Nutzung	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑
	Pufferzonen / Schutzstreifen <sup>1)</sup>	↑	→	↑	↑	↑	↑
	Bannwald	↑	○	↑↓	↑	↑↓	↑
	Stärkung Schutzgebietssystem <sup>1)</sup>	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Wasserhaushalt <sup>2)</sup>	Verminderung Oberflächenabfluss	↑	↓	↑	-	↑	↑↓
	dezentrale Versickerung	↑↓	↓	○	-	○	↑↓
	Natürlicher Wasserrückhalt	↑↓	↓	↑	↑	↑	↑↓

↑ = tendenziell positive Wirkung      ↓ = tendenziell negative Wirkung

→ = tendenziell neutrale bis leicht positive Wirkung      ↑↓ = positive oder negative Wirkung, Einzelfallabhängig

○ = keine Angabe, da größere Kenntnislücken bei den Wirkungszusammenhängen

- = zumeist ohne direkte Wirkung für den Bodenschutz

1) bietet Chancen bei Integration der Belange des Bodenschutzes

2) Maßnahmenauswahl basierend auf Zwischenbericht des Handlungsfeldes „Wasserhaushalt“ vom 11.3.2013, die Maßnahmenbewertung bezieht sich nur auf die Böden der beanspruchten Freiflächen

3) betrachtet wird der Lebensraum einer Bodenlebensgemeinschaft auf qualitativer Ebene. Die Diversität oder die Reaktion ausgewählter Indikatorarten kann mit dem gewählten Verfahren kaum bewertet werden

4) organische Düngung kann Torfmineralisierung verringern, mineralische Düngung erhöhen und deshalb negativer wirken

5) Moorböden sind zwingend von einer Kalkung auszunehmen

Im Handlungsfeld Boden weisen einige der vorgestellten Maßnahmen aus den anderen, nutzungsorientierten Handlungsfeldern Synergieeffekte bzw. starke Überlappungen auf. Hier sollte eine gemeinsame, d.h. abgestimmte Realisierung angestrebt werden. Weiterhin ist die Wirkung einiger Maßnahmen großflächig und deshalb von besonderer Bedeutung für einen flächendeckenden Bodenschutz. Andere Maßnahmen werden hingegen mittel bis kleinflächig umgesetzt, so dass hier zielgerichtet auch auf lokale Risikobereiche reagiert werden kann. Aus diesen Gründen wurde abschließend eine qualitative Zusammenstellung der 10 Maßnahmen mit den summarisch besten Wirkungspotenzialen vorgenommen (siehe Tabelle 53).

Tabelle 53: Übersicht zu den 10 Maßnahmen mit den summarisch am höchsten eingeschätzten Wirkungspotenzialen zur Anpassung an den Klimawandel für das Handlungsfeld Boden

potenzieller Flächenbezug	Maßnahme	Handlungsfeld
großflächig	konservierende Bodenbearbeitung + Verminderung Oberflächenabfluss	Landwirtschaft + Wasserhaushalt
	Erweiterung der Fruchtfolge + Humusreproduktion + naturnaher Waldbau	Landwirtschaft + Landwirtschaft + Forstwirtschaft
mittelflächig - kleinflächig	Begrünung / Landschaftselemente + Pufferzonen / Schutzstreifen	Landwirtschaft + Naturschutz
	Förderung extensiver Nutzung + Stärkung Schutzgebietssystem	Naturschutz + Naturschutz
	standortdifferenzierte Kalkung	Forstwirtschaft

## 4.2 Finanzielle und gesamtökonomische Aspekte der Anpassung

Zu den finanziellen und gesamtökonomischen Aspekten der Anpassungsstrategien wird auf die Berichte der Handlungsfelder Landwirtschaft (Flaig 2013), Naturschutz (Schlumprecht et al. 2013), Forstwirtschaft (Unselde et al. 2013) und Wasserwirtschaft (Dittmer et al. 2013) verwiesen.

## 4.3 Beschreibung von weiteren Anpassungsoptionen

### 4.3.1 Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen

Aus Sicht des Handlungsfeldes Boden sollten die in Kapitel 4.1 genannten Anpassungsmaßnahmen um weitere Maßnahmen ergänzt werden, die einen engen Bezug zu einigen der in Kapitel 3.3 vorgestellten Teilbereiche aufweisen.

#### **4.3.1.1 Bodenkundliche Baubegleitung**

Auch zukünftig wird Bodenverbrauch und Bodenbelastung durch anhaltende Bautätigkeit zunehmen. Besonders bei den 85. Perzentilen der Klimaprojektionen ist in den milderen Winterhalbjahren zunehmend mit feuchteren und nicht gefrorenen Böden zu rechnen. Deshalb ist zukünftig ein besonders sorgfältiger Umgang mit Bodenaushub erforderlich, um Strukturschäden oder Humusverlust von Böden zu minimieren. Damit können die Bodenfunktionen wie z.B. „Ausgleich im Wasserkreislauf“ oder „Lebensraum für Bodenorganismen“ gesichert werden. Weiterhin besteht aufgrund der feuchteren Böden die Gefahr von zunehmender Bodenverdichtung in Baustellenbereichen. In Kombination mit den im Klimawandel zunehmenden Starkniederschlagsereignissen führt dies zu verstärktem Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit besonders schädlichen Wirkungen in Baustellen oder direkt nach abgeschlossenen und deshalb häufig noch ungeschützten Baumaßnahmen sowie angrenzenden Bereichen. Durch eine rechtzeitig greifende und fachtechnisch fundierte Baubegleitung können die Schadwirkungen im Konsens mit den Bauträgern minimiert und Folgekosten sogar vermieden werden, wie gegenwärtig schon Beispiele in der Schweiz zeigen (siehe auch Kapitel 3.3.7).

#### **4.3.1.2 Flächenmanagement**

Siedlungsentwicklung verbraucht auch zukünftig Böden als nicht erneuerbare Ressource. Damit gehen zunehmend Bodenfunktionen verloren, die im Rahmen der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel eine wichtige Rolle übernehmen könnten. So sind z.B. aufgrund von Versiegelung weniger Böden für die Aufnahme und den Rückhalt von Niederschlagswasser verfügbar, das in Menge und Intensität insbesondere bei den 85. Perzentilen der Klimaprojektionen zunimmt. Die Leistung für den Hochwasserschutz nimmt somit ab. Ebenso nimmt die Kühlleistung von Böden bei zusätzlicher Flächeninanspruchnahme ab, was bei zunehmenden Temperaturen besonders nachteilig in Siedlungsbereichen ist. Die Kühlleistung ist reduziert, weil weniger Niederschlagswasser in die Böden infiltriert und somit für die kühlende Evapotranspiration fehlt. Weiterhin wird die Atmung der Böden und des Bodenlebens durch Flächeninanspruchnahme unterbunden, so dass die Ausgleichs- und Pufferfunktion für Treibhausgase wie CO<sub>2</sub> entfällt. Deshalb sollten zukünftig bei der Raumordnung auch verstärkt die Instrumente zur Bodenfunktionsbewertung eingesetzt werden, so dass die Leistungsfähigkeit von Böden ein Entscheidungskriterium für das moderne Flächenmanagement wird und mögliche Kosten für Anpassungs- und Ausgleichsmaßnahmen beim Klimawandel reduziert werden (siehe z.B. TUSEC-IP 2006).

### 4.3.1.3 Bodenschutzgesetz

Die Festlegung von Anpassungsoptionen in Bodenschutzgesetz oder –verordnung kann die Maßnahmenumsetzung in allen diskutierten Teilbereichen befördern. Deshalb wird von UBA (2012) auch eine Integration folgender Aspekte vorgeschlagen:

- Schutz, Erhalt oder die (Wieder)Herstellung der Kohlenstoffspeicherfunktion des Bodens (z.B. durch den Erhalt von Mooren)
- Schutz, Erhalt oder die (Wieder)Herstellung der Kühlfunktion des Bodens (z.B. durch Entsiegelung)
- Schutz des Bodens vor den negativen Folgen des Klimawandels (z.B. Erosion).

In den bestehenden Bodenschutzgesetzen des Bundes und des Landes Baden-Württemberg sind zwar einige Absätze enthalten, die zumindest indirekt eine Anpassungsoption an den Klimawandel umfassen wie z.B. §2 des LBodSchAG „...der sparsame, schonende und haus-hälterische Umgang mit Boden...“ zur Prüfung der Flächeninanspruchnahme. Oder §2 (5) des LBodSchAG „Die Vermittlung der Grundsätze der guten fachlichen Praxis in der land-wirtschaftlichen Bodennutzung nach § 17 Abs. 1 Satz 2 BBodSchG...“ zur Vermeidung von Erosion. Die Verankerung und Konkretisierung der oben genannten Schutz- und Anpassungsziele zunächst im Bodenschutzgesetz des Bundes würden die Möglichkeiten zur Um-setzung von Maßnahmen erleichtern.

Weitere Anpassungsoptionen wie „Ergänzung der Bodenfunktionen um die Klimafunktion des Bodens sowie die notwendige Konkretisierung im BBodSchG und der BBodSchV“, „Schutz hydromorpher Böden“, „Flächenmanagement oder Berücksichtigung der Bodenfunk-tion Kohlenstoffsенке in Planungs- und Genehmigungsverfahren“ würden die Möglichkeiten zur Umsetzung von Maßnahmen noch weiter konkretisieren. Auf Bundesebene wurden des-halb inzwischen auch die fachlichen und rechtlichen Defizite und Potenziale analysiert, um auch hierbei zumindest mittelfristig eine Integration in die Gesetzgebung zu ermöglichen (UBA 2012b, Dahlmann et al. 2012). Die hohe Vulnerabilität der Teilbereiche „organische Bodensubstanz“ und „Moorböden“ (siehe Kapitel 3.3.4 und 3.3.5), die in enger Wechselwir-kung mit dem Klimarelevanten CO<sub>2</sub> stehen, unterstreichen nochmals besonders die Bedeu-tung einer verbindlichen Festschreibung. Inwiefern eine Integration der in diesem Abschnitt genannten Belange in das Landesrecht möglich ist, sollte zielgerichtet analysiert werden.

