

TEXTE

16/2011

# Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden

Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 3708 71 205  
UBA-FB 001463

## **Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden**

**Untersuchungen zu Auswirkungen des Klima-  
wandels auf die Bodenerosion durch Wasser**

von

**Dr. Daniel Wurbs**  
Geoflux GbR, Halle (Saale)

**Dr. Michael Steininger**  
Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und  
Bodenschutz (MISB), Halle (Saale)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4089.html> verfügbar. Hier finden Sie auch eine Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand und -monitoring  
Stephan Marahrens, Jeannette Mathews

Dessau-Roßlau, März 2011

### Berichts-Kennblatt

Berichtsnummer UBA-FB 001463	2.	3.
4. Titel des Berichts Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden - Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Dr. Wurbs, Daniel Dr. Steininger, Michael		8. Abschlussdatum September 2010
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift)  ARGE Bodenerosion, bestehend aus: Geoflux GbR, Lessingstraße 37, 06114 Halle (Saale) Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde u. Bodenschutz, Hauptstrasse 19, 06132 Halle (Saale)		9. Veröffentlichungsdatum März 2011
		10. UFOPLAN-Nr. 3708 71 205
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		11. Seitenzahl 202
		12. Literaturangaben 56
		13. Tabellen u. Diagramme 50
		14. Abbildungen 90
15. Zusätzliche Angaben Anhang mit 3 Tabellen auf 17 Seiten		
16. Zusammenfassung Die für das 21. Jahrhundert prognostizierten Klimaänderungen lassen für die zukünftige Erosionsgefährdung Auswirkungen erwarten. Ursachen sind die Veränderung des (Stark-)Niederschlagsregimes und der Bodenbedeckung als Folge der klimatischen Anpassung der Vegetationsperioden landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Neben der Schaffung einer Vergleichsgrundlage, mit der Aussagen zum IST-Zustand der Erosionsgefährdung der Landwirtschaftsflächen in Deutschland getroffen wurden, erfolgte die Untersuchung der Folgen des Klimawandels für die Bodenerosionsgefährdung anhand des Emissionsszenariums A1B des regionalen Klimamodells WETTREG. Hierzu wurde die zukünftige Entwicklung der R-Faktoren mit Hilfe eines peak-over-threshold-Verfahrens analysiert. Weiterhin wurden die Veränderung der Vegetationsbedeckung und der Jahres-R-Faktoren-Verteilung zur Bestimmung der C-Faktoren betrachtet und Entwicklungsszenarien zum Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung erarbeitet. Die Erosionsmodellierung wurde durch einen modifizierten ABAG-Ansatz für den Zeitraum 1971-2100 vorgenommen. Die Entwicklung der R-Faktoren ist in Deutschland räumlich und zeitlich differenziert zu betrachten. Nach geringen Veränderungen bis 2040 kommt es zwischen 2041 und 2070 zu einer Zunahme der Bodenabträge in W- und NW-Deutschland und leichten Rückgängen in S- und O-Deutschland. Ab 2071 erhöhen sich gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) die R-Faktoren flächendeckend. Die innerjährliche Verschiebung der erosiven Niederschläge und der Vegetationsperioden führt zukünftig zu einem Anstieg der C-Faktoren, der die Entwicklung der R-Faktoren zum Teil deutlich überprägt. Als Folge dessen ist zukünftig von einem Anstieg der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung auszugehen. Die Erosionsgefährdung durch Wasser stellt in Deutschland bereits gegenwärtig ein Problemfeld dar, dem unter veränderten Klimabedingungen verstärkt Bedeutung beigemessen werden muss. Die erarbeiteten Handlungsstrategien zur Verminderung der Bodenerosion, wie die dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung, sind gegenwärtig und zukünftig in Schwerpunktgebieten der Erosionsgefährdung anzuwenden.		
17. Schlagwörter Klimawandel, Bodenerosion, Bodenschutz, ABAG, R-Faktor, C-Faktor, WETTREG		
18. Preis	19.	20.

### Report Cover Sheet

Report No. UBA-FB 001463	2.	3.
4. Report Title The impacts of climate change on soils - Investigations of impacts of climate change on soil erosion by water		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Dr. Wurbs, Daniel Dr. Steininger, Michael	8. Report Date September 2010	
	9. Publication Date March 2011	
6. Performing Organisation (Name, Address)  Working group , soil erosion', consisting of: geoflux company, Lessingstraße 37, 06114 Halle (Saale) Middle German Institute for applied site ecology and soil conservation, Hauptstrasse 19, 06132 Halle (Saale)	10. UFOPLAN-Ref. No. 3708 71 205	
	11. No. of Pages 202	
	12. No. of Reference 56	
7. Sponsoring Agency (Name, Address)  Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency), Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	13. No. of Tables, Diagrams 50	
	14. No. of Figures 90	
	15. Supplementary Notes Attachment (17 pages, 3 tables)	
16. Abstract Climate forecasts regarding the 21st century raise expectations in soil erosion growth mainly due to changes in heavy precipitation characteristics and ground cover in line with the adaptation of the crop growing season to future climatic conditions. The aim of this study initiated by the Federal Environmental Agency was, to examine the impacts of climate change on soil erosion by water in Germany using data calculated by the statistical climate model WETTREG. Soil erosion by water was estimated following an USLE approach implemented in ABAGFlux and TerraFlux with focus on the usage-based erosion potential in German agricultural areas. In the 2nd project phase the USLE R factor was recalculated for the recent (1971-2000) and future climate periods (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) using statistical methods such as the peak over threshold method. Furthermore the climate-induced change of the C-factor was analyzed with respect to changes of culture periods, ground cover and the monthly R factor. Scenarios regarding future percentage of conservation tillage systems as also the potential and usage-based soil erosion for these four climate periods have been modelled. The results underline a requirement to differentiate the view on temporal and spatial development of R factors and potential soil erosion. There are minor changes between 2011 and 2040 followed by an increased erosion hazard in western and north-western Germany after 2041 while eastern and southern Germany face a downward trend of R factors, derived using WETTREG data of a reference period 1971 to 2000. Between 2071 and 2100 potential soil erosion rises with R factors above the actual state due to more heavy rain falls nearly all over Germany. The resulting temporal offset of culture periods and the monthly distribution of the R factor cause rising C factors in all time periods as also increasing usage-based soil erosion hazard in Germany. This study shows that soil erosion exists in Germany. The problem gains more and more importance due to climate change and calls for action strategies against soil erosion, especially extended conservation tillage systems in core regions of soil erosion hazards.		
17. Keywords Climate change, soil erosion, soil conservation, USLE, R factor, C factor, WETTREG		
18. Price	19.	20.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	10
Anhangsverzeichnis .....	13
Abkürzungsverzeichnis .....	14
1 Einleitung.....	17
1.1 Veranlassung .....	17
1.2 Ziele des Vorhabens .....	18
1.3 Methodisches Gesamtkonzept.....	19
1.4 Projektbeirat.....	21
1.5 Aufbau des Berichtes.....	22
2 Methodische Vorgehensweise .....	24
2.1 Modellansatz der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG).....	24
2.2 Datengrundlagen.....	25
2.3 Schaffung der Vergleichsgrundlage - Bundesweite Bewertung der Erosionsgefährdung für den Ist-Zeitraum .....	27
2.3.1 Bestimmung der R-Faktoren.....	27
2.3.2 Bestimmung der K-Faktoren.....	34
2.3.3 Bestimmung der C-Faktoren.....	36
2.3.4 Bestimmung der LS-Faktoren .....	47
2.3.5 Modellierung und Bewertung der Erosionsgefährdung für den Ist- Zeitraum – Modelle ABAGFlux und TerraFlux .....	57
2.4 Abschätzung der Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen.....	60
2.4.1 Auswahl eines regionalen Klimaszenarienmodells.....	60
2.4.2 Regressionsansatz zur Bestimmung der R-Faktoren für die Szenarienzeiträume .....	69

2.4.3	Szenarienanalysen zur Neubestimmung der C-Faktoren .....	83
2.4.4	Neuberechnung und Bewertung der Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume .....	91
<b>3</b>	<b>Bundesweite Darstellung der Erosionsgefährdung für den Zeitraum 1971-2000.....</b>	<b>93</b>
3.1	Einzelfaktoren der ABAG .....	93
3.1.1	Darstellung der R-Faktorenverteilung .....	93
3.1.2	Darstellung der K-Faktoren-Verteilung .....	95
3.1.3	C-Faktoren der Naturräume in Deutschland .....	96
3.1.4	LS-Faktorenverteilung .....	110
3.2	Potenzielle Erosionsgefährdung in Deutschland.....	115
3.3	Nutzungsabhängige Erosionsgefährdung in Deutschland .....	124
<b>4</b>	<b>R-Faktoren und Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen .....</b>	<b>134</b>
4.1	R-Faktoren der Szenarienzeiträume.....	134
4.1.1	Entwicklung der Niederschläge .....	134
4.1.2	Darstellung der R-Faktoren für den Kontrolllauf und die Szenarien .....	138
4.1.3	Veränderung der R-Faktoren zwischen 2011 und 2100 .....	139
4.2	Auswirkungen auf die potenzielle Erosionsgefährdung.....	148
4.3	Ausweisung von Schwerpunktgebieten einer zukünftigen Entwicklung der potenziellen Erosionsgefährdung.....	154
<b>5</b>	<b>Abschätzung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen .....</b>	<b>158</b>
5.1	C-Faktoren der Szenarienzeiträume.....	158
5.1.1	Veränderung der C-Faktoren als Folge der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung (Phänophasen und Kulturperioden).....	158
5.1.2	Veränderung der C-Faktoren unter zusätzlicher Berücksichtigung von Annahmen zur Bodenbearbeitung .....	163
5.1.3	Veränderung der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung.....	166
5.2	Auswirkungen auf die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung.....	172



5.3	Ausweisung von Schwerpunktgebieten einer zukünftigen Entwicklung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung .....	184
6	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	190
6.1	Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Erosionsgefährdung und Ausweisung von Schwerpunktregionen .....	190
6.2	Handlungsstrategien zur Verminderung der Erosionsgefährdung .....	192
6.3	Möglichkeiten und Grenzen der Ergebnisinterpretation hinsichtlich verwendeter Methoden und Modelle .....	194
7	Perspektiven und Ausblick .....	196
8	Literaturverzeichnis .....	198

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektschema.....	21
Abbildung 2: Regressionsbeziehung zwischen Sommerniederschlag und Jahres- R-Faktoren für 191 Stationen .....	29
Abbildung 3: Räumliche Verteilung der R-Faktor-Stationen und ihre Datenquellen .....	30
Abbildung 4: Darstellung des Niederschlagsrasters vor und nach der Interpolation.....	31
Abbildung 5: Vergleich der R-Faktoren in Nordrhein-Westfalen und Hessen für unterschiedliche Regressionsbeziehungen .....	33
Abbildung 6: Klimagebiete der BÜK 1000N.....	35
Abbildung 7: Prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung des C-Faktors .....	37
Abbildung 8: Belegung der Naturräume mit statistischen Daten .....	40
Abbildung 9: Lage der phänologischen Meldestationen.....	41
Abbildung 10: Dauer der Vegetationsperiode in Tagen.....	43
Abbildung 11: Räumliche Gliederung der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten .....	45
Abbildung 12: Monatliche R-Faktoren-Anteile der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten.....	45
Abbildung 13: Aufteilung des Hanges durch Nutzungsgrenzen und Barrieren .....	48
Abbildung 14: Landwirtschaftliche Nutzflächen, basierend auf dem Basis-DLM .....	49
Abbildung 15: Ausgewiesene Senkenbereiche nach GMK 1000.....	52
Abbildung 16: Faktoren zur Hanglängenberechnung.....	53
Abbildung 17: Exemplarische Darstellung der Parameter zur Ableitung des LS-Faktors .....	54
Abbildung 18: Darstellung des L-Faktors – abgeleitet aus dem spezifischen Einzugsgebiet.....	55
Abbildung 19: Vergleich der Standardvariante zur Bestimmung des L-Faktors mit Modellansatz zur Bestimmung des L-Faktors aus dem spezifischen Einzugsgebiet.....	56
Abbildung 20: Fließschema der Modelle ABAGFlux und TerraFlux.....	57
Abbildung 21: Wiedergabe der Jahresniederschlagsverteilung in Deutschland durch die Modelle.....	63

Abbildung 22: Schema zur Bestimmung der R-Faktoren .....	70
Abbildung 23: Beispielschema zur Ableitung von Wichtungsfaktoren aus der Distanz der WETTREG-Stationen zur Referenzstation .....	71
Abbildung 24: Verwendete Referenzstationen und WETTREG-Stationen zur Bestimmung der R-Faktoren .....	72
Abbildung 25: 98 %-Perzentil der 30-jährigen Reihe des Kontrolllaufes – Station Aachen	74
Abbildung 26: Statistischer Zusammenhang zwischen gemessenen R-Faktoren und den Starkregensummen des Kontrolllaufes.....	76
Abbildung 27: Vergleichende Darstellung der Ansätze zur Regionalisierung der R-Faktoren .....	82
Abbildung 28: Jahreszeitlicher Verlauf der mittleren Temperatursummen für Deutschland der Szenarienzeiträume in Bezug zum Kontrolllauf des WETTREG-Modells	84
Abbildung 29: Verlauf der mittleren jährlichen Temperatursummen innerhalb der Bewertungseinheiten im Zeitraum 1971 bis 2000.....	88
Abbildung 30: Verteilung der Sommerniederschläge (1971-2000) .....	93
Abbildung 31: R-Faktoren in Deutschland (1971-2000).....	94
Abbildung 32: K-Faktoren in Deutschland.....	95
Abbildung 33: Verteilung der Naturraumeinheiten nach ihrer Flächengröße.....	96
Abbildung 34: Anzahl der Gemeinden je Naturraum.....	98
Abbildung 35: Übersicht zu den Anbauverteilungen der Fruchtartenhauptgruppen in den Flächenbundesländern Deutschlands - ermittelt auf Grundlage der Agrarstrukturdatenerhebung 2007.....	98
Abbildung 36: Flächenanteile der Fruchtartenhauptgruppen bezogen auf die Naturraumeinheiten.....	101
Abbildung 37: Mittlere Eintrittstage für die Merkmale Aussaat und Ernte für die Fruchtarten Winterweizen, Winterraps und Mais, bezogen auf die Naturraumeinheiten Deutschlands .....	103
Abbildung 38: Bodenbearbeitungs-/Aussaatverfahren für Wintergetreide .....	105
Abbildung 39: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Naturräumen Deutschlands unter Annahme einer 100 %-igen konventionellen Bewirtschaftung.....	107

Abbildung 40: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Natur- räumen Deutschlands unter Annahme einer 25 %-igen konservierenden Bewirtschaftung.....	108
Abbildung 41: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Natur- räumen Deutschlands unter Annahme einer 50 %-igen konservierenden Bewirtschaftung.....	109
Abbildung 42: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Natur- räumen Deutschlands unter Annahme einer 100 %-igen konservierenden Bewirtschaftung.....	110
Abbildung 43: Darstellung der S-Faktoren Deutschlands .....	111
Abbildung 44: Vergleich der L-Faktoren in Abhängigkeit von der Nutzung.....	112
Abbildung 45: Darstellung der nutzungsdifferenzierten L-Faktoren der Acker- flächen Deutschlands .....	113
Abbildung 46: Darstellung der nutzungsdifferenzierten LS-Faktoren der Ackerflächen Deutschlands .....	114
Abbildung 47: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxS) auf den landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	116
Abbildung 48: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) auf den landwirt- schaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	117
Abbildung 49: Flächenanteil landwirtschaftlicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume.....	118
Abbildung 50: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der potenziellen Boden- abträge (RxKxS) der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten .....	119
Abbildung 51: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	120
Abbildung 52: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der potenziellen Bodenabträge (RxKxLxS) der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten.....	121
Abbildung 53: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	122
Abbildung 54: Lage ausgewählter Naturräume mit hohem potenziellen Bodenabtrag .....	123

Abbildung 55: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag (100 % konventionelle Bodenbearbeitung) auf den landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	125
Abbildung 56: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag (50 % konservierende Bodenbearbeitung) auf den Ackerflächen Deutschlands (Ist-Zustand) .....	126
Abbildung 57: Reduzierung der Bodenabträge gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung bei Annahme einer 50 % konservierenden Bodenbearbeitung.....	127
Abbildung 58: Flächenanteil ackerbaulicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume .....	128
Abbildung 59: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der nutzungsabhängigen Bodenabträge der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung .....	130
Abbildung 60: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag der ackerbaulichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands für verschiedene Annahmen des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung.....	131
Abbildung 61: Lage ausgewählter Naturräume mit hohem nutzungsabhängigen Bodenabtrag (50 % konservierende Bodenbearbeitung).....	133
Abbildung 62: Jahresniederschlagssummen des Vergleichszeitraumes (Kontrolllauf 1971-2000) und der Szenarienzeiträume .....	136
Abbildung 63: Veränderung der Jahresniederschläge der Szenarienzeiträume gegenüber dem Vergleichszeitraum 1971-2000 .....	137
Abbildung 64: R-Faktoren des Kontrolllaufes (1971-2000).....	138
Abbildung 65: R-Faktoren der Szenarienzeiträume (2011-2100) .....	140
Abbildung 66: Veränderung der R-Faktoren der Szenarienzeiträume gegenüber dem Kontrolllauf.....	141
Abbildung 67: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der mittleren R-Faktoren der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume .....	142
Abbildung 68: Vergleich der räumlichen Veränderung der Starkniederschlagssummen und der R-Faktoren des Szenarienzeitraums 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum.....	145
Abbildung 69: Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung der R-Faktoren in den Szenarienzeiträumen – Beispiel 2011-2040. ....	146

Abbildung 70: Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung der R-Faktoren in den Szenarienzeiträumen – Beispiel 2071-2100. ....	146
Abbildung 71: Mittlerer potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) und Anteil der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands.....	149
Abbildung 72: Veränderung des mittleren potenziellen Bodenabtrages (RxKxLxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands in den Szenarienzeiträumen gegenüber dem Referenzzeitraum .....	150
Abbildung 73: Median- und Quartilwerte des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume .....	152
Abbildung 74: Veränderung des mittleren potenziellen Bodenabtrages der landwirtschaftlichen Flächen in Schwerpunktgebieten der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum.....	155
Abbildung 75: Lage der Schwerpunktgebiete mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum .....	157
Abbildung 76: Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode der Szenarienzeiträume in den Naturräumen Deutschlands .....	160
Abbildung 77: Jahreszeitlicher Verlauf der R-Faktorenanteile in den Szenarienzeiträumen.....	161
Abbildung 78: Absolute Veränderung der C-Faktoren in den Naturräumen gegenüber der Referenzperiode (Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung 50 %).....	170
Abbildung 79: Absolute Veränderung der C-Faktoren in den Naturräumen gegenüber der Referenzperiode (Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung 50 %, keine Berücksichtigung von Stilllegungen) .....	171
Abbildung 80: Flächenanteil ackerbaulicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume .....	173
Abbildung 81: Mittlerer nutzungsabhängiger Bodenabtrag für 100 % konventionelle und 50 % konservierende Bodenbearbeitung in den Naturräumen Deutschlands (Kontrolllauf).....	174
Abbildung 82: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2011-2040 gegenüber dem Referenzzeitraum.....	176

Abbildung 83: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum.....	177
Abbildung 84: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum.....	179
Abbildung 85: Median- und Quartilwerte des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten bei 50 %-iger konservierender Bodenbearbeitung .....	182
Abbildung 86: Median- und Quartilwerte des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen R-Einheiten (50 % konservierende Bodenbearbeitung ohne Stilllegungsflächen) .....	183
Abbildung 87: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten der Erosionsgefährdung (2011-2040) gegenüber dem Referenzzeitraum.....	185
Abbildung 88: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten der Erosionsgefährdung (2041-2070) gegenüber dem Referenzzeitraum.....	186
Abbildung 89: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten der Erosionsgefährdung (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum.....	187
Abbildung 90: Lage der Schwerpunktgebiete (Naturräume) mit großer Veränderung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum .....	189

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bereitgestellte Datengrundlagen.....	26
Tabelle 2: R-Faktoren – abgeleitet aus verschiedenen Regressionsgleichungen .....	32
Tabelle 3: Übersicht zu Vorgehensweisen zur Ermittlung des C-Faktors in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung und den Bewertungszielen .....	36
Tabelle 4: Übersicht der bereitgestellten Fruchtartengruppen .....	39
Tabelle 5: Phänophasen landwirtschaftlicher Kulturarten.....	42
Tabelle 6: Zuordnung von Datenquellen der R-Faktoren-Anteile zu naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten.....	44
Tabelle 7: Linienhafte Barrieretypen und ihre Zuordnung zum DLM250 .....	49
Tabelle 8: Flächenhafte Barrieretypen und ihre Zuordnung zu DLM250 und Basis-DLM .....	50
Tabelle 9: Ableitung des Hanglängenexponenten $m$ aus der Hangneigung .....	53
Tabelle 10: Flächenanteile der Abtragsklassen in Deutschland .....	56
Tabelle 11: Berechnungsvarianten für die potenzielle Erosionsgefährdung .....	58
Tabelle 12: Berechnungsvarianten für die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung.....	59
Tabelle 13: Informationen zu den Modellen REMO und WETTREG.....	60
Tabelle 14: Relative Abweichungen der Modellkontrollläufe gegenüber Beobachtungsdaten.....	62
Tabelle 15: Stationswerte der für den Modellvergleich betrachteten Stationen.....	64
Tabelle 16: Stationsbezogener Vergleich von Niederschlagsparametern der Modellkontrollläufe mit Beobachtungsdaten (1971-2000) .....	65
Tabelle 17: Relative Veränderung von Niederschlagsparametern für die Szenarienzeiträume gegenüber den Modellkontrollläufen .....	66
Tabelle 18: Stationsweise für alle CLINO-Perioden ermittelte Niederschlagsparameter .....	75
Tabelle 19: Regressionsgleichungen und Gütemaße für WETTREG-Kontrolllauf .....	78
Tabelle 20: Regressionsgleichungen zur Bestimmung des R-Faktors und Gütemaße für die WETTREG-Szenarienzeiträume (Erstbestimmung) .....	79



Tabelle 21: Auswirkungen des Klimawandels auf die Kulturperioden landwirtschaftlicher Kulturen zur Ableitung des C-Faktors .....	85
Tabelle 22: Varianten zur Berechnung der C-Faktoren der Szenarienzeiträume .....	90
Tabelle 23: Berechnungsvarianten der Erosionsgefährdung in den Szenarienzeiträumen.....	92
Tabelle 24: Verteilung der Gemeindeanzahl je Naturraum in Abhängigkeit von der Größe des jeweiligen Naturraumes .....	97
Tabelle 25: Anbauverteilungen der Fruchtartenhauptgruppen in den Flächenbundesländern Deutschlands (Stand 2007).....	99
Tabelle 26: Fruchtartenverteilung in Deutschland auf Ebene der Naturräume - Vergleich ausgewählter Bundeslandstatistiken mit den jeweiligen FDZ-Daten .....	99
Tabelle 27: Wachstumsmodell (Differenz Tage zum Stichtag Aussaat) .....	104
Tabelle 28: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten .....	119
Tabelle 29: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten.....	121
Tabelle 30: Mittlerer potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) in ausgewählten Naturräumen .....	123
Tabelle 31: Rückgang der mittleren Bodenabträge in naturräumlichen Haupt- einheiten in Abhängigkeit vom Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung .....	127
Tabelle 32: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten.....	129
Tabelle 33: Mittlerer nutzungsabhängiger Bodenabtrag in ausgewählten Natur- räumen bei Annahme eines Anteils von 50 % konservierender Bodenbearbeitung....	132
Tabelle 34: Veränderung der Niederschlagssummen in den naturräumlichen R-Einheiten .....	135
Tabelle 35: Statistische Kenngrößen der mittleren R-Faktoren der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume .....	143
Tabelle 36: Veränderung der mittleren R-Faktoren der naturräumlichen R- Einheiten für die Szenarienzeiträume in Abhängigkeit vom R-Ansatz.....	147
Tabelle 37: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume .....	152

Tabelle 38: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume .....	153
Tabelle 39: Veränderung der mittleren potenziellen Bodenabträge in Schwerpunktgebieten (Naturräume) mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum .....	157
Tabelle 40: Veränderungen der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode in den Szenarienzeiträumen in Bezug auf den Vergleichszeitraum von 1971 bis 2000 .....	158
Tabelle 41: Einfluss der Bodenbedeckung und des Verlaufs der R-Faktoren auf die Höhe des C-Faktors.....	162
Tabelle 42: Veränderung der C-Faktoren in den Szenarienzeiträumen unter Annahme einer 100 % konventionellen Bodenbearbeitung.....	164
Tabelle 43: Veränderung der C-Faktoren in den Szenarienzeiträumen unter Annahme einer 100 % konservierenden Bodenbearbeitung.....	165
Tabelle 44: Mittlere C-Faktoren in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien.....	167
Tabelle 45: Absolute Veränderung der mittleren C-Faktoren in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien gegenüber der Referenzperiode.....	169
Tabelle 46: Mittlere nutzungsabhängige Bodenabträge in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien .....	180
Tabelle 47: Relative Veränderung der mittleren nutzungsabhängigen Bodenabträge in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien gegenüber der Referenzperiode.....	181
Tabelle 48: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten bei 50 %-iger konservierender Bodenbearbeitung .....	182
Tabelle 49: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume in den naturräumlichen R-Einheiten (50 % konservierende Bodenbearbeitung ohne Stilllegungsflächen) .....	183
Tabelle 50: Veränderung der mittleren nutzungsabhängigen Bodenabträge in Schwerpunktgebieten mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum (50 % konservierende Bodenbearbeitung) .....	188

# Anhang

Anhang 1: R-Faktoren und Niederschlagssummen der verwendeten Stationen.....	A1
Anhang 2: Bezeichnung der Legendeneinheiten der BÜK 1000N .....	A7
Anhang 3: K-Faktoren der Legendeneinheiten der BÜK 1000N in Abhängigkeit von Klimagebiet und Hauptnutzung.....	A10

# Abkürzungsverzeichnis

*(Nicht im Textteil oder in den Fußnoten der Gleichungen erläuterte Abkürzungen)*

°C	Grad Celsius
a	Jahr
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
Abb.	Abbildung
AG	Arbeitsgemeinschaft
BB	Bodenbearbeitung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
Bd.	Band
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BÜK	Bodenübersichtskarte
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CEC	Climate & Environment Consulting
CLINO	climate normal
CLM	Climate Limited area Model
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CORINE	Coordination of Information of the Environment
d. h.	das heißt
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
e.V.	eingetragener Verein
et. al.	und andere
EU	Europäische Union
EZG	Teileinzugsgebietsgröße
f.	für
FA	Fließakkumulation
FDZ	Forschungsdatenzentrum Nord
FKZ	Förderkennzeichen
gg.	gegenüber
GIS	Geoinformationssystem
Gl.	Gleichung
GMK	Geomorphographische Karte

GPD	Generalized Pareto Distribution
h	Stunde
ha	Hektar
Hrsg.	Herausgeber
ID	Identifikationsnummer
IDP-Tool	Interaktives Diagnose- und Präsentationstool
incl.	inklusive
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
k. A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
KLIWA	Vorhaben 'Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft'
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
konserv.	konservierend
konvent.	konventionell
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LLFG	Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau Sachsen-Anhalt
$l_{\text{nat}}$	natürliche Hanglänge
LW	Landwirtschaft
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
Mio.	Million
mm	Millimeter
mNN	Meter über Normalnull
MPI	Max-Planck-Institut
n	Anzahl
N	Niederschlag
NAWARO	nachwachsende Rohstoffe
$N_{\text{jahr}}$	Jahresniederschlagssumme
Nr.	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
$N_{\text{So}}$	Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres
östl.	östlich
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
P98	98 %-Perzentil
PoT	Peak-over-threshold-Methode
r	Korrelationskoeffizient
r <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß

RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
RBA	Relativer Bodenabtrag
REMO	Regional Model
R <sub>Jahr</sub>	Jahres-R-Faktor
RP	Rheinland-Pfalz
s.	siehe
S.	Seite
SB	Saatbett
So-HJ	Sommerhalbjahr
STALA	Statistisches Landesamt
südl.	südlich
t	Tonne
Tab.	Tabelle
TU	Technische Universität
u. a.	unter anderen
UBA	Umweltbundesamt
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTM	Universal Transverse Mercator
vgl.	vergleiche
westl	westlich
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WGS	World Geodetic System
Wi-HJ	Winterhalbjahr
z. B.	zum Beispiel
ZALF	Zentrum für Agrarlandschaftsforschung



# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung

Laut viertem Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) lässt sich im globalen Maßstab seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur um durchschnittlich 0,7 °C sowie eine Umverteilung der Niederschläge feststellen (IPCC 2007). Für Deutschland diagnostizierten JONAS et al. (2005) eine noch stärkere mittlere Erwärmung um 1,0 °C zwischen 1901 und 2000. Ebenfalls nahmen im gleichen Zeitraum im bundesweiten Durchschnitt die Niederschlagssummen um 9 % zu, wobei einem leichten Rückgang der Niederschläge im Sommerquartal eine deutliche Erhöhung um 19 % im Winter gegenübersteht (JONAS et al. 2005). Für die Entwicklung der Starkniederschläge weisen regional differenzierte Beobachtungen vor allem im Westen Deutschlands einen deutlich positiven und im Osten einen geringer ausfallenden Trend für eine Zunahme auf. Ausgehend von der Diagnose zeigen die vom Umweltbundesamt veröffentlichten Ergebnisse regionaler Klimamodelle auch für die Klimaprognose des 21. Jahrhunderts eine weitere Zunahme der winterlichen und einen Rückgang der sommerlichen Niederschläge (JACOB et al. 2008; SPEKAT et al. 2007). Gleichzeitig wird, mit regional unterschiedlichem Ausmaß, von einer Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen ausgegangen (JACOB et al. 2008; SPEKAT et al. 2007; GERSTENGARBE 2006).

Aus den prognostizierten Klimaänderungen lassen sich für den Boden- und Gewässerschutz negative Folgewirkungen ableiten. Insbesondere eine verstärkte Erosionsgefährdung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen infolge der Zunahme erosiver Niederschlagsereignisse wäre gleichbedeutend mit höheren Bodenabträgen, Bodenfunktionsverlusten und einem Anstieg diffuser Stoffeinträge in die Gewässer. Gleichzeitig verändern sich als Folge der Temperaturerhöhung die Phänophasen und somit die Vegetationsperioden landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Daraus resultiert eine Veränderung der Bodenbedeckung, die, in Zusammenhang mit der Veränderung des innerjährlichen Starkniederschlagsverhaltens zu einer weiteren Verstärkung oder aber auch Verminderung der potenziellen Erosionsgefährdung führen kann (UBA 2008).

Die Bundesregierung hat am 17. Dezember 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) beschlossen. Dem Boden als Ökosystem kommt unter Berücksichtigung der möglichen Folgen des Klimawandels eine besondere Bedeutung zu. Auch in Hinblick auf die entsprechenden Anpassungsmaßnahmen ist der Boden daher eines der 15 Handlungsfelder innerhalb der DAS. Durch einen unter Beteiligung der Bundesländer zu entwickelnden „Aktionsplan Anpassung“ soll die Anpassungsstrategie bis März 2011 weiter konkretisiert werden. Hierzu sind räumlich übergreifende Aussagen zur Betroffenheit und Beeinträchtigung des Bodens durch die Klimaänderungen erforderlich, um langfristige Anpassungsstrategien zu erarbeiten.



Darüber hinaus werden für die bundes- und EU-weite Umweltberichterstattung Informationen über den Zustand und die Gefährdung der Böden benötigt, welche die Grundlage für Maßnahmen zur Vorsorge und zur Gefahrenabwehr gegen Erosion bilden. Der Entwurf der Bodenrahmenrichtlinie enthält einen Vorschlag zur Bestimmung von prioritären Gebieten, die von Erosion betroffen sein können. Ebenso ist zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie die großflächige Ausweisung erosionsgefährdeter Flächen erforderlich, um entsprechende Maßnahmen zur Minderung potenzieller Sediment- und Stoffeinträge ergreifen zu können.

In diesem Zusammenhang hat das Umweltbundesamt (UBA) im Rahmen des UFOPLAN das durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Forschungsprojekt „Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser“ initiiert. Das Projekt ist Teil des Vorhabens „Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden“ (FKZ 3708 71 205).

## 1.2 Ziele des Vorhabens

Vor dem in Abschnitt 1.1 erläuterten Hintergrund ergibt sich das vorrangige Ziel des Projektes, die klimabedingte Veränderung des Niederschlagsregimes und die daraus resultierenden möglichen Folgen für die Bodenerosionsentwicklung in Deutschland zu untersuchen und zu quantifizieren. Darüber hinaus werden durch Szenarienbetrachtungen zur Abschätzung des Einflusses von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Bodenerosion und des Einflusses von Anpassungsmaßnahmen zur Kompensation klimabedingter Erosionsgefährdungen Nutzungsprobleme aufgezeigt, um Folgeschäden für Umwelt und Gesellschaft besser abschätzen zu können. Den Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion ist die Schaffung einer Vergleichsgrundlage vorangestellt, welche die bundesweite Erosionsgefährdung im Ist-Zustand großräumig charakterisiert. Wesentliche Ziele des Vorhabens lassen sich wie folgt benennen:

- Schaffung einer Vergleichsgrundlage des aktuellen und potenziellen Bodenabtrages für den Ist-Zustand 1971-2000 auf Basis des Modellansatzes der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG)
- Neubestimmung des Regen- und Oberflächenabflussfaktors (R-Faktor) auf Grundlage eines regionalen Klimaszenarienmodells
- Ermittlung der Klimawirkungen auf die Bodenbedeckung (C-Faktor) anhand von Szenarienbetrachtungen zu den Veränderungen der Phänophasen für angebaute Fruchtfolgen und Kulturarten sowie Annahmen zur Bodenbearbeitung
- Bundesweite Modellierung der potenziellen und nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung





- Vergleichende Betrachtung der bundesweiten Erosionsgefährdung für den Referenzzeitraum 1971-2000 und die Szenarienzeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100
- Ableitung von Empfehlungen für mögliche Nutzungsszenarien (Fruchtfolgen, Kulturarten) sowie die Bodenbearbeitung unter dem Blickwinkel des Klimawandels

Die vorliegenden Ergebnisse dienen der bundesweiten Übersichtsdarstellung der gegenwärtigen und zukünftig zu erwartenden potenziellen und nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung in Deutschland. In Abhängigkeit von den verwendeten Datengrundlagen und der im Rahmen der Studie angewendeten Methoden und Modelle sind maßstabsbedingt Differenzen zu Ergebnissen und Informationen der regionalen oder lokalen Maßstabsebene zu erwarten. Insofern muss die Bewertung und Interpretation der Resultate entsprechend des bundesweiten Maßstabes erfolgen. Eine Untersetzung der Ergebnisse innerhalb der Bundesländer, unter Verwendung höher aufgelöster Datengrundlagen, ist zur Verbesserung der regionalen Aussageschärfe anzustreben.

Vor dem Hintergrund der Vielzahl an vorhandenen globalen und regionalen Klimamodellen, den verschiedenen Emissionsszenarien sowie unterschiedlichen Ansätzen zur Modellierung der Bodenerosion stellen die vorliegenden Ergebnisse nur einen Teil eines Ensembles verschiedener Entwicklungsmöglichkeiten dar. Demnach besitzen die in dieser Studie getroffenen Aussagen ihre Gültigkeit ausschließlich unter Benennung der verwendeten Modelle, Methoden sowie der betrachteten Maßstabsebene.

### 1.3 Methodisches Gesamtkonzept

Der in dieser Studie zur Anwendung kommende Untersuchungsansatz gliedert sich in vier wesentliche Kategorien (vgl. Abbildung 1). Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Abschätzung der zukünftig zu erwartenden potenziellen und nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen Deutschlands.

Für die Prognose großräumiger Bodenabträge gilt der Ansatz der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) gemeinhin als anerkannte Modellgrundlage. In Hinblick auf die Bewertung klimabedingter Veränderungen des Bodenabtrages ist der direkt über das Klima gesteuerte R-Faktor der ABAG von Bedeutung. Der Regressionsansatz beinhaltet die Neubestimmung (Wichtung) der für Deutschland gültigen R-Faktoren für die 30-jährigen CLINO-Perioden der Klimaszenarien von 2011 bis 2100 über ein kombiniertes Verfahren. Grundgedanke ist dabei, dass der R-Faktor die Erosivität der Niederschläge widerspiegelt und auf Basis analysierter Starkregenereignisse bestimmt wurde. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass aus einer Veränderung des Starkregenverhaltens in gleichem Maße auf eine Veränderung der R-Faktoren geschlossen werden kann. Das Verfahren integriert zum einen die simulierten Tagesniederschläge eines



regionalen Klimamodells und betrachtet zudem über eine Schwellenwertmethode die direkte Veränderung des R-Faktors, das heißt, des Anteils erosiver Niederschläge am Gesamtniederschlag. Die Wichtung erfolgt auf Grundlage einer Starkregenanalyse, welche die Veränderung der definierten Starkregensummen der Szenarienzeiträume gegenüber dem Modellkontrolllauf berücksichtigt. Die flächendeckende Bestimmung der R-Faktoren kann anschließend über die Ableitung angepasster Regressionsgleichungen und deren Verknüpfung mit den mittleren Niederschlägen des regionalen Klimamodells erfolgen. Als Datengrundlage dienen hierzu die Ergebnisse des regionalen Klimaszenarienmodells WETTREG (SPEKAT et al. 2007).