### 4.3.2 Ausgewählte Ergänzungsmaßnahmen für Boden-Teilbereiche

Zu Anpassungs- und Schutzmaßnahmen bei den Teilbereichen Bodenerosion durch Wasser, Auswaschung nicht sorbierbarer Stoffe und organische Bodensubstanz liegen zahlreiche Studien und Ratgeber vor u.a. auch von Landesfachämtern, die leicht zu recherchieren sind und deshalb an dieser Stelle nicht zitiert werden.

#### 4.3.2.1 *Ergänzungsmaßnahmen für Moorböden*

Die Vulnerabilitätsschätzung hat die primäre Gefährdung von Moorböden im Sinne eines Torfverlustes durch die aktuelle Landnutzung aufgezeigt. Sekundär kann diese durch den Klimawandel verstärkt werden. Besonders stark betroffen hiervon sind Moorböden mit weniger als 150 cm Torfmächtigkeit in Randlagen und weniger stark solche mit mächtigeren Torfschichten im Zentrum der Moore. Deshalb und aufgrund der unzähligen und heterogenen Moore in Baden-Württemberg sind flächendeckende Einheitsmaßnahmen nicht realisierbar. Somit sind im Vorfeld einer Maßnahmenumsetzung die technischen und/oder topografischen Restriktionen auf lokaler Ebene zu prüfen.

Die erste Säule der Anpassungsmaßnahmen ist die Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushalts bzw. die Wiedervernässung und wird vom Handlungsfeld Naturschutz beschrieben. Die Veränderung der Landnutzung ist eine zweite Säule der Anpassungsmaßnahmen, die aber von der Vernässung stark abhängig ist:

- Eine Intensivierung der Moorbewirtschaftung, z.B. durch Erweiterung von Entwässerungsgräben oder Grünlandumbruch sollte dringend vermieden werden
- Die Extensivierung durch Umwandlung in Grünland oder Weideland oder eine reduzierte Bewirtschaftungsintensität vorhandenen Grünlands sind Maßnahmenoptionen, falls eine lokale Vernässung nicht erreicht werden kann (BfN 2010), z.B. aufgrund hydrologisch-technischer oder gesellschaftlicher Barrieren. Die hierbei beobachtete Reduktion von Treibhausgasemissionen (Drösler et al. 2011) weist auch auf einen verringerten Torfschwund hin
- Eine andere Form der Extensivierung ist die Kultivierung von Schilf, Erlen oder Torfmoos (SRU 2012). Dabei handelt es sich um kompromiss- und erlösorientierte und Anbauverfahren, falls eine andere Art der Extensivierung aufgrund der lokalen Rahmenbedingungen nicht realisierbar ist
- Die Vermeidung des Eintrags von Nähr- und Schadstoffen in Moorböden aus umliegenden Flächen reduziert den Nährstoffumsatz. Dadurch werden die Bodenverhältnisse für den Erhalt oder das Wachstum von Moorböden verbessert und die negativen Folgen des Klimawandels verringert. Dies gilt besonders für die Moorböden in den Randlagen von Mooren.

Aufgrund der Komplexität der meisten Maßnahmenoptionen werden derzeit im BWPLUS-Projekt Moore-BW (Angenendt et al. 2013) regional differenzierte Moorschutzszenarien für Baden-Württemberg aus landwirtschaftlicher, natur- und bodenschutzfachlicher sowie aus klimaschutzpolitischer Sicht abgeleitet. Anschließend werden die Szenarien ökologisch-ökonomisch bewertet und in Handlungsempfehlungen für Aktionspläne sowie regionale und kommunale Planungsprozesse überführt. Es wird deshalb empfohlen, diese Ergebnisse bei der abschließenden Ausarbeitung von Anpassungsmaßnahmen zum Schutz der Moorböden

im Rahmen des Klimawandels ebenso zu berücksichtigen wie die von anderen Moorschutzprojekten (z.B. ReMoKo: Röhl 2012).

Dem derzeitigen Kenntnisstand zufolge legt die landesweite Vielfalt der Moore für die erfolgsversprechende und standortgerechte Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ein Verfahren nahe, das mehrere Optionen umfasst: Lokaler oder regionaler Moderationsprozess, Reduktion oder Unterbindung der Entwässerung und Nutzungsintensivierung, alternative oder extensivierte Moorbewirtschaftung mit moderater Wiedervernässung, Renaturierung durch vollständige Wiedervernässung. Voraussetzung dazu ist u.a. die lokale Bestandsaufnahme von Torfmächtigkeit, Grundwasserstand und -schwankungen, klimatischer Wasserbilanz, Nutzungsinteressen, Eigentumsverhältnissen oder technischem Realisierungs- und Erhaltungsaufwand. Die Kopplung mit einer Kosten-Nutzenanalyse ist dabei hilfreich. Bausteine dafür können Pflege- und Entwicklungspläne sein (z.B. Kapfer et al. 2005) oder hydrologische Gutachten. Orientierung und Hilfe zur Umsetzung geben Leitfäden wie z.B. für Bayern (LfU-BY 2010) oder Baden-Württemberg (Röder et al. 2012).

#### **4.3.2.2 Ergänzungsmaßnahmen für Bodenlebensgemeinschaften**

Beim Teilbereich Bodenlebensgemeinschaften sollten aufgrund der nur regional mittleren, ansonsten geringen Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen zukünftig weiterhin zumindest die bekannten Maßnahmen zum Erhalt der Diversität von Bodenorganismen und der Bodenfruchtbarkeit umgesetzt werden (Flaig et al. 2013, Unseld et al. 2013). Diese sind letztendlich stark abhängig von der Landnutzung, also von Land- und Forstwirtschaft:

- Neben den klimatischen Faktoren Temperatur, Niederschlag und Wasserbilanz im Sommer- und Winterhalbjahr ist die Entwicklung entscheidend von der Vielfalt bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und Baumarten abhängig, also den Streulieferanten für die Bodenlebensgemeinschaften. Hiermit liegt dann zwar eine Steuerungsmöglichkeit vor, die allerdings entscheidend von den Anpassungsstrategien der Land- und Forstwirtschaft abhängig ist
- Um darüber hinaus eine ganzjährige Aktivität zu sichern, ist ein möglichst ganzjähriges Bodenwasserangebot zu sichern. Dies kann mit landwirtschaftlichen Verfahren wie z.B. pfluglose Bodenbearbeitung oder ganzjähriger Bodenbedeckung mit Pflanzen oder Pflanzenresten erreicht werden
- Eine Verbesserung des Lebensraums für viele Bodenorganismen kann auch z.B. durch Anhebung des Boden-pH in einen sehr schwach sauren bis neutralen Bereich durch Kalkung erreicht werden. Damit wäre für lokale Risikobereiche auch kurzfristig eine Anpassungsmaßnahme verfügbar.

Insgesamt weisen die Bodenlebensgemeinschaften eine hohe Anpassungsflexibilität auf, so dass zwar kaum vermeidbare Änderungen eintreten werden, aber die Funktion als Lebensraum nicht grundsätzlich gefährdet ist. Direkte wirkende Anpassungsmaßnahmen im Sinne eines vorsorgenden Bestandsschutzes sind aufgrund des Bodennutzungsinteresses derzeit auch kaum realisierbar, so dass aus der fortlaufenden Beobachtung der zukünftigen Entwicklung die Schutzmaßnahmen im Konsens mit den Landnutzern realisiert werden müssen.

#### **4.3.2.3 Ergänzungsmaßnahmen bei Bodenverdichtung**

Auch der mit dem Klimawandel regionalspezifisch verbundene Anstieg des potenziellen Risikos von Bodenverdichtung erfordert grundsätzlich keine andere oder neue Schutzmaßnahmen als die derzeit bereits bekannten (LABO 2010). Dies gilt insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft, sofern die Bemühungen zur Vermeidung von Bodenverdichtung fortgesetzt bzw. eine konsequentere Umsetzung angestrebt wird, so dass die zunehmenden Risiken eingegrenzt werden. Weil die Anpassungsmaßnahmen zumeist von den Landnutzern umgesetzt werden müssen, sind entsprechende Empfehlungen auch bei den zuständigen Handlungsfeldern wie Land- und Forstwirtschaft zu finden (Flaig et al. 2013, Unseld et al. 2013). Aber auch im Rahmen der Bauwirtschaft nehmen die Risiken aus den u.g. Gründen zu, so dass hier dringend die Institutionalisierung einer bodenkundlichen Baubegleitung empfohlen wird und in der Schweiz beispielsweise bereits etabliert ist. Beispiele für Maßnahmen sind:

- Entwicklung und Realisierung eines Bewertungs- und Beratungskonzeptes zur bodenschonenden Bewirtschaftung
- Integration bodenkundlicher Baubegleitung in Planungsprozesse und Bauvorhaben
- Übersichten zu potenziellen Maßnahmen bei der Landbewirtschaftung geben z.B. MKULNV-NRW (2010) oder MELR-BW (2002), für die Bauwirtschaft BAFU (2008).
- Im Allgemeinen wird zumeist die Vermeidung von Bodenverdichtungen durch Berücksichtigung verdichtungsmindernder Bewirtschaftungsverfahren empfohlen, aber auch eine bessere Beratung bietet Chancen:
  - Wahl des richtigen Bearbeitungszeitpunktes in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte
  - Nutzung breiterer Reifen und Reduzierung der Radlasten bei Bewirtschaftungsmaschinen
  - Umsetzung humuserhaltender Bewirtschaftungsverfahren
  - konservierende Bodenbearbeitung zur Erhöhung der Aggregatstabilität und somit auch der Tragfähigkeit.

#### **4.4 Beschreibung der Kenntnisdefizite und Identifizierung von Forschungsbedarf**

Prinzipiell lassen sich die erzielten Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen mit einer kartografisch höheren Auflösung darstellen wie die Kartenvergrößerung in Abbildung 7 zeigt. Durch zusätzliche Verschneidung von Landnutzung und Bodentypen könnten die Informationen zu lokalen Risikobereichen konkretisiert werden und für verschiedene Querschnittsdisziplinen wie Landwirtschaft oder Wasserwirtschaft in einem planungsrelevanten Maßstab verfügbar sein. Allerdings weisen die Vulnerabilitätsanalysen zu den Teilbereichen Bodenlebensgemeinschaften und Verdichtungsrisiko sowie bedingt auch zur organischen Bodensubstanz aufgrund fehlender Alternativen große Unsicherheiten auf, so dass im Vorfeld methodische Verbesserungen erforderlich sind. Darüber hinaus konnten weitere umweltrelevante Teilbereiche wie z.B. Nährstoffe mit den Prozessen Stickstoffmineralisierung (Nitrat, Lachgas) oder Phosphorausstrag aufgrund von Defiziten bei den halbquantitativen und pragmatischen Analysemethoden nicht bewertet werden. Dies ist im Zusammenhang mit Regelungen wie Wasserrahmenrichtlinie oder Trinkwasserverordnung aber sicherlich auch zukünftig von Bedeutung.

Eine Konkretisierung des Forschungsbedarfs wurde beim Auftraggeber hinterlegt.

## 5 Maßnahmenformblätter

Vom Handlungsfeld Boden wurden keine Maßnahmenformblätter für die Anpassungsoptionen angelegt, weil die Maßnahmen zumeist vom Landnutzungstyp abhängig sind und somit von den nutzungsorientierten Handlungsfeldern formuliert wurden. Eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen mit Bezug zum Handlungsfeld Boden befindet sich aber in Tabelle 51 mit präzisierten Querverweisen zum Auffinden der Maßnahmenformblätter. Dazu wird auf die Berichte der Handlungsfelder Landwirtschaft (Flaig 2013), Naturschutz (Schlumprecht et al. 2013), Forstwirtschaft (Unseld et al. 2013) und Wasserwirtschaft (Dittmer et al. 2013) hingewiesen.

## 6 Anhang

### 6.1 Hintergrundinformationen

Abbildung 23: Die Naturräume 4. Ordnung nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962) zur Identifizierung und räumlichen Zuordnung von kleineren Gebieten mit hoher Vulnerabilität (Geobasisdaten © LUBW, LGL, www.lgl-bw.de, Az: 2851.9-1/19)

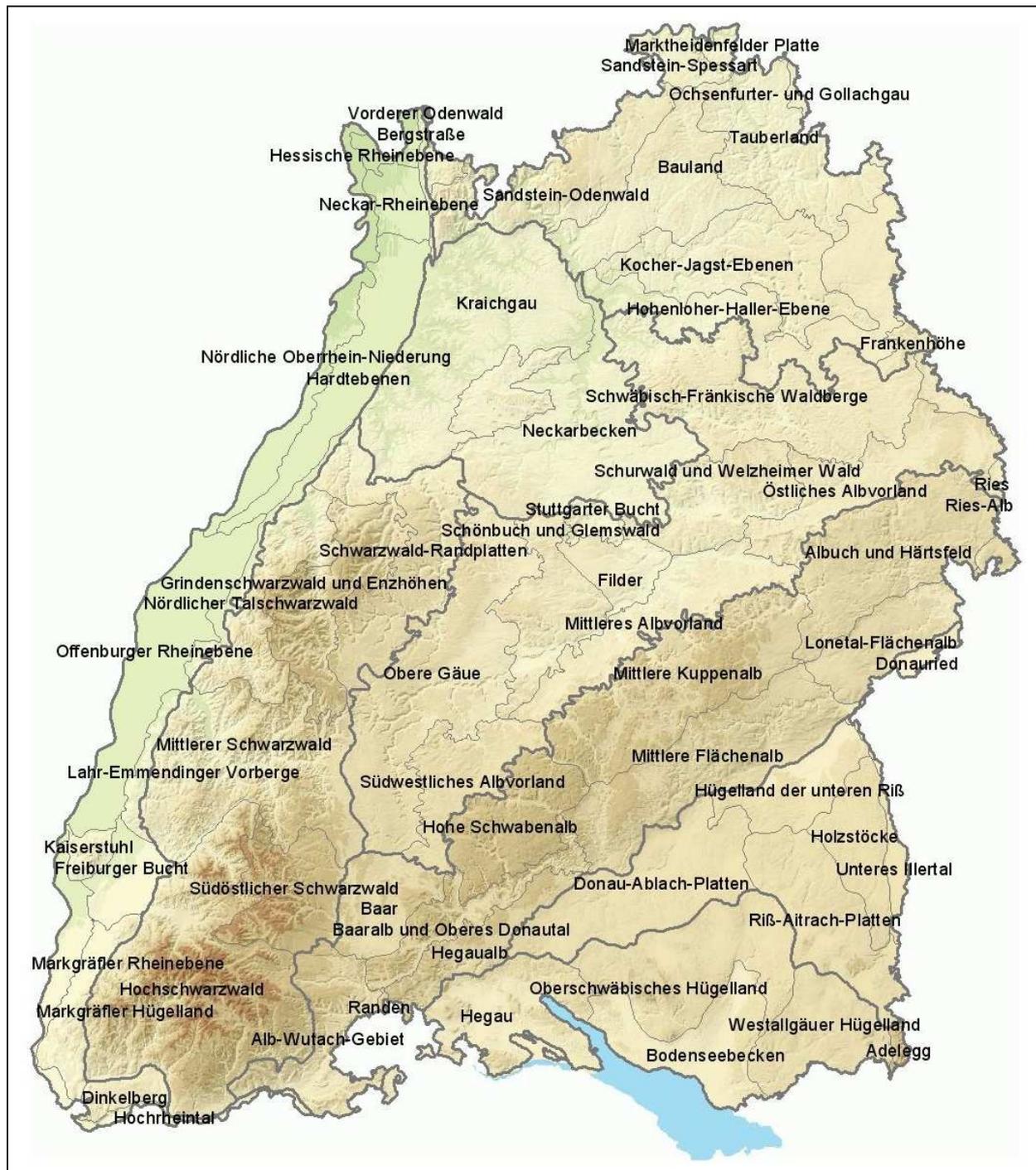


Abbildung 24: Methodik zur Ableitung des modifizierten R-Faktors als Kennwert für die Erosivität von Niederschlägen

## Abhängigkeit des R-Faktors als Kenngröße des erosiven Niederschlags von Klimakennwerten

### für Gegenwartsszenario in Ba.-Wü.

- $RF_{ist} = 0,1039 * NSM_{ist} - 7,31$
- d.h. nur mit mittl. Jahresniederschlag der Gegenwart ( $NSM_{ist}$ )

### für Zukunftsszenario in Ba.-Wü.

- mit mittlerer Jahresniederschlagsmenge ( $NSM_{pro}$ )
- Anzahl Tage mit Starkniederschlag ( $SNST_{pro}$ )
- mittlere Starkniederschlagsmenge ( $SNSM_{pro}$ )

#### Abkürzungen

..._ist	Gegenwarts-Projektion
..._pro	Zukunfts-Projektion
RF	R-Faktor nach DIN
NIW	Niederschlagsintensitätswert
NSM	Niederschlagsmenge/Jahr
SNST	Starkniederschlagstage/Jahr
SNSM	Starkniederschlagsmenge/Jahr

### Berechnung

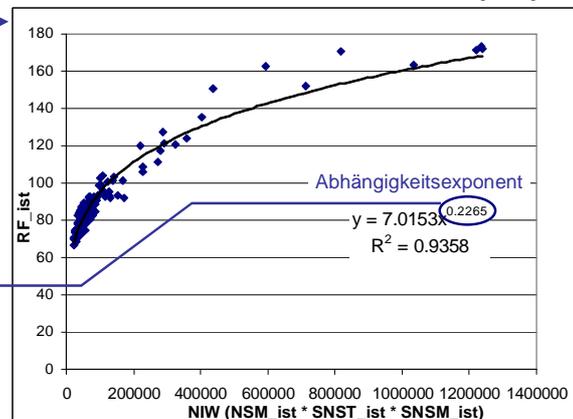
1. Schritt: Regression ermitteln  
aus 110 Gitterpunkten der Klimamodellierung im 25-km-Raster:

RF\_ist (50. Perzentil) in Abhängigkeit von  
 $NIW_{ist} = NSM_{ist} * SNST_{ist} * SNSM_{ist}$

2. Schritt: Veränderungsfaktor  
„Gegenwart → Zukunft“:

$NIW_{pro}^{0,2265} / NIW_{ist}^{0,2265}$ , d.h.