Neben dem direkt über das Klima gesteuerten R-Faktor lassen sich aus den zu erwartenden Klimaveränderungen auch Einflüsse auf die Vegetationsbedeckung durch die Anpassung der Fruchtfolgen und angebaute Kulturarten erwarten. Diese werden gemäß der ABAG durch den C-Faktor wiedergegeben. Im Rahmen einer Szenarienbetrachtung werden die Wirkungszusammenhänge und Auswirkungen ermittelt, die sich aus der Veränderung der Jahres-R-Faktoren-Verteilung und der Veränderung der Phänophasen für die angebauten Fruchtfolgen und Kulturarten und deren räumliche Verteilung ergeben können. Basis hierfür bilden neben den Ergebnissen der R-Faktorenbetrachtung die Auswertung der zukünftigen Temperaturentwicklung sowie eine Literaturrecherche, aus deren Ergebnissen die Veränderungen abgebildet und zukünftig wahrscheinliche C-Faktoren ausgewiesen werden. Darüber hinaus dienen Annahmen eines steigenden Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung, der sich aus der erhöhten Wasser-, Energie- und Kosteneffizienz dieser Bodenbearbeitungssysteme begründen lässt sowie zur Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und deren Umwidmung in Anbauflächen für erneuerbare Energiepflanzen der Ermittlung möglicher Schwankungsbreiten der zukünftigen C-Faktoren.

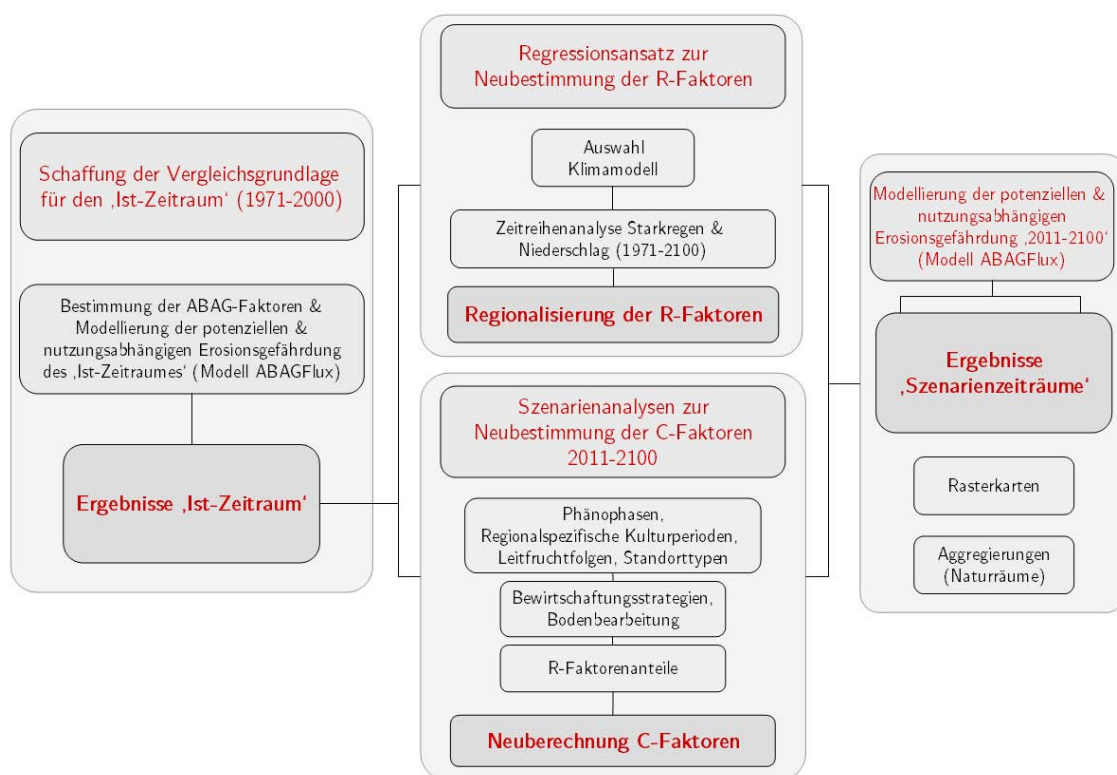
Beiden Untersuchungsschwerpunkten, welche ihren zeitlichen Bezug im Szenarienzeitraum 2011 bis 2100 besitzen, wird die Schaffung der Vergleichsgrundlage für den Zeitraum 1971 bis 2000 vorangestellt. Dabei wird zum einen die bundesweite Erosionsgefährdung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen unter Verwendung aktueller Datengrundlagen kleinmaßstäbig bestimmt. Darüber hinaus werden in diesem Arbeitspaket Modellgrundlagen erarbeitet, die als konstante Faktoren sowohl für den Ist-Zeitraum als auch die Szenarienzeiträume in die Erosionsmodellierung einfließen. Dies betrifft die K-, L- und S-Faktoren der ABAG. Die Modellierung selbst wird durch Anwendung der Modellsysteme *ABAGFlux* und *TerraFlux* (vgl. WURBS et al. 2007; VOLK et al. 2010) realisiert, die auf einem modifizierten Ansatz der Bodenabtragsgleichung beruhen und der Ermittlung langjähriger Bodenabträge durch die variable Einbindung und Modifizierung der ABAG-Faktoren dienen.

Ursprüngliches Ziel der Untersuchungen war es, die vorliegenden Ergebnisse aus der Studie ‚Bundesweite Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Agrarstatistikdaten und aktuellen Daten der Bodennutzung‘ (ERHARDT ET AL. 2002) unter Verwendung aktualisierter Datengrundlagen fortzuschreiben. Im Verlauf der ersten Projektphase musste



in Abstimmung mit dem Projektbeirat festgestellt werden, dass die in der genannten Studie verwendeten Daten und Annahmen nicht in dem Maße belastbar sind, als dass sie als Fortschreibungsgrundlage in die eigenen Untersuchungen eingehen können. Demzufolge wurden für den Ist-Zustand 1971-2000 aktualisierte Datengrundlagen eingebunden und eigene Grundannahmen für die Abschätzung der gegenwärtigen Erosionsgefährdung getroffen.

Abbildung 1: Projektschema



## 1.4 Projektbeirat

Das Forschungsvorhaben wurde durch einen vom Umweltbundesamt einberufenen Projektbeirat fachlich beratend unterstützt. Dabei wurden das methodische Vorgehen sowie die Projektergebnisse gemeinsam diskutiert und abgestimmt. Der Beirat setzte sich aus folgenden Fachvertretern zu den Themenkomplexen Agrarökologie, Landwirtschaft, Landnutzung und Bodenschutz zusammen:



- Herr Dr. Detlef Deumlich - Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Institut für Bodenlandschaftsforschung, Müncheberg,
- Herr Dr. Volker Hennings - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Geozentrum, Hannover,
- Herr Dr. Walter Schmidt - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Abteilung 7 – Pflanzliche Erzeugung, Leipzig,
- Herr Dr. Matthias Schrödter - Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLFG), Bernburg-Strenzfeld,
- Herr Dr. Karl Severin - Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover,
- Herr Dr. Walter Schäfer - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover,
- Herr Robert Brandhuber - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Freising,
- Herr Dr. Norbert Billen - Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Stuttgart,
- Herr Dirk Elhaus - Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Fachbereich Fachinformationssystem, Krefeld.

Außerhalb des Projektbeirates erfolgten der wissenschaftliche Austausch und die Durchführung von Fachdiskussionen mit Vertretern des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Abteilung Agrarmeteorologie sowie des Umweltbundesamtes, Fachgebiet KomPass – Klimafolgen und Anpassung in Deutschland.

## 1.5 Aufbau des Berichtes

Nach den einleitenden Abschnitten (Kap. 1) erfolgt in Kapitel 2 eine umfangreiche Erläuterung der methodischen Vorgehensweise. Diese beinhaltet zunächst die Schaffung der Vergleichsgrundlage, die ABAG-basierte Modellierung des Ist-Zustandes der gegenwärtigen Erosionsgefährdung in Deutschland. Darin eingeschlossen ist die Bestimmung der Einzelfaktoren der ABAG und die Beschreibung der verwendeten Erosionsmodelle (Kap. 2.3). Die zukünftige Entwicklung der Erosionsgefährdung wird vorrangig durch die Veränderung des C- und R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung bestimmt. Einer Beschreibung des verwendeten regionalen Klimaszenarienmodells WETTREG (Kap. 2.4.1) schließen sich die Erläuterung des Regressionsansatzes zur Neubestimmung der R-Faktoren (Kap. 2.4.2) und der Szenarienanalysen zum C-Faktor (Kap. 2.4.3) an. Die Abschnitte 3, 4 und 5 dienen der Ergebnisdarstellung. In Abschnitt 3 werden die räumliche Verteilung der ABAG-Faktoren und der potenziellen sowie nut-



zungsabhängigen Erosionsgefährdung in Deutschland für den Zeitraum 1971 bis 2000 dargestellt. Die Beschreibung der Veränderung der R-Faktoren und der daraus resultierenden Entwicklung der potenziellen Erosionsgefährdung erfolgt in Kapitel 4. Die Abschätzung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen, welche zusätzlich den C-Faktor einbezieht, wird in Abschnitt 5 vorgenommen. Abschnitt 6 fasst die Erkenntnisse zusammen und zeigt Handlungsstrategien sowie Möglichkeiten und Grenzen der Ergebnisinterpretation auf. In Kapitel 7 erfolgt abschließend ein kurzer Ausblick.



## 2 Methodische Vorgehensweise

### 2.1 Modellansatz der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG)

Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung ABAG (SCHWERTMANN et al. 1990) ist eine an mitteleuropäische Verhältnisse angepasste Variante der Universal Soil Loss Equation USLE (WISHMEIER & SMITH 1978), die aufgrund ihrer relativ effizient zu beschaffenden Eingangsdaten und ihrer einfachen Struktur eine weltweite Anwendung erfahren hat und Kern einer Reihe von konzeptionellen Modellansätzen ist (MERRITT et al. 2003). Die Gleichung beschreibt in ihrer ursprünglichen Form die Beziehungen zwischen Bodenabtrag und korrelativ ermittelten Klima-, Boden-, Relief- und Nutzungsfaktoren (Gl. 1). Jeder Einzelschritt liefert bereits ein auf seiner Integrationsebene gültiges Ergebnis, sodass der Einfluss der Teilfaktoren auf das Gesamtergebnis nachvollziehbar bleibt und die Zahl der zu verwendenden Faktoren von der jeweiligen Datenverfügbarkeit und benötigten Aussageschärfe (z. B. aktuelle oder potenzielle Erosionsgefährdung) abhängig gemacht werden kann.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{Gl. 1})$$

A ... mittlerer, jährlicher Bodenabtrag [ $\text{t x ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ ]; R ... Regen- und Oberflächenabflussfaktor; K ... Bodenerodierbarkeitsfaktor; LS ... Reliefaktor (Hangneigung, Hanglänge); C ... Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor; P ... Erosionsschutzfaktor

Im Zuge regionaler Anpassungen und im Zusammenhang mit der steigenden Verfügbarkeit digitaler Flächendaten sind verschiedene Varianten der Faktorenableitung entwickelt worden. Für Deutschland sind Berechnungsvarianten in HENNINGS (2000) dokumentiert. Ein Nachteil des Standardansatzes der ABAG besteht in den fehlenden Möglichkeiten, erosive Hanglängen unter dynamischer Berücksichtigung von Landschafts- und Reliefstrukturen effektiv ableiten zu können. Durch die Modifizierung einzelner ABAG-Faktoren sowie die Einbindung weiterer reliefbasierter Ansätze können diese Defizite minimiert und maßstabsunabhängig erosionsgefährdete Flächen ausgewiesen werden.

Die Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wasser wird im vorliegenden Projekt durch die Verknüpfung empirischer Erosionsmodellierungsansätze mit Verfahren der digitalen Reliefanalyse realisiert. Hierzu kommen die von der geoflux GbR entwickelten Modelle *ABAGFlux* und *TerraFlux* zur Anwendung (Kap. 2.3.5).



## 2.2 Datengrundlagen

Für die Schaffung der Modellgrundlagen wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Geo- und Klimadaten bereitgestellt. Dabei dienen die Daten der ID 1 bis 13 vorwiegend der Erosionsmodellierung des Ist-Zustandes zur Schaffung der Modell- und Vergleichsgrundlage. Zusätzlich wurden Zeitreihendaten der regionalen Klimamodelle für die Abschätzung der Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen verwendet (ID 14-16). Da im Gegensatz zu den Produkten der Landesvermessungsämter für bundesweite Datengrundlagen kein einheitlicher geodätischer Raumbezug vorgegeben ist, werden die Daten in verschiedenen Koordinatensystemen bereitgestellt. Um einen homogenen Raumbezug zu gewährleisten, wurden alle Datengrundlagen in folgendes Koordinatensystem transformiert:

- Geographisches Koordinatensystem: WGS\_1984 (UTM-Abbildung, Zone 32N)
- Projektion: Transverse Mercator
- Datum: D\_WGS 1984
- Zentralmeridian: 9,0 Grad

Id	Datenbeschreibung	Datenquelle	Verwendung
1	Rasterdatensatz (1x1 km) der mittleren Jahres- und Monatsniederschlagssummen 1971-2000	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Ableitung R-Faktor
2	Stationsbezogene R-Faktoren für Sachsen, Nordrhein-Westfalen und NO-Deutschland	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, Geologischer Dienst NRW, ZALF Müncheberg	Anpassung R-Faktor
3	Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000) mit Geometrien, Sachdaten und K-Faktoren (Stand 2005)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Regionalisierung K-Faktor
4	Digitales Geländemodell für Deutschland im 25-m-Raster (Stand 2007)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	Ableitung LS-Faktor
5	Geomorphographische Reliefparameter 1:1.000.000 (GMK 1000) (Stand 2006)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Ableitung LS-Faktor
6	Digitales Landschaftsmodell 1:250.000 (DLM 250), (alle Objektbereiche, Stand 2006)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	Ableitung von Barrieren für LS-Faktor



Id	Datenbeschreibung	Datenquelle	Verwendung
7	Digitales Basis-Landschaftsmodell 1:25.000 (Basis-DLM) mit den Ebenen Ackerland, Grünland, Brachland und baulich geprägte Flächen (Stand 2008)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	Festlegung landwirtschaftlicher Bezugseinheiten (Betrachtungsflächen), Ableitung von Barrieren für LS-Faktor
8	Phänologische Beobachtungsdaten (Stand 2008)	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Bestimmung der Anbau-terminen ausgewählter Fruchtarten für C-Faktoren-Ermittlung
9	Naturräumliche Gliederung Deutschlands (Stand 2008)	Bundesamt für Naturschutz (BfN)	Räumliche Bezugseinheiten für C-Faktoren-Ermittlung
10	Agrarstrukturhebung auf Gemeindebasis (Stand 2007)	Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder, bereitgestellt durch das Forschungsdatenzentrum (FDZ) Nord in Kiel	Ermittlung der Fruchtartenanteile in den Naturräumen auf Basis von Gemeindedaten zur C-Faktoren-Ermittlung
11	Verwaltungsgrenzen von Deutschland 1:250.000 (Stand 1.12.2006)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	Festlegung von Aggregierungsräumen
12	CORINE Land Cover 2000 – Daten zur Bodenbedeckung	Umweltbundesamt	Ergänzende Informationen
13	Ergebnis- und Berichtsdaten der UBA-Studie (ERHARDT et al. 2002)	Umweltbundesamt	Ergänzende Informationsgrundlage
14	Tageswerte des Niederschlages ausgewählter Stationen (1971-2000)	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Analysen zur Klimamodellauswahl
15	Mittlere und tägliche Klimadaten (Niederschlag, Temperatur) aller verfügbaren Stationen des WETTREG-Modells (1971-2000; 2011-2100)	Regionalmodell WETTREG, Umweltbundesamt (IDP-Tool)	Szenarienanalysen zum R- und C-Faktor
16	Mittlere und tägliche Klimadaten (Niederschlag) ausgewählter Rasterzellen des REMO-Modells (1971-2000; 2011-2100)	Regionalmodell REMO, Umweltbundesamt (IDP-Tool)	Szenarienanalysen zum R-Faktor

Tabelle 1: Bereitgestellte Datengrundlagen





## 2.3 Schaffung der Vergleichsgrundlage - Bundesweite Bewertung der Erosionsgefährdung für den Ist-Zeitraum

### 2.3.1 Bestimmung der R-Faktoren

#### *Vorgehensweise zur Ermittlung der R-Faktoren*

Der R-Faktor (Regen- oder Oberflächenabflussfaktor) ist innerhalb der ABAG das Maß für die Erosivität bzw. gebietsspezifische Wirksamkeit der Niederschläge in einem Untersuchungsraum. Niederschläge werden nur dann als erosiv angesehen, wenn sie eine bestimmte Niederschlagsmenge überschreiten. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine größere Intensität eines Niederschlagsereignisses bzw. seiner kinetischen Energie auch eine Verstärkung der erosiven Leistung nach sich zieht. Im Idealfall ist die Bestimmung der erosiven Niederschlagsmenge für jedes Untersuchungsgebiet separat durchzuführen. So leiteten WISHMEIER & SMITH (1978) für das Gebiet des Mittleren Westens der USA 12,5 mm als Grenzwert für erosive Niederschlagsereignisse ab. BADER & SCHWERTMANN (1980) änderten den Grenzwert für Bayern auf 10 mm Niederschlagsmenge, der dann auch auf Gesamtdeutschland angewendet wurde (vgl. SCHWERTMANN ET AL. 1990). Die Berechnung der Erosivität von Niederschlagsereignissen geht auf Wishmeier & Smith (1958) zurück. Der R-Faktor [ $\text{kJ} \times \text{m}^{-2} \times \text{mm} \times \text{h}^{-1}$ ] einer Station ergibt sich Gleichung (2) zufolge aus den aufsummierten Erosivitäten der Einzelniederschlagsereignisse  $R_e$  einer Station.

$$R = \sum_{e=1}^n R_e \quad (\text{Gl. 2})$$

Der  $R_e$ -Wert eines Einzelniederschlagsereignisses wird nach Gleichung 3 berechnet, wobei  $E_e$  die kinetische Energie und  $I_{30}$  [ $\text{mm} \times \text{h}^{-1}$ ] die größte durchschnittliche Regenintensität kennzeichnen, die im Verlauf einer 30-Minuten-Niederschlagsperiode gemessen wird.

$$R_e = E_e \times I_{30} \quad (\text{Gl. 3})$$

Voraussetzung für die Berechnung von  $E_e$  [ $\text{kJ} \times \text{m}^{-2}$ ] ist die Unterteilung der Niederschlagssummenkurve eines Niederschlagsereignisses in  $i$  Abschnitte konstanter Steigung. Jedem Abschnitt wird dabei die Intensität und die zugehörige Niederschlagshöhe  $N_i$  zugeordnet.  $E_e$  ergibt sich aus der Aufsummierung seiner Abschnitte  $i$  entsprechend Gleichung (4).

$$E_e = \sum_{e=1}^n 1,189 + 8,731 \log_i \times N_i \quad (\text{Gl. 4})$$



Für die flächenhafte Darstellung wird der R-Faktor alternativ aus dem mittleren Jahres- oder Sommerniederschlag mit Hilfe von Korrelationsbeziehungen zwischen berechneten R-Faktoren und langjährigen Niederschlagssummen bestimmt. Für die einzelnen Bundesländer liegen verschiedene Arbeiten zur flächenhaften Ableitung der R-Faktoren vor, welche in HENNINGS (2000) dokumentiert sind und als Grundlage für bundes-/landesweite Abschätzungen der R-Faktoren-Verteilung dienen. Für Deutschland fasste SAUERBORN (1994) die Arbeiten aller Bundesländer zusammen und stellte die R-Faktoren den zugehörigen langjährigen durchschnittlichen Niederschlagssummen von 139 Stationen gegenüber. Die daraus durch SAUERBORN (1994) abgeleiteten, für Deutschland gültigen Regressionsgleichungen stellen sich zunächst wie folgt dar:

$$R_{\text{Jahr}} = 0,0788 \times N_{\text{Jahr}} - 2,82 \quad \text{mit } r = 0,78 \quad (\text{Gl. 5})$$

$$R_{\text{Jahr}} = 0,0677 \times N_{\text{So}} + 25,68 \quad \text{mit } r = 0,45 \quad (\text{Gl. 6})$$

Eigene Untersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Studie zum linearen Zusammenhang zwischen den Niederschlagswerten und den R-Faktoren der 139 Stationen durchgeführt wurden, ergaben von Gleichung 5 und 6 abweichende Regressionsbeziehungen. Auf mögliche Ursachen der auftretenden Differenzen kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Vielmehr wurden eine Korrektur der Regressionsgleichungen und die Neubestimmung des Gütemaßes  $r$  vorgenommen.

$$R_{\text{Jahr}} = 0,080 \times N_{\text{Jahr}} - 4,18 \quad \text{mit } r = 0,79 \quad (\text{Gl. 7})$$

$$R_{\text{Jahr}} = 0,1618 \times N_{\text{So}} - 12,32 \quad \text{mit } r = 0,81 \quad (\text{Gl. 8})$$

$R_{\text{Jahr}}$  ... Jahres-R-Faktor;  $N_{\text{Jahr}}$  ... Jahresniederschlagssumme [mm];  $N_{\text{So}}$  ... Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres [mm];  $r$  ... Korrelationskoeffizient

Während für die Gleichung (7) auf Grundlage der Jahresniederschläge relativ geringe Abweichungen auftreten, unterscheidet sich die korrigierte Regressionsgleichung für die Sommerniederschläge (Gleichung 8) deutlich. Dies spiegelt sich auch in einem deutlich besseren Korrelationskoeffizienten von 0,81 wider. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ist die Anpassung der gegenwärtig für Deutschland gültigen und in den Verknüpfungsregeln der Methodendokumentation Bodenkunde (HENNINGS 2000) verankerten Regressionsgleichungen (Gl. 5, 6) entsprechend Gleichung 7 und 8 zu empfehlen.

Grundlegend muss angemerkt werden, dass die den Regressionsgleichungen zugrunde liegenden Stationsdaten zum Teil veraltet sind. Zur Verbesserung der Berechnungsbasis wäre eine deutschlandweite Neubestimmung stationsbezogener R-Faktoren, auf Grundlage zeitlich hoch auflösender Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes



(DWD) und die Neubestimmung der Regressionsgleichungen anzustreben (vgl. auch Kap. 7). In Ermangelung einer gegenwärtig noch nicht aktualisierten Datenbasis wurde im Rahmen der Projektbearbeitung grundsätzlich auf die Stationsdaten von SAUERBORN (1994) zurückgegriffen. Eine partielle Aktualisierung der Datenbasis wurde durch die Einbindung von Ergebnisdaten aus Nordrhein-Westfalen (Geologischer Dienst), Sachsen (ELHAUS & HILLER 2007) und Nordost-Deutschland (DEUMLICH 1999) vorgenommen. Durch die Bereitstellung der R-Faktoren (vgl. Tabelle 1, ID 2) wurde die 139 Stationen umfassende Datenbasis von SAUERBORN (1994) ergänzt, aktualisiert und auf 191 Stationen erweitert. Die berücksichtigten Stationen sind in Anhang 1 aufgeführt. Anschließend erfolgte die Neubestimmung von aktualisierten Regressionsgleichungen für Deutschland in der Form:

$$R_{\text{Jahr}} = 0,0785 \times N_{\text{Jahr}} + 0,94 \quad \text{mit } r = 0,76 \quad (\text{Gl. 9})$$

$$R_{\text{Jahr}} = 0,1655 \times N_{\text{So}} - 11,48 \quad \text{mit } r = 0,80 \quad (\text{Gl. 10})$$

$R_{\text{Jahr}}$  ... Jahres-R-Faktor;  $N_{\text{Jahr}}$  ... Jahresniederschlagssumme [mm];  $N_{\text{So}}$  ... Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres [mm];  $r$  ... Korrelationskoeffizient

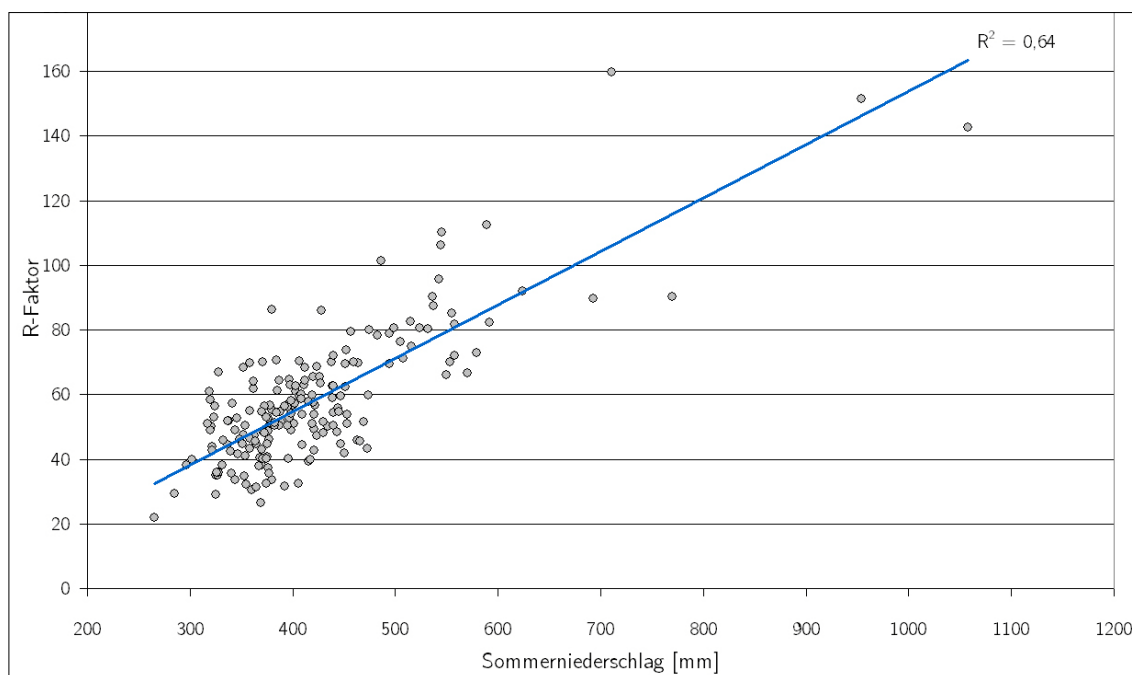


Abbildung 2: Regressionsbeziehung zwischen Sommerniederschlag und Jahres-R-Faktoren für 191 Stationen

Die aktualisierten Regressionsgleichungen bildeten die Berechnungsgrundlage für die bundesweite Darstellung der R-Faktoren-Verteilung des Ist-Zustandes (1971-2000), welche sowohl auf Basis der Jahres- als auch der Sommerniederschläge umgesetzt wurde. Für den Ist-Zustand weist die Gleichung für den Sommerniederschlag



mit  $r = 0,80$  das etwas höhere Gütemaß auf (vgl. Abbildung 2), sodass für die weiterführenden Untersuchungen zur Erosionsmodellierung des Ist-Zustandes Gleichung 10 verwendet wurde. Für die Szenarienbetrachtungen zum Klimawandel wurde hingegen ein anderer Ansatz gewählt, worauf in Kapitel 2.4.2 ausführlicher eingegangen wird. Abbildung 3 zeigt die räumliche Verteilung der 191 Stationen und ihrer Datenquellen. Weitere Informationen zu den Stationen können Anhang 1 entnommen werden.

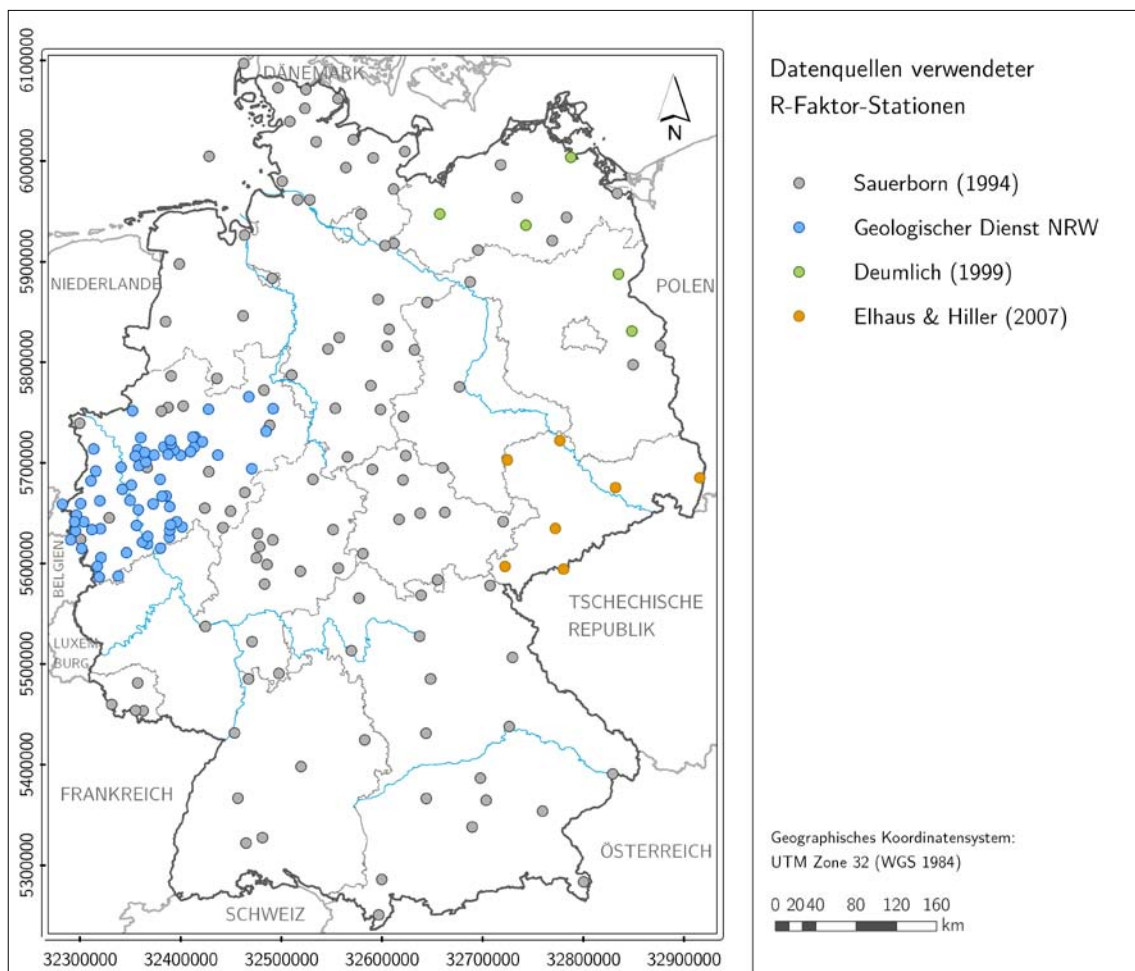


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der R-Faktor-Stationen und ihre Datenquellen

Die Anwendung der aktualisierten Regressionsgleichungen (9 und 10) zur flächenhaften Darstellung der R-Faktorenverteilung erfolgte abschließend durch Verrechnung der Niederschlagssummen des Jahres bzw. des Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1971-2000. Der Datensatz wurde durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) im 1x1-km-Raster bereitgestellt und beinhaltet eine höhenabhängige Interpolation der Niederschlagswerte.

Als problematisch erwies sich die grobe räumliche Auflösung des Niederschlagsrasters vor allem im Bereich der Küsten und Inseln. Insbesondere kleinräumige und schmale Küstenstrukturen werden durch das DWD-Raster nicht abgebildet, was zu Fehlwerten bei der Ableitung des R-Faktors führen wurde. Ausgehend vom 1x1-km-Raster wurde

mittels der Kriging-Interpolationsmethode eine räumliche Interpolation der Rasterdaten durchgeführt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch für die Inseln Rügen und Hiddensee die Darstellung des Niederschlagsrasters vor (links) und nach (rechts) der Interpolation.

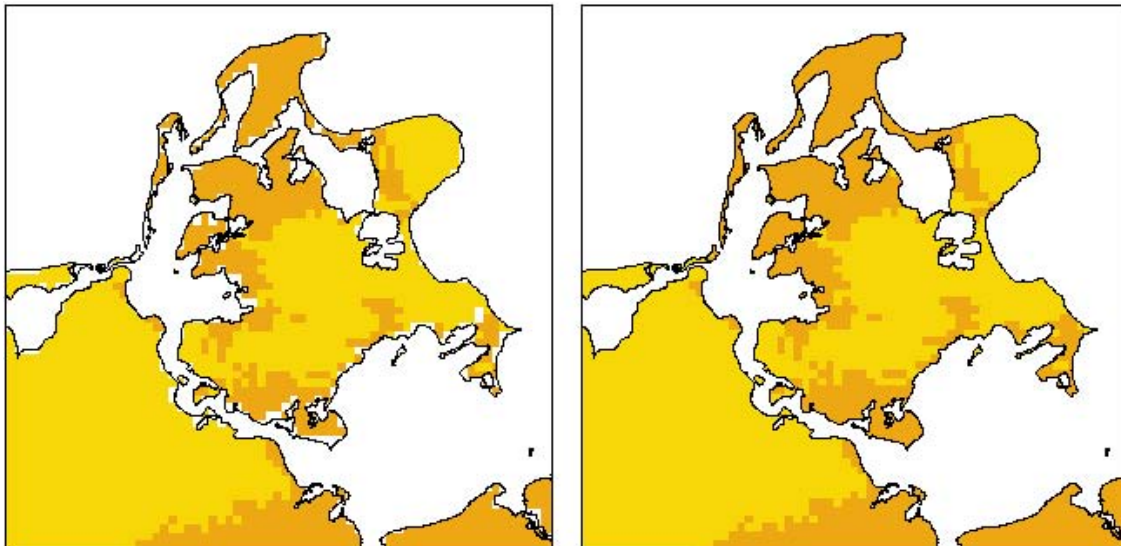


Abbildung 4: Darstellung des Niederschlagsrasters vor (links) und nach der Interpolation (rechts)

Neben den mittleren jährlichen R-Faktoren ist im Rahmen der ABAG auch die Ermittlung der innerjährlichen Verteilung der R-Faktoren (R-Faktoren-Anteile) für die Berechnung des C-Faktors erforderlich. Auf die methodische Vorgehensweise hierzu wird ausführlich in Kap. 2.3.3 eingegangen.

### *Vergleich der bundesweiten Regressionsgleichung mit länderspezifischen Gleichungen*

Die für Deutschland angepassten Regressionsgleichungen (Gl. 7, 8) dienen der bundesweiten Abschätzung der R-Faktoren. Für die einzelnen Bundesländer liegen hingegen regionalspezifische Gleichungen vor, die stärker auf die regionalen Niederschlagsverhältnisse angepasst sind. Für die Ableitung der Regressionsbeziehungen wurden zumeist Stationen innerhalb eines Bundeslandes oder seiner Nachbarbundesländer verwendet. Grundsätzlich erscheint die Verwendung länderspezifischer Regressionsbeziehungen zunächst auch für eine deutschlandweite Betrachtung sinnvoll, da somit die länderspezifischen Niederschlagscharakteristika berücksichtigt werden könnten. Hier zeigt sich allerdings das Problem des ‚Überganges‘ zwischen den Bundesländern, wie nachfolgender Vergleich zeigt. Für diesen wurden die Niederschlagsdaten des DWD-Datensatzes im 1x1-km-Raster auf die bundesweit gültige Regressionsgleichung (Gl. 7) und die Gleichungen der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Hessen (Gl. 11, 12) angewendet. Grundlage bildeten die Jahresniederschläge des Betrachtungszeitraumes 1971-2000.