$\frac{(NSM_{pro} * SNST_{pro} * SNSM_{pro})^{0,2265}}{(NSM_{ist} * SNST_{ist} * SNSM_{ist})^{0,2265}}$



Anhangstabelle 1: Veränderungsklassifikation der bodenkundlichen Feuchtestufe in Abhängigkeit des aktuellen pH-Wertes als Indikator für Bodenlebensgemeinschaften

pH	BKF-nah / BKF-fern	BKF-ist					
		0+1	2+3	4+5	6	7+8	9+10
<4	0+1	0	0	-1	-1	-1	0
	2+3	0	0	-1	-1	-1	0
	4+5	+1	+1	0	0	0	+1
	6	+1	+1	0	0	0	+1
	7+8	+1	+1	0	0	0	+1
	9+10	0	0	-1	-1	-1	0
4-5	0+1	0	-1	-2	-2	-2	-1
	2+3	+1	0	-1	-1	-1	0
	4+5	+2	+1	0	0	0	+1
	6	+2	+1	0	0	0	+1
	7+8	+2	+1	0	0	0	+1
	9+10	+1	0	-1	-1	-1	0
>5-6	0+1	0	-1	-1	-2	-1	-1
	2+3	+1	0	0	-1	0	0
	4+5	+1	0	0	-1	0	0
	6	+2	+1	+1	0	+1	+1
	7+8	+1	0	0	-1	0	0
	9+10	+1	0	0	-1	0	0
>6	0+1	0	-1	-2	-3	-2	-1
	2+3	+1	0	-1	-2	-1	0
	4+5	+2	+1	0	-1	0	+1
	6	+3	+2	+1	0	+1	+2
	7+8	+2	+1	0	-1	0	+1
	9+10	+1	0	-1	-2	-1	0

## 6.2 Ergebnistabellen

Anhangstabelle 2: Flächenaufteilung der einzelnen Vulnerabilitätsstufen für den Teilbereich „Erosion“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr	LÖR	LÖR in km <sup>2</sup> <sup>1)</sup>	Vuln.- Stufe	Fläche in km <sup>2</sup>				Flächenanteil je LÖR <sup>1)</sup> in %			
				n50	n85	f50	f85	n50	n85	f50	f85
1	ohr	2924	1	2613	1548	1568	1530	89,4	52,9	53,6	52,3
			2	200	48	1096	38	6,8	1,7	37,5	1,3
			3	111	1328	261	1357	3,8	45,4	8,9	46,4
2	ug	2693	1	1589	1292	1506	1266	59,0	48,0	55,9	47,0
			2	660	268	90	239	24,5	9,9	3,3	8,9
			3	445	1134	1098	1188	16,5	42,1	40,8	44,1
3	sw	5874	1	5830	5795	5837	5795	99,2	98,6	99,4	98,6
			2	33	4	28	4	0,6	0,1	0,5	0,1
			3	11	76	10	76	0,2	1,3	0,2	1,3
4	hml	2377	1	1890	1821	1846	1821	79,5	76,6	77,6	76,6
			2	486	5	531	5	20,5	0,2	22,3	0,2
			3	1	552	1	552	0,0	23,2	0,0	23,2
5	dil	2330	1	2322	1524	2322	1524	99,6	65,4	99,6	65,4
			2	9	797	9	794	0,4	34,2	0,4	34,1
			3	0	9	0	13	0,0	0,4	0,0	0,5
6	sab	5844	1	5443	4783	5151	4782	93,1	81,8	88,1	81,8
			2	398	365	294	365	6,8	6,2	5,0	6,2
			3	3	697	399	697	0,0	11,9	6,8	11,9
7	kll	5702	1	5585	4740	5271	4447	97,9	83,1	92,5	78,0
			2	104	271	385	564	1,8	4,7	6,8	9,9
			3	13	691	45	691	0,2	12,1	0,8	12,1
8	bho	4398	1	3682	3173	3571	3159	83,7	72,2	81,2	71,8
			2	401	509	408	412	9,1	11,6	9,3	9,4
			3	315	716	418	826	7,2	16,3	9,5	18,8
-	BW	32142	1	28953	24675	27071	24324	90,1	76,8	84,2	75,7
			2	2291	2266	2839	2420	7,1	7,0	8,8	7,5
			3	898	5201	2232	5399	2,8	16,2	6,9	16,8

1) Acker, Grünland, Dauerkultur, Wald

Anhangstabelle 3: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen ( $V_{ag}$ ), Flächenanteile mit hoher Vulnerabilität ( $Flant_3$  in %) und Gesamt-Vulnerabilitätsklassifikation ( $V_{St}$ ) für den Teilbereich „Erosion“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr.	LÖR	n50			n85			f50			f85		
		$V_{ag}$	$Flant_3$	$V_{St}$									
1	ohr	1,14	3,8	1	1,92	45,4	3	1,55	8,9	2'	1,94	46,4	3
2	ug	1,58	16,5	2'	1,94	42,1	3	1,85	40,8	3	1,97	44,1	3
3	sw	1,01	0,2	1	1,03	1,3	1	1,01	0,2	1	1,03	1,3	1
4	hml	1,21	0,0	1	1,47	23,2	2	1,22	0,0	1	1,47	23,2	2
5	dil	1,00	0,0	1	1,35	0,4	1	1,00	0,0	1	1,35	0,5	1
6	sab	1,07	0,0	1	1,30	11,9	1	1,19	6,8	1	1,30	11,9	1
7	kll	1,02	0,2	1	1,29	12,1	1	1,08	0,8	1	1,34	12,1	1
8	bho	1,23	7,2	1	1,44	16,3	2	1,28	9,5	1	1,47	18,8	2
-	BW	1.16	2.8	1	1.47	16.2	2	1.27	6.9	1	1.48	16.8	2

Anhangstabelle 4: Flächenaufteilung der einzelnen Vulnerabilitätsstufen für den Teilbereich „Auswaschung“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR-Nr.	LÖR <sup>1)</sup>	LÖR [km <sup>2</sup> ]	Vuln.-Stufe	Fläche in km <sup>2</sup>						Flächenanteil je LÖR <sup>1)</sup> in %					
				n15	n50	n85	f15	f50	f85	n15	n50	n85	f15	f50	f85
1	ohr	2924	1	2924	2645	1385	2924	2226	943	100,0	90,5	47,4	100,0	76,1	32,2
			2	0	279	1537	0	698	1497	0,0	9,5	52,6	0,0	23,9	51,2
			3	0	0	2	0	0	485	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	16,6
2	ug	2693	1	2693	2654	705	2693	1778	528	100,0	98,5	26,2	100,0	66,0	19,6
			2	0	39	1988	0	915	2165	0,0	1,5	73,8	0,0	34,0	80,4
			3	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	sw	5874	1	5874	5834	5508	5874	5814	5508	100,0	99,3	93,8	100,0	99,0	93,8
			2	0	40	366	0	61	366	0,0	0,7	6,2	0,0	1,0	6,2
			3	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	hml	2377	1	2377	2336	610	2377	2316	607	100,0	98,3	25,6	100,0	97,4	25,6
			2	0	41	1767	0	61	1768	0,0	1,7	74,4	0,0	2,6	74,4
			3	0	0	0	0	0	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	dil	2330	1	2330	2322	356	2330	918	356	100,0	99,6	15,3	100,0	39,4	15,3
			2	0	9	1487	0	1412	1230	0,0	0,4	63,8	0,0	60,6	52,8
			3	0	0	487	0	0	744	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	31,9
6	sab	5844	1	5844	5844	3108	5844	5092	3108	100,0	100,0	53,2	100,0	87,1	53,2
			2	0	0	2593	0	752	2290	0,0	0,0	44,4	0,0	12,9	39,2
			3	0	0	143	0	0	446	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	7,6
7	kll	5702	1	5702	4750	209	5702	4018	209	100,0	83,3	3,7	100,0	70,5	3,7
			2	0	951	4862	0	1684	4750	0,0	16,7	85,3	0,0	29,5	83,3
			3	0	0	630	0	0	742	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	13,0
8	bho	4398	1	4398	4192	1426	4398	3460	1412	100,0	95,3	32,4	100,0	78,7	32,1
			2	0	206	2892	0	937	2816	0,0	4,7	65,8	0,0	21,3	64,0
			3	0	0	80	0	0	169	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	3,9
-	BW	32142	1	32142	30578	13308	32142	25623	12673	100,0	95,1	41,4	100,0	79,7	39,4
			2	0	1565	17493	0	6520	16883	0,0	4,9	54,4	0,0	20,3	52,5
			3	0	0	1341	0	0	2587	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	8,0

1) Acker, Grünland, Dauerkultur, Wald

Anhangstabelle 5: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen ( $V_{ag}$ ), Flächenanteile mit hoher Vulnerabilität ( $Flant_3$  in %) und Gesamt-Vulnerabilitätsklassifikation ( $V_{St}$ ) für den Teilbereich „Auswaschung“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr.	n15			n50			n85			f15			f50			f85		
	$V_{ag}$	$Flant_3$	$V_{St}$															
1	1,00	0,0	1	1,10	0,0	1	1,53	0,1	2'	1,00	0,0	1	1,24	0,0	1	1,84	16,6	2'
2	1,00	0,0	1	1,01	0,0	1	1,74	0,0	2'	1,00	0,0	1	1,34	0,0	1	1,80	0,0	2'
3	1,00	0,0	1	1,01	0,0	1	1,06	0,0	1	1,00	0,0	1	1,01	0,0	1	1,06	0,0	1
4	1,00	0,0	1	1,02	0,0	1	1,74	0,0	2'	1,00	0,0	1	1,03	0,0	1	1,74	0,0	2'
5	1,00	0,0	1	1,00	0,0	1	2,06	20,9	2'	1,00	0,0	1	1,61	0,0	2'	2,17	31,9	2'
6	1,00	0,0	1	1,00	0,0	1	1,49	2,4	1	1,00	0,0	1	1,13	0,0	1	1,54	7,6	2'
7	1,00	0,0	1	1,17	0,0	1	2,07	11,1	2'	1,00	0,0	1	1,30	0,0	1	2,09	13,0	2'
8	1,00	0,0	1	1,05	0,0	1	1,69	1,8	2'	1,00	0,0	1	1,21	0,0	1	1,72	3,9	2'
BW	1,00	0,0	1	1,04	0,0	1	1,67	4,2	2'	1,00	0,0	1	1,23	0,0	1	1,75	8,0	2'

Anhangstabelle 6: Flächenaufteilung der einzelnen Vulnerabilitätsstufen für den Teilbereich „organische Bodensubstanz“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR-Nr.	LÖR <sup>1)</sup>	LÖR [km <sup>2</sup> ]	Vuln.-Stufe	Fläche in km <sup>2</sup>						Flächenanteil je LÖR <sup>1)</sup> in %					
				n15	n50	n85	f15	f50	f85	n15	n50	n85	f15	f50	f85
1	ohr	2924	1	697	1208	1428	0	0	1208	23,8	41,3	48,8	0,0	0,0	41,3
			2	1019	1716	1496	2924	2227	1019	34,8	58,7	51,2	100,0	76,2	34,8
			3	1208	0	0	0	697	697	41,3	0,0	0,0	0,0	23,8	23,8
2	ug	2693	1	368	1497	1497	0	0	1497	13,7	55,6	55,6	0,0	0,0	55,6
			2	2325	1197	1197	2693	2325	636	86,3	44,4	44,4	100,0	86,3	23,6
			3	0	0	0	0	368	561	0,0	0,0	0,0	0,0	13,7	20,8
3	sw	5874	1	1460	50	88	0	0	50	24,9	0,8	1,5	0,0	0,0	0,8
			2	4364	5825	4326	5787	4376	4364	74,3	99,2	73,6	98,5	74,5	74,3
			3	50	0	1460	88	1498	1460	0,8	0,0	24,9	1,5	25,5	24,9
4	hml	2377	1	1094	485	1283	0	0	485	46,0	20,4	54,0	0,0	0,0	20,4
			2	1283	1892	1094	1892	1283	799	54,0	79,6	46,0	79,6	54,0	33,6
			3	0	0	0	485	1094	1094	0,0	0,0	0,0	20,4	46,0	46,0
5	dil	2330	1	0	820	820	0	0	820	0,0	35,2	35,2	0,0	0,0	35,2
			2	2330	1511	1510	2330	1506	686	100,0	64,8	64,8	100,0	64,6	29,4
			3	0	0	0	0	824	824	0,0	0,0	0,0	0,0	35,4	35,4
6	sab	5844	1	0	1304	1315	0	0	1304	0,0	22,3	22,5	0,0	0,0	22,3
			2	5844	4540	2598	5844	3903	2609	100,0	77,7	44,5	100,0	66,8	44,6
			3	0	0	1931	0	1941	1931	0,0	0,0	33,0	0,0	33,2	33,0
7	kll	5702	1	4230	1233	1471	0	0	1233	74,2	21,6	25,8	0,0	0,0	21,6
			2	1471	4469	4230	5702	3845	2612	25,8	78,4	74,2	100,0	67,4	45,8
			3	0	0	0	0	1856	1856	0,0	0,0	0,0	0,0	32,6	32,6
8	bho	4398	1	728	2200	2200	0	0	2200	16,6	50,0	50,0	0,0	0,0	50,0
			2	3669	2198	2198	4398	3669	1469	83,4	50,0	50,0	100,0	83,4	33,4
			3	0	0	0	0	728	728	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6	16,6
-	BW	32142	1	8578	8796	10102	0	0	8796	26,7	27,4	31,4	0,0	0,0	27,4
			2	22306	23346	18649	31570	23135	14194	69,4	72,6	58,0	98,2	72,0	44,2
			3	1258	0	3391	572	9008	9152	3,9	0,0	10,5	1,8	28,0	28,5

1) Acker, Grünland, Dauerkultur, Wald

Anhangstabelle 7: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen ( $V_{ag}$ ), Flächenanteile mit hoher Vulnerabilität ( $Flant_3$  in %) und Gesamt-Vulnerabilitätsklassifikation ( $V_{St}$ ) für den Teilbereich „organische Bodensubstanz“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr.	n15			n50			n85			f15			f50			f85		
	$V_{ag}$	$Flant_3$	$V_{St}$															
1	2,17	41,3	3	1,59	0,0	2'	1,51	0,0	2'	2,00	0,0	2'	2,24	23,8	2'	1,83	23,8	2'
2	1,86	0,0	2'	1,44	0,0	1	1,44	0,0	1	2,00	0,0	2'	2,14	13,7	2'	1,65	20,8	2'
3	1,76	0,8	2'	1,99	0,0	2'	2,23	24,9	2'	2,01	1,5	2'	2,26	25,5	3'	2,24	24,9	2'
4	1,54	0,0	2'	1,80	0,0	2'	1,46	0,0	1	2,20	20,4	2'	2,46	46,0	3'	2,26	46,0	3'
5	2,00	0,0	2'	1,65	0,0	2'	1,65	0,0	2'	2,00	0,0	2'	2,35	35,4	3'	2,00	35,4	3
6	2,00	0,0	2'	1,78	0,0	2'	2,11	33,0	3	2,00	0,0	2'	2,33	33,2	3'	2,11	33,0	3
7	1,26	0,0	1	1,78	0,0	2'	1,74	0,0	2'	2,00	0,0	2'	2,33	32,6	3'	2,11	32,6	2'
8	1,83	0,0	2'	1,50	0,0	2'	1,50	0,0	2'	2,00	0,0	2'	2,17	16,6	2'	1,67	16,6	2'
BW	1,80	3,9	2'	1,69	0,0	2'	1,71	10,5	2'	2,03	1,8	2'	2,28	28,0	3'	1,98	28,5	2'

Anhangstabelle 8: Flächenaufteilung der einzelnen Vulnerabilitätsstufen für den Teilbereich „**Bodenlebensgemeinschaften**“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR-Nr.	LÖR <sup>1)</sup>	LÖR [km <sup>2</sup> ]	Vuln.-Stufe	Fläche in km <sup>2</sup>						Flächenanteil je LÖR <sup>1)</sup> in %					
				n15	n50	n85	f15	f50	f85	n15	n50	n85	f15	f50	f85
1	ohr	2924	1	1724	2924	2538	1091	2538	2924	59.0	100.0	86.8	37.3	86.8	100.0
			2	1200	0	386	1447	386	0	41.0	0.0	13.2	49.5	13.2	0.0
			3	0	0	0	386	0	0	0.0	0.0	0.0	13.2	0.0	0.0
2	ug	2693	1	1747	2693	1747	1398	1977	1747	64.9	100.0	64.9	51.9	73.4	64.9
			2	946	0	946	1296	716	946	35.1	0.0	35.1	48.1	26.6	35.1
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	sw	5874	1	5824	5874	5874	5824	5824	5874	99.1	100.0	100.0	99.1	99.1	100.0
			2	50	0	0	50	50	0	0.9	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	hml	2377	1	2358	2358	2377	2358	2358	2377	99.2	99.2	100.0	99.2	99.2	100.0
			2	19	19	0	19	19	0	0.8	0.8	0.0	0.8	0.8	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	dil	2330	1	2330	2330	2330	2330	2330	2330	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	sab	5844	1	5811	5844	5811	5811	5844	5811	99.4	100.0	99.4	99.4	100.0	99.4
			2	33	0	33	33	0	33	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.6
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	kll	5702	1	5674	5702	5674	3399	5674	5674	99.5	100.0	99.5	59.6	99.5	99.5
			2	27	0	27	2302	27	27	0.5	0.0	0.5	40.4	0.5	0.5
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	bho	4398	1	2648	4398	3366	1376	4049	3366	60.2	100.0	76.5	31.3	92.1	76.5
			2	1749	0	1032	3021	349	1032	39.8	0.0	23.5	68.7	7.9	23.5
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-	BW	32142	1	28119	32124	29719	23589	30595	30105	87.5	99.9	92.5	73.4	95.2	93.7
			2	4024	19	2424	8168	1548	2038	12.5	0.1	7.5	25.4	4.8	6.3
			3	0	0	0	386	0	0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0

1) Acker, Grünland, Dauerkultur, Wald

Anhangstabelle 9: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen ( $V_{ag}$ ), Flächenanteile mit hoher Vulnerabilität ( $Flant_3$  in %) und Gesamt-Vulnerabilitätsklassifikation ( $V_{St}$ ) für den Teilbereich „**Bodenlebensgemeinschaften**“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr.	n15			n50			n85			f15			f50			f85		
	$V_{ag}$	$Flant_3$	$V_{St}$															
1	1.41	0.0	1	1.00	0.0	1	1.13	0.0	1	1.76	13.2	2'	1.13	0.0	1	1.00	0.0	1
2	1.35	0.0	1	1.00	0.0	1	1.35	0.0	1	1.48	0.0	1	1.27	0.0	1	1.35	0.0	1
3	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1
4	1.01	0.0	1	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1
5	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
6	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1
7	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.40	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
8	1.40	0.0	1	1.00	0.0	1	1.23	0.0	1	1.69	0.0	2'	1.08	0.0	1	1.23	0.0	1
BW	1.15	0.0	1	1.00	0.0	1	1.09	0.0	1	1.29	1.2	1	1.06	0.0	1	1.07	0.0	1