Die Regressionsbeziehung für Nordrhein-Westfalen (Gl. 11) wurde anhand der Daten von 65 Stationen abgeleitet. Für Hessen (Gl. 12) bildeten 8 Stationen die Datenbasis. Beide Gleichungen weisen einen überdurchschnittlich hohen Korrelationskoeffizienten auf.

$$R_{\text{Jahr}} = 0,1096 \times N_{\text{Jahr}} - 14,25 \quad \text{mit } r = 0,89 \quad (\text{Gl. 11})$$

$$R_{\text{Jahr}} = 0,0520 \times N_{\text{Jahr}} + 14,44 \quad \text{mit } r = 0,96 \quad (\text{Gl. 12})$$

$R_{\text{Jahr}}$  ... Jahres-R-Faktor;  $N_{\text{Jahr}}$  ... Jahresniederschlagssumme [mm];  $r$  ... Korrelationskoeffizient

Tabelle 2 zeigt die R-Faktoren, wie sie für verschiedene Niederschlagshöhen mittels der drei verwendeten Regressionsgleichungen bestimmt wurden. Deutlich wird, dass mit der für Nordrhein-Westfalen gültigen Gleichung die höchsten und mithilfe der Gleichung für Hessen die geringsten R-Faktoren berechnet werden. Die anhand der bundesweit gültigen Regressionsbeziehung ermittelten Werte liegen zwischen den länderspezifischen Ergebnissen. Mit zunehmenden Niederschlagswerten nehmen die Abweichungen deutlich zu. Daraus kann geschlossen werden, dass bei Anwendung der bundesweiten Gleichung die R-Faktoren in Nordrhein-Westfalen unterschätzt und in Hessen überschätzt werden (vgl. Abbildung 5). Diese ‚Fehler‘ liegen allerdings in einem deutlich kleineren Bereich als die Abweichungen der Ergebnisse beider Bundesländer. Bei einem Niederschlag von 750 mm würde für Nordrhein-Westfalen ein um 27 % höherer R-Faktor ausgewiesen werden als in Hessen. Bei 1.250 mm Niederschlag liegt die Differenz bereits bei 55 %.

Jahresniederschlag [mm]	R-Faktoren nach Gleichung für ...			Differenz zur bundesweiten Gleichung [%]	
	Deutschland	Nordrhein-Westfalen	Hessen	Nordrhein-Westfalen	Hessen
500	35,8	40,6	40,4	13,2	12,9
750	55,8	68,0	53,4	21,7	-4,3
1.000	75,8	95,4	66,4	25,8	-12,4
1.250	95,8	122,8	79,4	28,1	-17,1
1.500	115,8	150,2	92,4	29,6	-20,2

Tabelle 2: R-Faktoren – abgeleitet aus verschiedenen Regressionsgleichungen

Die erwähnte Unterschätzung der R-Faktoren in Nordrhein-Westfalen bei Anwendung der Gleichung für Deutschland verdeutlicht Abbildung 5 (links). Gleichzeitig werden für Hessen höhere R-Faktoren dargestellt als bei Anwendung der landesspezifischen Gleichung. Der Übergang zwischen den niederschlagsreichen Regionen Nordrhein-Westfalens zu den im Leebereich liegenden, trockeneren Gebieten Hessens erfolgt



hingegen ohne erkennbare Abstufungen. Diese sind bei getrennter Anwendung der Regressionsbeziehungen beider Bundesländer an der Landesgrenze deutlich sichtbar (Abbildung 5, rechts).

Die Verwendung der länderspezifischen Regressionsgleichungen kann nur in den jeweiligen Bundesländern erfolgen. Für eine bundesweite Betrachtung können, trotz der geringeren Berücksichtigung der regionalen Niederschlagsbedingungen, nur die bundesweit gültigen Gleichungen Verwendung finden.

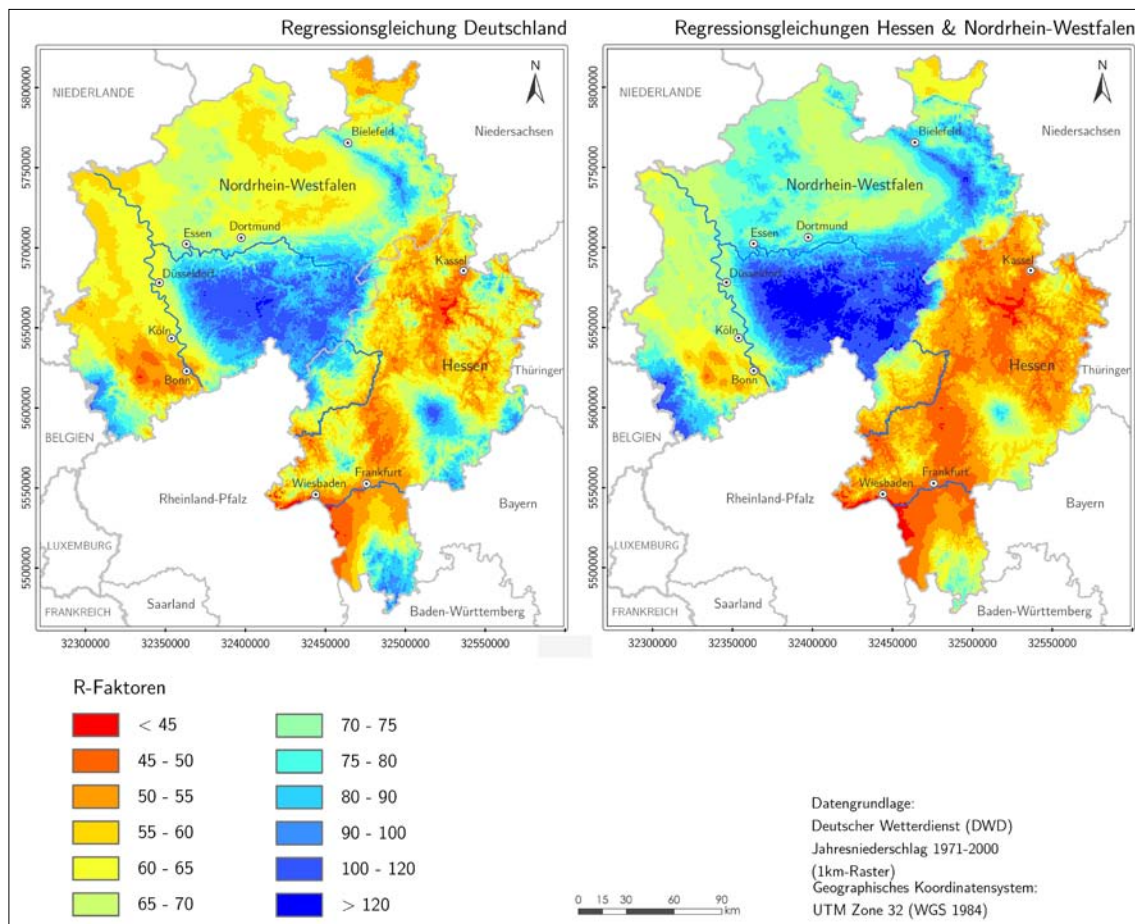


Abbildung 5: Vergleich der R-Faktoren in Nordrhein-Westfalen und Hessen für unterschiedliche Regressionsbeziehungen



### 2.3.2 Bestimmung der K-Faktoren

Der K-Faktor beschreibt die Erodierbarkeit des Oberbodens und lässt sich bei Vorhandensein der notwendigen bodenkundlichen Parameter nach dem Ansatz von SCHWERTMANN et al. (1990) in der folgenden Form bestimmen:

$$K = 2,77 \times 10^{-6} \times M^{1,14} \times (12 - OS) + 0,043 \times (A - 2) + 0,033 \times (4 - D) \quad (\text{Gl. 13})$$

M ... (Schluff+Feinstsand [%]) × (Schluff + Sand [%]); OS ... organische Substanz [%]; A ... Aggregatklasse; D ... Durchlässigkeitsklasse

Ebenso lässt sich der K-Faktor nach der in der DIN 19708 (DIN 2005) festgelegten und in HENNINGS (2000) dokumentierten Formel ermitteln (Gl. 14):

$$K = (K_B \times K_H \times K_A \times K_D) \times K_S \quad (\text{Gl. 14})$$

K<sub>B</sub> ... bodenartabhängiger Anteil des K-Faktors; K<sub>H</sub> ... humusabhängiger Anteil des K-Faktors; K<sub>A</sub> ... aggregierungsabhängiger Anteil des K-Faktors; K<sub>D</sub> ... wasserdurchlässigkeitsabhängiger Anteil des K-Faktors; K<sub>S</sub> ... steinbedeckungsabhängiger Anteil des K-Faktors

Die flächenkonkrete Ermittlung der Bodenerodierbarkeit erfordert die Bereitstellung von Geometriedaten zur Abbildung der Bodeneinheiten und von Bodenparametern (Sachdaten), aus denen sich die K-Faktoren der Bodeneinheiten nach Gleichung (13) oder (14) ableiten lassen. Im Vorfeld der Projektbearbeitung war die Übernahme der K-Faktoren aus dem Projekt ‚Bundesweite Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Agrarstatistikdaten und aktuellen Daten der Bodennutzung‘ (ERHARDT et al. 2002) vorgesehen. Da die Ergebnisdaten ausschließlich für landwirtschaftliche Nutzungen vorlagen und somit eine Übertragung auf eine aktuellere Landnutzungsbasis nicht möglich war, wurde die Erarbeitung einer neuen Datengrundlage vorgenommen.

Die Kartengrundlage für die Berechnungen bildete die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK1000N) mit 68 Legendeneinheiten, die durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereitgestellt wurde (vgl. Anhang 2). Perspektivisch ist, nach deren Fertigstellung, die Fortschreibung der Ergebnisse unter Verwendung der Bodenübersichtskarte 1:200.000 vorzunehmen. Die Nutzungsdifferenzierung ergibt sich aus der Verschneidung von Flächendaten der Hauptnutzungsarten Wald, Acker und Grünland mit der Bodenübersichtskarte Maßstab 1:1.000.000 (BÜK1000) und der nutzungsspezifischen Kennzeichnung der Legendeneinheiten. Eine weitere Differenzierung wurde anhand der Einteilung in vier Klimagebiete vorgenommen. Abbildung 6 zeigt die Klimagebiete nach BÜK1000N vor dem Hintergrund der räumlichen Heterogenität der Leitbodeneinheiten. Die Werte der K-Faktoren wurden von der Bundesanstalt für Geowis-



senschaften und Rohstoffe (BGR) nach HENNINGS (2000) für jede der 68 Leitbodeneinheiten, in Abhängigkeit von Klimagebiet und Hauptnutzung, ermittelt und für die weiteren Untersuchungen in Form einer Zuordnungstabelle zur Verfügung gestellt (s. Anhang 3). Weitere Informationen beinhalten Horizontbezeichnung, Horizonttiefe, Bodenart, Humusklasse und Skelettklasse.

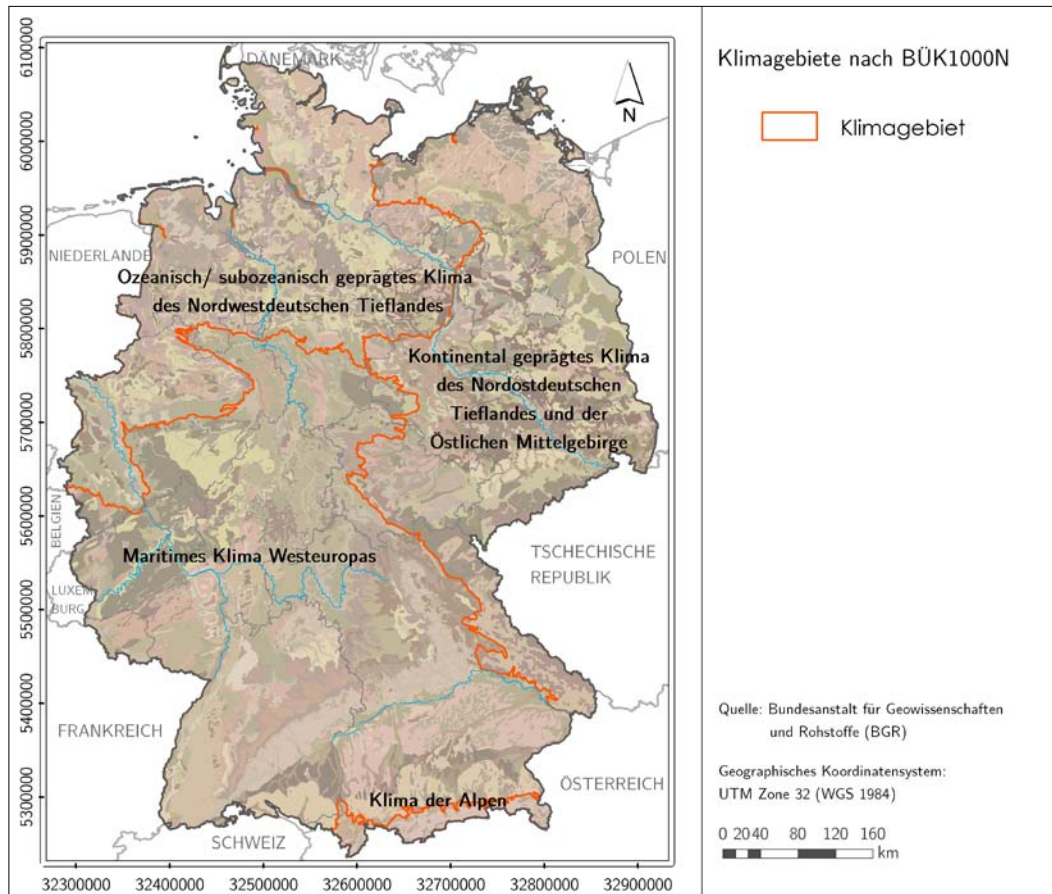


Abbildung 6: Klimagebiete der BÜK 1000N (BGR)

Um die K-Faktoren den Legendeneinheiten der BÜK1000N relational und nutzungsdifferenziert zuordnen zu können, wurde die Verschneidung der klimadifferenzierten Legendeneinheiten der BÜK1000 mit der Landnutzungskarte vorgenommen. Als Landnutzungsdaten wurden die Flächendaten des Digitalen Basis-Landschaftsmodells im Maßstab 1:25.000 (Basis-DLM) mit den Ebenen Ackerland und Grünland verwendet (siehe Kap. 2.3.4). Im Anschluss erfolgte die Zuordnung der K-Faktoren zu den Legendeneinheiten, differenziert nach Klimagebiet und Hauptnutzung (Acker, Grünland). Aufgrund des unterschiedlichen Generalisierungsgrades der Nutzungsdaten des Digitalen Basis-Landschaftsmodells und des der BÜK 1000N zugrunde liegenden CORINE Land Covers liegen in der Datenbank der BGR nicht für alle Boden-Nutzungs-Kombinationen K-Faktoren vor. Um auch für diese Einheiten K-Faktoren zu generieren, wurde durch die BGR eine manuelle Ermittlung der K-Faktoren vorgenommen. Diese erfolgte anhand von Wahrscheinlichkeits- und Plausibilitätsprüfungen, unter Berück-



sichtigung der K-Faktoren gleicher Bodeneinheiten benachbarter Klimagebiete. Die Faktoren der im gesamten Bundesgebiet auftretenden Boden-Klima-Nutzungs-Kombinationen sind in Anhang 3 dokumentiert. Für die spätere Modellierung (Kap. 2.3.5) wurden für die potenzielle und die nutzungsabhängige Erosionsabschätzung die gleichen Geometriedaten der K-Faktoren verwendet.

### 2.3.3 Bestimmung der C-Faktoren

Der Grad der Vegetationsbedeckung des Bodens hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gefährdungspotenzial der Standorte hinsichtlich der Wassererosion. Innerhalb der ABAG wird dieser Einfluss durch den C-Faktor widerspiegelt, der je nach Grad der Bodenbedeckung zwischen 1 (=Schwarzbrache) und 0 (=dichter Grünlandbewuchs) liegen kann. Für ackerbauliche Kulturarten liegt der C-Faktor im Bereich 0,02 bis 0,4. Neben der relativen Bodenbedeckung der jeweiligen Fruchtart in den einzelnen Kulturperioden haben die Anbausysteme (z. B. Zwischenfrucht oder Untersaat) sowie die Bodenbearbeitung (Pflug, konservierend, Direktsaat) erhebliche Auswirkungen auf die Größe des C-Faktors.

Für die Berechnung des C-Faktors stehen in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung und den Bewertungszielen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Einen Überblick hierzu gibt AUERSWALD (2002; vgl. Tabelle 3).

Konkrete Fruchtfolge	Additives Verfahren aus Fruchtartenanteilen	Schätzung mittels Regression (AUERSWALD 2002)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- widerspiegelt die tatsächlichen Verhältnisse</li> <li>- ursprünglicher Ansatz der ABAG</li> <li>- geeignet für betriebliche und lokale Ebene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- überbetriebliche Ebene</li> <li>- entwickelt zur Schätzung größerer räumlicher Einheiten anhand der Fruchtartenanteile</li> <li>- <math>r^2=0,63</math> (AUERSWALD 2002)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- überbetriebliche Ebene</li> <li>- entwickelt zur Schätzung größerer räumlicher Einheiten anhand der Fruchtartenanteile</li> <li>- soll Nachteile vom additiven Verfahren ausgleichen</li> <li>- <math>r^2 = 0,89</math> (AUERSWALD 2002)</li> </ul>

Tabelle 3: Übersicht zu Vorgehensweisen zur Ermittlung des C-Faktors in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung und den Bewertungszielen

Bei der Auswertung auf überregionaler Ebene, in der aufgrund der Datenlage in der Regel ein Rückgriff auf statistisches Zahlenmaterial notwendig ist und sich somit nur Fruchtartenanteile ableiten lassen, wird häufig das „Additive Verfahren“ angewendet. Auf die Nachteile dieses Ansatzes, die insbesondere aus der Überlappung der einzelnen Fruchtarten in den Kulturperioden zwischen Ernte und Aussaat hervorgerufen werden, verweist AUERSWALD (2002) und schlägt die Schätzung mittels einer Regression vor. Diese weist gegenüber dem „Klassischen Ansatz“ auf der Basis von konkreten Fruchtfolgen ein weitaus höheres Bestimmtheitsmaß auf als das „Additive Verfahren“ (Tabelle 3).



Aufgrund der Tatsache, dass bei der bundesweiten Betrachtung der Anbauverhältnisse mit einem sehr heterogenen Anbauspektrum zu rechnen ist und in einzelnen Regionen davon auszugehen ist, dass der Ackerfutter- und Stilllegungsanteil > 30 % beträgt, besteht die Gefahr an die Geltungsbereiche der Regression zu stoßen. Um eine bundesweit einheitliche Betrachtung zu gewährleisten, wurde, trotz der bekannten Unzulänglichkeiten des Verfahrensansatzes, die additive Ermittlung des C-Faktors zum Ansatz gebracht. Deren Vorgehensweise entspricht der Methodik nach SCHWERTMANN et al. (1990). Das prinzipielle Ablaufschema ist in Abbildung 7 dargestellt.

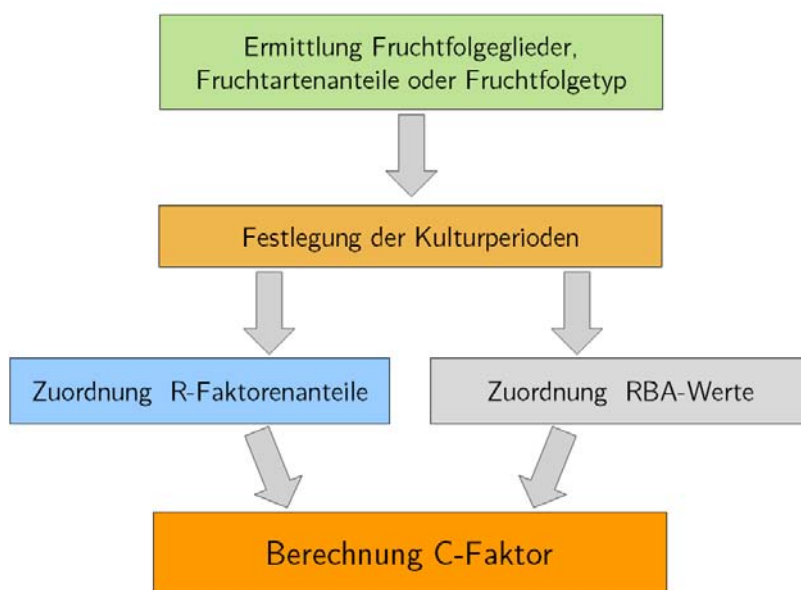


Abbildung 7: Prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung des C-Faktors (nach SCHWERTMANN et al. 1990)

Die Ausweisung der bundesweiten Erosionsgefährdung wird für zwei Betrachtungszeiträume durchgeführt. Der erste Zeitraum stellt den Ist-Zustand dar und bezieht sich auf die gegenwärtige Flächennutzung. Das Ergebnis dient als Grundlage für den Vergleich mit den Trendszenarien, die aus den Klimaprognosen abgeleitet werden (vgl. Kap. 2.4.3). Die verwendeten Datengrundlagen für die Ermittlung der C-Faktoren des Ist-Zustandes sind in Tabelle 1 (ID 8 bis 10) aufgeführt.

### *Ermittlung der landwirtschaftlichen Flächennutzung*

Statistisches Datenmaterial zur landwirtschaftlichen Bodennutzung liegt auf Ebene der Bundesländer frei verfügbar bei den jeweiligen statistischen Landesämtern vor und ist hier über eine Internetabfrage recherchierbar. Standortkundliche Differenzierungen, die innerhalb der Bundesländer zu veränderten Anbauspektren führen, lassen sich mit diesem Datenmaterial nur bedingt umsetzen, sind jedoch für eine flächenkonkrete Ermittlung des C-Faktors unbedingt notwendig. Eine Untersetzung dieser Landesdaten



bis hin zur Betriebsebene ist, zumindest theoretisch, durch die Daten der Agrarstrukturerhebung der Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder möglich. Im Rahmen dieser Studie wurde auf die Daten der Agrarstrukturerhebung 2007 zurückgegriffen, die durch das Forschungsdatenzentrum Nord in Kiel bereitgestellt wurden (Tabelle 1). Die Agrarstrukturerhebung wird regelmäßig alle zwei Jahre im Mai durchgeführt, abwechselnd als Vollerhebung und Stichprobenbefragung. Die Informationen zu den Vollerhebungen wurden im Jahre 2003 für rund 420.000 und im Jahr 2007, das die Basis für die vorliegenden Auswertungen bildet, für rund 375.000 landwirtschaftliche Betriebe geliefert.

Das Grundprogramm der Agrarstrukturerhebung erfasst Merkmale zur Bodennutzung und zu Viehbeständen. Darüber hinaus werden Angaben zu den Produktionsstrukturen und -kapazitäten der landwirtschaftlichen Betriebe sowie Angaben über die wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse der Betriebsinhaber und/oder -leiter erhoben, die für das vorliegende Vorhaben jedoch ohne Relevanz waren.

Folgende Randbedingungen waren aus Gründen der Anonymisierung und Nichtrückverfolgbarkeit für die Datenbereitstellung und damit für die weitere Auswertung zu beachten:

- jeder Aggregierungsraum muss mindestens 2 Gemeinden umfassen
- je Aggregierungsraum müssen mindestens 3 Betriebe gemeldet haben
- die Datenbereitstellung erfolgt für Fruchtartengruppen (im vorliegenden Fall wurde eine Zusammenfassung gemäß Tabelle 4 gewählt)

Fruchtartengruppe	Berücksichtigte Fruchtarten
Wintergetreide	Winterweizen (ohne Durum) (incl. Dinkel wenn EF211 = Null) Triticale Roggen Wintergerste
Sommergetreide	Sommerweizen (ohne Durum) Hartweizen (Durum) Sommergerste Hafer
Mais/Silomais	Körnermais zum Ausreifen Corn-Cob-Mix Silomais
Hackfrüchte	Frühe Speisekartoffeln Mittelfrühe und späte Speisekartoffeln zum Direktverzehr oder Be- und Verarbeitung Zuckerrüben ohne Samenbau
Ölfrüchte Winter	Winterraps zur Körnergewinnung



Ölfrüchte Sommer	Sommerraps und Sommerrüben zur Körnergewinnung Flachs (Lein) zur Körner- und Fasergewinnung Andere Ölfrüchte - auch für technische Zwecke (z. B. Körnersenf)
Leguminosen	Futtererbsen zur Körnergewinnung Ackerbohnen zur Körnergewinnung Lupinen zur Körnergewinnung
Ackerfutter mehr-jährig	Klee, Klee gras, Klee-Luzerne-Gemisch (einschließlich Kleebrache) Luzerne Grasanbau auf dem Ackerland zum Abmähen und Anweiden
Stilllegung	Stillgelegtes/aus der landwirtschaftlichen Erzeugung genommenes Ackerland, Brache Nicht mehr landwirtschaftlich genutzte Flächen Brache mit und ohne Begrünung Stillgelegte bzw. erstmalig aufgeforstete Flächen Stillgelegte Fläche im Rahmen der Agrarumweltprogramme der Länder

Tabelle 4: Übersicht der bereitgestellten Fruchtartengruppen

Als räumliche Bewertungsebene wurden die 502 Naturraumeinheiten des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) herangezogen. Naturraumeinheiten stellen hinsichtlich geomorphologischer, geologischer, hydrologischer und bodenkundlicher Kriterien homogene Gebiete dar. Politisch-administrative Grenzen spielen dabei, abgesehen von den nationalen Außengrenzen, keine Rolle. Die Einheiten orientieren sich im Wesentlichen an der Gliederung nach MEYNEN (1953-1962). Aufgrund der Ausgrenzungskriterien ist hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung innerhalb der Naturräume von ähnlichen bis gleichen Anbauspektren und -systemen auszugehen, sodass diese Einheiten als Aggregierungsebene für die das Anbauspektrum in Form der angebauten Fruchtarten und der Anbaufläche herangezogen werden konnten.

Die Gemeinden, als Standorte der Betriebssitze der landwirtschaftlichen Unternehmen, wurden den Naturräumen zugeordnet, in denen sich ihr größter Flächenanteil befindet.

Für Naturräume, die nicht mit Datenmaterial belegt waren (keine zugeordneten Gemeinden, zu wenige Gemeinden), wurde das Fruchtartenspektrum aus dem Mittelwert der angrenzenden Naturräume abgeleitet. Die betreffenden Naturräume sind in Abbildung 8 dargestellt.

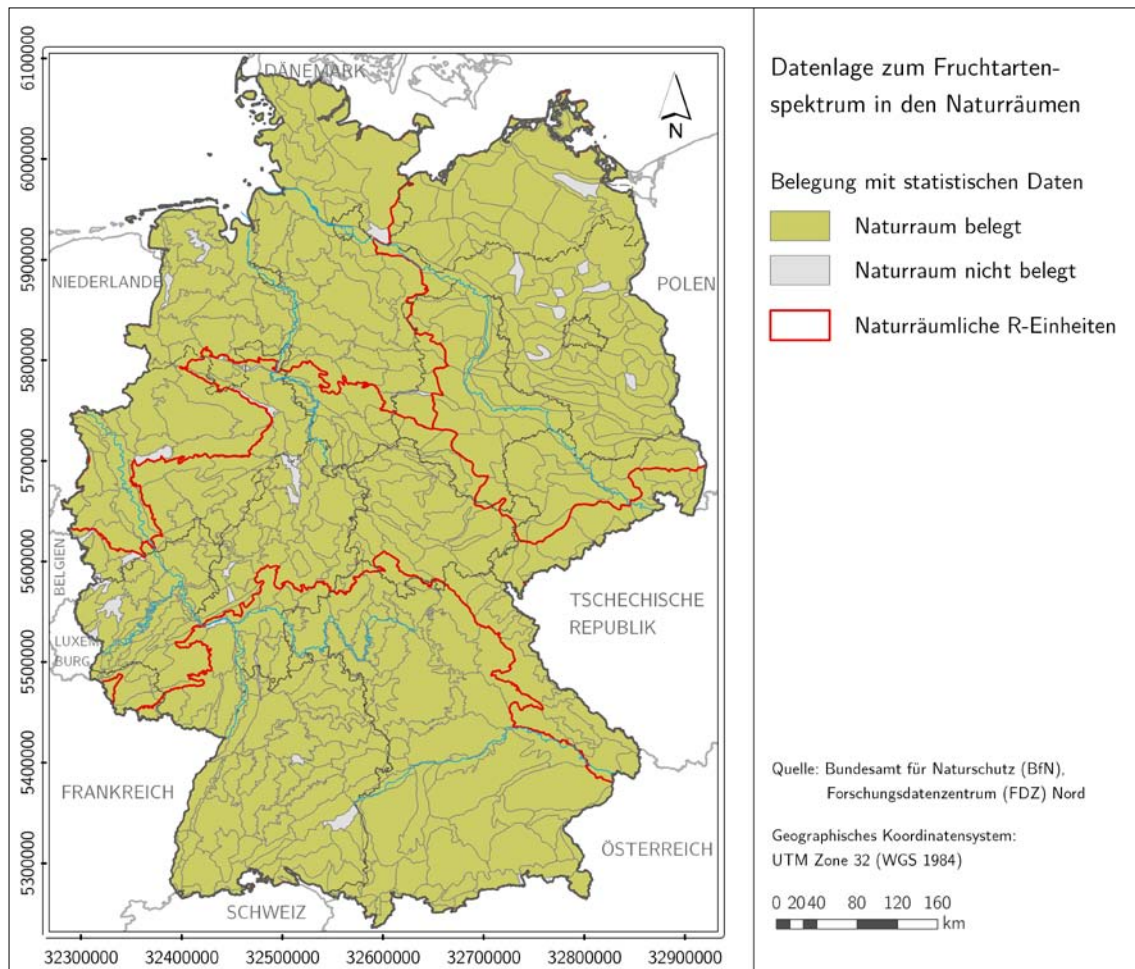


Abbildung 8: Belegung der Naturräume mit statistischen Daten

### *Bestimmung der Vegetations- und Kulturperioden*

Entsprechend des Verfahrensansatzes wird der C-Faktor durch die relative Bodenbedeckung der angebauten Fruchtarten in den Kulturperioden zwischen Bodenbearbeitung und Ernte sowie der R-Faktorenverteilung innerhalb dieses Zeitraums bestimmt. Die regionalspezifischen Zeiträume der Kulturperioden wurden aus den phänologischen Beobachtungsdaten der Jahre 1991 bis 2008 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet. Für die angegebene Zeitreihe konnten 1.079 der insgesamt 6.572 Meldepunkte für die phänologischen Beobachtungsdaten ausgewertet werden. Eine Verteilung der berücksichtigten Meldestationen innerhalb der Naturräume Deutschlands kann Abbildung 9 entnommen werden.

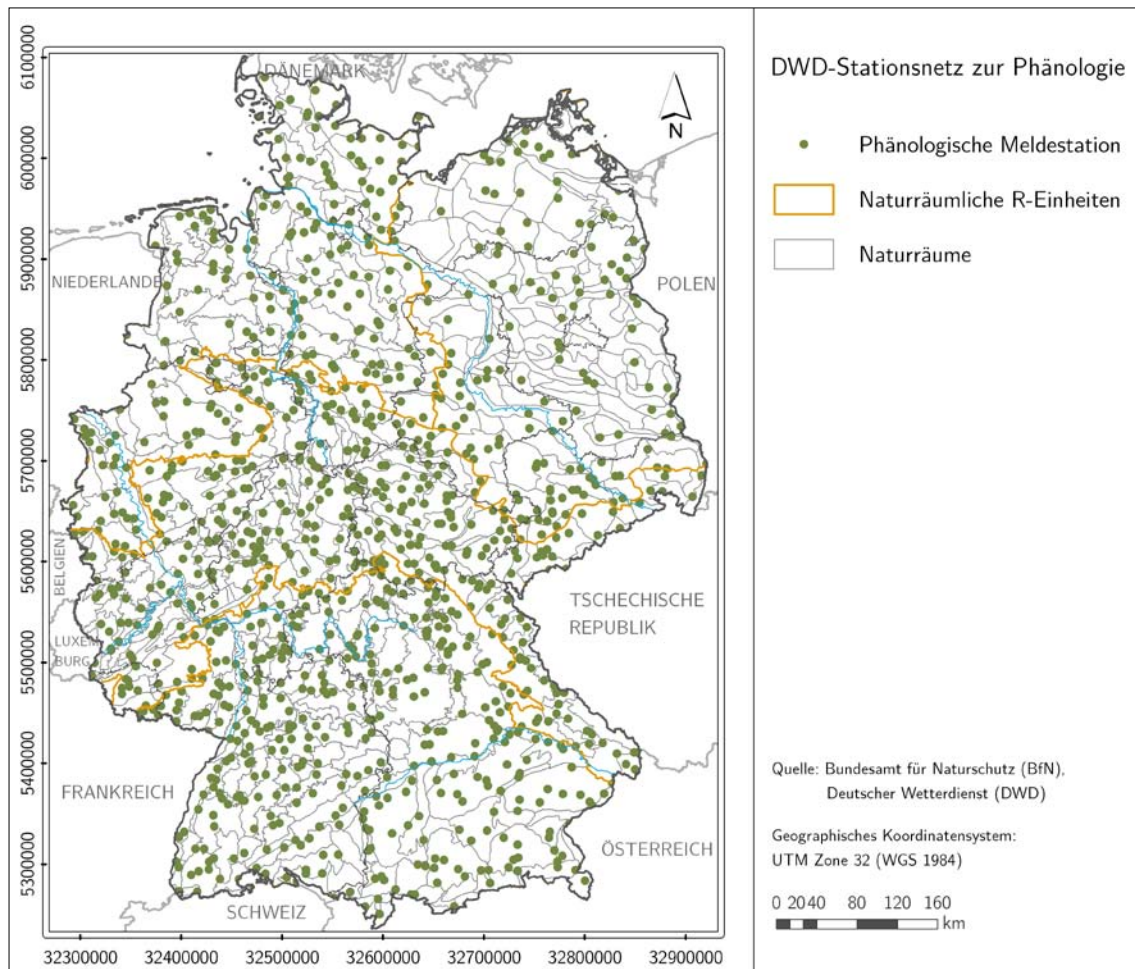


Abbildung 9: Lage der phänologischen Meldestationen

Im phänologischen Datenbestand des DWD sind für die landwirtschaftlich relevanten Kulturarten die in Tabelle 5 aufgeführten Phänophasen enthalten. Für die Ausgrenzung der Kulturperioden sind die Phasen ‚Bestellung‘, ‚Aufgang/Auflaufen‘, ‚Bestandschluss‘ und ‚Ernte‘ von direkter Bedeutung. Die übrigen Phasen dienen der Kontrolle für die Festlegung der Bodenbedeckungsgrade.

Bei den Winterungen wurde die Wachstumsphase in der Vegetationsruhe (Winter) einheitlich ausgesetzt. Die Vegetationsruhe beginnt entsprechend der Definition des DWD mit der Blattfärbung der Stieleiche und endet mit dem Blühbeginn der Salweide. Die sich daraus für die einzelnen Naturräume ergebende Dauer der Vegetationsperiode ist in Abbildung 10 dargestellt.



Pflanze	Bestellung	Beginn Aufgang/ Auflaufen	Bestand geschlossen	Beginn der Rosettenbildung	Beginn des Schossens	Beginn der Blattbildung	Beginn des Längenwachstums	Beginn des Rispenschiebens	Beginn der Knospenbildung	Beginn des Ährenschiebens	Beginn der Blüte	Beginn der Vollblüte	Beginn der Milchreife	Beginn der Gelbreife	Beginn der Teigreife	Beginn der Vollreife	Ernte
Hafer	x	x			x								x	x		x	x
Sommergerste	x	x			x					x				x		x	x
Sommerweizen	x	x			x					x				x		x	x
Wintergerste	x	x			x					x				x		x	x
Winterroggen	x	x			x					x	x			x		x	x
Winterweizen	x	x			x					x			x	x		x	x
Winterraps	x	x		x			x		x		x					x	x
Sonnenblume	x	x				x			x		x						x
Mais	x	x					x	x			x	x	x	x	x	x	x
Kartoffel	x	x	x								x						x
Zuckerrübe	x	x	x														x

Tabelle 5: Phänophasen landwirtschaftlicher Kulturarten

Ausgehend von den aus den DWD-Daten abgeleiteten Phänophasen und den Eintrittsterminen für das Ende bzw. den Start der Vegetationsphasen wurden die Zeiträume der Kulturperioden für die landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten bemessen. Zum Ansatz kam hierbei ein Wachstumsmodell aus dem Modellpaket „REPRO“, welches durch den Lehrstuhl für allgemeinen Pflanzenbau und ökologischen Landbau der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und dem Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme der TU München zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebssysteme entwickelt wurde.



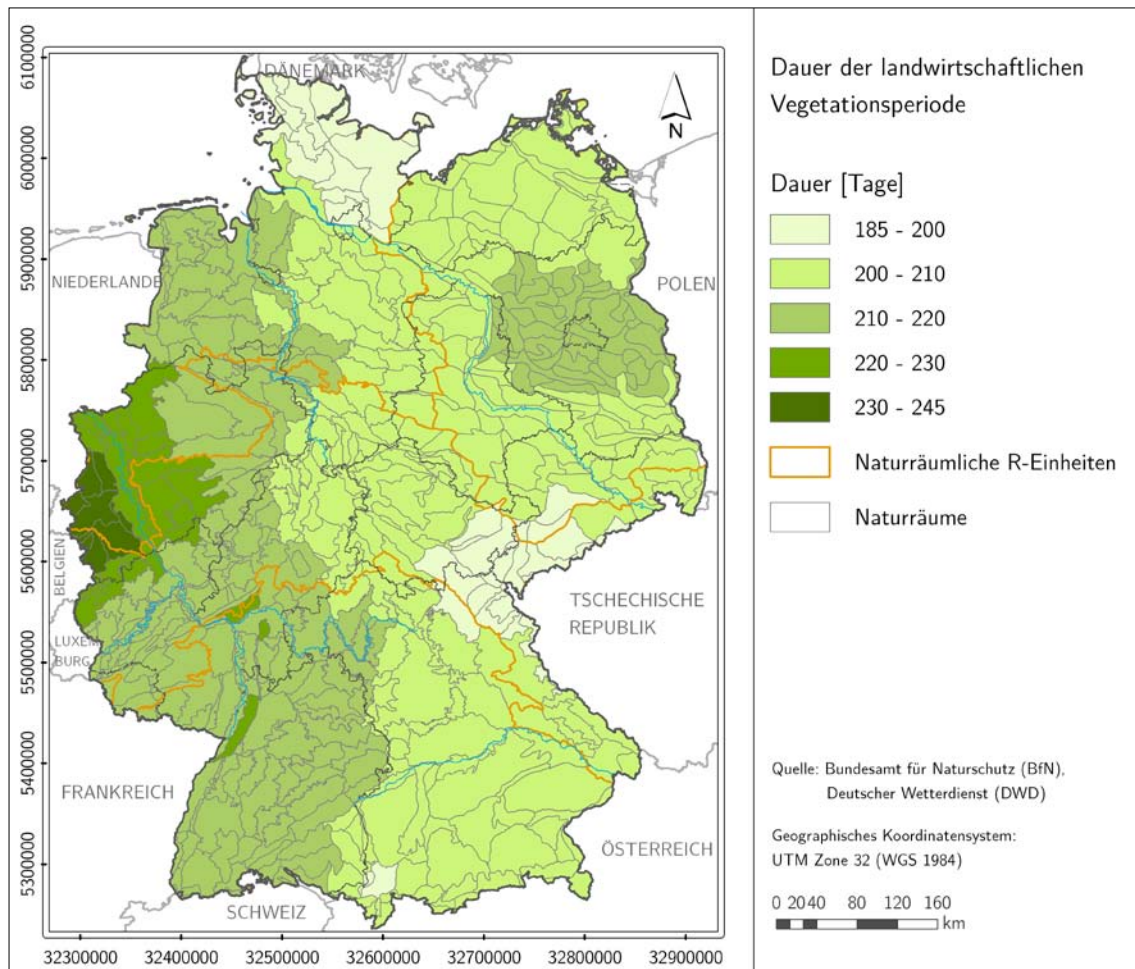


Abbildung 10: Dauer der Vegetationsperiode in Tagen

### Ermittlung der R-Faktoren-Anteile

Die Bestimmung des C-Faktors erfordert Angaben zur Jahres-R-Verteilung. Umfangreiche Daten liegen von SCHWERTMANN et al. (1990) für Bayern vor. Eine einfache Übertragung der Werte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. auch ERHARDT et al. 2002) würde zu Fehlinterpretationen, v.a. im Norddeutschen Tiefland führen, da insbesondere die von SCHWERTMANN et al. (1990) ermittelten, sehr geringen R-Faktorenanteile im Winter nicht gleichermaßen charakteristisch für die weiter nördlich gelegenen Landesteile sind. Um eine bessere räumliche Differenzierung der Jahres-R-Verteilung zu erhalten, wurden weitere Literaturquellen hinzugezogen. AUERSWALD (1996) griff die Ergebnisse von SCHWERTMANN et al. (1990) auf und erweiterte die Datenbasis auf 20 Stationen. Für den süddeutschen Raum wurden anschließend tägliche R-Anteile ermittelt. Aus HIRCHE (1990) liegen monatliche R-Faktoren-Anteile für Niedersachsen vor. SAUPE (1985) bestimmte halbmonatliche R-Anteile für 19 Stationen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Davon befinden sich 13 Stationen im Bereich der Mittelgebirge und ihrer Vorländer sowie 2 Stationen (Magdeburg, Salzwedel) im Nordostdeutschen Tiefland. Für Nordost-Deutschland liegen monatliche R-Faktorenanteile an 5 Stationen nach



DEUMLICH (1999) vor. Auf Grundlage der zusätzlichen Quellen wurde eine Differenzierung der R-Faktoren-Anteile für naturräumliche R-Faktoren-Einheiten vorgenommen. Die Ausweisung der R-Faktoren-Einheiten erfolgte durch Aggregation von Naturräumen des BfN anhand der räumlichen Gültigkeit der genannten Datenquellen. In Tabelle 6 und Abbildung 11 sind die verwendeten Datenquellen und ihre Zuordnung zu den naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten aufgeführt.

Die Zuordnung der Stationswerte zu den naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten ist in stark generalisierter Form vorgenommen worden. Dennoch lässt sich mithilfe einer naturraumbezogenen Zuordnung der Jahres-R-Verteilung eine verbesserte räumliche Differenzierung hinsichtlich der Ableitung der C-Faktoren erreichen. Zudem kann eine direkte Zuordnung der R-Anteile zu den Naturräumen vorgenommen werden.

Naturräumliche R-Faktoren-Einheit	Quelle, Stationen	Naturräumliche R-Einheiten (nach BfN)
Südliche Mittelgebirge und Alpen	AUERSWALD (1996) - 20 Stationen in Bayern und Baden-Württemberg	Alpen, Alpenvorland, Südwestliche Mittelgebirge
Westliche und Östliche Mittelgebirge	SAUPE (1985) - 13 Stationen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen	Östliche und westliche Mittelgebirge
Nordostdeutsches Tiefland	DEUMLICH (1999) - 5 Stationen in Nordostdeutschland SAUPE (1985) - 2 Stationen im nördlichen Sachsen-Anhalt	Nordostdeutsches Tiefland
Nordwestdeutsches Tiefland	HIRCHE (1990) - Stationen in Niedersachsen	Nordwestdeutsches Tiefland

Tabelle 6: Zuordnung von Datenquellen der R-Faktoren-Anteile zu naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten

Um, mit Ausnahme der bereits in täglicher Auflösung existierenden Werte von AUERSWALD (1996), R-Anteile auf Tageswertbasis zu erhalten, wurden die monatlich/halbmonatlich vorliegenden R-Faktoren-Anteile der Stationen gemittelt und in vereinfachter Form gleichmäßig auf die Monatstage disaggregiert. Abbildung 12 zeigt die monatlich kumulierten R-Faktoren-Anteile der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten. Deutlich erkennbar sind die sehr geringen Anteile nach AUERSWALD (1996) in Süddeutschland, welche die Erfordernis einer räumlich differenzierten Bestimmung der R-Anteile bestätigen.

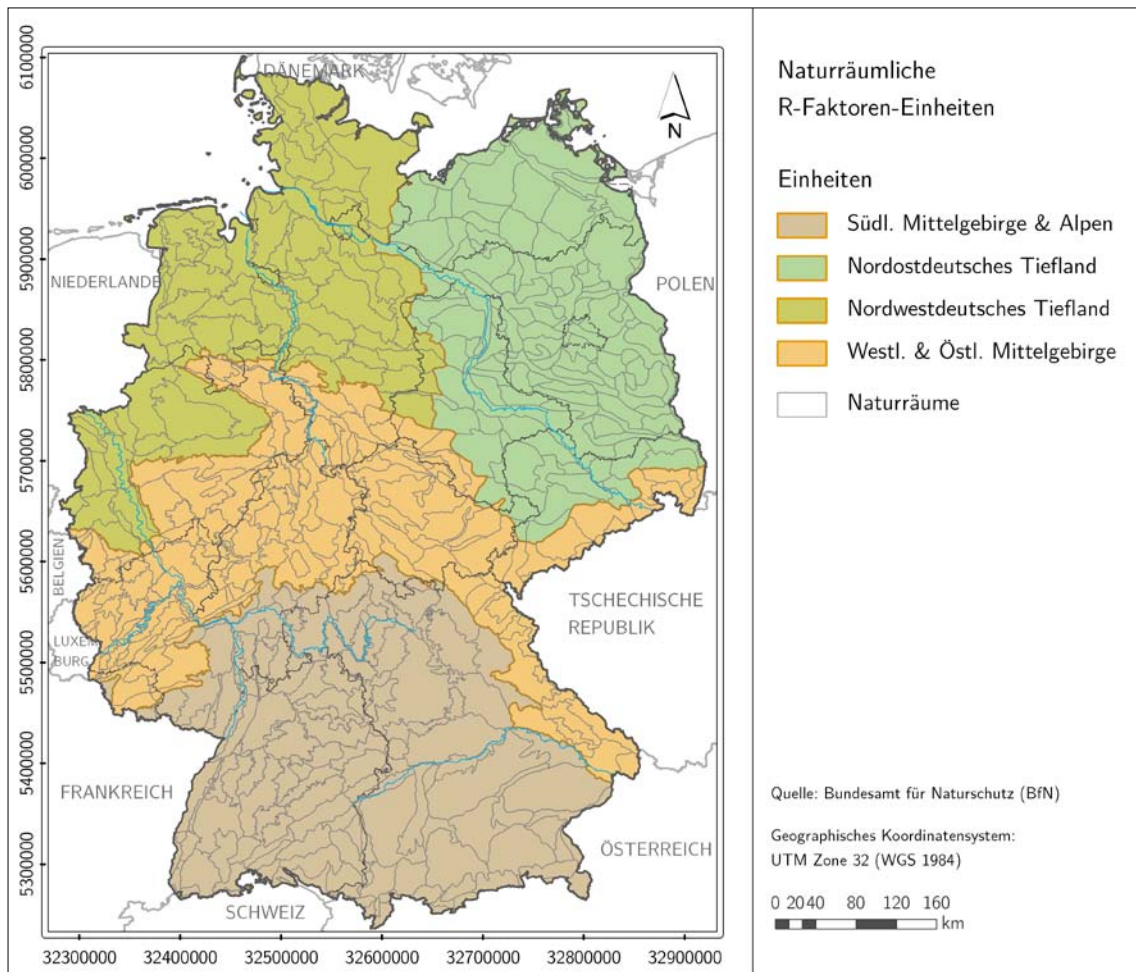


Abbildung 11: Räumliche Gliederung der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten

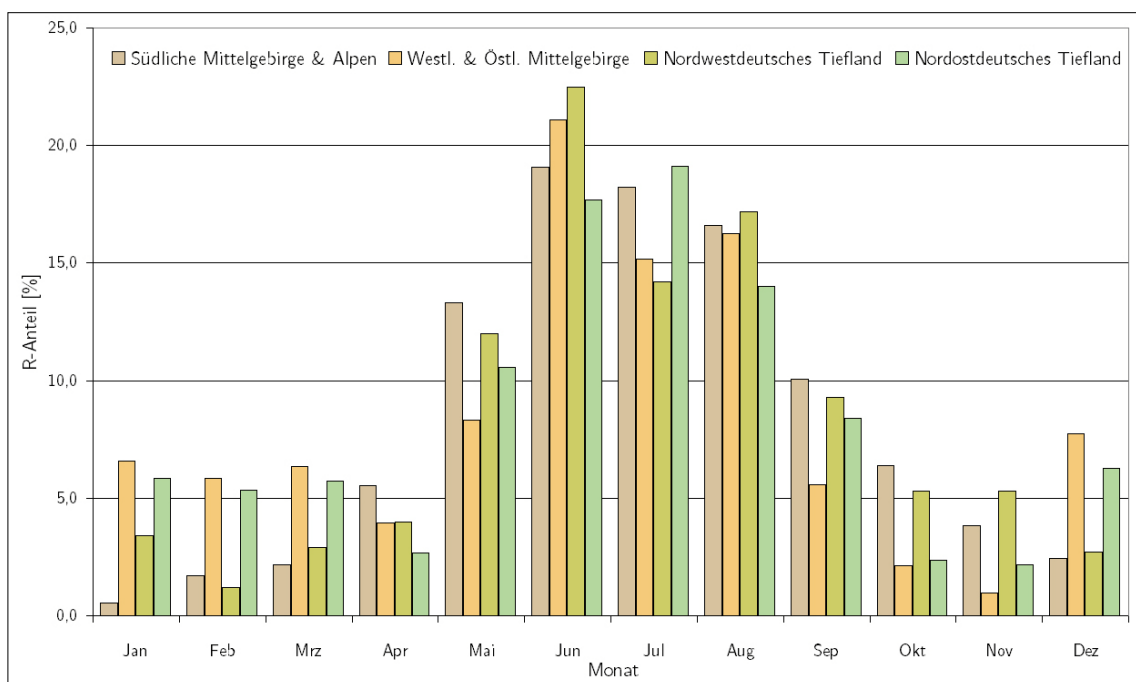


Abbildung 12: Monatliche R-Faktoren-Anteile der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten



### *Festlegung von Szenarien zur Bodenbearbeitung*

Neben den Daten der Kulturperioden hat die Technologie der Bodenbearbeitung einen wesentlichen Einfluss auf den C-Faktor. Bei der konservierenden Bodenbearbeitung (pfluglose Bodenbearbeitung) wird auf den Pflugeinsatz verzichtet. Stattdessen kommen nicht wendende Bodenbearbeitungsgeräte zum Einsatz (z. B. Grubber, Scheibeneggen, zapfwellengetriebene Geräte), die den Boden weitgehend in seinem natürlichen Aufbau belassen und so deren Regenverdaulichkeit im Vergleich zu gepflügten Böden erhöhen. Gleichzeitig verbleiben Teile der Ernterückstände (Mulchmaterial) nahe oder an der Bodenoberfläche, was sich positiv auf die Rauigkeit der Bodenoberfläche und somit auf den Erosionswiderstand auswirkt. Die konservierende Bodenbearbeitung hat ein stabiles, wenig verschlammungsanfälliges, gleichzeitig tragfähiges Bodengefüge zum Ziel.

Flächendeckende statistische Angaben zum Umfang konventioneller (Pflug) und konservierender (Mulch, Direktsaat) Bodenbearbeitung sind für Deutschland bis dato nicht verfügbar. Die Ermittlung stützt sich im Wesentlichen auf Ergebnisse aus Literaturrecherchen sowie mündlichen Mitteilungen von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeinen Pflanzenbau und ökologischen Landbau der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Um in nachfolgenden Schritten die Auswirkung eines sich veränderten Anteils pflugloser Bearbeitung auf die Höhe des C-Faktors bestimmen zu können, erfolgt die Ausweisung für folgende Ansätze:

- 100 % konventionelle Bodenbearbeitung (Worst-Case-Ansatz)
- 100 % pfluglose Bodenbearbeitung (Best-Case-Ansatz)
- Annahmen zur IST-Situation der Bodenbearbeitung (25 und 50 % pfluglose Bodenbearbeitung)

Zur Abschätzung der potenziellen Bodenabträge wurde der C-Faktor standardmäßig auf 1,0 festgelegt. Der oben beschriebene Ansatz bezieht sich auf die ackerbaulich genutzten Flächen zur Berechnung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung, die bei der Aggregierung der Ergebnisse für die Naturräume als Bezugsflächen verwendet wurden (Kap. 2.3.5). Die Grünland- und Brachflächen (langjährig aus der Nutzung genommen) wurden dennoch in die Modellierung einbezogen und durch Verknüpfung mit den ABAG-Faktoren der Abtrag ermittelt (vgl. Kap. 2.3.5). Für diese Nutzungen ist die Festlegung eines globalen C-Faktors erforderlich. Zur kleinmaßstäbigen Abschätzung der Bodenerosion kann unter mitteleuropäischen Verhältnissen der Abtrag unter Grünland nahezu vernachlässigt werden. STUMPF & AUERSWALD (2006), RIPPEL ET AL. (2004), VAN ROMPAEY ET AL. (2001) sowie AUERSWALD & SCHMIDT (1986) gaben für Grünland einen C-Faktor von 0,004 an. Dieser Wert wurde auch für die vorliegenden Untersuchungen verwendet.



### 2.3.4 Bestimmung der LS-Faktoren

In der Vergangenheit wurde bei der Bestimmung des L-Faktors vorwiegend die Berücksichtigung einer Standardhanglänge von 100 m oder 250 m zum Ansatz gebracht (siehe auch ERHARDT et al. 2002). Auch die Einstufung von Feldblöcken hinsichtlich ihrer potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetz (Cross Compliance) erfolgt durch die Verknüpfung der ABAG-Faktoren ‚K‘ und ‚S‘ bzw. ‚K‘, ‚S‘ und ‚R‘. Die Einbindung des Hanglängenfaktors ‚L‘ erfolgt optional, wobei auch hier zunächst eine mittlere Hanglänge von 100 m angesetzt wird (BUNDESRAT 2008).

Die Nichtberücksichtigung des L-Faktors und der Ansatz einer Standardhanglänge hätte allerdings eine Unterschätzung der erosiven Wirkung großer Hanglängen bei gleichzeitiger Überschätzung der Gefährdung auf kleinräumigen und heterogenen Flächen zur Folge, wie zum Ende dieses Kapitels exemplarisch dokumentiert wird. Mit dem Vorhandensein flächendeckender digitaler Geodaten sowie den verfügbaren Modellansätzen und Rechnerkapazitäten lassen sich mittlerweile auch Methoden anwenden, mit deren Hilfe sich die Hanglänge unter Einbeziehung von Nutzungsstrukturen, Schlaggrenzen oder weiteren Landschaftselementen ableiten lässt. Hierzu ist zunächst die Erarbeitung einer digitalen Landnutzungskarte erforderlich, deren Raumeinheiten die Modellgebiete darstellen.

#### *Schaffung der Landnutzungsgrundlage*

Betrachtungsräume für die modellgestützte Abschätzung der Bodenerosion durch Wasser bilden die landwirtschaftlich genutzten Flächen der Bundesrepublik Deutschland. Hierzu zählen sowohl Acker- als auch Grünlandflächen und Dauerbrachen (nur in Mecklenburg-Vorpommern ausgewiesen). Hinsichtlich der Erosionsgefährdung wurden die Brachflächen wie die Grünlandflächen eingestuft, da es sich hierbei um langjährig aus der ackerbaulichen Nutzung genommene und wieder begrünte Flächen handelt.

Der Datensatz der ‚CORINE Land Cover – Daten‘ (Tabelle 1) dient der Bereitstellung von einheitlichen und damit vergleichbaren Daten der Bodenbedeckung für Europa. Für flächendifferenzierte Betrachtungen der Bodenerosion in Deutschland muss die räumliche Auflösung der Daten hingegen als zu gering angesehen werden. Im digitalen Landschaftsmodell 1:250.000 des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie liegen Informationen zu Siedlungsbereichen nur als Punktdaten vor. Eine räumliche Abgrenzung ackerbaulicher Flächen ist ebenfalls nicht vorhanden. Für die Schaffung der Landnutzungskarte wurde demzufolge auf Daten des digitalen Basis-Landschaftsmodells 1:25.000 (Basis-DLM) zurück gegriffen (Tabelle 1). Das Basis-DLM beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat. Die Objekte werden einer bestimmten Objektart zugeordnet und durch ihre räumliche Lage, ihren geometrischen Typ, beschreibende Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten definiert. Die

Länderdatensätze des Basis-DLM werden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) übernommen und für ein bundeseinheitliches Basis-DLM geprüft, harmonisiert, georeferenziert, blattschnittfrei aufbereitet und verwaltet. Die Datenabgabe kann kompakt oder für verschiedene Datenebenen erfolgen. Für die Abgrenzung der landwirtschaftlichen Betrachtungsräume wurden folgende Ebenen des Objektbereiches ‚Vegetation‘ (4000) ausgewählt: Ebene ‚Ackerland‘ (Objektart 4101), Ebene ‚Grünland‘ (Objektart 4102) und Ebene ‚Brachland‘ (Objektart 4110), die nur in Mecklenburg-Vorpommern ausgewiesen wurde. Sonderkulturen (Objektart 4109) wurden nicht in die Untersuchungen einbezogen, da sie nicht flächendeckend im Basis-DLM vorgehalten werden.

In folgenden Arbeitsschritten erfolgte die Erarbeitung der Landnutzungskarte:

- bundesweite Zusammenführung der für die Bundesländer getrennt vorliegenden Datensätze für jede Hauptnutzungsart (Objektarten Ackerland, Grünland, Brachland) mittels *Merging*
- Aggregation der drei Hauptnutzungsarten mittels *Merging*
- Zuweisung der Attribute ‚Objektart‘, ‚Hauptnutzungstyp‘, ‚Datenquelle‘ und ‚Landnutzungs-ID‘

Die generierten Flächeneinheiten stellen zum einen die Bezugsräume für die Erosionsmodellierung dar. Für diese Flächen erfolgt die modellinterne Zuweisung der ABAG-Faktoren (Kap. 2.3.5). Darüber hinaus bilden die landwirtschaftlichen Flächen potenzielle Erosionsbarrieren, da die betrachtete Hanglänge (L-Faktor) auf die Flächen begrenzt wird. Die äußeren Grenzen der Flächen werden gemäß Abbildung 13 modellintern als ‚Barriere‘ definiert, sofern zwischen zwei Landwirtschaftsflächen ein Nutzungswechsel vorliegt.

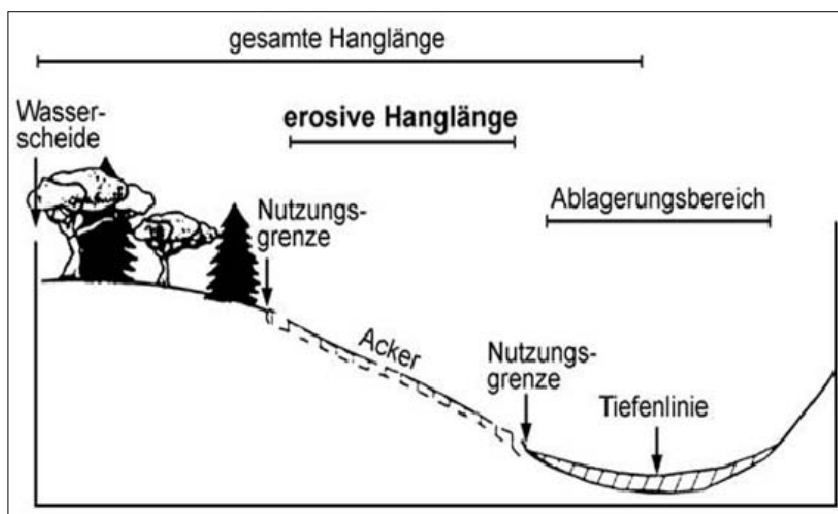
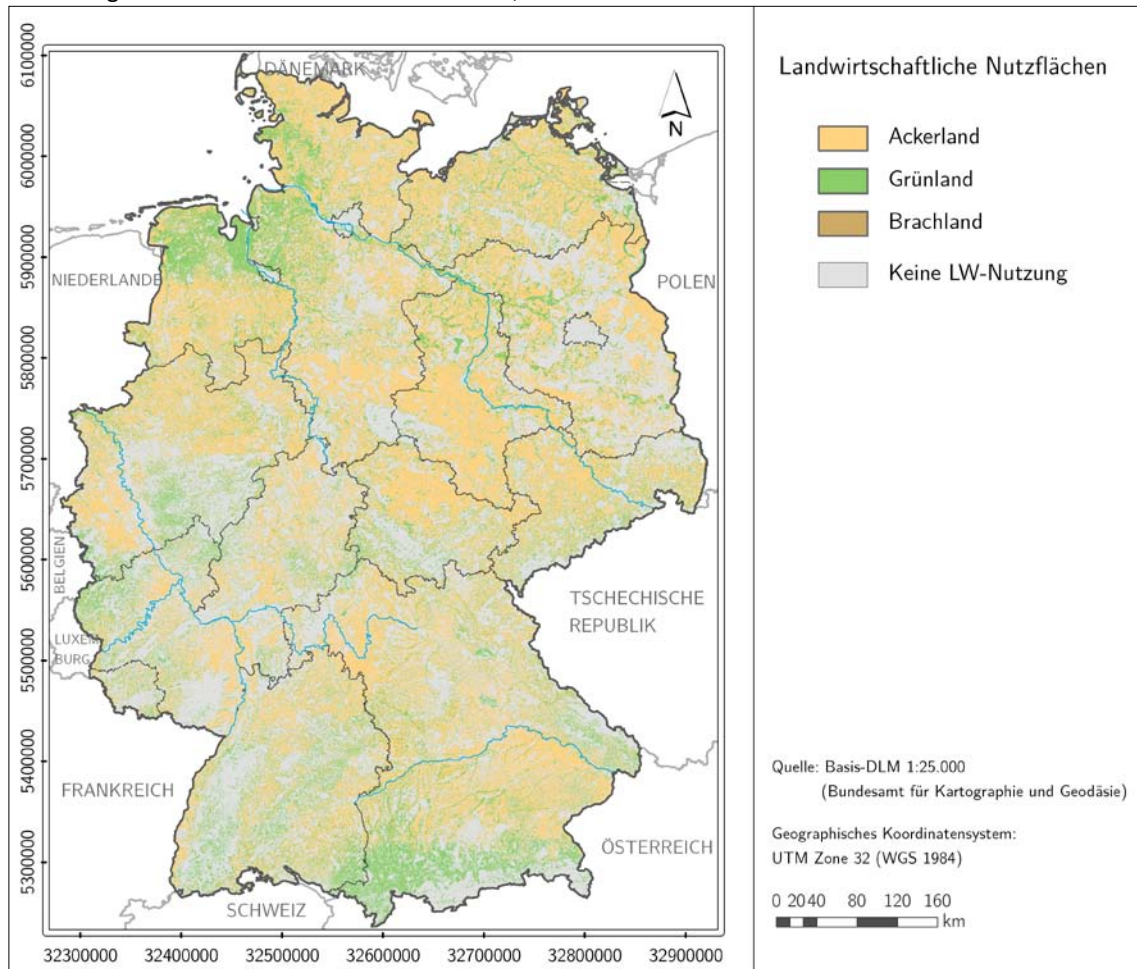


Abbildung 13: Aufteilung des Hanges durch Nutzungsgrenzen und Barrieren (RIPPEL et al. 2004)



Die bundesweite Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzflächen, basierend auf dem Basis-DLM, zeigt Abbildung 14.

Abbildung 14: Landwirtschaftliche Nutzflächen, basierend auf dem Basis-DLM



### Erarbeitung von Erosionsbarrieren

Neben den Grenzen der Landwirtschaftsflächen, die indirekt als Barriere wirken, wurde ein Datensatz erstellt, der linienhafte Objekte beinhaltet, welche die Flächendaten direkt ‚zerschneiden‘ und somit Hang verkürzend wirken. Hierzu wurden Fließgewässer, Verkehrsstrassen und Dämme berücksichtigt. Datengrundlage bildete das Digitale Landschaftsmodell (DLM 250). In Tabelle 7 sind die Barrieretypen näher spezifiziert.

Barrieretyp	Objektbereich (DLM 250)	Objektart (Attributierung)
Verkehrsweg	Verkehr	Straßen (3101), Wege (3102), Schienenbahn (3201), Rollbahn (3303)
Damm	Relief	Damm, Wall, Deich (6201)
Gewässer	Gewässer	Kanal (5102), Wasserlauf (5106)

Tabelle 7: Linienhafte Barrieretypen und ihre Zuordnung zum DLM250



Die Linienobjekte wurden zu einem ganzheitlichen Datensatz aggregiert und gemäß Tabelle 7 attribuiert. Die Einbindung in die Modellierung erfolgte modellintern als shape-Datei in *TerraFlux* und *ABAGFlux*. Eine Bewertung der Durchlässigkeit oder des Retentionsvermögens der Barrieren erfolgte nicht. Dies kann nur im großmaßstäbigen Bereich für kleine Betrachtungsräume sinnvoll umgesetzt werden.

Neben den linienhaften Objekten wirken auch Nutzungsgrenzen und somit der Übergang zu nicht landwirtschaftlichen Flächenobjekten als Barrieren. Durch die Betrachtung der Grenzen der Landwirtschaftsflächen als Barrieren wird diesem Ansatz indirekt bereits entsprochen, da aufgrund der hohen räumlichen Genauigkeit des Basis-DLM keine Überlagerung mehrere Flächenobjekte vorliegen kann. Zur Dokumentation und Darstellung wurde ergänzend ein Datensatz mit Flächendaten, die als Barriere wirken, erarbeitet und mit der Landnutzungskarte verknüpft. Die Flächendaten beinhalten die Objekte Wald, Gewässer und Bebauung und sind in Tabelle 8 dokumentiert. Die Flächentypen wurden zu einem Datensatz aggregiert und entsprechend Barrieretyp, Objektart und Datenquelle attribuiert.

Barrieretyp	Objektarten (Attributierung)	Datenquelle
Bebauung	Wohnbaufläche (2111), Industriefläche (2112), Fläche gemischter Nutzung (2113), Fläche funktionaler Prägung (2114), Freizeitanlage (2202)	Basis-DLM
Wald	Wald/Forst (4107)	DLM250
Sonstige Vegetation	Heide (4104), Moor (4105), Sumpf (4106), Sonderkultur (4109)	DLM250
Gewässer	Kanal (5102), Wasserlauf (5106), Binnensee (5112)	DLM250

Tabelle 8: Flächenhafte Barrieretypen und ihre Zuordnung zu DLM250 und Basis-DLM

### *Einbeziehung von Senkenbereichen nach Geomorphographischer Karte 1:1.000.000 (GMK 1000)*

Neben den beschriebenen Erosionsbarrieren können auch reliefbedingte Senkenbereiche Einfluss auf die Modellierung des Bodenabtrages haben, da auf diesen Flächen die Akkumulation erodierten Materials im langjährigen Mittel den Bodenabtrag übersteigt. Die Einbeziehung von Senkenbereichen wirkt sich auf die erosive Hanglänge aus, da diese vorwiegend am Hangfuß verkürzt dargestellt und somit ein reduzierter L-Faktor ausgewiesen werden kann.

Als bundesweite Datengrundlage lag die Geomorphographische Karte 1:1.000.000 (GMK 1000) vor, die im Auftrag der BGR durch die scilands GmbH erstellt wurde. Die GMK 1000 basiert auf dem digitalen Geländemodell im 250-m-Raster und weist jeder Landschaftseinheit definierte Reliefeinheiten zu. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde geprüft, ob die Einbindung der Senkenbereiche nach GMK 1000 zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen kann.





Aus der GMK 1000 wurden folgende sechs Klassen (111 bis 116) der Senkenbereiche extrahiert, die aus den Reliefparametern ‚Höhe über Tiefenlinie‘, ‚Tiefenlinie‘ und ‚Bodenfeuchteindex‘ abgeleitet wurden.

- 111 - Senken in sehr geringer Höhe über Tiefenlinie, mit sehr hohem Bodenfeuchteindex
- 112 - Senken in sehr geringer Höhe über Tiefenlinie, mit hohem Bodenfeuchteindex
- 113 - Senken in geringer Höhe über Tiefenlinie, mit hohem Bodenfeuchteindex
- 114 - Senken in mittlerer Höhe über Tiefenlinie, mit mittlerem Bodenfeuchteindex
- 115 - Senken in mittlerer Höhe über Tiefenlinie, mit geringem Bodenfeuchteindex
- 116 - Senken in großer Höhe über Tiefenlinie, mit sehr geringem Bodenfeuchteindex, mittel geneigt

Die aggregierten Senkenbereiche wurden mit den vorliegenden Erosionsbarrieren (Flächen, Linien) verknüpft und in die Modelle *TerraFlux* und *ABAGFlux* implementiert. Anschließend wurde die Erosionsmodellierung für zwei Varianten vorgenommen (vgl. auch Kap. 2.3.5). Zum einen erfolgte die Berücksichtigung aller linien- und flächenhafter Barrieren bei der Bestimmung des LS-Faktors, einschließlich der ausgewiesenen Senkenbereiche. Eine zweite Variante lässt die Senkenbereiche unberücksichtigt. Die Ergebnisse beider Berechnungsvarianten liegen dem UBA als Rasterdatensatz vor.

Die für ein Testgebiet im Detail untersuchten Ergebnisse zeigten, dass die Einbindung von Senkenbereichen grundsätzlich zu einer Verbesserung der Modellergebnisse führen kann, sofern die betrachteten Maßstabsebenen vergleichbar sind. In der vorliegenden Studie unterscheiden sich allerdings maßstabsbedingt die Lagegenauigkeiten der aus den Landschaftsmodellen (Basis-DLM, DLM 250) erarbeiteten Nutzungsdaten (Landwirtschaftsflächen, Barrieren) und des verwendeten DGM 50 zu stark von denen der aus der GMK 1000 abgeleiteten Senkenbereiche.

Abbildung 13 zeigt exemplarisch für ein Gebiet im östlichen Harzvorland die unterschiedlichen Lagegenauigkeiten von Senkenbereichen und Barrieren vor dem Hintergrund der Hangneigung. Dabei wird ersichtlich, dass,

- maßstabsbedingt Senkenbereiche größer ausgewiesen und somit gewässernahe Hangbereiche überdeckt werden,
- ausgewiesene Senkenbereiche zum Teil außerhalb erkennbarer Tiefenlagen des DGM 50 liegen,
- kleinere Senkenbereiche in schmalen Tiefenlinien nicht ausgewiesen werden.



Trotzdem es grundsätzlich zu bevorzugen ist, auch Senkenbereiche als Erosionsbarrieren zu berücksichtigen, könnten maßstabsbedingte Abweichungen zu einer Verkürzung der erosiven Hanglänge führen. Die Ursache hierfür liegt nicht in der Ausweisung der Senkenbereiche an sich. Vielmehr zeigt sich, dass die GMK 1000 aufgrund des geringer auflösenden Betrachtungsmaßstabes für eine Anwendung auf Basis des DGM 50 nicht ausreichend geeignet ist.

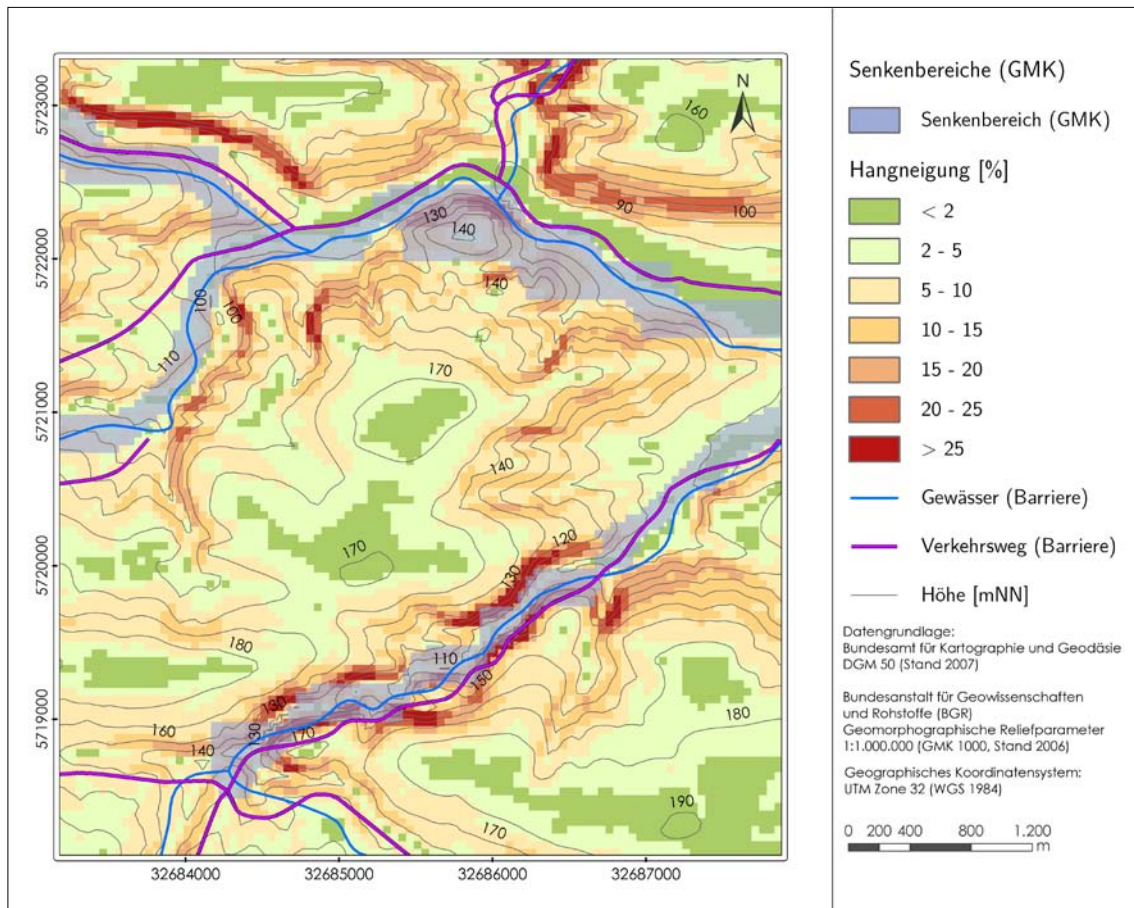


Abbildung 15: Ausgewiesene Senkenbereiche nach GMK 1000

### Modellierung der LS-Faktoren

Die digitale Ableitung des LS-Faktors gehört zu den Standardoperationen der Reliefanalyse. Nach HENNINGS (2000) gilt für die Bestimmung des LS-Faktors die Gleichung (15), wobei der Hanglängenkoeffizient  $m$  sich aus Tabelle 9 ergibt.

$$LS = (l/22)^m \times s/9 \times (s/9)^{0,5} \quad (Gl. 15)$$

LS ... Relieffaktor (Hangneigung, Hanglänge); l ... Hanglänge [m]; s ... Hangneigung [%]; m ... Hanglängen-  
koeffizient

Hangneigung [%]	$m$
$\leq 0,5$	0,15
$> 0,5 - 1,0$	0,20
$> 1,0 - 3,4$	0,30
$> 3,4 - 5,0$	0,40
$\geq 5,0$	0,50

Tabelle 9: Ableitung des Hanglängenexponenten  $m$  aus der Hangneigung

Während der S-Faktor sich direkt aus dem Reliefattribut Hangneigung  $s$  ableitet, haben sich bei der DGM-basierten Berechnung des L-Faktors Ansätze durchgesetzt, die auf dem komplexen Reliefattribut ‚spezifisches Einzugsgebiet‘ basieren. Der Vorteil besteht insbesondere in der Möglichkeit, Konvergenz und Divergenz der Oberfläche zu berücksichtigen. Das spezifische Einzugsgebiet entspricht der natürlichen Hanglänge  $l_{nat}$  (MOORE & BURCH 1986; MOORE & WILSON 1992; DESMET & GROVERS 1996) und berechnet sich nach Abbildung 16 aus der Teileinzugsgebietsgröße  $EZG$  und der Breite der potenziellen Abflussbahn  $b$ .