Anhangstabelle 10: Flächenaufteilung der einzelnen Vulnerabilitätsstufen für den Teilbereich „**Bodenverdichtung**“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR-Nr.	LÖR <sup>1)</sup>	LÖR [km <sup>2</sup> ]	Vuln.-Stufe	Fläche in km <sup>2</sup>						Flächenanteil je LÖR <sup>1)</sup> in %					
				n15	n50	n85	f15	f50	f85	n15	n50	n85	f15	f50	f85
1	ohr	2924	1	2924	2924	2819	2924	2924	2924	100.0	100.0	96.4	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	105	0	0	0	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	ug	2693	1	2693	2693	2693	2693	2693	2693	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	sw	5874	1	5874	5874	5874	5874	5874	5874	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	hml	2377	1	2377	2377	2377	2377	2377	2377	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	dil	2330	1	2330	2330	2296	2330	2330	2296	100.0	100.0	98.5	100.0	100.0	98.5
			2	0	0	35	0	0	35	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.5
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	sab	5844	1	5844	5844	4430	5844	5844	4430	100.0	100.0	75.8	100.0	100.0	75.8
			2	0	0	1414	0	0	1414	0.0	0.0	24.2	0.0	0.0	24.2
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	kll	5702	1	5702	5702	4050	5702	5702	4050	100.0	100.0	71.0	100.0	100.0	71.0
			2	0	0	1652	0	0	1652	0.0	0.0	29.0	0.0	0.0	29.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	bho	4398	1	4398	4398	3008	4398	4398	4397	100.0	100.0	68.4	100.0	100.0	100.0
			2	0	0	1390	0	0	1	0.0	0.0	31.6	0.0	0.0	0.0
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-	BW	32142	1	32142	32142	27547	32142	32142	29041	100.0	100.0	85.7	100.0	100.0	90.4
			2	0	0	4595	0	0	3101	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	9.6
			3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

1) Acker, Grünland, Dauerkultur, Wald

Anhangstabelle 11: Aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufen ( $V_{ag}$ ), Flächenanteile mit hoher Vulnerabilität ( $Flant_3$  in %) und Gesamt-Vulnerabilitätsklassifikation ( $V_{St}$ ) für den Teilbereich „**Bodenverdichtung**“ in den landschaftsökologischen Regionen

LÖR Nr.	n15			n50			n85			f15			f50			f85		
	$V_{ag}$	$Flant_3$	$V_{St}$															
1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.04	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
2	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
3	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
4	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
5	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.01	0.0	1
6	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.24	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.24	0.0	1
7	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.29	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.29	0.0	1
8	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.32	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1
BW	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.11	0.0	1	1.00	0.0	1	1.00	0.0	1	1.07	0.0	1

### 6.3 Literatur und Referenzen

- Ad-hoc-AG Boden (2003): Verknüpfungsregel 4.12 - Ermittlung der jährlichen Sickerwasser-rate aus dem Boden nach dem TUB\_BGR-Verfahren. – Hrsg.: Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der BGR, 4 S. internet (22.12.2012): [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Netzwerke/Adhocag/Downloads/Ergaenzungsregel\\_4\\_12.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Netzwerke/Adhocag/Downloads/Ergaenzungsregel_4_12.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Angenendt, E., Bakara, H., Billen, N., Jooß, R., Konold, A., Marggraff, V., Schwarz-v. Raumer H.-G., Kaule, G., Stahr, K. und Zeddies, J. (2011): Nachwachsende Energieträger und Biodiversität: naturschutzbezogene und ökonomische Entwicklung und Bewertung von Anbauszenarien (NawEnNat) und Abschätzung der Produktionspotenziale für den Anbau von Energiepflanzen zur CO<sub>2</sub>-Bindung in Baden-Württemberg und deren ökologische und ökonomische Bewertung. – Forschungsbericht BWPLUS, 243 S.
- Angenendt, E., Billen, N., Holz, I., Kalia, A., Krimly, T., Marggraff, V., Peringer, A., Schwarz von Raumer, H.G., Bahrs, E., Böcker, R., Dabbert, S., Kaule, G., Stahr, K. (2013): . Ökonomisch – ökologische Bewertung der Klimawirksamkeit von Mooren in Baden-Württemberg (Moore-BW). - (Vorläufiger) Zwischenbericht der BWPLUS-Projekte BWM10001, 10002, 10003 zum Statuskollquium am KIT Karlsruhe, 15 S.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2008): Bodenschutz auf der Baustelle. - Broschüre, 2 S. internet (7.1.2012) <http://www.bafu.admin.ch/publikationen>
- Beylich, A., Broll, G., Graefe, U., Höper, H., Römbke, J., Ruf, A., & Wilke, B.-M. (2005). Biologische Charakterisierung von Böden: Ansatz zur Bewertung des Bodens als Lebensraum für Bodenorganismen im Rahmen von Planungsprozessen. BVB-Materialien 13, 78 S., E. Schmidt Verlag, Berlin.
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2010): Ökosystemdienstleistungen von Mooren – insbesondere Klimarelevanz. Pressehintergrundinfo. Bonn. – internet (7.1.2013): [http://www.bfn.de/fileadmin/NBS/documents/df\\_Presse2010\\_Hintergrund\\_Moore.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/NBS/documents/df_Presse2010_Hintergrund_Moore.pdf), 13 S.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]. (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung (5., verb. und erw. Aufl.). Stuttgart: Schweizerbart [i. Komm.].
- Billen, N., Angenendt, E., Krimly, T., Holz, I., Kalia, A., Peringer, A., Bahrs, E., Böcker, R., Dabbert, S., Kaule, G. Stahr, K. (2012): Ökonomische - ökologische Bewertung der Klimawirksamkeit von Mooren in Baden-Württemberg. – Zwischenbericht zum BWPLUS-Statuskollquium im KIT Karlsruhe, 14 S. – internet (1.12.2010): <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103805/bwm10001-10003.pdf?command=downloadContent&filename=bwm10001-10003.pdf&FIS=203>
- Birkhofer, K., Schöning, I., Alt, F., Herold, N., Klärner, B., Maraun, M., Marhan, S., u. a. (2012). General Relationships between Abiotic Soil Properties and Soil Biota across Spatial Scales and Different Land-Use Types. *PLoS ONE*, 7(8), e43292. doi:10.1371/journal.pone.0043292
- Capriel, P. (2010). Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising- Weihenstephan, 41 S. internet (2.8.2012): [http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_38740.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p_38740.pdf)
- Dahlmann, I, Ginzky, H. & Martin, J. (2012): Boden und Klimawandel – Positionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. – Bodenschutz 2, 12; 45-49.
- DBG – Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1992): Strategien zur Reduzierung standort- und nutzungsbedingter Belastungen des Grundwassers mit Nitrat. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft - Arbeitsgruppe Bodennutzung in Wasserschutz- und -schongebieten. DBG-Selbstverlag, Oldenburg.

- DIN 19688 (2011): Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit von Böden aus der Vorbelastung (Norm-Entwurf). – Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. – Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19732 (2011): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen. – Beuth Verlag, Berlin.
- Dittmer, U. et al. (2013): Verwundbarkeiten des Handlungsfeldes Wasserhaushalt – Zwischenbericht (Stand: 11.03.2013). – Univ. Stuttgart Wasserforschungszentrum, 82 S.
- Drösler, M., Freibauer, A. et al. (2011): Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis - Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz - Moornutzungsstrategien“ 2006-2010. - Arbeitsberichte aus dem vTI-Institut für Agrarrelevante Klimaforschung 04/2011, Braunschweig, 15 S.
- Drösler, M., Schaller, L., Kantelhardt, J., Schweiger, M., Fuchs, D., Tiemeyer, B., Augustin, J., Wehrhan, M., Förster, C., Bergmann, L., Kapfer, A. & Krüger, G.-M. (2012): Beitrag von Moorschutz- und -revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. - Natur und Landschaft, 87, 70-76.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2012): de.dwd.nkdz-grid.MVC30 - grid fields (1 km) of 30-year-means of monthly climate values for Germany for download (Rasterfiles zur Jahresdurchschnittstemperatur und mittleren Jahresniederschlagssummen). – intern (17.9.2012): [https://werdis.dwd.de/werdis/retrieve\\_data.do?pidpat=de.dwd.nkdz-grid.MVC30&tolevel=false](https://werdis.dwd.de/werdis/retrieve_data.do?pidpat=de.dwd.nkdz-grid.MVC30&tolevel=false)
- Ehrmann, O. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. – Vorstudie im Auftrag der LUBW Karlsruhe, 64 S.
- Flaig et al. (2013): Fachgutachten zum Handlungsfeld „Landwirtschaft“ in der „Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels Baden-Württemberg“. - Entwurf des Abschlussberichts zum Stand 8. 2. 2013, 136 S.
- Flaig, H. et al. (2013): Fachgutachten zum Handlungsfeld „Landwirtschaft“ in der „Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels Baden-Württemberg“, Entwurf des Abschlussberichts zum Stand 15. 3. 2013. – Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe. Fachgutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 197 S.
- Freibauer, Annette (2010) Kohlenstoffbilanz der Landnutzung in Europa - Ergebnisse aus dem CarboEurope-Projekt. KTBL-Schrift, Band 483, Seiten 176-181.
- Göttlich, K.-H. (1967-79): Moorkarte von Baden-Württemberg 1:50.000, mit Erläuterungen.- Stuttgart.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. – Mitt.Dt.Wetterd. 2, 1-24.
- Hennings, V. (2000). Methodendokumentation Bodenkunde: Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden; mit 112 Tabellen. Geologisches Jahrbuch: Sonderhefte; Reihe G, Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste; 1 (2. Aufl.). Hannover: Schweizerbart.
- IBS – Institut für Bodenkunde und Standortslehre (2012): Datensammlung von 1700 Bodenprofilen mit Standortbeschreibungen und Analyseergebnissen ab 1962 aus Dissertationen, Hohenheimer Bodenkundlichen Heften, Exkursionsführern und Diplomarbeiten, incl. aus ausgewählter Bodenprofile des LGRB. – IBS Universität Hohenheim, Kontinuierliche Fortschreibung.
- IEOS - Institute for the Study of Earth, Oceans and Space (2009): User's Guide for the DNDC Model (DeNitrification-DeComposition, Version 9.3). - University of New Hampshire, 93 S.