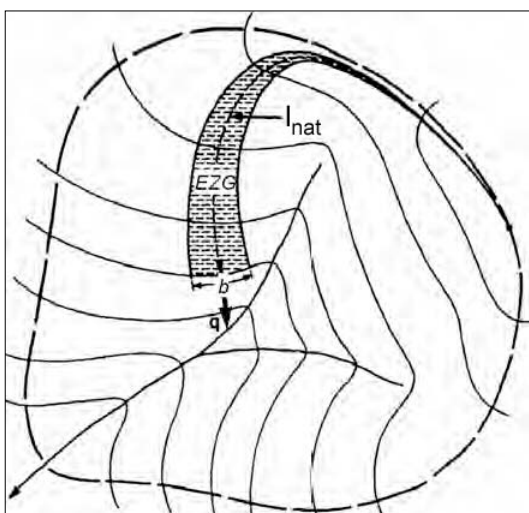


Abbildung 16: Faktoren zur Hanglängenberechnung (MOORE &amp; BURCH 1986; MOORE &amp; WILSON 1992)

Die in *TerraFlux* implementierte Berechnung der erosiven Hanglänge (spezifisches Einzugsgebiet) erfolgt mittels eines Fließakkumulationsalgorithmus. Danach gibt der Parameter ‚Fließakkumulation‘ für jede Rasterzelle die Größe des Gebietes an, dessen Oberflächenabfluss in diese Zelle entwässert. Hierbei wurde auf den „Multi-flow-direction“-Ansatz (CONRAD 1998) zurückgegriffen. Die wesentliche Modifizierung gegenüber der klassischen ABAG besteht in der Integration künstlicher und natürlicher Barrieren. Der zur Berechnung des LS-Faktors verwendete Fließakkumulationsalgorithmus berücksichtigt Barrieren und Flurelemente und bewirkt eine Verkürzung und somit realistischere Berechnung der Hanglänge. Gleichmaßen werden kleinere zwischen Oberhang und Tiefenlinie gelegene Akkumulationsbereiche einbezogen und der

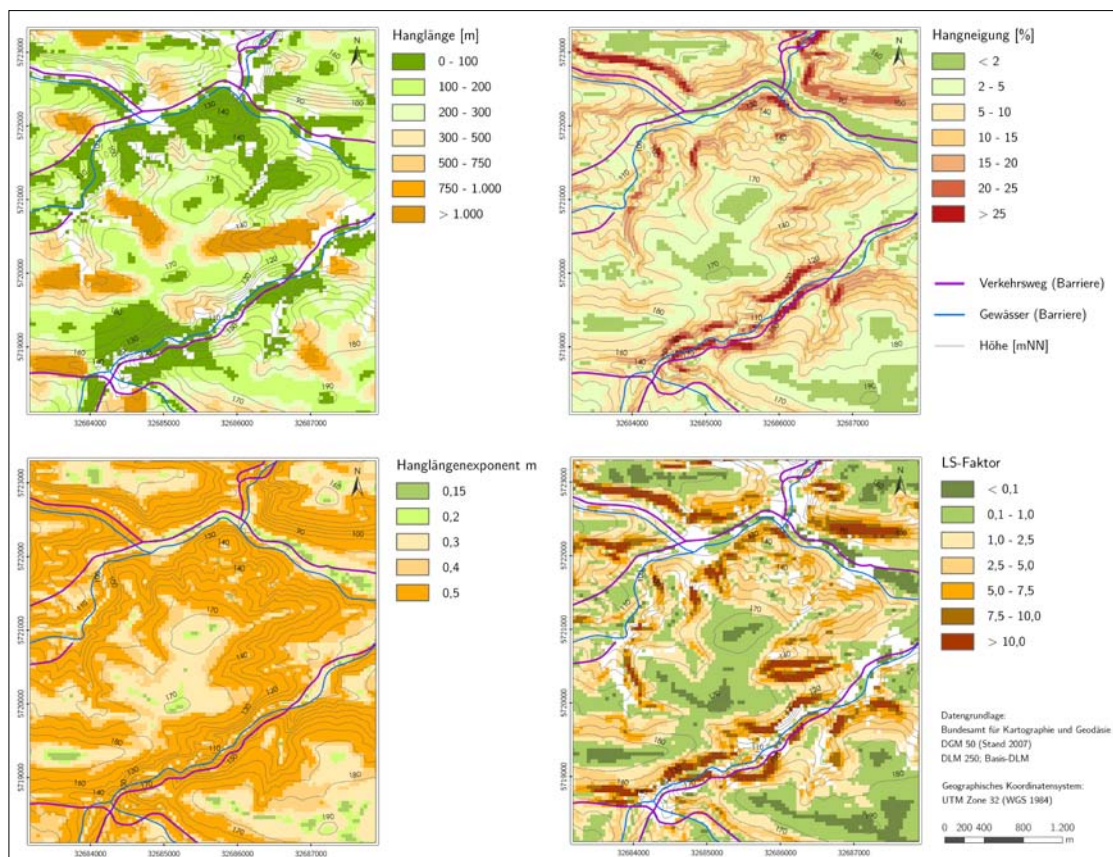


Gesamthang ggf. stärker differenziert. Als Barrieren fungieren die definierten Grenzen der Landwirtschaftsflächen sowie linien- und flächenhafte Barrieren. Neben der Hanglänge wurden auf Grundlage des digitalen Geländemodells modellintern die Hangneigung [%] und der Hanglängenkoeffizient bestimmt und nach Gleichung (15) für jede Rasterzelle der L-, S- und LS-Faktor abgeleitet.

Die Bestimmung des LS-Faktors wurde auf Grundlage des digitalen Geländemodells für Deutschland des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie vorgenommen. Das DGM wurde im 25-m-Raster zur Verfügung gestellt. Um entsprechend der Aufgabenstellung einen Rasterdatensatz von 50×50 m (DGM 50) zu generieren, wurde ein Resampling-Verfahren angewendet. Resampling-Verfahren sind lokale Filteroperationen, bei denen die Werte des Ausgangsrasters durch Nachbarschaftsoperationen auf das Zielraster übertragen werden. Die Anzahl der verwendeten Nachbarzellen sowie die Auswahl der Resampling-Methode (z. B. bilinear, bikubisch) bestimmen den Grad der Veränderung der Originalwerte des Ausgangszellenrasters. Für die Erstellung des DGM 50 wurde das Verfahren der binären Interpolation angewendet, welches über Nachbarschaftsbeziehungen die Werte der vier Nachbarzellen berücksichtigt und über die Entfernung wichtet.

Abbildung 17 zeigt exemplarisch für die landwirtschaftlichen Flächen eines Testgebietes die für die Bestimmung des LS-Faktors erforderlichen Parameter.

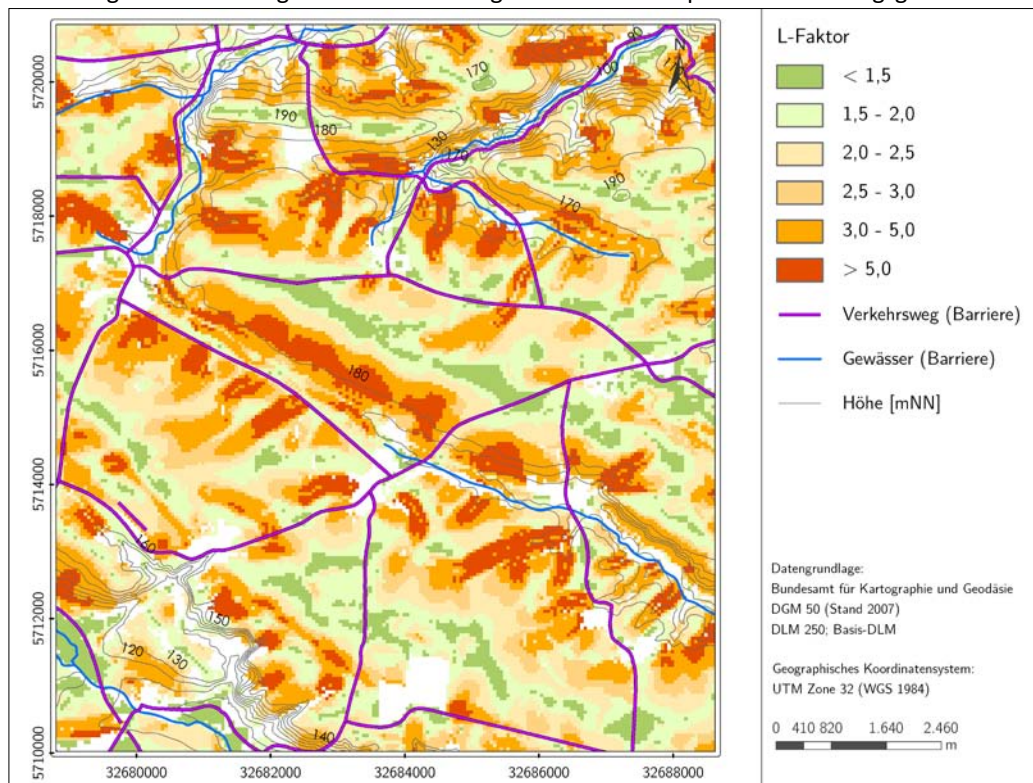
Abbildung 17: Exemplarische Darstellung der Parameter zur Ableitung des LS-Faktors



### Vergleichsberechnung LS-Faktor mit Standardhanglänge

Während im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen der L-Faktor aus dem spezifischen Einzugsgebiet abgeleitet wurde, kommen, wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, gegenwärtig noch ABAG-Ansätze zur Anwendung, bei denen eine Standardhanglänge von 250 m festgesetzt wird, was einem L-Faktor von 2 entspricht. Daraus lassen sich, vor allem in Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Ergebnissen, Unterschiede bei der Abschätzung der erosiven Hanglänge und somit bei der Bewertung der reliefabhängigen Erosionsgefährdung erwarten. Nachfolgende Vergleichsberechnung dokumentiert die Unterschiede zwischen Varianten und deren Ursachen.

Abbildung 18: Darstellung des L-Faktors – abgeleitet aus dem spezifischen Einzugsgebiet



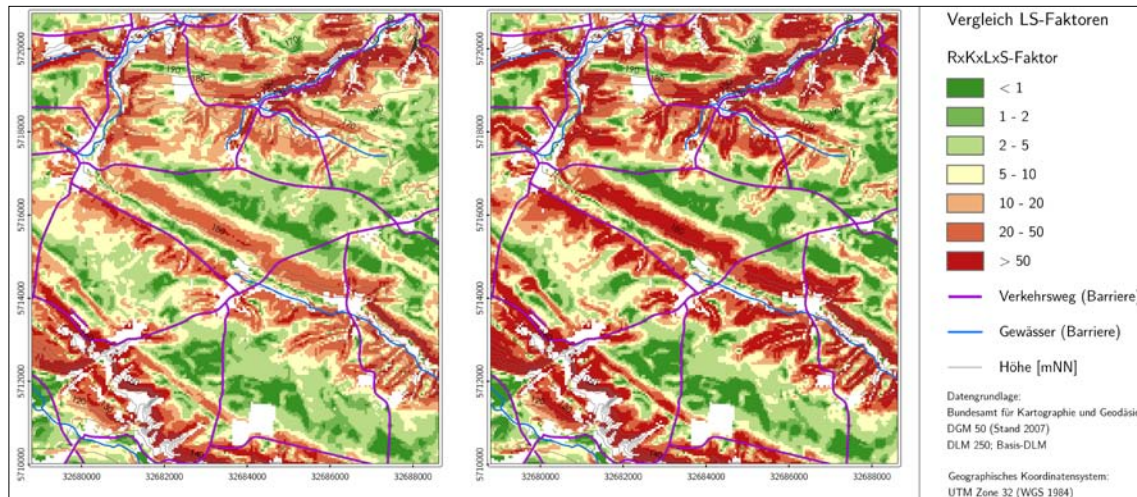
Obige Abbildung zeigt für die landwirtschaftlichen Flächen eines Testgebietes die stärkeren Differenzierungen, welche durch die modellhafte Berechnung des L-Faktors ermittelt werden können. Bei der Annahme eines standardmäßigen L-Faktors von „2“ würde der Reliefeinfluss auf den grün gekennzeichneten Flächen überschätzt werden. Dagegen käme es insbesondere auf stärker geneigten Bereichen größerer Hanglängen zu teilweise deutlichen Unterschätzungen der erosiven Hanglänge, sofern keine modellhafte Berechnung des L-Faktors erfolgt (Abbildung 18).

Legt man die zur Einstufung von Feldblöcken hinsichtlich ihrer potenziellen Erosionsgefährdung vorgegebene Verknüpfung der ABAG-Faktoren „K‘, „LS‘ und „R‘ gemäß Cross Compliance zugrunde, führt insbesondere in stärker geneigten Bereichen mit Hanglängen über 250 m die modellhafte Berücksichtigung des Hanglängenexponenten  $m$  zu sichtbaren Differenzen gegenüber der Standardvariante. In Abbildung 19 sind die Er-



gebnisse beider Varianten für die landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Testgebietes im östlichen Harzvorland dargestellt. Erkennbar ist ein geringerer Anteil stärker gefährdeter Flächen bei der Standardvariante (links).

Abbildung 19: Vergleich der Standardvariante zur Bestimmung des L-Faktors (links) mit Modellansatz zur Bestimmung des L-Faktors aus dem spezifischen Einzugsgebiet (rechts)



Bezogen auf die ackerbaulich genutzten Flächen Deutschlands zeigt Tabelle 10 die unterschiedlichen Flächenanteile ausgewählter Gefährdungsklassen. Grundlage der Klassenbildung bildete die Einstufung im Nationalatlas der Bundesrepublik Deutschland (FOHRER et al. 2003). Die direkte Ableitung des L-Faktors aus dem DGM, unter Berücksichtigung von Barrieren (Variante R x K x L x S), führt zu einer größeren Bedeutung der höchsten Gefährdungsklasse 5, was im Wesentlichen auf die stärkere Berücksichtigung von Flächen mit großen Hanglängen sowie die Einbindung des Hanglängenexponenten *m*, zurückzuführen ist, welcher in Abhängigkeit von der Hangneigungsklasse berechnet wird. Dies hätte vor allem auf die Erosionsbewertung in den durch eine größere Reliefenergie geprägten Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Sachsen und Thüringen maßgeblichen Einfluss.

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Abtrag [ $t \times ha^{-1} \times a^{-1}$ ]	< 5	5 – 10	10 - 15	15 - 30	> 30
R x K x L x S [Anteil %]	57,3	10,4	6,2	10,4	15,6
R x K x L x S [Anteil %]	58,5	9,2	5,1	9,1	18,1

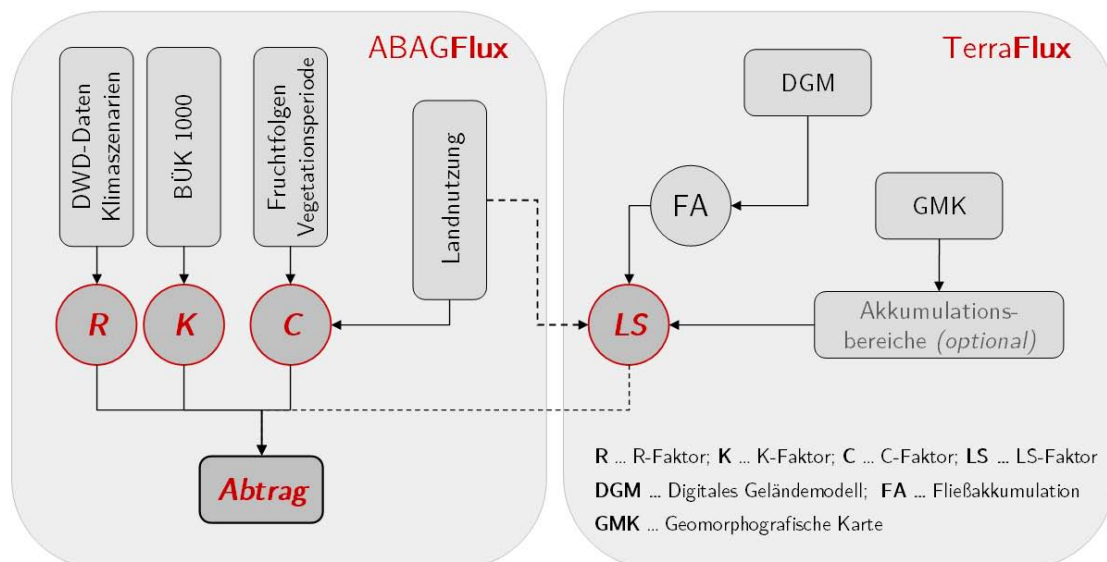
Tabelle 10: Flächenanteile der Abtragsklassen in Deutschland

Die Ergebnisse der Vergleichsberechnung zeigen, dass durch die direkte Ermittlung des L-Faktors aus Hanglänge und -neigung, wie sie im Rahmen der vorliegenden Studie umgesetzt wurde, eine differenzierte Betrachtung des Reliefeinflusses auf die Boden-erosion möglich ist. Allerdings sind hierfür modellgestützte Verfahren erforderlich.

### 2.3.5 Modellierung und Bewertung der Erosionsgefährdung für den Ist-Zeitraum – Modelle ABAGFlux und TerraFlux

Die modellbasierte Verknüpfung der ABAG-Faktoren und die rasterbasierte Berechnung der Bodenerosion durch Wasser erfolgt durch Anwendung der Modelle *ABAGFlux* und *TerraFlux* (WURBS et al. 2007; VOLK et al. 2010). Innerhalb von *TerraFlux* können auf Grundlage des digitalen Geländemodells Reliefparameter und die modifizierten ABAG-Faktoren ‚L‘ und ‚S‘ abgeleitet und verknüpft werden. Die Modifizierung beruht auf der Anwendung von Fließakkumulationsansätzen und der Einbindung einer Barriere- und Relief Funktion zur Berechnung der erosiven Hanglänge (vgl. Kap. 2.3.4). Das Erosionsgeschehen wird innerhalb der Modellumgebung von *ABAGFlux* betrachtet, das der Ermittlung langjähriger Bodenabträge auf der Fläche durch die variable Einbindung der ABAG-Faktoren LS, K und R dient (Abbildung 20). Durch die Verknüpfung der Teilergebnisse aus *TerraFlux* und *ABAGFlux* können Abtragsbereiche klassifiziert und bewertet werden.

Abbildung 20: Fließschema der Modelle ABAGFlux und TerraFlux



#### Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung

Die bundesweite Ermittlung der potenziellen Erosionsgefährdung erfolgte für alle landwirtschaftlichen Flächen, ohne Differenzierung nach Acker-, Grün- oder Brachland, wobei die in Kap. 2.3.4 beschriebenen Barriereansätze zur Anwendung kamen. Insofern wurden alle landwirtschaftlichen Flächen als homogene Einheit betrachtet. Gegenüber der nutzungsdifferenzierten Landnutzung, welche zusätzlich den C-Faktor berücksichtigt, ergeben sich daraus Unterschiede in Bezug auf den L-Faktor. Nutzungswechsel zwischen Acker- und Grünland wurden vernachlässigt, was aufgrund der fehlenden Barrierewirkung zu einer Erhöhung der erosiven Hanglänge führt.



Da die Eingangsdaten in unterschiedlichen Rasterauflösungen vorliegen (z. B. R-Faktor im 1000-m-Raster), erfolgte im Rahmen des Präprocessings innerhalb von *ABAGFlux* zunächst die Vereinheitlichung der Datengrundlagen in ein Grid mit einer räumlichen Auflösung von 50 x 50 m Rasterweite. Die Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung wurde anschließend für jede Rasterzelle auf Grundlage der Raumauflösung des digitalen Geländemodells umgesetzt. Die Ergebnisse liegen als ‚mittlere langjährige Bodenabträge‘ [ $t \times ha^{-1} \times Jahr^{-1}$ ] vor. Im Anschluss wurden die rasterbezogenen vorliegenden Ergebnisse für die Naturräume Deutschlands (vgl. Tabelle 1) durch Mittelwertbildung aggregiert und damit die räumliche Basis für eine vergleichende Betrachtung mit den später zu erarbeitenden Trendszenarien geschaffen.

Der Schwerpunkt bei der Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung liegt zunächst bei zwei Varianten. In der ersten Variante (1a, 1b) wird die erosive Hanglänge nicht berücksichtigt ( $R \times K \times S$ ). Die zweite Variante (1c – 1f) bezieht zusätzlich den L-Faktor mit ein ( $R \times K \times L \times S$ ). Eine weitere Differenzierung ergibt sich aus den unterschiedlichen Bezugszeiträumen des R-Faktors (Sommer, Jahr – vgl. Kap. 2.3.1). Zudem ergeben sich weitere Ergebniskombinationen aus den verschiedenen Möglichkeiten zur Integration von Barrieren bzw. Senkenbereichen (Kap. 2.3.4). Folgende Varianten zur Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung wurden für den Ist-Zustand modelliert und die Ergebnisse bezüglich der Naturräume aggregiert:

Variante	Beschreibung
Abtrag ohne Berücksichtigung der Hanglänge ( $R \times K \times S$ )	
1a	$R_{NSo} \times K \times S$ - R-Faktor auf Basis der Sommerniederschläge
1b	$R_{Jahr} \times K \times S$ - R-Faktor auf Basis der Jahresniederschläge
Abtrag mit Berücksichtigung der Hanglänge ( $R_{NSo} \times K \times L \times S$ ) auf Basis der Sommerniederschläge	
1c	Landwirtschaftsflächen ohne Berücksichtigung der Senkenbereiche - Keine Nutzungsdifferenzierung und Barrierewirkung zwischen Acker-, Grün- und Brachland (C-Faktor = 1)
1d	Landwirtschaftsflächen mit Berücksichtigung der Senkenbereiche - Keine Nutzungsdifferenzierung und Barrierewirkung zwischen Acker-, Grün- und Brachland (C-Faktor = 1) - Senkenbereiche gelten zusätzlich als Barrieren
Abtrag mit Berücksichtigung der Hanglänge ( $R_{Jahr} \times K \times L \times S$ ) auf Basis der Jahresniederschläge	
1e	Landwirtschaftsflächen ohne Berücksichtigung der Senkenbereiche - Keine Nutzungsdifferenzierung und Barrierewirkung zwischen Acker-, Grün- und Brachland (C-Faktor = 1)
1f	Landwirtschaftsflächen mit Berücksichtigung der Senkenbereiche - Keine Nutzungsdifferenzierung und Barrierewirkung zwischen Acker-, Grün- und Brachland (C-Faktor = 1) - Senkenbereiche gelten zusätzlich als Barrieren

Tabelle 11: Berechnungsvarianten für die potenzielle Erosionsgefährdung





Die Ergebnisse aller Varianten liegen dem UBA als Datensatz vor. Die Bewertung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung erfolgte ohne Berücksichtigung der Senken. Die Ergebnisdarstellung (Kap. 3) für den Ist-Zustand wurde für die R-Faktor-Variante unter Einbeziehung der Sommerniederschläge (Varianten 1a, 1c) vorgenommen.

### *Berechnung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung*

Die Modellierung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung wurde gemäß der zuvor für die potenzielle Gefährdung dargestellten Vorgehensweise vorgenommen. Zusätzlich wurden die ermittelten C-Faktoren für den Ist-Zustand (Kap. 2.3.3) eingebunden. Eine Differenzierung erfolgte nach dem Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung (0 %, 25 %, 50 % und 100 %). Die klassifizierten Ergebnisse wurden als Rasterkarte für die weitere Auswertung bereitgestellt. Ebenfalls wurde die Aggregation der Ergebnisse für die Naturräume der Bundesrepublik durch Mittelwertbildung vorgenommen. Im Gegensatz zur potenziellen Erosionsgefährdung besteht am Übergang von Acker- zu Grünland eine erosionsmindernde Barrierewirkung. Somit hat die nutzungsdifferenzierte Betrachtung nicht nur einen direkten Einfluss (C-Faktor) sondern beeinflusst auch indirekt den Bodenabtrag durch die Reduzierung der Hanglänge (L-Faktor).

Eine weitere Differenzierung der Modellierungsvarianten hinsichtlich der Einbindung des L-Faktors bzw. unterschiedlicher Barrieren erfolgte nicht. Die folgenden Berechnungsvarianten beziehen grundsätzlich den L-Faktor (ohne Senkenbereiche) mit ein und basieren auf den Varianten 1c und 1e der potenziellen Erosionsgefährdung. Die bei der Ergebnisdarstellung (Kap. 3) bevorzugte Variante basiert auf den R-Faktoren auf Grundlage der Sommerniederschläge (Varianten 2a – 2d).

Variante	Beschreibung
Abtrag mit Berücksichtigung der Hanglänge ( $R_{N_{So}} \times K \times L \times S$ ) auf Basis der Sommerniederschläge - Ackerflächen gelten als nutzungsdifferenzierte Abtragsbereiche; Grün- und Brachland stellen flächenhafte Erosionsbarrieren dar	
2a	100 % konventionelle Bodenbearbeitung
2b	25 % konservierende Bodenbearbeitung
2c	50 % konservierende Bodenbearbeitung
2d	100 % konservierende Bodenbearbeitung
Abtrag mit Berücksichtigung der Hanglänge ( $R_{N_{Jahr}} \times K \times L \times S$ ) auf Basis der Jahresniederschläge - Ackerflächen gelten als nutzungsdifferenzierte Abtragsbereiche; Grün- und Brachland stellen flächenhafte Erosionsbarrieren dar	
2e	100 % konventionelle Bodenbearbeitung
2f	25 % konservierende Bodenbearbeitung
2g	50 % konservierende Bodenbearbeitung
2h	100 % konservierende Bodenbearbeitung

Tabelle 12: Berechnungsvarianten für die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung



## 2.4 Abschätzung der Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen

### 2.4.1 Auswahl eines regionalen Klimaszenarienmodells

#### *Beschreibung der regionalen Klimaszenarienmodelle*

Die regionalen Klimaszenarienmodelle REMO (JACOB et al. 2008) und WETTREG (SPEKAT et al. 2007) wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt. Die Klimaprojektionen beider Modelle basieren auf den Simulationen des am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg vorhandenen Globalmodell ECHAM5. REMO bildet die dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre ab und liefert Ergebnisse mit einer räumlichen Auflösung von 0,088° und einer Zeitschrittweite von einer Stunde. WETTREG hingegen nutzt die statistischen Wechselbeziehungen bisheriger Klimabeobachtungen - vor allem den Einfluss der Großwetterlagen auf das Lokalklima - und liefert Berechnungsergebnisse auf Stationsbasis mit Tageswerten. Wesentliche Basisinformationen zu beiden Modellen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Informationen	REMO	WETTREG
Modelltyp	Dynamisches Modell	Statistisches Regionalisierungsverfahren
Entwickler	MPI für Meteorologie, Hamburg	CEC Potsdam GmbH
Zeitraum	1951-2000 (Kontrolllauf); 2001-2100 (Szenarien)	1961-2000 (Kontrolllauf); 2001-2100 (Szenarien)
Modellgebiet	Deutschland und Alpenraum	Deutschland
Emissionsszenarien	A1B, B1, A2	A1B, B1, A2
Antrieb durch Globalmodell	ECHAM5 / MPI-OM (Lauf 1)	ECHAM5 / MPI-OM (Lauf 1)
Räumliche Auflösung	0,088° (ca. 10 x 10 km)	1.959 Stationen
Zeitliche Auflösung	Stunde	Tag
Struktur	Gitterpunkte: rotiertes Modellgitter sowie reguläres Höhe-/Breite-Gitter	Diskrete Stationswerte, ergänzt um Metadaten (geographische Koordinaten, Höhe mNN)

Tabelle 13: Informationen zu den Modellen REMO und WETTREG

Aggregierte Tageswerte liegen für beide Modelle innerhalb des Interaktiven Diagnose- und Präsentationstools (IDP) zur weiteren Auswertung vor. Die Extrahierung der für die Szenarienbetrachtungen erforderlichen Klimazeitreihen auf Tagesbasis wurde aus dem IDP-Tool heraus realisiert.



### *Bundesweiter Modellvergleich hinsichtlich der Wiedergabe der Niederschlagsverteilung*

Bedingt durch die unterschiedlichen Modellansätze und -eigenschaften lassen sich für die regionalen Klimaszenarienmodelle REMO und WETTREG auch Differenzen in der flächendeckenden Darstellung der Niederschlagsverteilung in Deutschland erwarten. Eine gute Wiedergabe des beobachteten Niederschlagsverhaltens durch den Modellkontrolllauf ist eine Voraussetzung für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung stärkerer Niederschläge. Die nach der Fertigstellung der REMO-Szenarien veröffentlichten Niederschlagsdaten wiesen zunächst Fehler in Form von horizontalen Verschiebungen bei der Niederschlagsverteilung auf. Diese Defizite, welche auf eine fehlende Berücksichtigung des Verdriftungseffektes der Niederschläge zurückzuführen waren, wurden durch die Entwickler korrigiert. Für den Modellvergleich fanden die korrigierten Werte Verwendung.

Um die Vergleichbarkeit der Modelldaten zu gewährleisten, waren zunächst folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Erfassung von langjährigen Mittelwerten des Jahresniederschlages (Referenzzeitraum 1971-2000) für die WETTREG-Stationen, die REMO-Rastermittelpunkte (jeweils Kontrolllauf) und die DWD-Stationen
- Räumliche Interpolation der punktuell vorliegenden Mittelwerte mittels Kriging-Methode auf 1x1-km-Raster
  - Aufgrund des unterschiedlichen Raumbezugs von REMO (Zellen) und WETTREG (Stationen) treten Abweichungen im Interpolationsergebnis auf. Aufgrund der relativ hohen Dichte der Stationen und Rasterzellen können diese für einen grundlegenden Modellvergleich vernachlässigt werden.
- Erarbeitung von Übersichtskarten zum Jahresniederschlag der Modellkontrollläufe und der DWD-Beobachtungsdaten
- Statistische Erfassung von mittleren Differenzen zwischen Modellkontrollläufen und Beobachtungsdaten für die naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten (nach Abbildung 11)

Die Ergebnisse des Modellvergleichs zeigten für das REMO-Modell gegenüber vorherigen Untersuchungen (WURBS & KÖNIG 2009) durch die Berücksichtigung des Verdriftungseffektes eine verbesserte Wiedergabe der Niederschlagsverteilung, insbesondere für exponierte Lagen der Mittelgebirge. Erkennbar bleiben bei REMO aber weiterhin die zum Teil erheblichen Abweichungen gegenüber den beobachteten Werten (Abbildung 21). Diese spiegeln sich in einer deutlichen Überschätzung der Niederschlagssummen von etwa 25 % im Nordwest- und Nordostdeutschen Tiefland wider.



Auch die westlichen und östlichen Mittelgebirgsbereiche sowie die südlichen Mittelgebirge und die Alpen zeigen eine mittlere Überschätzung des Niederschlages um 11,3 bzw. 7 %. Unterschätzungen des beobachteten Niederschlages weisen – wenn auch in geringerem Ausmaß - einzelne Regionen in Süd- und Westdeutschland auf. Als Ursache für die Abweichungen zwischen beobachteten und modellierten Daten wird durch das Max-Planck-Institut für Meteorologie die grobe Maschenweite einzelner Beobachtungsdatensätze angeführt, welche kleinräumige Strukturen der Niederschlagsverteilung nicht enthalten.

Begründet durch den statistischen Modellansatz, bei dem die statistischen Wechselbeziehungen bisheriger Klimabeobachtungen genutzt werden, weist der Kontrolllauf des WETTREG-Modells eine gute Darstellung des beobachteten Niederschlagsgeschehens auf, sowohl in seiner räumlichen Verteilung (Abbildung 21) als auch in der Wiedergabe der absoluten Werte (Tabelle 14). Im Mittel konnten leichte Unterschätzungen (-2,1 %) für das Nordwestdeutsche Tiefland und leichte Überschätzungen durch WETTREG in den weiteren naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten bestimmt werden.

Naturräumliche R-Faktoren-Einheiten	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
<b>REMO</b>				
Nordwestdeutsches Tiefland	+24,1 %	- 13,4 %	+121,3 %	+ 15,9
Nordostdeutsches Tiefland	+26,2 %	-21,3 %	+109,8 %	+ 11,6
Westliche & Östliche Mittelgebirge	+11,3 %	- 53,2 %	+143,7 %	+ 26,1
Südliche Mittelgebirge & Alpen	+7,0 %	- 48,2 %	+168,6 %	+ 25,7
<b>WETTREG</b>				
Nordwestdeutsches Tiefland	-2,1 %	-8,2 %	+4,1 %	+1,8
Nordostdeutsches Tiefland	1,2 %	-6,8 %	+8,3 %	+2,4
Westliche & Östliche Mittelgebirge	0,1 %	-8,1 %	+11,7 %	+1,9
Südliche Mittelgebirge & Alpen	0,4 %	- 7,2 %	+6,6 %	+1,9

Tabelle 14: Relative Abweichungen der Modellkontrollläufe gegenüber Beobachtungsdaten

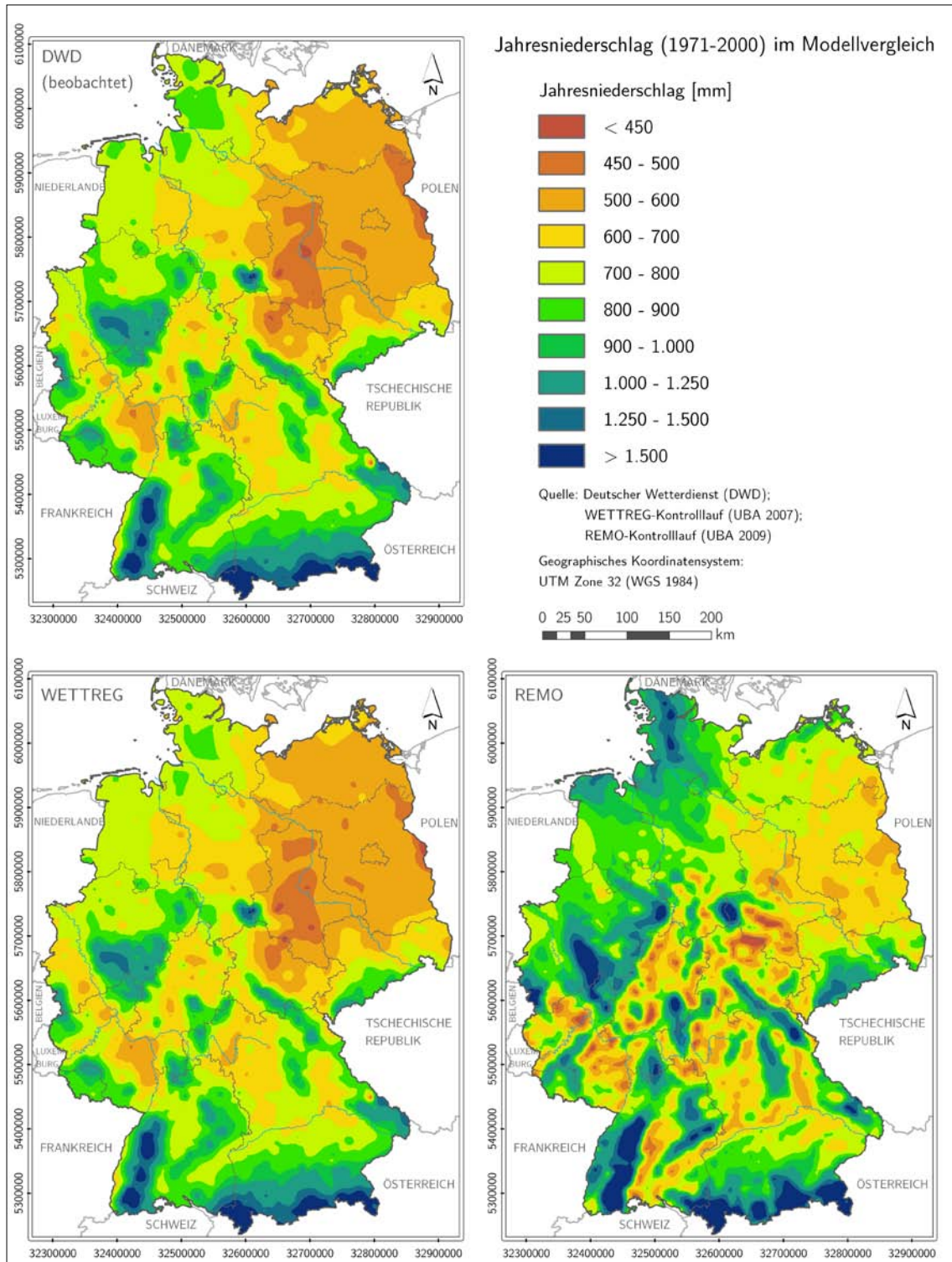


Abbildung 21: Wiedergabe der Jahresniederschlagsverteilung in Deutschland durch die Modelle



### Statistische Analysen für Beispielstationen

Neben der großräumigen Betrachtung der Wiedergabe des beobachteten Niederschlagsverhaltens durch die Modelle wurde anhand ausgewählter statistischer Parameter stichprobenhaft geprüft, ob und in welchem Ausmaß REMO und WETTREG eine Veränderung stärkerer Ereignisse für die Szenarienzeiträume wiedergeben können.

Durch das REMO-Modell lässt sich nach Aussagen der Entwickler die Veränderung extremer Niederschläge durch das REMO-Modell ableiten, da das atmosphärische Zirkulationsmodell REMO die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet (JACOB et al. 2008). Das WETTREG-Modell erzeugt zwar tägliche Niederschlagsreihen, da diese jedoch durch Rekombination von Anomalie-Abschnitten aus dem „Ist-Klima“ abgeleitet wurden, geben sie zunächst nur die gegenwärtige „Extremcharakteristik“ wieder (SPEKAT et al. 2007). Im Rahmen weiterer Bearbeitungsschritte wird zur Berücksichtigung der Extremwert-Muster bei WETTREG mit Hilfe von Regressionsbeziehungen und Verteilungsanpassungen ein lokaler Messwert aus einer Kombination von Einflussgrößen synthetisch bestimmt (SPEKAT et al. 2007).

Die statistische Analyse erfolgte anhand der DWD-Stationen Dresden und Leipzig, für die durch ELHAUS & HILLER (2007) Auswertungen zur Aktualisierung des R-Faktors vorgenommen wurden (Tabelle 15). Für den Modellvergleich wurden ausgewählte statistische Kenngrößen (vgl. Tabelle 16) der den genannten Stationen nächstgelegenen WETTREG-Station bzw. REMO-Rasterzelle ausgewertet. Im Gegensatz zu der in Kap. 2.4.2 dokumentierten Vorgehensweise wurde keine entfernungsgewichtete Betrachtung mehrerer Nachbarstationen bzw. -zellen vorgenommen.

DWD-Station	Rechtswert	Hochwert	Station WETTREG		Rasterzelle REMO	
			Name	Distanz	Name	Distanz
Leipzig-Holzhausen	32740401	5690693	Leipzig	2,1 km	066_067	3,2 km
Dresden-Klotzsche	32832168	5675231	Dresden	2,2 km	076_063	2,7 km

Tabelle 15: Stationswerte der für den Modellvergleich betrachteten Stationen

Eine Betrachtung von linearen Trends innerhalb der 30-jährigen Perioden wurde nicht vorgenommen, da die Methodik beider Modelle zur Zeitreihenerstellung dies sowohl für die Kontrollläufe als auch die Szenarienzeiträume nicht zulässt. WETTREG und REMO haben zum Ziel, nicht die Trends sondern das Niveau und die Variabilität des Kontrollzeitraums (Mittelwerte, jährliche Verteilungen, Extrema) korrekt wiederzugeben. Die Zusammenstellung von Zeitreihen für eine CLINO-Periode erfolgt dann eher zufällig und gibt nicht die taggenau gemessenen Klimadaten wider.

Tabelle 16 zeigt zunächst den Vergleich der Modellkontrollläufe mit der DWD-Referenzperiode 1971-2000. Auch hier zeigt das REMO-Modell gegenüber den DWD-Daten für beide Stationen deutlich höhere Niederschlagssummen mit geringen halb-



jährlichen Differenzierungen. Dagegen unterschätzt WETTREG den beobachteten Niederschlag leicht. Betrachtet man hingegen die Niederschlagssummen oberhalb des definierten 98 %-Perzentils (P98) zeigen beide Modelle relativ geringe Abweichungen gegenüber den beobachteten Werten des DWD. Ausgehend von den höheren Gesamtniederschlägen ergibt sich daraus für REMO ein geringerer Anteil der Starkregensummen am Gesamtniederschlag, was - unter Beachtung der hier verwendeten Methode und Stationen - auf eine Unterschätzung der definierten Starkregen durch das Modell hindeutet.

	Werte (absolut)						Abweichung [%]			
	Dresden			Leipzig			Dresden		Leipzig	
	DWD	WETTREG	REMO	DWD	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO
Jahresniederschlag [mm]	675	646	789	603	580	675	-4,3	16,9	-3,8	11,9
Niederschlagssumme So-HJ [mm]	388	372	455	340	332	382	-4,1	17,3	-2,4	12,4
Niederschlagssumme Wi-HJ [mm]	287	274	334	263	248	293	-4,5	16,4	-5,7	11,4
98 %-Perzentil P98 [mm]	15,1	14,5	15,3	13,7	14,2	14,4	-4,0	1,3	3,6	5,1
Niederschlagssumme (Jahr) > 98P [mm]	177	185	174	162	160	160	4,5	-1,7	-1,2	-1,2
Anteil P98 am Jahresniederschlag [%]	26,2	28,7	22,1	26,8	27,5	23,6	9,5	-15,6	2,6	-11,9
Überschreitungshäufigkeit 20 mm/Tag [Tage]	3,8	3,9	3,5	2,7	2,9	3,2	2,6	-7,9	7,4	18,5

Tabelle 16: Stationsbezogener Vergleich von Niederschlagsparametern der Modellkontrollläufe mit Beobachtungsdaten (1971-2000)

Tabelle 17 stellt die relative Veränderung der Niederschlagsparameter an beiden Stationen dar. Verglichen wurden jeweils die CLINO-Perioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 mit dem Kontrolllauf 1971-2000.



Wesentliche Unterschiede zwischen den Modellen lassen sich wie folgt zusammenfassen. Die Gültigkeit der Aussagen bezieht sich ausschließlich auf die Stationen Dresden und Leipzig.

- REMO zeigt an beiden Stationen eine Tendenz zur Niederschlagszunahme, während das WETTREG-Modell abnehmende Jahresniederschlagssummen vorgibt.
- Für beide Modelle kann von einem Anstieg des Anteils der Winterniederschläge ausgegangen werden.
- Bezogen auf das 98 %-Perzentil, zeigt WETTREG tendenziell einen leichten Rückgang stärkerer Ereignisse, wobei zwischen den Stationen, Perioden und Halbjahren zu differenzieren ist.
- REMO zeigt eine deutlich erkennbare Tendenz zur Zunahme stärkerer Ereignisse (Starkregensummen, Anteil am Gesamtniederschlag) mit ausgesprochen hohen Quantitäten.

	Dresden						Leipzig					
	WETTREG			REMO			WETTREG			REMO		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Jahresniederschlag [mm]	-5,0	-4,3	-5,1	2,3	6,9	1,3	-0,3	-8,5	-1,7	4,8	12,3	7,8
Niederschlag So-HJ [mm]	-2,5	-11,3	-16,7	-1,1	-2,6	-7,2	3,4	-15,2	-15,7	3,1	4,3	1,5
Niederschlag Wi-HJ [mm]	-8,4	5,1	10,7	6,8	19,9	12,8	-5,2	0,5	16,9	6,9	22,6	16,0
Niederschlag (Jahr) > 98P [mm]	3,8	-1,4	-10,7	11,4	29,2	34,7	2,5	-17,7	-0,1	14,2	40,5	35,1
Anteil P98 am Jahresniederschlag [%]	2,7	0,9	-1,7	2,0	4,6	7,3	0,8	-2,8	0,4	2,1	5,9	6,0
Überschreitungshäufigkeit 20 mm/Tag [Tage]	5,1	-7,8	-21,8	17,1	37,1	42,9	-7,4	0,0	11,1	9,4	46,9	31,2

Tabelle 17: Relative Veränderung [%] von Niederschlagsparametern für die Szenarienzeiträume gegenüber den Modellkontrollläufen





### *Begründung der Modellauswahl*

Wie eingangs erläutert, berücksichtigen REMO und WETTREG grundsätzlich die Veränderung des Starkniederschlagsgeschehens bei der Erstellung der Klimaszenarien. Der Modellvergleich hat für zwei Beispielstationen gezeigt, dass es hinsichtlich Richtung und Ausmaß einer zukünftigen Starkregenentwicklung deutliche Unterschiede zwischen beiden Modellen gibt. Insofern kann daraus auch nicht auf DAS „richtige Modell“ geschlossen werden. Aus folgenden Gründen wurden für die weiterführenden Untersuchungen die Klimaszenariendaten des WETTREG-Modells verwendet:

#### Wiedergabe des Gesamtniederschlages:

REMO zeigte deutschlandweit deutliche Abweichungen zum gemessenen Niederschlag. Zumeist werden die Niederschlagssummen überschätzt. Da im Rahmen des Projektes die relative Veränderung – im Vergleich mit dem Kontrolllauf – im Vordergrund steht, könnten, trotz der dokumentierten Abweichungen, grundsätzlich auch REMO-Daten genutzt werden. Allerdings treten die Unterschiede zum beobachteten Niederschlagsverhalten nicht flächendeckend in vergleichbarem Maße auf. Vielmehr zeigen sich regional deutliche Differenzen zwischen Nord- und Süddeutschland, sodass eine homogene deutschlandweite Vergleichsbasis für die Szenarienanalysen nicht gegeben scheint. Dagegen gibt das WETTREG-Modell, bei deutlich geringeren Abweichungen zu den Beobachtungsdaten, Niederschlagssummen und –verteilung gut wider. Trotz der Option, bei der Ergebnisdarstellung hauptsächlich auf relative Veränderungen zu orientieren, ist zum Zweck der Nachvollziehbarkeit die tabellarische und kartografische Darstellung der Absolutwerte unerlässlich. Hier wäre bei einer Verwendung der REMO-Ergebnisse die Möglichkeit von Fehlinterpretationen nicht auszuschließen. Der Verzicht auf die REMO-Daten erfolgt ausschließlich projektbezogen. In Abhängigkeit vom Verwendungszweck können andere Klimaparameter durchaus besser dargestellt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass zukünftige Weiterentwicklungen zur Minimierung der genannten Defizite des Modells beitragen können.

#### Korrektur des Verdriftungseffektes und Modellverfügbarkeit:

Im Rahmen der Modellverbesserung erfolgte für das REMO-Modell eine Nachbearbeitung des Niederschlages, um den Verdriftungseffekt während des Fallens zu berücksichtigen. Die korrigierten Ergebnisse standen erst nach Projektbeginn Ende 2008 als Rohdatensatz in stündlicher Auflösung zur freien Verfügung. Die Nutzung der Stundenwerte wäre, insbesondere in Hinblick auf die bundesweite Betrachtung, aufgrund des enormen Daten- und Bearbeitungsaufwandes, im Rahmen dieses Projektes nicht realisierbar gewesen. Aus diesem Grund wurde für die Auswertung auf aggregierte Tageswerte zurückgegriffen, die für beide Modelle innerhalb des Interaktiven Diagnose- und Präsentationstools (IDP) vorlagen. Da die Einarbeitung der korrigierten REMO-



Werte in das IDP-Tool erst ab 2009 erfolgte, war eine Verwendung der korrigierten Tageswerte für diese Studie nicht mehr realisierbar.

### *Festlegung der Emissionsszenarien und CLINO-Perioden*

Die regionalen Klimamodelle liefern Ergebnisse für die drei IPCC-Emissionsszenarien A1B, B1 und A2, die in unterschiedlicher Weise die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von der globalen Entwicklung (Bevölkerung, Wirtschaft, Technik, Energienutzung) bis zum Jahr 2100 berücksichtigen. Für die vorliegende Studie wurde eine mittlere Realisierung des A1B-Szenariums gewählt. Gegenüber den Szenarien A2 und B1 zeigt das A1B-Szenarium eine mittlere Entwicklung mit folgenden globalen Randbedingungen auf:

- global orientierte Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum
- schnelle Einführung neuer und effizienterer Techniken
- Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien
- Anstieg der Weltbevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts, gefolgt von einer Abnahme der Weltbevölkerung
- Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis Mitte des 21. Jahrhunderts und leichter Rückgang bis 2100

Als Grundlage für die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des erosiven Niederschlagsverhaltens wurden 30-jährige Zeitreihen des Tagesniederschlags erarbeitet, die jeweils den gegenwärtigen Zustand (Referenzzeitraum) und die Situation unter veränderten klimatischen Bedingungen (Szenarienzeitraum) charakterisieren.

Als Referenzzeitraum wurde die aktuelle CLINO-Periode 1971-2000 festgelegt. Der Szenarienzeitraum umfasst die Periode 2011 bis 2100 und dient der vergleichenden Analyse mit dem Referenzzeitraum. Der Gesamtzeitraum wird jeweils getrennt für die Szenarienzeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 betrachtet. Dabei ist mit zunehmendem Zeitabstand zum Referenzzeitraum von einem Anstieg der Unsicherheiten der Klimamodellergebnisse auszugehen.



## 2.4.2 Regressionsansatz zur Bestimmung der R-Faktoren für die Szenarienzeiträume

### *Grundgedanken des Regressionsansatzes*

Der Regressionsansatz beinhaltet die Neubestimmung (Wichtung) der für Deutschland gültigen R-Faktoren für die 30-jährigen CLINO-Perioden der Klimaszenarien von 2011 bis 2100 über ein kombiniertes Verfahren. Grundgedanke ist dabei, dass der R-Faktor die Erosivität der Niederschläge widerspiegelt und auf Basis analysierter Starkregenereignisse bestimmt wurde. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass aus einer Veränderung des Starkregenverhaltens in gleichem Maße auf eine Veränderung der R-Faktoren geschlossen werden kann. Das Verfahren integriert zum einen die simulierten Tagesniederschläge regionaler Klimamodelle und betrachtet zudem über eine Schwellenwertmethode die direkte Veränderung des R-Faktors, das heißt, des Anteils erosiver Niederschläge am Gesamtniederschlag. Eine explizite Betrachtung konvektiver Ereignisse kann aufgrund der Zeitschrittweite des Klimamodells nicht erfolgen.

Mithilfe des zur Anwendung kommenden Ansatzes erfolgt zunächst die Wichtung der R-Faktoren an den für Deutschland vorliegenden 191 Referenzstationen, an denen R-Faktoren in der Vergangenheit bestimmt wurden (Kap. 2.3.1) – ergänzt um zusätzliche Stützstationen. Die Wichtung wird auf Grundlage einer Starkregenanalyse, welche die Veränderung der definierten Starkregensummen der Szenarienzeiträume gegenüber dem Modellkontrolllauf berücksichtigt, umgesetzt. Die flächendeckende Bestimmung der R-Faktoren kann anschließend über die Ableitung angepasster Regressionsgleichungen und deren Verknüpfung mit den mittleren Niederschlägen der regionalen Klimamodelle erfolgen.

Hintergrund der Vorgehensweise ist eine möglichst enge Orientierung an den gegenwärtig vorliegenden methodischen Vorgaben zur flächendeckenden Bestimmung des R-Faktors nach DIN 19708 (DIN 2005) und der Methodendokumentation Bodenkunde der Ad-Hoc AG Boden (HENNING 2000). Diese orientiert auf

- die stationsbezogene Bestimmung der R-Faktoren (Wichtung),
- die Ableitung von Regressionsgleichungen zur Wiedergabe des statistischen Zusammenhangs zwischen R-Faktoren und Niederschlag,
- die Regionalisierung der R-Faktoren mithilfe vorliegender Niederschlagsdaten.

Eine vollständige Neuberechnung des R-Faktors nach SCHWERTMANN et al. (1990) ist aufgrund der Zeitschrittweite der Klimamodelle gegenwärtig nicht möglich.

Abbildung 22 zeigt das Fließschema der nachfolgend dokumentierten Vorgehensweise zur Bestimmung der R-Faktoren.

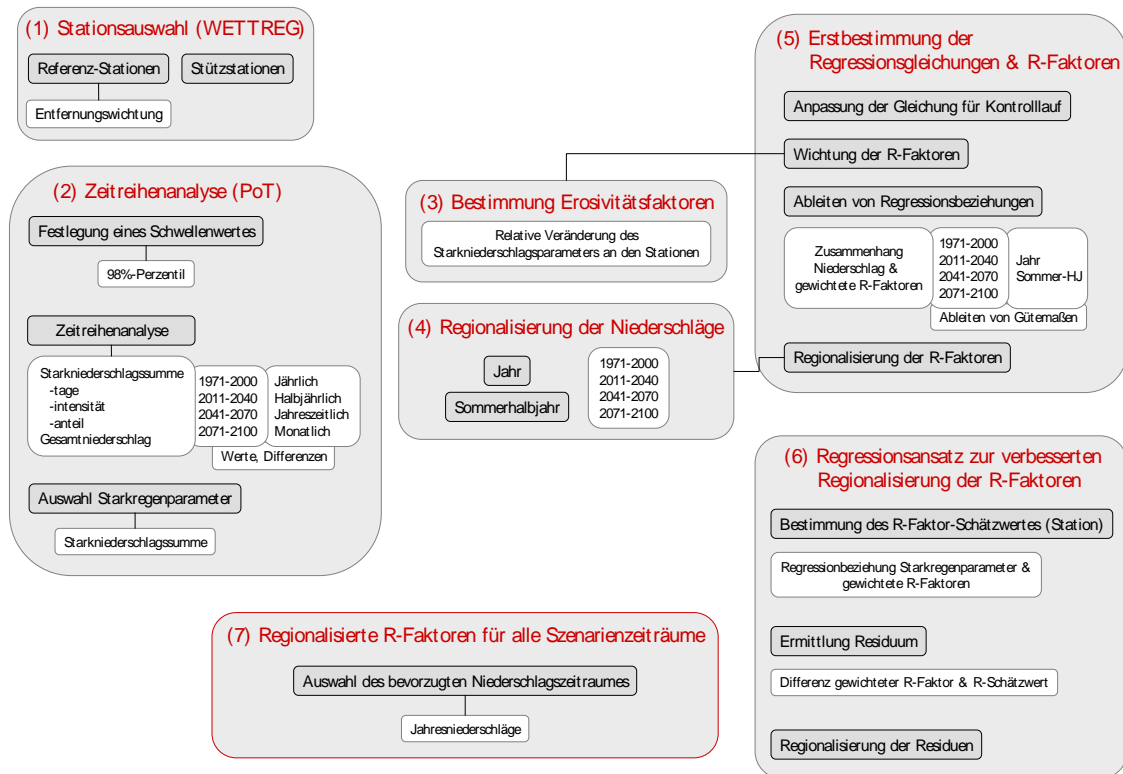


Abbildung 22: Schema zur Bestimmung der R-Faktoren

### Stationsauswahl und Zeitreihenerstellung

Die Neubestimmung des R-Faktors erfordert die Bereitstellung von Zeitreihen des Tagesniederschlags an ausgewählten Referenzstationen für den Kontrolllauf und die Szenarienzeiträume. Als Referenzstationen gelten alle 191 Stationen, die zur Ableitung des R-Faktors für den Ist-Zustand hinzugezogen wurden (Kap. 2.3.1). Da die für das WETTREG-Modell verwendeten Stationen nicht in jedem Fall identisch mit den Referenzstationen sind, war im Vorfeld der Bearbeitung die Auswahl von repräsentativen Stationen erforderlich. Für jede Referenzstation wurden mittels Nearest-Neighbour-Methode vier Nachbarstationen aus dem WETTREG-Datensatz identifiziert und die jeweilige Distanz zur Referenzstation ermittelt. Entsprechend Gleichung 16 wurde für jede Nachbarstation ein Wichtungsfaktor bestimmt, wobei mit zunehmender Entfernung zur Referenzstation die Bedeutung einer WETTREG-Station abnimmt (vgl. Abbildung 23).

$$W_{1..4} = \frac{\left( \frac{1}{(D_{1..4})} \right)}{\left( \frac{1}{(D_1)} + \frac{1}{(D_2)} + \frac{1}{(D_3)} + \frac{1}{(D_4)} \right)} \quad (Gl. 16)$$

$W_{1-4}$  ... Wichtungsfaktor der WETTREG-Stationen 1 bis 4;  $D_{1-4}$  ... Distanz der WETTREG-Stationen zur Referenzstation [km]

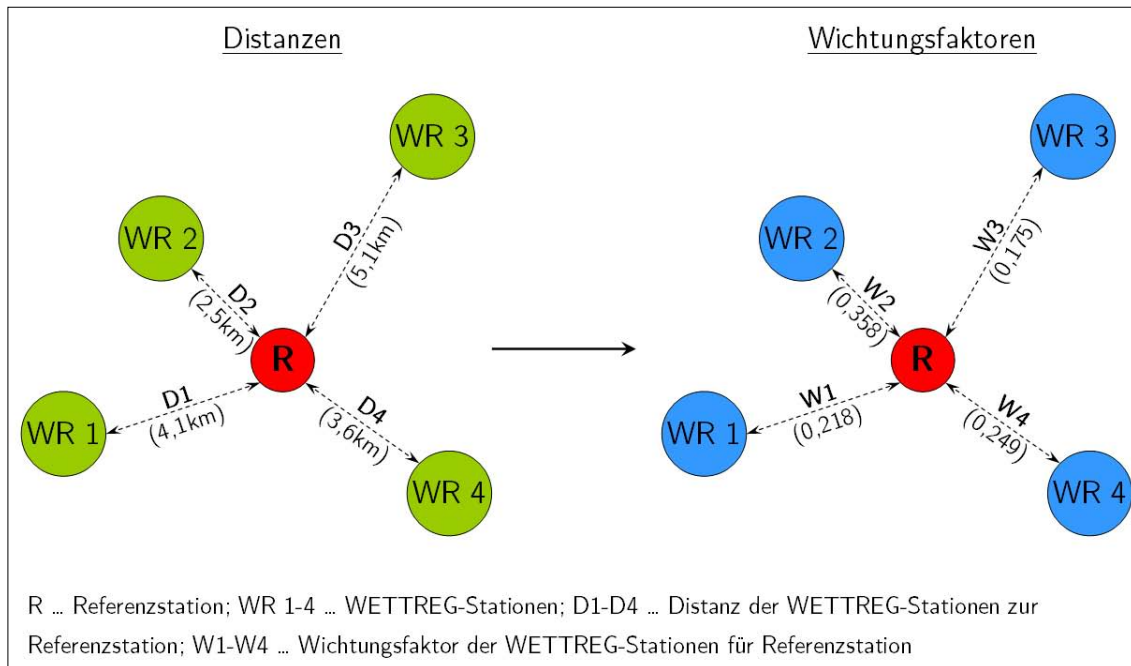


Abbildung 23: Beispielschema zur Ableitung von Wichtungsfaktoren aus der Distanz der WETTREG-Stationen zur Referenzstation

Die Ermittlung der Wichtungsfaktoren bildet die Grundlage für die entfernungsgewichtete Zuordnung von relativen Veränderungen des Starkregenverhaltens der WETTREG-Stationen zu einer Referenzstation.

Insgesamt wurden 552 unterschiedliche WETTREG-Stationen den 191 Referenzstationen zugewiesen. Abbildung 24 verdeutlicht, dass die Referenzstationen und dementsprechend auch die 552 WETTREG-Stationen mit unterschiedlicher Dichte innerhalb von Deutschland verteilt sind. Insbesondere Teile Ost- und Südwestdeutschlands sind durch Stationen unterrepräsentiert. Um eine bessere regionale Anpassung der für die Szenarienzeiträume zu erarbeitenden Regressionsgleichungen für Gebiete mit geringerer Stationsdichte zu erhalten, und somit die Plausibilität der Ergebnisse zu erhöhen, wurden 100 zusätzliche Stationen in die Starkregenanalyse einbezogen. Diese ‚Stützstationen‘ wurden mittels Nearest-Neighbour-Methode insbesondere in Gebieten mit bisher geringer Stationsdichte ausgewählt. Auswahlkriterium für die bisher nicht berücksichtigten WETTREG-Stationen war die Rangordnung der maximalen Entfernung zu einer Referenzstation. In Abbildung 24 ist die räumliche Verteilung der Referenz- und WETTREG-Stationen sowie der Stützstationen dargestellt.

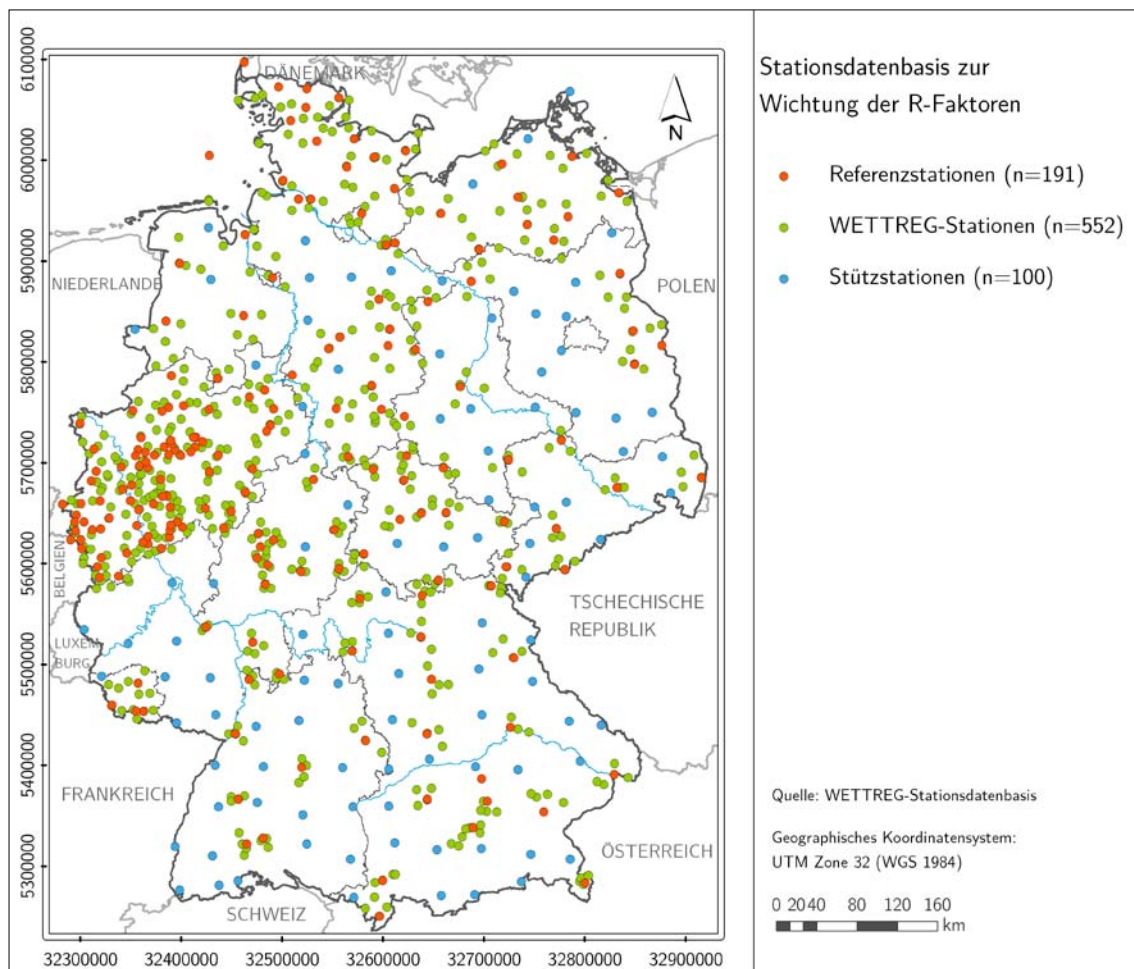


Abbildung 24: Verwendete Referenzstationen und WETTREG-Stationen zur Bestimmung der R-Faktoren

Die Niederschlagswerte der ausgewählten Stationen des WETTREG-Modells wurden erfasst, hinsichtlich ihrer Datenqualität analysiert und für die Starkregenanalyse übergeben. Hierzu wurden gemäß der gewählten CLINO-Perioden (Kap. 2.4.1) 30-jährige Niederschlagszeitreihen auf Tagesbasis für den Modellkontrolllauf (1971-2000) und die Szenarienziträume (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) erstellt. Entsprechend der täglichen Zeitschrittweite der Szenariendaten wurde für die weiteren Auswertungen eine Dauerstufe für ein Starkregenereignis von  $D = 24$  h gewählt.

### Zeitreihenanalyse – Peak-over-threshold-Methode (PoT)

Die Wichtung der R-Faktoren für die Szenarienziträume erfolgte auf Grundlage der **Peak-over-threshold-Methode** (PoT). Mit der Peak-over-threshold-Methode werden mittels definierter Schwellenwerte Extremwerte in einem Datensatz bestimmt. Die statistische Analyse erfolgt ausschließlich für jene Daten, die den Schwellenwert überschreiten. Gegenüber der klassischen Extremwertstatistik (z. B. *annual maximum series* –AMS) besteht durch die PoT-Methode der Vorteil, dass nicht nur jährliche Extremwerte betrachtet werden (vgl. PANDEY et al. 2003). Dadurch ist die Anzahl der verfügbaren



Fälle deutlich höher. Zur Anpassung einer Häufigkeitsverteilung der Fälle über dem Schwellenwert wird eine asymptotische Verteilung, die *Generalized Pareto Distribution* (GPD) verwendet (Gl. 17). Dabei streben die Funktionswerte für große Werte von  $x$  langsamer gegen null als bei der Normalverteilung.

Für  $x' =$  Schwellenwert gilt:

$$GPD_{\xi, \sigma}(x-x') = 1 - \left(1 + \xi x \frac{x-x'}{\sigma}\right)^{-1/\xi} \quad (\text{Gl. 17})$$

$\xi$  ... Formparameter;  $\sigma$  ... Standardabweichung (Skalenparameter);  $x'$  ... Schwellenwert;  $x$  ... Beobachtungswert

Ein bedeutender Schritt bei der Anwendung der PoT-Methode ist die **Wahl eines geeigneten Schwellenwertes**. Da es dafür keine definierten Standards gibt, sollte sich die Festlegung des Schwellenwertes an der Charakteristik des betrachteten Klimaparameters orientieren. Bei zu klein gewählten Schwellenwerten besteht die Möglichkeit des Nichtgreifens der Asymptotik. Dagegen liefern zu hohe Schwellenwerte eventuell eine zu geringe Stichprobenzahl für die Auswertungen. Verschiedene Ansätze zur Wahl des Schwellenwertes gehen von absoluten Werten des Tagesniederschlages aus oder benutzen stationsspezifische Häufigkeitsverteilungen. Feste Schwellenwerte von 10 bzw. 20 mm Tagesniederschlag nutzten u. a. KREIENKAMP et al. (2009) oder GERSTENGARBE et al. (2006). Der Nachteil fester Schwellenwerte liegt in der mangelnden Berücksichtigung der Orografie, welche die räumliche Variabilität der Niederschläge beeinflusst (Höhenabhängigkeit, Luv-Lee-Effekte). Während zum Beispiel ein Schwellenwert von 20 mm im Flachland durchaus als geeignet erscheint, beschreibt dieser Wert im Mittel- und Hochgebirgsbereich nicht zwingend auch ein 24-stündiges Starkregenereignis. Dagegen besitzen stationsbezogene Häufigkeitsverteilungen den Vorteil, regionalspezifische Besonderheiten stärker zu berücksichtigen. Als ein solches Maß gelten Perzentile, durch die ein Starkregenereignis nicht über seinen Schwellenwert sondern sein Auftreten innerhalb einer Grundgesamtheit definiert wird. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Tagesniederschlagsmengen berücksichtigt, die das 98 %-Perzentil einer Station überschreiten. Dies betrifft alle Niederschläge, die im langjährigen Mittel von 30 Jahren nur an 2 % aller Tage überschritten werden und somit durchschnittlich 7,3-mal im Jahr auftreten. Durch diesen Ansatz kann von einer ausreichenden Grundgesamtheit von 219 Werten innerhalb des Referenzzeitraumes 1971-2000 ausgegangen werden. Beispiele für die Schwellenwertfestlegung anhand von Perzentilen liefern u. a. GRIESER & BECK (2002) und WURBS & KÖNIG (2009). Abbildung 25 zeigt ein Beispiel von Überschreitungen des Schwellenwertes (19,8 mm) einer 30-jährigen Reihe für die Station Aachen.

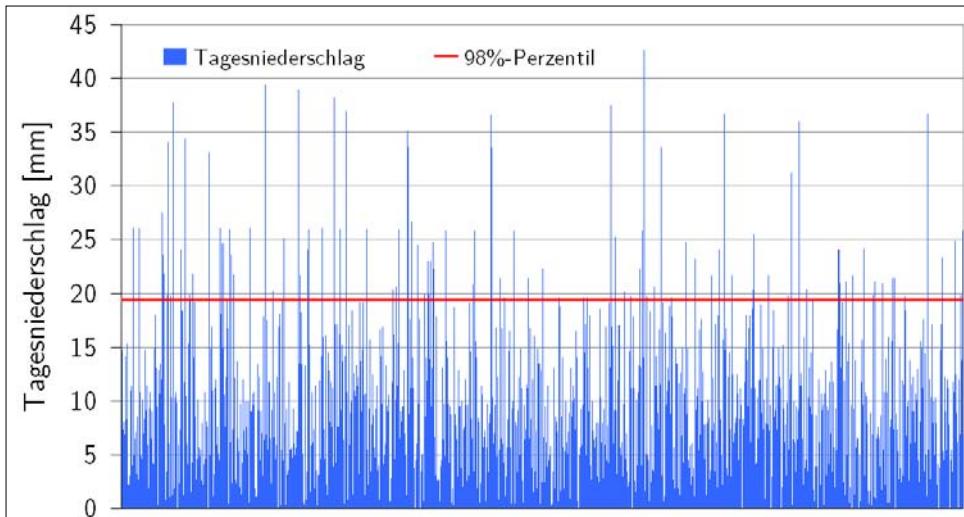


Abbildung 25: 98 %-Perzentil der 30-jährigen Reihe des Kontrolllaufes – Station Aachen

Die 98 %-Perzentile wurden für alle Stationen aus den Tageswerten des Kontrolllaufes bestimmt.

Ausgehend von den für jede Station festgelegten Schwellenwerten wurde für den WETTREG-Kontrolllauf der Referenzperiode 1971-2000 und die Szenarienzeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 stationsbezogen eine detaillierte **Zeitreihenanalyse** durchgeführt. Im Fokus standen sowohl Starkniederschlagsparameter als auch die Gesamtniederschlagssummen mit monatlichem bis jährlichem Zeitbezug. Einen Überblick über die ausgewerteten Kennwerte gibt Tabelle 18.