- Joosten, H. Augustin, J. (2006): Peatland restoration and climate: on possible fluxes of gases and money. In: Bambalov, N.N. (ed.): Peat in solution of energy, agriculture and ecology problems. Proceedings of the International Conference Minsk. May 29 – June 2. Tonpik, Minsk: 412-417.
- Kapfer, A.; Martens, C., Moog, D. & Schuler, B. (2005): Pflege- und Entwicklungsplan Pfrunger-Burgweiler Ried für Stiftung Naturschutz Pfrunger-Burgweiler Ried, 354 S.
- Kempf, J., Billen, N., Fosser, G., Assmann, A., und Schipper, H. (2012): Einfluss des Klimawandels mit zunehmenden Starkniederschlägen auf Abfluss und Bodenerosion in Süddeutschland. – In: Weiler, M. (Hrsg.): Wasser ohne Grenzen - Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 31.12, 141-146.
- Kolbe, H. (2009): Einflussfaktoren auf den Humusgehalt. - internet (21.9.2012): [http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Kolbe\\_Humus-Einflussfaktoren09.pdf](http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Kolbe_Humus-Einflussfaktoren09.pdf)
- König, W., Wurbs, D., & Schmidt, G. (2009). Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion in vulnerablen Regionen - Beispiel Sachsen-Anhalt und die hieraus erwachsenden Konsequenzen für die Regionalisierung der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) (S. 95). Halle. – internet (5.9.2012): [http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek\\_Politik\\_und\\_Verwaltung/Bibliothek\\_LAU/Klima/AG\\_Klimawandel/Forschungsberichte/Dateien/Abschlussbericht\\_Klimawandel\\_Erosion\\_LSA.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LAU/Klima/AG_Klimawandel/Forschungsberichte/Dateien/Abschlussbericht_Klimawandel_Erosion_LSA.pdf)
- Kropp J., Roithmeier O., Hattermann F., Rachimow C., Lüttger A., Wechsung F., Lasch P., Christiansen E.S., Reyer C., Suckow F., Gutsch M., Holsten A., Kartschall T., Wodinski M., Hauf Y., Conradt T., Österle H., Walther, C., Lissner T., Lux N., Tekken V., Ritchie S., Kossak J., Klaus M., Costa L., Vetter, T. und Klose M. (2009): Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. – Endbericht Studie im Auftrag des MLU Sachsen-Anhalt, 312 S.
- LABO – Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2010): Positionspapier - Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz beim Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung, Mainz, 22 S.
- LANA - Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung (2012): Potentiale und Ziele zum Moor- und Klimaschutz (Positionspapier), 18 Seiten
- LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen, 27 S.
- Lebert, M. (2010), Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden.
- LEL - Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume (2010): Landwirtschaftliche Betriebsverhältnisse und Buchführungsergebnisse Wirtschaftsjahr 2008/09, Heft 58, 261 S.
- LfU-BY - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Moorrenaturierung kompakt – Handlungsschlüssel für die Praxis. - Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 41 S.
- LfU-BY - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): Klimawandel und Boden - Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen. Dokument, 11. S. internet (3.2.2013): [http://www.lfu.bayern.de/boden/klimawandel\\_und\\_boden/doc/klimawandel\\_und\\_boden.pdf](http://www.lfu.bayern.de/boden/klimawandel_und_boden/doc/klimawandel_und_boden.pdf)
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW (2006): Umweltdaten 2006 Baden-Württemberg 224 Seiten, Karlsruhe.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW (2012a): Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg. – Hrsg.: LUBW, Karlsruhe, 87 S. (unveröffentlicht).

- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW (2012b): Analyse und Bewertung des Stickstoffhaushalts in Baden-Württemberg. – Einblicke / Journal zur Umweltforschung in Baden-Württemberg, S. 31 (Projektstart 2011, in Bearbeitung).
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW (2012c): Moorkataster Baden-Württemberg im Daten und Kartendienst der LUBW. – internet (10.12.2012): <http://brsweb.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- MELR-BW – Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum BW (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. – Merkblätter für umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 25, 8 S.
- Meynen, E., & Schmithüsen, J. (1959-1962). Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands: Gemeinschaftsveröffentlichung des Instituts für Landeskunde und des Deutschen Instituts für Länderkunde / Unter Mitw. d. Zentrallausschusses f. Dt. Landeskunde, Bad Godesberg: Bundesanstalt f. Landeskunde u. Raumforschung.
- MKULNV-NRW Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW (2010): Bodenverdichtungen vermeiden Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen, 44 S.
- Müller, U., & Waldeck, A. (2011). Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). GeoBerichte 19, 8., erw. und erg. Aufl., Version: 09.11.2011.). Hannover, LBEG, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- NIBIS – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (2011): siehe Müller & Waldeck (2011)
- Röder, M., Huber, S., Seyfang, H. & Wuchter, K. (2012): Moorschutz mal praktisch – Kleiner Leitfaden für Moorschützer. – Koordinationsstelle Wirtschaft und Umwelt, HfWU Nürtingen-Geislingen, 28 S.
- Röder, N. & Grützmacher, F. (2012): Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren - Vermeidungskosten und Anpassungsbedarf. - Natur und Landschaft 87, 56-61.
- Röhl, M. (2012): Empfehlungen zu zukünftigen Handlungsschwerpunkten im Moorschutz aus wissenschaftlicher Sicht: Beispiele aus dem regionalen Moorentwicklungskonzept Kisslegg. – Vortrag zur Fachtagung „Renaturierung von Mooren in Theorie und Praxis“, HfWU Nürtingen-Geislingen, 3.5.2012, internet (2.2.2013): [http://www.hfwu.de/fileadmin/user\\_upload/koordinationsstelle\\_umwelt/Archiv\\_Veranstaltung/Moorschutz\\_Tagung/Vortrag\\_Roehl\\_Moorschutz\\_mal\\_praktisch\\_3\\_5\\_2012\\_\\_\\_geschuetzt\\_.pdf](http://www.hfwu.de/fileadmin/user_upload/koordinationsstelle_umwelt/Archiv_Veranstaltung/Moorschutz_Tagung/Vortrag_Roehl_Moorschutz_mal_praktisch_3_5_2012___geschuetzt_.pdf)
- Römbke, J., Dreher, P., Beck, L., Hund-Rinke, K., Jänsch, S., Kratz, W., Pieper, S., u. a. (2002). Entwicklung von bodenbiologischen Bodengüteklassen für Acker- und Grünlandstandorte. – Texte 20/2002 (Forschungsbericht 29974294), 273 S., Umweltbundesamt, Berlin – internet (15.9.2012): <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2123.pdf>
- Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., Oijen, M. van, Smith, P., Webb, J., Alm, J., u. a. (2008). Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. - internet ( 6.10.2012): <http://www.cabdirect.org/abstracts/20093177830.html;jsessionid=E93D167236A79406258592E46D08EEC5>
- Schlumprecht, H. & Friedel, M. (2013): Handlungsfeld Naturschutz und Biodiversität – Fachkapitel, Stand 5.4.2013. - Büro für ökologische Studien GdbR Bayreuth. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 201 S.
- Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, K., Voller, T., Turian, G. (2002): Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. – Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 63: 163 S.
- SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012): Umweltgutachten 2012 - Verantwortung in einer begrenzten Welt. – Erich Schmid Verlag, Berlin, 422 S.