Niederschlagsparameter	Jahr	Hydrologische Halbjahre	Meteorologische Jahreszeiten	Monate
Starkniederschläge				
98 %-Perzentil	o			
Mittlere Starkniederschlagssumme [mm/Jahr]	o	o	o	o
Anteil Starkniederschlagssumme am Gesamtniederschlag [%]	o	o		
Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage (veränderlich erst in Szenarienzeiträumen)	o	o	o	o
Mittlere Intensität der Starkniederschläge [mm/Tag]	o	o		
Mittlere Starkniederschlagssumme x Intensität (Gesamtparameter)	o	o		
Gesamtniederschläge				
Mittlere Niederschlagssumme [mm]	o	o	o	o
Anteil Niederschlagssumme am Jahresniederschlag [%]		o	o	o





Tabelle 18: Stationsweise für alle CLINO-Perioden ermittelte Niederschlagsparameter

Die Definition des Schwellenwertes wurde für den Kontrolllauf 1971-2000 vorgenommen und für die Szenarienzeiträume konstant gehalten, um die Vergleichbarkeit der Starkregenparameter zwischen den Perioden zu gewährleisten.

Für die in Tabelle 18 aufgeführten Kennwerte wurden folgende Auswertungen vorgenommen:

- Bestimmung der Starkniederschlags- und Niederschlagsparameter für den Kontrolllauf 1971-2000 und die drei Szenarienzeiträume
- Ermittlung der **absoluten** Veränderungen der Starkniederschlags- und Niederschlagsparameter jedes Szenarienzeitraumes gegenüber dem Kontrolllauf
- Ermittlung der **relativen** Veränderungen der Starkniederschlags- und Niederschlagsparameter jedes Szenarienzeitraumes gegenüber dem Kontrolllauf

Aus den in Tabelle 18 aufgeführten Kennwerten galt es einen für die Neubestimmung bzw. Wichtung der R-Faktoren geeigneten **Parameter auszuwählen**, welcher die Verteilung der R-Faktoren aller Referenzstationen ausreichend gut abbildet und aus dessen zeitlicher Entwicklung in gleichem Maße auf die Veränderung der R-Faktoren geschlossen werden kann. Hier zeigten die für die 191 Referenzstationen entfernungsgewichtet aus den Daten der 552 WETTREG-Stationen bestimmten **mittleren Starkniederschlagssummen** den besten linearen Zusammenhang zu den gemessenen R-Faktoren. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,84 (Abbildung 26). Bei der Bewertung des statistischen Zusammenhanges sind folgende Faktoren zu berücksichtigen, die limitierend auf die Güte der Regressionsbeziehung wirken: Die den gemessenen R-Faktoren gegenüber gestellten Starkregensummen wurden anhand des WETTREG-Kontrolllaufes bestimmt. Dieser weist die in Kap. 2.4.1 dokumentierten Abweichungen zu den Beobachtungsdaten auf, was sich einschränkend auf den in Abbildung 26 abgebildeten Zusammenhang auswirkt. Des Weiteren liegen zeitliche Abweichungen zwischen Kontrolllauf (1971-2000) und den Beobachtungszeiträumen vor, für die die R-Faktoren an den 191 Stationen bestimmt wurden. Diese Zeiträume liegen zumeist vor der Periode des Kontrolllaufes. Hierbei handelt es sich allerdings um ein modellunabhängiges Defizit, welches in Kap. 7 diskutiert wird. Zuletzt sei angemerkt, dass die WETTREG-Stationen nicht identisch mit den 191 R-Faktoren-Stationen sind, sondern entfernungsgewichtet deren Nachbarstationen betrachtet wurden. Berücksichtigt man die genannten Gründe, so könnte insbesondere die Verringerung der zeitlichen und räumlichen Inkonsistenzen zu einer Verbesserung der Güte des statistischen Zusammenhanges führen.

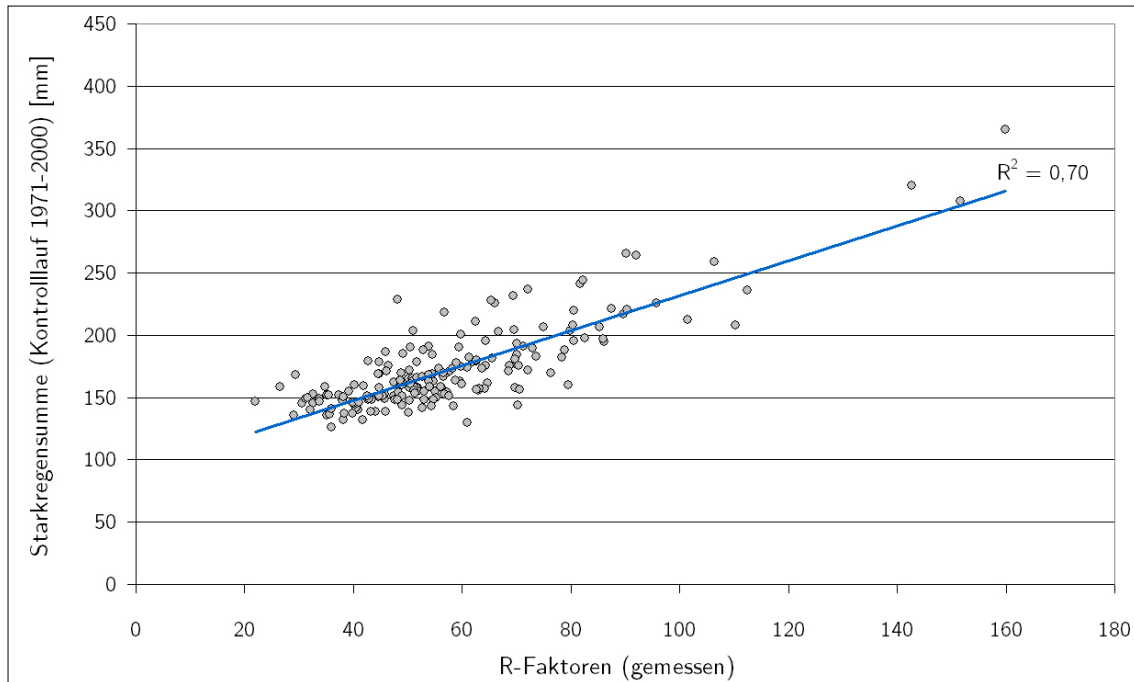


Abbildung 26: Statistischer Zusammenhang zwischen gemessenen R-Faktoren und den Starkregensummen des Kontrolllaufes

### Ableitung von Erosivitätsfaktoren

Mithilfe der Zeitreihenanalyse wurden Schwellenwerte bestimmt und mit der mittleren Starkniederschlagssumme ein Parameter festgelegt, dessen Entwicklung auf die R-Faktoren des Ist-Zustandes aufgeprägt wird. Die relative Veränderung der mittleren Starkniederschlagssummen einer WETTREG-Station wird durch den Erosivitätsfaktor widergegeben. Er kennzeichnet das Verhalten jeder Station des WETTREG-Modells hinsichtlich der Tendenz zur Zu- oder Abnahme erosiver Ereignisse eines Szenarienzeitraumes gegenüber dem Modellkontrolllauf. Die Erosivitätsfaktoren lassen sich nach folgender Gleichung bestimmen:

$$E_N = \frac{\left( \sum Ne_{S_z} - \sum Ne_{R_f} \right)}{\sum Ne_{R_f}} + 1 \quad (Gl. 18)$$

$E_N$  ... Erosivitätsfaktor des erosiven Jahresniederschlags;  $\sum Ne_{S_z}$  ... Summe erosiver Jahresniederschläge des Szenarienzeitraumes;  $\sum Ne_{R_f}$  ... Summe erosiver Jahresniederschläge des Referenzzeitraumes (Kontrolllauf)

Die Ableitung der Erosivitätsfaktoren wurde auf Grundlage der erosiven Niederschläge des gesamten Jahres für die 30-jährigen Kontroll- und Szenarienzeiträume vorgenom-



men. Die ganzjährige Betrachtung der Erosivitätsfaktoren hat gegenüber der Fokussierung auf das für das Starkniederschlagsgeschehen heute bedeutendere Sommerhalbjahr den Vorteil, dass innerjährliche Verschiebungen des Niederschlagsgeschehens stärker berücksichtigt werden, die u. a. nach SPEKAT et al. (2007) und GERSTENGARBE et al. (2006) zu erwarten sind. Die Erosivitätsfaktoren wurden sowohl für die 552 Nachbarstationen der Referenzstationen als auch die 100 ausgewählten Stützstationen ermittelt (Abbildung 24). Die Zuordnung der Erosivitätsfaktoren zu den Referenzstationen erfolgte abschließend unter Berücksichtigung der Entfernung der WETTREG-Stationen nach dem in Abbildung 23 dargestellten Schema.

### *Ermittlung der bundesweiten Niederschlagsverteilung aus WETTREG-Daten*

Ausgehend von den Erosivitätsfaktoren ist eine Anpassung bzw. Neubestimmung der Regressionsgleichungen für den Kontrolllauf und die Szenarienzeiträume erforderlich. Deren Anwendung erfordert die Bereitstellung flächendeckender Niederschlagsdaten auf Jahres- und Halbjahresbasis. Während für den Ist-Zustand das Niederschlagsraster des DWD bereitgestellt wurde (Kap. 2.3.1), ist für die WETTREG-Szenarien die Berechnung eines Niederschlagsrasters aus den Stationsdaten erforderlich. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Interpolationsmethode ohne Berücksichtigung der Höhenregression angewendet. Die Erzeugung der Flächendaten erfolgt mittels *Ordinary Kriging*, bei dem der Schätzwert mithilfe der gewichteten, linearen Kombination aus den benachbarten Messwerten nach der folgenden Formel ermittelt wird (DE SMITH et al. 2007):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{Gl. 19})$$

$Z(x_0)$  ... Schätzwert der Variablen  $Z$  am unbeprobten Ort  $x_0$ ;  $Z(x_i)$  ... Wert der Variablen  $Z$  am Messpunkt  $x_i$ ;  $\lambda_i$  ... Gewicht für den Wert der Variablen  $Z$  am Messpunkt  $x_i$ ;  $n$  ... Anzahl der Messpunkte

Die räumliche Interpolation wurde für die langjährigen Jahres- und Sommerniederschläge des Kontrolllaufes und der drei Szenarienzeiträume vorgenommen. Als Stationsdaten wurden die aus dem IDP-Tool generierten Niederschlagswerte aller verfügbaren (1.959) Stationen des WETTREG-Modells verwendet. Die Rastergröße orientiert sich mit einer Auflösung von 1 x 1 km an der Weite des DWD-Niederschlagsrasters (Tabelle 1).

Neben der Schaffung einer Regionalisierungsgrundlage für die R-Faktoren dienen die Rasterkarten der Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Niederschlagsentwicklung für das Jahr und das Sommerhalbjahr.



### *Erstbestimmung von Regressionsgleichungen und R-Faktoren für den Kontrolllauf*

Die für die 191 Referenzstationen erarbeitete Regressionsgleichung für die Bestimmung der R-Faktoren des Ist-Zustandes (Kap. 2.3.1; Gl. 9, 10) gilt es für den Kontrolllauf anzupassen, um das Auftreten von Fehlern, die aufgrund der Abweichungen zwischen WETTREG-Kontrolllauf und beobachtetem Niederschlagsmuster (vgl. Kap. 2.4.1) zu erwarten wären, zu vermeiden. Eigene Erfahrungen aus vorliegenden Projektergebnissen bestätigen die Notwendigkeit einer solchen Anpassung (WURBS & KÖNIG 2009). Die Anpassung der Regressionsgleichung wurde durch eine Regressionsanalyse zwischen den realen R-Faktoren der 191 Referenzstationen und den Jahresniederschlagssummen der zugeordneten WETTREG-Stationen für den Kontrolllauf 1971-2000 vorgenommen.

In Abhängigkeit von der Verwendung der Jahres- bzw. Sommerniederschläge ergeben sich für den Kontrolllauf die in Tabelle 19 aufgeführten Gleichungen und Gütemaße. Bei Anwendung der Gleichung für die Jahresniederschläge lassen sich für den Kontrolllauf R-Faktoren bestimmen, die in geringem Maße niedriger als die R-Faktoren des Ist-Zustandes liegen. Diese Differenzen resultieren aus der im Mittel leichten Überschätzung der beobachteten Niederschlagswerte durch das WETTREG-Modell (vgl. Tabelle 14). Mithilfe der angepassten Gleichung können diese Abweichungen berücksichtigt und die R-Faktoren entsprechend korrigiert werden. Grundsätzlich ergeben sich aus der Anpassung der Regressionsgleichung für den Kontrolllauf nur geringfügige Veränderungen bei den statistischen Gütemaßen.

Bezugszeitraum	Gleichung	r	r <sup>2</sup>	p
Ist – Jahr	$R_{\text{Jahr}} = 0,0785 \times N_{\text{Jahr}} + 0,94$	0,76	0,58	< 0,001
Kontrolllauf - Jahr	$R_{\text{Jahr}} = 0,0750 \times N_{\text{Jahr}} + 0,54$	0,76	0,58	< 0,001
Ist – Sommer	$R_{\text{Jahr}} = 0,1655 \times N_{\text{So}} - 11,48$	0,80	0,64	< 0,001
Kontrolllauf - Sommer	$R_{\text{Jahr}} = 0,1620 \times N_{\text{So}} - 8,96$	0,79	0,62	< 0,001
$R_{\text{Jahr}}$ ... Jahres-R-Faktor; $N_{\text{Jahr}}$ ... Jahresniederschlagssumme [mm]; $N_{\text{So}}$ ... Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres [mm]; r ... Korrelationskoeffizient; r <sup>2</sup> ... Bestimmtheitsmaß; p ... Irrtumswahrscheinlichkeit				

Tabelle 19: Regressionsgleichungen und Gütemaße für den WETTREG-Kontrolllauf

Im Anschluss erfolgte die stationsbezogene Anwendung der Regressionsgleichungen des Kontrolllaufes (Tabelle 18) auf die Niederschlagswerte ( $N_{\text{Jahr}}$ ;  $N_{\text{So}}$ ) der 191 Referenz- und 100 Stützstationen und die Bestimmung der R-Faktoren (n=291). Diese bilden die Basis für die Szenarienanalysen, bei denen die Wichtung der R-Faktoren für die Szenarienzeiträume anhand der Erosivitätsfaktoren erfolgt. Dieser Zwischenschritt ist erforderlich, um eine einheitliche Datenbasis für die Referenz- und Stützstationen zu erhalten, da für diese keine gemessenen R-Faktoren vorliegen. Durch die Neuberech-



nung der R-Faktoren der Referenzstationen ergibt sich als Folge der Anpassung ein Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 1,0$  (Tabelle 20).

Die Erstbestimmung der Regressionsbeziehungen für die Szenarienzeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden gemäß Gleichung (18) die stationsbezogenen Erosivitätsfaktoren (Gl. 20) des jeweiligen Szenarienzeitraumes auf die R-Faktoren der WETTREG-Referenzstationen und Stützstationen aufgeprägt und daraus gewichtete R-Faktoren abgeleitet.

$$R_{Sz\_1} = R_{Rf} \times E_{N, So} \quad (Gl. 20)$$

$E_N$  ... Erosivitätsfaktor des erosiven Jahres- bzw. Sommerniederschlages;  $R_{Sz\_1}$  ... Langjähriger R-Faktor des Jahres eines Szenarienzeitraumes (Erstbestimmung);  $R_{Rf}$  ... Langjähriger R-Faktor des Jahres des Referenzzeitraumes (Kontrolllauf)

Die Neubestimmung der Regressionsgleichungen für die Szenarienzeiträume wurde durch eine Regressionsanalyse zwischen den gewichteten R-Faktoren und den Sommer- bzw. Jahresniederschlagssummen der 291 WETTREG-Stationen für jeden Szenarienzeitraum vorgenommen. Im Rahmen der Erstbestimmung der R-Faktoren wurden die in Tabelle 20 aufgeführten Gleichungen bestimmt. Da die R-Faktoren des Kontrolllaufes mithilfe der angepassten Regressionsgleichung für alle Stationen neu berechnet wurden, liegt das Bestimmtheitsmaß des Referenzzeitraumes bei 1,0. Aus den mittels Erosivitätsfaktoren gewichteten R-Faktoren ergibt sich für die Szenarienzeiträume 2011-2040 und 2041-2070 zunächst nur eine geringe Verringerung der Güte des statistischen Zusammenhanges. Für die letzte Periode 2071-2100 nimmt  $r^2$  hingegen deutlich ab, sodass für diesen Zeitraum von einer zunehmenden Unsicherheit der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

Bezugszeitraum	Gleichung	r	r <sup>2</sup>
Kontrolllauf - Jahr	$R_{Jahr\_1} = 0,0750 \times N_{Jahr} + 0,54$	1,00	1,00
2011-2040 – Jahr	$R_{Jahr\_1} = 0,0646 \times N_{Jahr} + 6,81$	0,94	0,88
2041-2070 – Jahr	$R_{Jahr\_1} = 0,0721 \times N_{Jahr} + 1,26$	0,93	0,87
2071-2100 – Jahr	$R_{Jahr\_1} = 0,0741 \times N_{Jahr} + 5,02$	0,82	0,68
Kontrolllauf - Sommer	$R_{Jahr\_1} = 0,1620 \times N_{So} - 8,96$	1,00	1,00
2011-2040 – Sommer	$R_{Jahr\_1} = 0,1532 \times N_{So} - 5,71$	0,95	0,91
2041-2070 – Sommer	$R_{Jahr\_1} = 0,1716 \times N_{So} - 5,55$	0,95	0,90
2071-2100 – Sommer	$R_{Jahr\_1} = 0,1697 \times N_{So} - 4,61$	0,82	0,68
$R_{Jahr\_1}$ ... Jahres-R-Faktor (Erstbestimmung); $N_{Jahr}$ ... Jahresniederschlagssumme [mm]; $N_{So}$ ... Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres [mm]; r ... Korrelationskoeffizient; r <sup>2</sup> ... Bestimmtheitsmaß			

Tabelle 20: Regressionsgleichungen zur Bestimmung des R-Faktors und Gütemaße für die WETTREG-Szenarienzeiträume (Erstbestimmung)



Die Regressionsgleichungen wurden auf die erarbeiteten Niederschlagsrasterkarten des WETTREG-Modells angewendet und für alle Perioden die bundesweite R-Faktoren-Verteilung ermittelt.

### *Anwendung eines Regressionsansatzes zur verbesserten Regionalisierung der R-Faktoren*

Die Aussageschärfe der Regressionsgleichungen ist vor allem in Regionen als überdurchschnittlich zu bewerten, aus denen beobachtete R-Faktoren in die Gleichungen eingeflossen sind. Diesbezüglich sind vor allem Teile Ost- und Südwestdeutschlands unterrepräsentiert (Abbildung 24). Die zusätzliche Einbindung der 100 Stützstationen verbessert die regionale Aussage der Regressionsgleichungen, dennoch kann es zu regional unterschiedlich ausgeprägten Über- oder Unterschätzungen der R-Faktoren durch die aufgestellten Regressionsgleichungen kommen, da nicht die Gesamtheit aller WETTREG-Stationen in die Starkregenanalyse einbezogen werden konnte. Durch die Anwendung eines Regressionsansatzes können die genannten Über- oder Unterschätzungen der R-Faktoren vermindert werden. Die Methode orientiert sich an der Vorgehensweise des DWD zur Bestimmung der räumlichen Niederschlagsverteilung mittels Höhenregression. Bei dieser wird zur besseren Darstellung der Niederschlagsverteilung zwischen vorhandenen Klimastationen die Höhenabhängigkeit des Niederschlages durch einen Regressionsansatz eingebunden.

Der Regressionsansatz wird in folgenden Schritten umgesetzt:

- Stationsweise Berechnung von  $R_{Jahr\_1}$  und Regionalisierung der R-Faktoren (Erstbestimmung)
  - Der Arbeitsschritt umfasst die oben dokumentierte Vorgehensweise zur Erstbestimmung der R-Faktoren
- Ableitung des stationsbezogenen Schätzwertes des R-Faktors (Regression)
  - Die für 291 Stationen bestimmten *R-Faktoren* weisen einen engen statistischen Zusammenhang zu den *Starkniederschlagssummen* auf, die anhand des 98-Perzentils bestimmt wurden. Mittels linearer Regression wurde für jeden Szenarienzeitraum aus beiden Parametern eine Regressionsgleichung ermittelt, welche die Abhängigkeit der gewichteten R-Faktoren vom Starkregenparameter kennzeichnet. Aus dieser Gleichung erfolgt die Bestimmung eines Schätzwertes des R-Faktors ( $R_{Jahr\_Schaetz}$ ) für jede Station.
- Ermittlung des Residuums und Regionalisierung
  - Residuen beschreiben die Differenz zwischen berechnetem ( $R_{Sz\_1}$ ) und geschätztem R-Faktor ( $R_{Jahr\_Schaetz}$ ). Für alle Stationen und Zeiträume wurden die Residuen nach Gleichung 21 bestimmt und mittels Kriging-Interpolationsmethode bundesweit regionalisiert.



$$Res = (R_{Sz\_1}) - (R_{Jahr\_Schaetz}) \quad (Gl. 21)$$

Res ... Residuum;  $R_{Sz\_1}$  ... Berechneter Jahres-R-Faktor (Erstbestimmung);  $R_{Jahr\_Schaetz}$  ... Geschätzter Jahres-R-Faktor

- Wichtung und Regionalisierung der berechneten R-Faktoren ( $R_{Jahr\_1}$ ) durch Residuen
  - Abschließend erfolgt die Verrechnung der mittels Regressionsgleichung bestimmten und regionalisierten R-Faktoren ( $R_{Jahr\_1}$ ) mit den Residuen nach Gleichung 22 zur bundesweiten Berechnung der R-Faktoren.

$$R_{Jahr\_Regr} = (R_{Jahr\_1}) - Res \quad (Gl. 22)$$

$R_{Jahr\_Regr}$  ... Mittels Regression bestimmter Jahres-R-Faktor; Res ... Residuum;  $R_{Jahr\_1}$  ... Berechneter Jahres-R-Faktor (Erstbestimmung);

- Erarbeitung von R-Faktoren-Karten
  - Darstellung der R-Faktoren der Szenarienzeiträume und der Veränderungen gegenüber Kontrolllauf

Abbildung 27 zeigt am Beispiel des Landes Sachsen-Anhalt die Unterschiede zwischen den standardmäßig ermittelten R-Faktoren ( $R_{Jahr\_1}$ ) und den mittels Regressionsansatz bestimmten und durch die Residuen gewichteten R-Faktoren ( $R_{Jahr\_Regr}$ ) des Kontrolllaufes. Ergänzend gegenübergestellt ist die räumliche Verteilung der Residuen. Die im Rahmen der Erstbestimmung regionalisierten R-Faktoren (Abb. 25, oben links) wurden mit den Residuen verrechnet und eine R-Faktoren-Karte erstellt, welche die tatsächliche Verteilung der Starkregensummen stärker berücksichtigt, wodurch sich die aus den Szenarien abzuleitenden regionalen Entwicklungen besser wiedergeben lassen. Bei den Residuen deuten negative Werte auf eine Unterschätzung der R-Faktoren durch die Regressionsgleichung hin, positive Werte auf eine Überschätzung.

Die oben dokumentierte Vorgehensweise wurde sowohl für den Modellkontrolllauf als auch die Szenarienzeiträume angewendet. Die bundesweite Regionalisierung der R-Faktoren erfolgte zunächst unter Verwendung der Jahres- und Sommerniederschlagssummen.

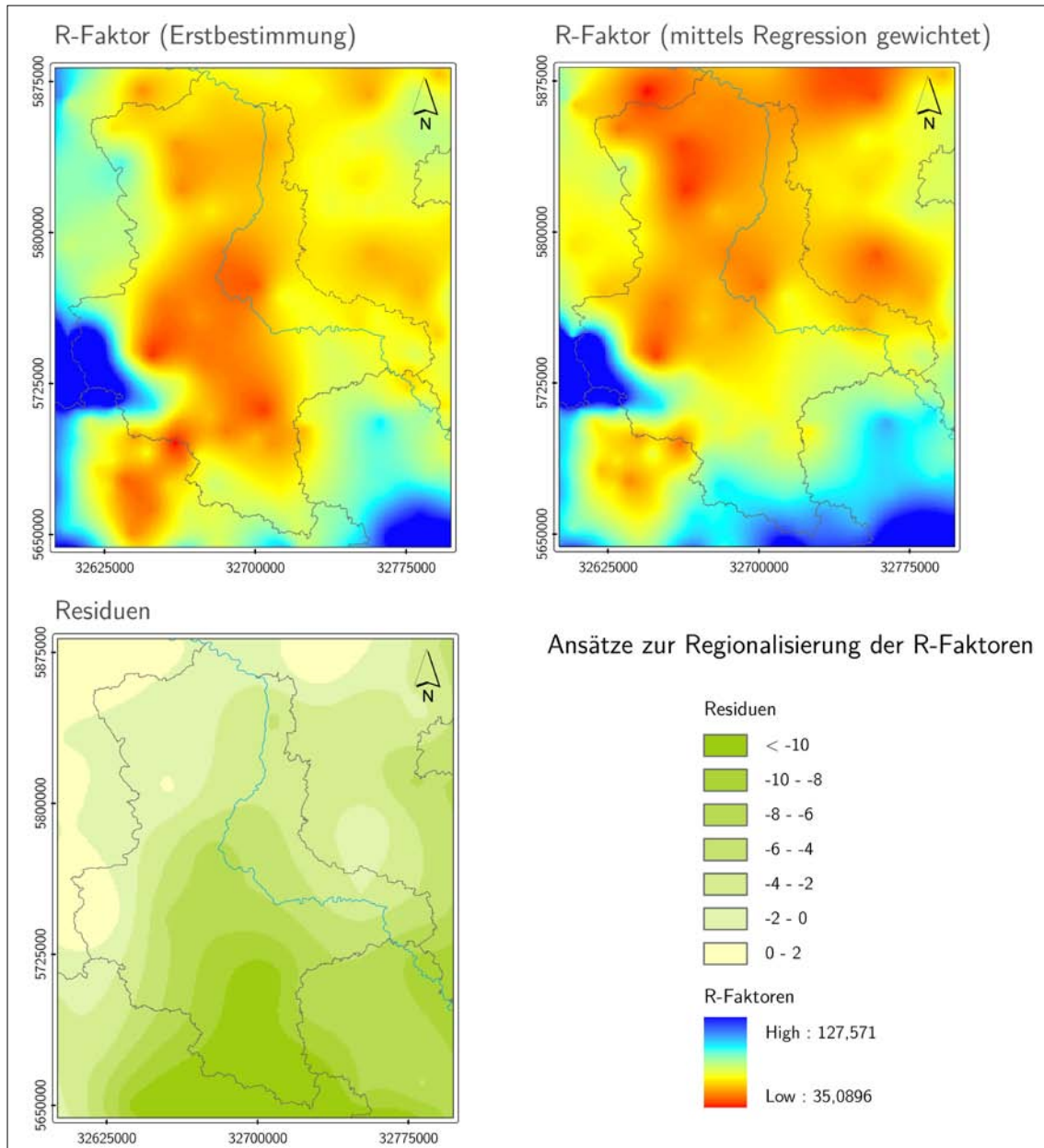


Abbildung 27: Vergleichende Darstellung der Ansätze zur Regionalisierung der R-Faktoren

Den Szenarienanalysen (Kap. 4) vorgehend, zeigen die WETTREG-Ergebnisse einen Trend in Richtung Abnahme der Sommerniederschläge (vgl. auch Tabelle 17). Gleichzeitig ist eine Tendenz zu einer Erhöhung der winterlichen Starkregensummen erkennbar. Um die innerjährliche Verschiebung des Anteils stärkerer Ereignisse zu berücksichtigen, wurde für die später vorzunehmende Ergebnisauswertung und –interpretation (Kapitel 4) der methodische Ansatz auf **Basis der Jahresniederschläge bevorzugt**. Insbesondere in Regionen mit überdurchschnittlich starken Abnahmen der sommerlichen Niederschläge wäre ansonsten eine deutliche Unterschätzung der R-Faktoren zu erwarten.





### 2.4.3 Szenarienanalysen zur Neubestimmung der C-Faktoren

#### *Beschreibung des Szenarienansatzes*

Ein wichtiger Parameter für das Pflanzenwachstum ist die Temperatursumme, die zum Erreichen einer Wachstumsphase benötigt wird. JANSSEN (2009) weist im Zusammenhang mit der Modellierung der Phänophasen, insbesondere des Beginns und Endes der Vegetationsperiode, auf folgende Grundsätze hin:

- Die Pflanzen kennen keinen Kalender, sondern nur das vergangene Wettergeschehen, welches bereits gewirkt hat. Von dem zukünftigen Wetter kennt die Pflanze nichts.
- Hat die Pflanze ein bestimmtes Stadium erreicht, so ist dieses nicht mehr rückgängig zu machen, eine weitere Entwicklung kann lediglich durch ungünstiges Wetter unterbrochen werden.
- Bei Temperaturen unter 0° C ist der Boden gefroren und es findet kein Wachstum statt.

Die Temperatursumme als Kriterium für die Ausgrenzung von Wachstumsphasen/ Kulturperioden wird im Zusammenhang mit der Auswirkung der prognostizierten Klimaänderung auf die Landwirtschaft sowie in Wachstumsmodellen verbreitet angewendet (STREITFERT & GRÜNHAGE 2009; RIPPEL 2007; RIPPEL & STUMPF 2008). Aufgrund der zu erwartenden Temperaturzunahme gehen die Autoren von einer Verschiebung der Vegetationszyklen aus, die sich insbesondere in einer Verfrühung des Beginns der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode (=Blühbeginn der Salweide) sowie in einer Hinauszögerung des Vegetationsendes manifestieren. RIPPEL (2007) nimmt für Bayern an, dass die landwirtschaftliche Vegetationsperiode im Jahr 2050 im Frühjahr 7 Tage früher beginnt und im Herbst 7 Tage später endet als im Jahr 2000, die Vegetationsperiode sich dementsprechend um 14 Tage verlängert. STREITFERT & GRÜNHAGE (2009) führen in ihrer Arbeit an, dass sich bereits für den Zeitraum 1991 bis 2007 eine Verlängerung der Vegetationsperiode gegenüber dem Zeitraum 1961 bis 1990 nachweisen lässt. Diese Verlängerung basiert größtenteils auf dem früheren Beginn der Vegetationsperiode. Das Ende verschiebt sich dahingegen nur geringfügig. Dieser Trend lässt sich den Modellergebnissen zufolge für Hessen auch bis Mitte des Jahrhunderts fortschreiben. Demzufolge ist für den Prognosezeitraum bis 2070 von einer weiteren Verlängerung der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode um ca. 2 Wochen auszugehen. Diese Verlängerung ist hauptsächlich auf eine weitere Verfrühung des Beginns der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode und nicht auf deren verzögertes Ende zurückzuführen. Die Verlängerung der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode hat erheblichen Einfluss auf die landwirtschaftlichen Produktionsabläufe und somit auf den C-Faktor. Es ist abzusehen, dass die Aussaat der Sommerungen temperaturbedingt früher erfolgt und

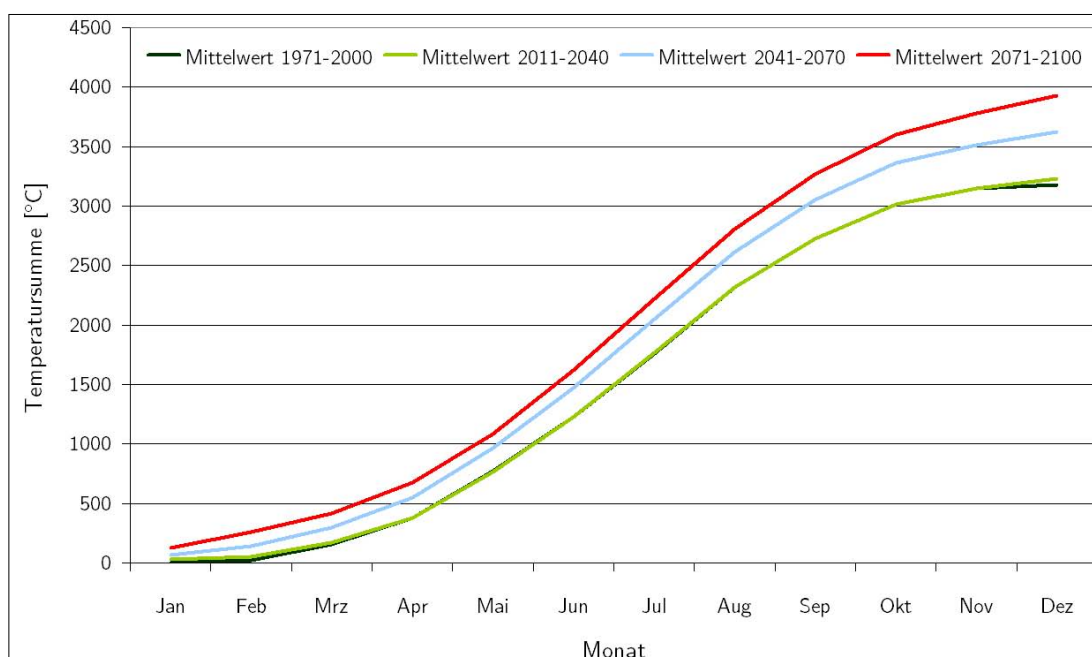


sich die Aussaat der Winterungen nach hinten verschiebt. Letzteres ist der Tatsache geschuldet, dass einerseits von einer zunehmenden Sommertrockenheit auszugehen ist und andererseits die Winterungen aus wachstumsphysiologischen Gründen und zur Vermeidung von Winterschäden nur mit einer bestimmten Entwicklungsphase in die Winterruhe eintreten sollten. Bedingt hierdurch sowie durch eine allgemeine Verkürzung der Wachstumsperiode durch höhere Temperaturen und damit einhergehend mit einer früheren Ernte werden sich die Sommerzwischenbrachen verlängern.

Die in den Arbeiten von RIPPEL (2007) sowie STREITFERT & GRÜNHAGE (2009) auf Ebene des jeweiligen Bundeslandes ermittelte Veränderung des Temperaturgeschehens zeigt sich auch auf Ebene einer deutschlandweiten Betrachtung. In Abbildung 28 sind die kumulativen Temperatursummen des WETTREG-Modells für den Vergleichszeitraum (1971 bis 2000) sowie die Prognosezeiträume 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100 als Mittelwerte für Deutschland dargestellt.

Abbildung 28: Jahreszeitlicher Verlauf der mittleren Temperatursummen für Deutschland der Szenarienzeiträume in Bezug zum Kontrolllauf (1971 bis 2000) des WETTREG-Modells

Aus Abbildung 28 wird deutlich, dass im ersten Prognosezeitraum (2011 bis 2040) der



jahreszeitliche Verlauf der kumulierten Temperatursummen mit dem Verlauf der Vergleichsperiode weitestgehend deckungsgleich ist. Lediglich in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember bis Februar) sind geringfügige Erhöhungen festzustellen. In den Frühjahr-, Sommer und Herbstperioden gibt es keine Veränderungen. Anders die Situation im zweiten (2041 bis 2070) und insbesondere dritten Szenarienzeitraum (2071 bis 2100). Hier zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Jahrestemperatursumme sowohl gegenüber der Vergleichsperiode als auch dem ersten Prognosezeitraum. Diese beruht auf deutlich höheren Temperaturen in den Herbst- und Wintermonaten sowie



zu Beginn des Frühjahres. Wie im ersten Prognosezeitraum fällt die Temperaturerhöhung in den Sommermonaten gegenüber dem Vergleichszeitraum nur gering aus. Ausgehend von den dargelegten Modellergebnissen, den daraus folgenden Überlegungen sowie der prognostizierten Temperaturentwicklung ist für die Prognosezeiträume (2011 bis 2040, 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100) von einer Veränderung der Dauer der Kulturperioden für die landwirtschaftlichen Kulturen gegenüber den derzeitigen Verhältnissen auszugehen.

Zusammenfassend sind für die Kulturperioden die in Tabelle 21 aufgeführten Veränderungen zu erwarten.

Nr.	Periode	Auswirkungen des Klimawandels
1	Bodenbearbeitung (BB) bis Saatbeet (SB)	<p><i>Sommerungen:</i> Verfrühung der Aussaattermine; Termin Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte; da die Wintermonate ein gleichbleibendes bis leicht höheres Niederschlagsaufkommen aufweisen sollen, Bodenbearbeitung wahrscheinlich im Herbst</p> <p><i>Winterungen:</i> Gleichbleibender Termin bis leichte Verzögerung der Aussaat - spätere Bodenbearbeitung</p>
2	SB bis 10 % Bodenbedeckung	Die Dauer dieser Perioden ist sehr kurz. Es ist eine weitere Verkürzung zu erwarten. Die Auswirkung der wärmeren Wintermonate auf die Wachstumsprozesse lässt sich nur sehr schwer abschätzen.
3	10 % bis 50 %	
4	50 % bis 75 %	
5	75 % bis Ernte	Aufgrund der veränderten Aussaat und der Verkürzung der Wachstumsphasen ist von früheren Ernteterminen auszugehen.
6	Ernte bis BB	Aus den Perioden Nr. 1 und Nr. 6 lässt sich eine Verlängerung dieser Phase ableiten.