- Streck, T., Lamers, M., Kazda, M., Werth, M., Fiedler, S. (2013): Repräsentative Erfassung der Emissionen klimarelevanter Gase aus Mooren Baden-Württembergs (EmMo). - (Vorläufiger) Zwischenbericht der BWPLUS-Projekte BWM 11001, 1003, 1100, zum Statuskolloquium am KIT Karlsruhe, 15 S.
- Stumpf, F., & Auerswald, K. (2006). Hochaufgelöste Erosionsprognosekarten von Bayern. Wasser Wirtschaft, 96(7-8), 70–74.
- Thimm, C. (1979): Humusgehalte und -mengen in den Ap-Horizonten ostniedersächsischer Sandbodentypen in Abhängigkeit von Standortfaktoren und Nutzungsbedingungen, Diplomarbeit, Universität Göttingen.
- TUSEC-IP - Technique of Urban Soil Evaluation in City Regions – Implementation in Planning Procedures (2006): Bodenbewertung in der räumlichen Planung - Ein Beitrag zur nachhaltigen Raumentwicklung. - Ergebnisse des EU-Interreg IIIB Alpenraum Projekts TUSEC-IP, Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit u. Umwelt (Hrsg.), 47 S.
- UBA – Umweltbundesamt (2008): Anpassungsstrategien bei Bodennutzungssystemen an den Klimawandel. – Bericht zum F&E Vorhaben FKZ: 206 71 202, Institut für Biodiversität Regensburg, 287 S., unveröffentlicht.
- UBA - Umweltbundesamt (Hrsg.). (2012a). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2012 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2010, 841 S.
- UBA – Umweltbundesamt (2011a): Beurteilung der Befahrbarkeit von Ackerböden unter sich wandelnden Klima- und Bearbeitungsbedingungen. – Projektstart 2011, in Bearbeitung, unveröffentlicht.
- UBA – Umweltbundesamt (2011b): Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes - Teilvorhaben 3: Bestimmung der Veränderungen des Humusgehaltes und deren Ursachen auf Ackerböden Deutschlands. – Projektstart 2011, in Bearbeitung, unveröffentlicht.
- UBA – Umweltbundesamt (2011c): Infoblatt Anpassung an den Klimawandel BODEN. – internet (9.8.2012): [www.umweltdaten.de/klimaschutz/kompass\\_themenblatt\\_boden.pdf](http://www.umweltdaten.de/klimaschutz/kompass_themenblatt_boden.pdf)
- UBA – Umweltbundesamt (2012b, Hrsg.): Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes Teilvorhaben 1: Erarbeitung der fachlichen und rechtlichen Grundlagen zur Integration von Klimaschutzaspekten ins Bodenschutzrecht im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt durch Anwaltsbüro Gaßner, Groth, Siederer & Coll., Berlin und ahu AG, Aachen, Entwurf vom 13.9.2012.
- UM-BW (1995): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. – Luft, Boden, Abfall, Heft 31, 34 S.
- UM-BW – Umweltministerium BW (2004, 2012): WaBoA Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Atlanten und CD-ROM. Hrsg: Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Unselde et al (2013): Anpassungsstrategie Klimawandel Baden-Württemberg Handlungsfeld Wald / Forstwirtschaft ENTWURF Fachkapitel A, 71 S.
- Unselde, R. (2013): Anpassungsstrategie Klimawandel Baden-Württemberg Handlungsfeld Wald / Forstwirtschaft (Stand: März 2013). – Unselde Forst, Freiburg. Im Auftrag der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 66 S.
- VDLUFA - Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (2004): Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. – VDLUFA-Standpunkt, VDLUFA Selbstverlag, 12 S.

- Weinzierl, W., Waldmann, F. & Heß, A. (2013): Ermittlung langjähriger CO<sub>2</sub>-Emissionen und Beurteilung der Moore Oberschwabens auf Basis historischer und aktueller Höhennivelements. – (Vorläufiger) Zwischenbericht des BWPLUS-Projektes BWM10004 zum Statuskolloquium am KIT Karlsruhe, 8 S.
- Wurbs, D., & Steininger, M. (2011). Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden - Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. – Texte 16/2012 (Forschungsbericht 370871205), 202 S., Umweltbundesamt Berlin – internet (15.9.2012):<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4089.pdf>
- Kartenbasis: Räumliches Informations- und Planungssystem (RIPS) der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Amtliche Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, [www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de), Az: 2851.9-1/19

## 6.4 Glossar

**Austauschhäufigkeit:** Quotient, der beschreibt, wie häufig das Sickerwasser innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens, ausgedrückt in der Feldkapazität des effektiven Wurzelraums, austauscht (BGR 2005). Beträgt der Quotient weniger als 100 % in einem Jahr, ist die Auswaschungsgefahr nicht sorbierbarer Stoffe niedriger, übersteigt er 100 %, wird das Bodenwasser mehrfach ausgetauscht. Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit der vollständigen Auswaschung gelöster oder nachgelieferter Nähr- oder Schadstoffe.

**Bodenlebensgemeinschaften:** Eine Bodenlebensgemeinschaft ist eine von den Umweltbedingungen abhängige Artenkombination von Mikroorganismen und Tieren im Boden. Zur Kennzeichnung der Bodenlebensgemeinschaft können Indikatororganismen verwendet werden. Indikatororganismen sind Arten, die relativ leicht erfasst werden können und die einen Rückschluss auf die Struktur der gesamten Lebensgemeinschaft erlauben (z.B. Regenwürmer, Kleinringelwürmer, Mikroarthropoden, mikrobielle Biomasse) (Müller und Waldeck 2011). Im Gutachten wurde der Lebensraum als Indikator für die Vitalität der Bodenlebensgemeinschaften bewertet.

**Bodenverdichtung:** Siehe Verdichtung

**Erosion:** Abtrag und Abtransport von Bodenmaterial durch Kräfte des Wassers und des Windes (BGR 2005). Es ist ein natürlicher Prozess, der oftmals durch menschliche Aktivitäten ermöglicht oder gefördert wird.

**Hauptvegetationsperiode:** Die Jahreszeit von Mai bis Oktober (Müller und Waldeck 2011) mit höchster Produktivität, d.h. Biomasseproduktion der Pflanzen.

**Landschaftsökologische Region (LÖR):** Naturräumliche Region in Baden-Württemberg mit vergleichbaren Klima- und Bodenverhältnissen. Die acht Regionen wurden durch Aggregation von 13 Großlandschaften (Naturräume 3. Ordnung) nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962) erzeugt (Lage und Abkürzungen siehe Abbildung 2) und sind näherungsweise vergleichbar mit den Vergleichsgebietsgruppen beim Handlungsfeld Landwirtschaft.

**Naturraum:** Entspricht einem Naturraum 4. Ordnung nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962) (siehe Abbildung 23). Dabei handelt es sich um Untereinheiten der Landschaftsökologischen Regionen bzw. der Naturräume 3. Ordnung nach Meynen & Schmithüsen (1959-1962), so dass differenziertere, d.h. lokale Zuordnungen in den Regionen möglich sind.

**Organische (Boden-)Substanz:** Gesamtmenge an abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffen und deren organische Umwandlungsprodukte. Angabe als  $C_{org}$  (BGR 2005)

**Perzentil:** Ein Perzentil ist die relative Position eines Wertes innerhalb eines Kennwert - Datensatzes (z.B. Jahrestemperatur). So ist z.B. das Maximum das 100. Perzentil, der Mittelwert entspricht in etwa dem 50. Perzentil.

**Torfverlust:** Ist die Torfsackung durch Strukturverlust und der Substanzverlust durch Mineralisierung, also Abbau der organischen Substanz als Folge der Entwässerung von Moorböden zwecks verbesserter Land- und Forstbewirtschaftung.

**Verdichtung:** Physikalischer Prozess, der mit Zunahme der Dichte und Abnahme des Porenvolumens einhergeht. Es wird unterschieden zwischen Sackungsverdichtung als Folge von Belastungen (meist anthropogen bedingt, d.h. Bodenverdichtung) und Einlagerungsverdichtung durch Einwandern von festen Stoffen (geogen und pedogen bedingt) (BGR2005).

## 6.5 Abkürzungsverzeichnis

A_	Auswaschung (Vulnerabilität)
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
AH	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
AP	Arbeitspaket entsprechend dem Angebot
BKF	bodenkundliche Feuchtestufe
BVB	Bundesverband Boden
BW	Baden-Württemberg
C_	org. gebundener Kohlenstoff im Boden (Vulnerabilität)
C <sub>org</sub>	organischer Kohlenstoff im Boden (x 1,72 = Humus)
COSMO	numerisch-regionales Klimamodell
D_	Bodenverdichtung (Vulnerabilität)
DBG	Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DNDC	DeNitrification-DeComposition (Computer Simulations Modell)
DW	Durchwurzelung
DWD	Deutscher Wetterdienst
E_	Erosion (Vulnerabilität)
ETP	potenzielle Evapotranspiration
f15 / 50 / 85	Klimasimulationsergebnisse zur fernen Zukunft (2070-2100) beim 15., 50. bzw. 85. Perzentil
FK	Feldkapazität = Speicherkapazität für Bodenwasser
FKWe	Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
Flant	Flächenanteil in %
GIS	Geografisches Informationssystem
GLA	Geologisches Landesamt
GW	Grundwasser
i50	Klimasimulationsergebnisse zum Ist-Zustand (1971-2000) beim 50. Perzentil
IBS	Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (Kooperationsvorhaben)
KWBv	Klimatische Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode (Mai – Oktober)
L_	Bodenlebensgemeinschaft (Vulnerabilität)
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LfL-BY	Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern
LfULG-SN	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau BW
LÖR	Landschaftsökologische Region (Abkürzungen der Regionen s. Tabelle 3)
Lu	schluffiger Lehm (Bodenart)
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW
MO	Mikroorganismen
n15 / 50 / 85	Klimasimulationsergebnisse zur nahen Zukunft (2021-2050) beim 15., 50. bzw. 85. Perzentil
nFK	nutzbare Feldkapazität = Speicherkapazität für pflanzenverfügbares Bodenwasser
nFKWe	nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
Nj	mittlere Jahresniederschlagsmenge
SE	Standortkundliche Einheit

SIA	Selbst-Integrierende Akkumulatoren (z.B. für Nitrat Monitoring)
SN	Sachsen
SWR	Sickerwasserrate
THG	Treibhausgase
T <sub>j</sub>	Jahresdurchschnittstemperatur
UBA	Umweltbundesamt Berlin
UM-BW	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
V <sub>ag</sub>	aggregiert-gewichtete Vulnerabilitätsstufe
VDLUFA	Verband dt. Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Veg.-Per.	Vegetationsperiode
Vuln	Vulnerabilität
WaBoA	Wasser-Boden-Atlas (UM-BW 2004, 2012)
WETTREG	statistisch-regionales Klimamodell
LTZ	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
VR	Verknüpfungsregel