Tabelle 21: Auswirkungen des Klimawandels auf die Kulturperioden landwirtschaftlicher Kulturen zur Ableitung des C-Faktors (Kulturperioden nach SCHWERTMANN et al 1990)

Neben einer temperaturbedingten Verschiebung der Kulturperioden gilt der Niederschlag als zweite klimatische Einflussgröße auf die C-Faktoren, da es zu einer Verschiebung der innerjährlichen Starkregenverteilung und somit einer Veränderung der monatlichen R-Faktoren-Anteile kommen kann. Beide Einflussfaktoren werden im Rahmen von Szenarienanalysen gemeinsam betrachtet.

Zusätzlich zu den klimatisch bedingten Veränderungen beim C-Faktor ist abzusehen, dass es auch bezüglich der Bodenbearbeitungstechnologie (verstärkter Einsatz wassersparender Produktionsverfahren, Mulchsaat, Direktsaat) sowie im Anbauspektrum zu Veränderungen kommen wird.



Die dargelegten Auswirkungen des Klimawandels auf Starkregenverlauf und Pflanzenentwicklung werden durch drei Szenarien abgebildet, die auf einer kulturartenbezogenen Neuberechnung der C-Faktoren für die einzelnen Prognosezeiträume basieren. Diese Neuberechnungen werden neben den veränderten Kulturperioden insbesondere aufgrund des sich in den Prognosezeiträumen ändernden Verlaufs der R-Faktorenanteile notwendig.

Die Festlegung der Szenarien beruht auf folgenden Festlegungen:

- Ein Vergleich mit der Ist-Situation muss gewährleistet sein.
- Die Tendenzen bei der Bodenbearbeitung müssen berücksichtigt werden.
- Die grundlegende Anbaustruktur der Hauptfruchtarten bleibt unverändert.

Auf Grundlage dieser Festlegungen wurden drei Szenarien entwickelt, welche die veränderte Bodenbedeckung durch die landwirtschaftliche Nutzung in den Szenarienzeiträumen abbilden.

### Szenarium 1:

- Anteile der Bodenbearbeitung ‚konventionell‘ bzw. ‚konservierend‘ bleibt konstant zur IST-Situation (vgl. Kap. 2.3.3).
- Fruchtartenspektrum und Flächenanteile bleiben konstant zur IST-Situation (vgl. Kap. 2.3.3).
- **Phänophasen und technologische Termine verschieben sich entsprechend den sich verändernden Temperatursummen in den landwirtschaftlichen Vegetationsperioden. Zusätzlich kommt es zu einer Verschiebung der monatlichen R-Faktoren-Anteile.**

Szenarium 1 spiegelt die klimabedingte Veränderung des C-Faktors der Naturraumeinheiten (Temperatur, Niederschlag) im Vergleich zur Ist-Situation wider.

### Szenarium 2:

- **Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung steigt von gegenwärtig 25 bis 50 % Flächenanteil in den Bundesländern auf 50 bis 75 %.**
- Fruchtartenspektrum und Flächenanteile bleiben konstant zur IST-Situation (vgl. Kap. 2.3.3).
- **Phänophasen, technologische Termine sowie R-Faktoren-Anteile entsprechend Szenarium 1.**

Das Szenarium 2 bildet die Veränderung des C-Faktors in den Naturraumeinheiten aufgrund der zu erwartenden Verschiebung in der Bodenbearbeitung ab. Werden gegen-



wärtig ca. 25 bis 50 % der Ackerfläche konservierend bearbeitet, ist für die Zukunft mit einem weiteren Anstieg zu rechnen. Der Anstieg liegt in der erhöhten Wasser- und Energie-/Kosteneffizienz dieses Bodenbearbeitungssystems begründet. Des Weiteren ist abzusehen, dass in Deutschland auch die Flächenanteile der Direktsaatverfahren zunehmen werden. Da dieser Trend jedoch nur sehr schwer quantitativ abzubilden ist, wurde dieses Bearbeitungssystem nicht berücksichtigt.

### Szenarium 3:

- **Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung gemäß Szenarium 2.**
- **Fruchtartenspektrum und Flächenanteile ändern sich wie folgt: Da der Bedarf an Produktionsfläche steigt, reduziert sich der Anteil der Stilllegungsflächen auf 0 % zugunsten nachwachsender Rohstoffe.**
- **Phänophasen, technologische Termine sowie R-Faktoren-Anteile entsprechend Szenarium 1.**

In Szenarium 3 wird der Einfluss sich ändernder Anbauspektren auf den C-Faktor untersucht. Zugrunde gelegt wird die Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und deren Umwidmung in Anbauflächen für Energiepflanzen. Zum Ansatz kommt eine Nutzung der Fläche von 50 % Winterraps und 50 % Mais. Die Annahme stellt bezüglich des Flächenumfangs und hinsichtlich der Auswirkung auf die Bodendeckung einen Eingriff in das bestehende System dar. Da in Zukunft mit einem verstärkten Anbau von Energiepflanzen zu rechnen ist, zeigt dieses Szenarium den Trend dieser Systeme hinsichtlich der Bodenerosionsgefährdung vor dem Hintergrund des Klimawandels auf.

### *Neubestimmung der Kulturperioden*

Grundlage für die Berechnung der C-Faktoren-Szenarien bildet die Ermittlung der Dauer der Kulturperioden (vgl. Tabelle 21) in den Prognosezeiträumen im Vergleich zum Ist-Zeitraum. In Anlehnung an STREITFERT & GRÜNHAGE (2009) sowie JANSSEN (2009) wurde der Temperatursummenansatz nach Gleichung (23) gewählt.

$$T_{Sum} = \sum_{D\_Start} (T_m - T_B) \quad (Gl. 23)$$

$T_{Sum}$  ... Temperatursumme;  $D_{Start}$  ... Starttag;  $T_m$  ... Tagesmitteltemperatur;  $T_B$  ... Bezugstemperatur

Der Temperatursummenansatz geht davon aus, dass jede Pflanze zum Erreichen einer Wachstumsphase eine bestimmte Temperatursumme benötigt. Bei Temperaturen  $< 0$  °C findet kein Wachstum statt. Die Temperatursumme wird aus der Aufsummierung der mittleren Tagestemperatur über einem gewählten/definierten Schwellenwert innerhalb des zu betrachteten Zeitabschnittes gebildet.

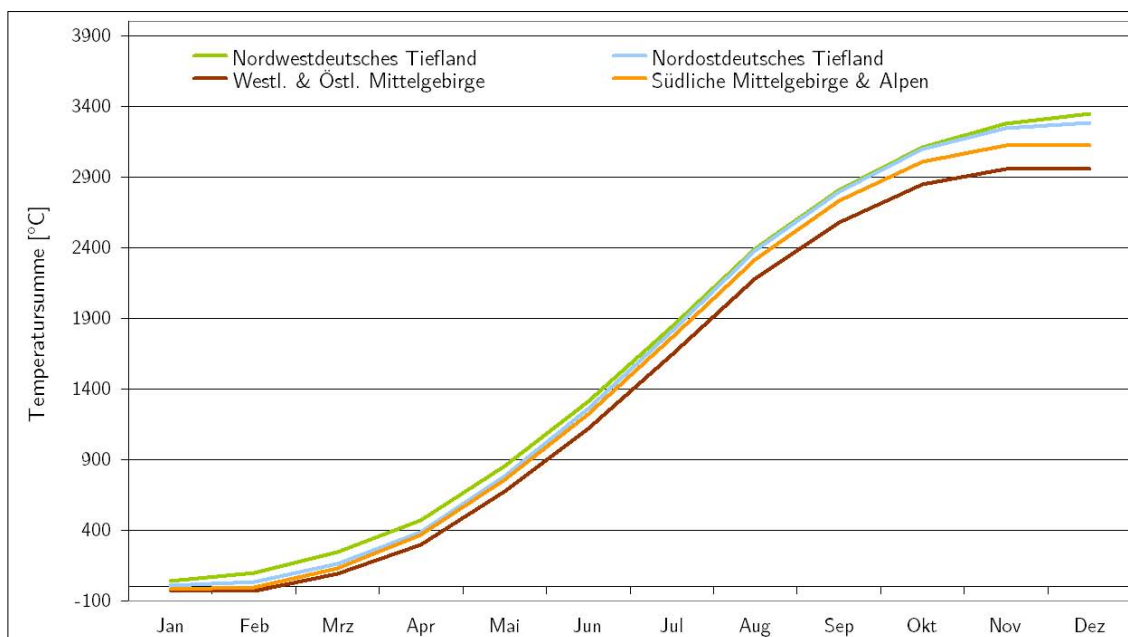


Die Bestimmung der Perioden der Prognosezeiträume für die in die C-Faktorenberechnung eingeflossenen landwirtschaftlichen Kulturen erfolgte in zwei Schritten:

1. Berechnung der kulturartenspezifischen Temperatursummen zum Erreichen der Kulturperioden für den Ist-Zeitraum
2. Berechnung des Beginns sowie Endes der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode und Übertragung der Temperatursummen aus 1.) auf die Prognosezeiträume; anschließend Neuberechnung der kulturartenspezifischen C-Faktoren unter Einbeziehung des jeweiligen Verlaufs der R-Faktoren

Innerhalb von Deutschland sind beim jährlichen Temperaturverlauf und den daraus resultierenden Temperatursummen starke räumliche Abweichungen zu beobachten. Auf Ebene der für die R-Faktorenauswertung gebildeten naturräumlichen R-Einheiten (siehe hierzu Kapitel 2.3.3) ist der mittlere jährliche Verlauf der Temperatursummen für den Zeitraum 1971 bis 2000 (Kontrolllauf) in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29: Verlauf der mittleren jährlichen Temperatursummen innerhalb der Bewertungseinheiten im Zeitraum 1971 bis 2000



Im Nordwestdeutschen Tiefland treten im Mittel der Jahre auch in den Wintermonaten keine negativen Monatstemperatursummen auf. Aufgrund dieser höheren „Startwerte“ liegt die Verlaufskurve in allen Jahreszeiten über denen der anderen naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten. Der Mittelgebirgsraum weist erwartungsgemäß das niedrigste Temperaturniveau auf, das Alpenvorland fällt erst in den Herbstmonaten unter das Niveau der Tieflandstandorte.



Die unterschiedlichen Temperaturverläufe erfordern eine differenzierte Ermittlung der Temperatursummen für die ausgegrenzten R-Faktoren-Einheiten. Die Berechnung der kulturartenspezifischen Temperatursummen für die Kulturperioden des Ist-Zeitraumes beruht auf der im Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Datenbank zur Berechnung des C-Faktors. Diese Datenbank beruht auf den Beobachtungsdaten des DWD-Messnetzes zur phänologischen Entwicklung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, die mit den Literaturangaben für die Kulturperioden modifiziert wurde.

Für die Szenarienzeiträume wurden im ersten Schritt der Beginn und das Ende der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode berechnet. Diese beiden Zeitpunkte stellen wesentliche Eckdaten für die landwirtschaftlichen Feldarbeiten und somit für die Kulturperioden dar. Nach Auswertung des DWD-Messnetzes schlägt JANSSEN (2009) für die Ermittlung des Beginns der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode eine Temperatursumme ab dem 18.02 von 164 °C vor, wobei nur Tagesmitteltemperaturen oberhalb von 0 °C zu berücksichtigen sind. Das Ende der Vegetation ist erreicht, wenn die Temperatursumme ab dem 2.8. den Wert von -1383 °C unterschritten hat. Bei der Summenbildung werden täglich von der Tagesmitteltemperatur 30 °C subtrahiert.

Auf der Grundlage dieses Ansatzes wurden auf Basis der WETTREG-Daten für die Szenarienzeiträume jeweils der Beginn und das Ende der Vegetationsperiode als Mittelwerte der naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten berechnet. Im nächsten Schritt wurden die Aussaattermine festgelegt und unter Anwendung der Temperatursummen zum Erreichen der Kulturperioden die jeweiligen kulturartenspezifischen Termine und anschließend die C-Faktoren der Kulturarten ermittelt.

### *Neubestimmung der R-Faktoren-Anteile*

Neben einer temperaturbedingten Verschiebung der Kulturperioden beinhalten alle Szenarien die Veränderung der monatlichen R-Faktoren-Anteile. Im ungünstigen Fall treffen Phasen geringerer Bodenbedeckung als Folge einer Verschiebung der Kulturperioden mit Zeiten erhöhter Starkregensummen zusammen.

Für den Ist-Zustand wurden aus den Ergebnissen verschiedener Arbeiten monatlich vorliegende R-Faktoren-Anteile der Stationen gemittelt und bezüglich der Monatstage disaggregiert (Kap. 2.3.3). Hierbei wurde eine Differenzierung für die vier naturräumlichen R-Faktoren-Einheiten vorgenommen (Abbildung 11). Um die Veränderung der R-Faktoren-Anteile in den Szenarienzeiträumen zu ermitteln, erfolgte die Verknüpfung mit den Ergebnissen der Zeitreihenanalyse (Kap. 2.4.2), bei der die monatliche Veränderung des ausgewählten Starkregenparameters (Starkniederschlagssummen) gegenüber dem Kontrolllauf stationsweise bestimmt wurde. Für jede der vier Naturraumeinheiten erfolgte die Berechnung der mittleren relativen Veränderung des Starkregenparameters durch Mittelwertbildung über alle innerhalb der Bezugseinheit gelegenen WETTREG-Stationen. Die Berechnung wurde für jeden Szenarienzeitraum und Monat vorgenommen. Anschließend wurden die relativen Differenzwerte auf die monatlichen



R-Faktoren-Anteile (vgl. Abbildung 12) des Ist-Zustandes aufgeprägt und neue R-Faktoren-Anteile bestimmt. Die für die C-Faktoren-Ermittlung erforderlichen Tageswerte wurden abschließend durch einfache Disaggregation der Monatswerte erarbeitet. Die monatliche Verteilung der R-Faktoren-Anteile der Szenarienzeiträume wird in Kap. 3.1.3 dokumentiert.

### *Erarbeitung von Berechnungsvarianten für die Szenarienanalysen zum C-Faktor*

Die Ableitung der Veränderung der Kulturperioden und R-Faktoren-Anteile (Szenarium ,1') erfolgte über statistische Verfahren aus den WETTREG-Szenarien. Dagegen wurden für Szenarium ,2' (Veränderung des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung) und Szenarium ,3' (Veränderung des Anteils von Stilllegungsflächen) nur Annahmen einer möglichen Entwicklung getroffen. Insofern erfolgte die Bestimmung der C-Faktoren eines jeden Szenarienzeitraumes anhand verschiedener Kombinationsmöglichkeiten, die sich aus den drei C-Faktor-Szenarien ergeben. Wie für den Ist-Zustand erfolgte auch für die Szenarienzeiträume die Berechnung der C-Faktoren für jeden der 502 Naturräume Deutschlands. Einen Überblick über die für den Ist-Zustand und die Szenarienzeiträume betrachteten C-Faktor-Varianten gibt Tabelle 21.

Gemäß Kapitel 3.1.3 wurden für den Ist-Zustand vier Varianten gerechnet. Bei den Szenarienzeiträumen betrachtet Szenarium ,1' zunächst die Veränderung der Kulturperioden und R-Faktoren-Anteile bei 100 % konventioneller Bodenbearbeitung. Bei Szenarium ,2' wird diese Variante um drei Varianten unterschiedlicher Anteile konservierender Bodenbearbeitung ergänzt. Szenarium ,3' umfasst abschließend für alle vier Annahmen der Bodenbearbeitungsvarianten den veränderten Anteil der Stilllegungsflächen. Daraus ergeben sich für jeden Szenarienzeitraum acht unterschiedliche Berechnungsvarianten des C-Faktors (Tabelle 22). Da die Annahmen des Flächenanteils einer konservierenden Bodenbearbeitung von 25 und 75 % nicht für alle Zeiträume gerechnet wurden, wird der Vergleich der Ergebnisse zwischen Szenarien und Ist-Zustand für die in Tabelle 22 grau hinterlegten Berechnungsvarianten (0 %, 50 %, 100 % konservierende Bodenbearbeitung) vorgenommen.

Bodenbearbeitungsverfahren	1971-2000	Szenarienzeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100		
		C-Szenarium ,1'	C-Szenarium ,2'	C-Szenarium ,3'
100 % konventionell	o	o		o
25 % konservierend	o			
50 % konservierend	o		o	o
75 % konservierend			o	o
100 % konservierend	o		o	o

Tabelle 22: Varianten zur Berechnung der C-Faktoren der Szenarienzeiträume





#### 2.4.4 Neuberechnung und Bewertung der Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume

Die Neuberechnung der Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume wurde nach der in Kap. 2.3.5 dokumentierten Methodik durch Anwendung der Modelle *ABAGFlux* und *TerraFlux* vorgenommen. K-, L- und S-Faktor wurden gegenüber dem Ist-Zustand konstant gehalten und modellintern mit den veränderten R- und C-Faktoren verknüpft. Bei der Berechnung der Erosionsgefährdung des Ist-Zustandes wurden unterschiedliche Varianten zur Berechnung des LS-Faktors (Barrierewirkungen) und des R-Faktors (Jahres- bzw. Sommerniederschläge) betrachtet, um die Sensitivität der Ergebnisse in Abhängigkeit von den Eingangsdaten bewerten zu können (Kap. 2.3.5, Tabelle 11). Da bei den Szenarienanalysen die klimabedingte Veränderung der Erosionsgefährdung im Vordergrund steht, erfolgte im Vorfeld der Ergebnisbewertung die Auswahl von einer Basisvariante, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Bei der Berechnung und Bewertung des potenziellen Bodenabtrages wurden die L-Faktoren unter Berücksichtigung von Barrieren, aber ohne Einbindung der Senkenbereiche bestimmt. Für die Regionalisierung der R-Faktoren erfolgte die Verwendung der Regressionsgleichungen auf Basis der Jahresniederschläge (vgl. Kap. 2.4.2). Die Ergebnisse unter Verwendung der Sommerniederschläge werden für die Datenübergabe ergänzend vorgehalten. Demnach entspricht die Basisvariante der Variante 1e (Tabelle 11) zur Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung.

Bei der Berechnung des nutzungsabhängigen Bodenabtrages werden neben der Einbindung der C-Faktoren Grün- und Brachlandbereiche als flächenhafte Barrieren betrachtet. Auch hier erfolgte die Verwendung der Regressionsbeziehungen auf Basis der Jahresniederschläge.

Aus den verschiedenen Annahmen zur Bestimmung der R- und C-Faktoren in den Szenarienzeiträumen ergibt sich eine Vielzahl von Berechnungsvarianten für die potenzielle und nutzungsabhängige Erosionsgefährdung. Einen Überblick über die rasterbasiert vorliegenden Ergebnisse und die für die Naturräume vorgenommenen Aggregationen gibt Tabelle 23. Zusätzlich wurde aufgeführt, welche Ergebnisse hinsichtlich der absoluten und relativen Veränderungen gegenüber dem Referenzzeitraum bewertet wurden. Hierbei ist grundsätzlich zu beachten, dass die Analyse der klimabedingten Entwicklung des Bodenabtrages nur anhand des Vergleiches zwischen Szenarienzeiträumen und dem WETTREG-Kontrolllauf vorgenommen werden kann. Eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse der Klimaszenarien und der vorliegenden Ergebnisse für den Ist-Zustand (basierend auf DWD-Daten; Kap. 2.3) ist nicht zulässig, da dabei die in Kapitel 2.4.1 dokumentierten Fehler des WETTREG-Modells unberücksichtigt bleiben würden.

In Hinblick auf die Kartendarstellung muss angemerkt werden, dass nur eine Auswahl der nachfolgend aufgeführten Ergebnisse innerhalb des vorliegenden Berichtes visualisiert wurde.



Berechnungsvarianten	Rasterkarte		Aggregation Naturräume	
	Betrag	Änderung	Betrag	Änderung
<b>Niederschlag (N)</b>				
$N_{\text{Sommerhalbjahr}} ; N_{\text{Jahr}}$	o	o		
<b>R-Faktor</b>				
$R_{\text{Jahr}}$	o	o	o	o
<b>C-Faktor (C)</b>				
$C_{1971-2000} - 100\% \text{ konvent.}$	o		o	
$C_{1971-2000} - 25\% \text{ konserv.}$	o		o	
$C_{1971-2000} - 50\% \text{ konserv.}$	o		o	
$C_{1971-2000} - 100\% \text{ konserv.}$	o		o	
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 1} - 100\% \text{ konvent.}$	o	o	o	o
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 2} - 50\% \text{ konserv.}$	o	o	o	o
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 2} - 75\% \text{ konserv.}$	o		o	
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 2} - 100\% \text{ konserv.}$	o	o	o	o
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 3} - 100\% \text{ konvent.}$	o	o	o	o
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 3} - 50\% \text{ konserv.}$	o	o	o	o
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 3} - 75\% \text{ konserv.}$	o		o	
$C_{2011-2100} - \text{Szenarium 3} - 100\% \text{ konserv.}$	o	o	o	o
<b>Potenzieller Bodenabtrag</b>				
$R \times K \times S$	o		o	o
$R \times K \times L \times S$	o	o	o	o
<b>Nutzungsabhängiger Bodenabtrag</b>				
$RxKxLxSx C_{1971-2000} - 100\% \text{ konvent.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{1971-2000} - 25\% \text{ konserv.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{1971-2000} - 50\% \text{ konserv.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{1971-2000} - 100\% \text{ konserv.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.1} - 100\% \text{ konvent}$	o	o	o	o
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.2} - 50\% \text{ konserv.}$	o		o	o
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.2} - 75\% \text{ konserv.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.2} - 100\% \text{ konserv.}$	o		o	o
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.3} - 100\% \text{ konvent.}$	o		o	o
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.3} - 50\% \text{ konserv.}$	o		o	o
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.3} - 50\% \text{ konserv.}$	o		o	
$RxKxLxSx C_{2011-2100} - \text{Szen.3} - 100\% \text{ konserv.}$	o		o	o

Tabelle 23: Berechnungsvarianten der Erosionsgefährdung in den Szenarienziträumen



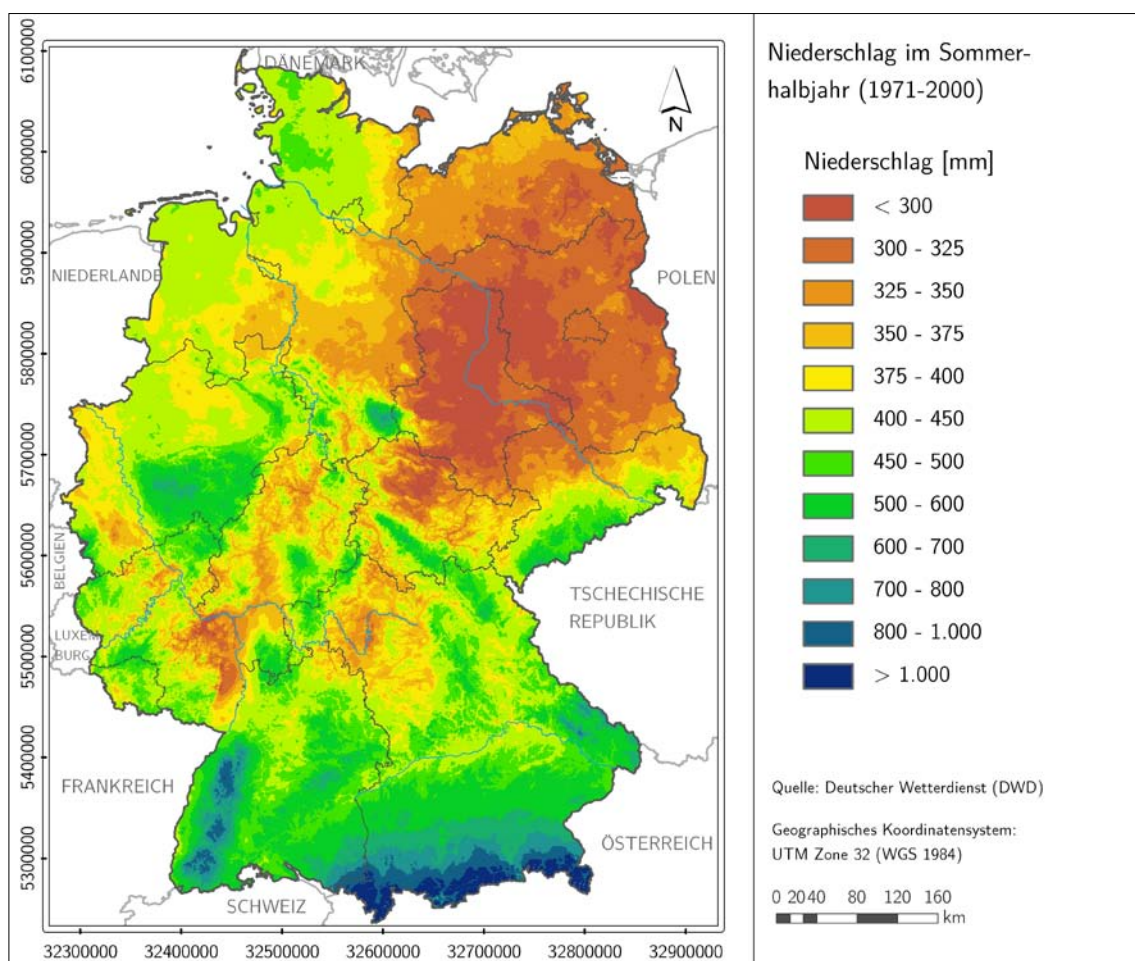
## 3 Bundesweite Darstellung der Erosionsgefährdung für den Zeitraum 1971-2000

### 3.1 Einzelfaktoren der ABAG

#### 3.1.1 Darstellung der R-Faktorenverteilung

Gemäß der in Kapitel 2.3.1 dokumentierten Vorgehensweise wurde für die Bundesrepublik Deutschland der R-Faktor für den Zeitraum 1971-2000 aus dem langjährigen Mittel der Niederschlagssummen bestimmt. Aufgrund des höheren Gütemaßes wurde für die Kartendarstellung auf die Regressionsgleichung unter Verwendung der Sommerniederschläge zurückgegriffen (Abbildung 30).

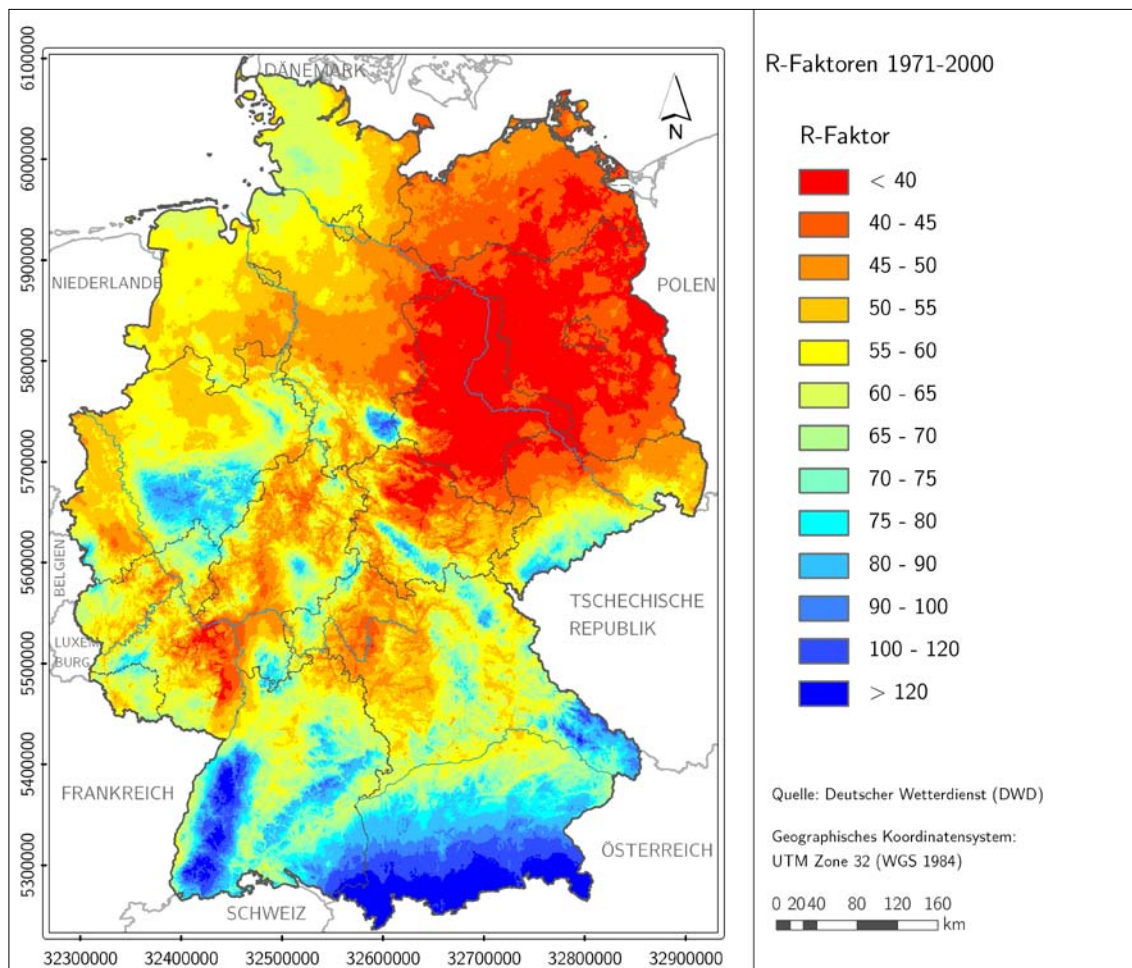
Abbildung 30: Verteilung der Sommerniederschläge (1971-2000)





Begründet durch den Regressionsansatz orientiert sich die R-Verteilung sehr stark an der Niederschlagsverteilung (Abbildung 30). Demzufolge weisen vor allem die agrarisch genutzten Teile Ostdeutschlands, vor allem in Sachsen-Anhalt und Brandenburg, geringe R-Faktoren unter 40 auf (Abbildung 31). R-Faktoren größer 100 treten in den Alpen sowie in den Kammlagen der Mittelgebirge (Harz, Schwarzwald, Bayerischer Wald) auf.

Abbildung 31: R-Faktoren in Deutschland (1971-2000)



Aus Sicht des Bodenschutzes und der Erosionsgefährdung sind trotz der hohen R-Faktoren die Mittelgebirgsräume aufgrund ihres hohen Waldanteils kaum als gefährdet anzusehen, sodass dort nur von einer potenziellen Erosivität der Niederschläge auszugehen ist. Anhand der Ergebnisse wird ebenfalls deutlich, dass bei regionalen Betrachtungen die Verwendung der länderspezifischen Regressionsgleichungen zu bevorzugen ist, da mit diesen die Zusammenhänge zwischen R-Faktor und Niederschlag in den Bundesländern besser abgebildet werden können. So zeigt sich, dass die bundesweit gültige Regressionsgleichung die R-Faktoren bei geringen Niederschlägen tendenziell unterschätzt. Für die hier vorliegende bundesweite Studie ist diese Gleichung allerdings geeignet (vgl. Kap. 2.3.1).



### 3.1.2 Darstellung der K-Faktoren-Verteilung

Die K-Faktoren wurden nutzungsdifferenziert für jede Bodeneinheit der BÜK1000N, in Abhängigkeit von ihrer Lage in einem der vier Klimagebiete bestimmt (vgl. Kap. 2.3.2). Abbildung 32 zeigt die bodenabhängige Erodierbarkeit der Böden in Deutschland vor dem Hintergrund der ausgewiesenen Klimagebiete (Abbildung 6). Die höchsten K-Faktoren zeigen die fruchtbaren und ackerbaulich intensiv genutzten Lössböden Mitteldeutschlands (Harzvorland, Sächsisches Lösshügelland) und der Hildesheimer Börde. Eine hohe Erodibilität weisen zudem die Parabraunerden aus Löss bzw. Sandlöss in der Jülicher Börde (Nordrhein-Westfalen) sowie in der Donau-Ebene auf. Dagegen weisen tendenziell die Böden auf Lockergesteinen, insbesondere in Norddeutschland bzw. auf kalkhaltigen Substraten, die geringste Erodibilität auf. Hier liegen die K-Faktoren unter 0,2. Die Ergebnisse basieren auf der Auswertung der BÜK1000N und dienen der bundesweiten Übersichtsdarstellung. Eine regionale Untersetzung und Differenzierung der Ergebnisse kann auf regionaler Ebene durch die Verwendung von Bodenkarten größerer Maßstabbereiche erreicht werden. Eine Zusammenfassung der den Bodeneinheiten, in Abhängigkeit von Hauptnutzung und Klimagebiet zugewiesenen K-Faktoren gibt Anhang 3.

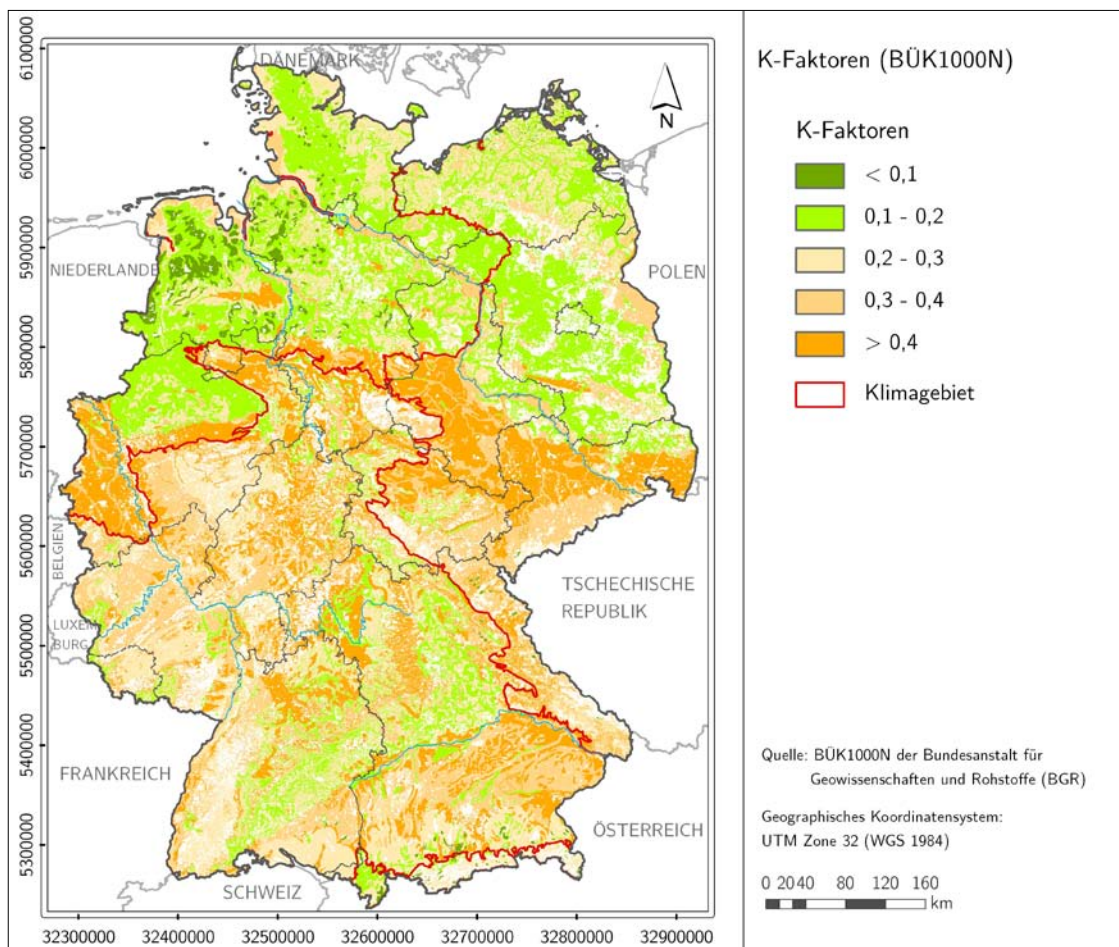


Abbildung 32: K-Faktoren in Deutschland (BÜK1000N)



### 3.1.3 C-Faktoren der Naturräume in Deutschland

#### *Statistische Daten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung*

Die Ergebnisse zur Fruchtartenverteilung auf Ebene der Naturräume basieren, wie in Kapitel 2.3.3 dargelegt, auf den Agrarstrukturerhebungen der Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder aus dem Jahre 2007. Aus Gründen der Anonymisierung wurden diese Daten jeweils für den entsprechenden Naturraum zusammengefasst.

Das Bundesamt für Naturschutz weist für Deutschland 502 Naturraumeinheiten aus. Die Flächengrößen liegen zwischen minimal 5,3 km<sup>2</sup> (Naturraum Helgoland - nicht in die C-Faktoren-Auswertung einbezogen) und 5.406 km<sup>2</sup> (Naturraum Wegscheider Hochfläche). In Abbildung 33 ist die Häufigkeitsverteilung der Flächengrößen dargestellt.

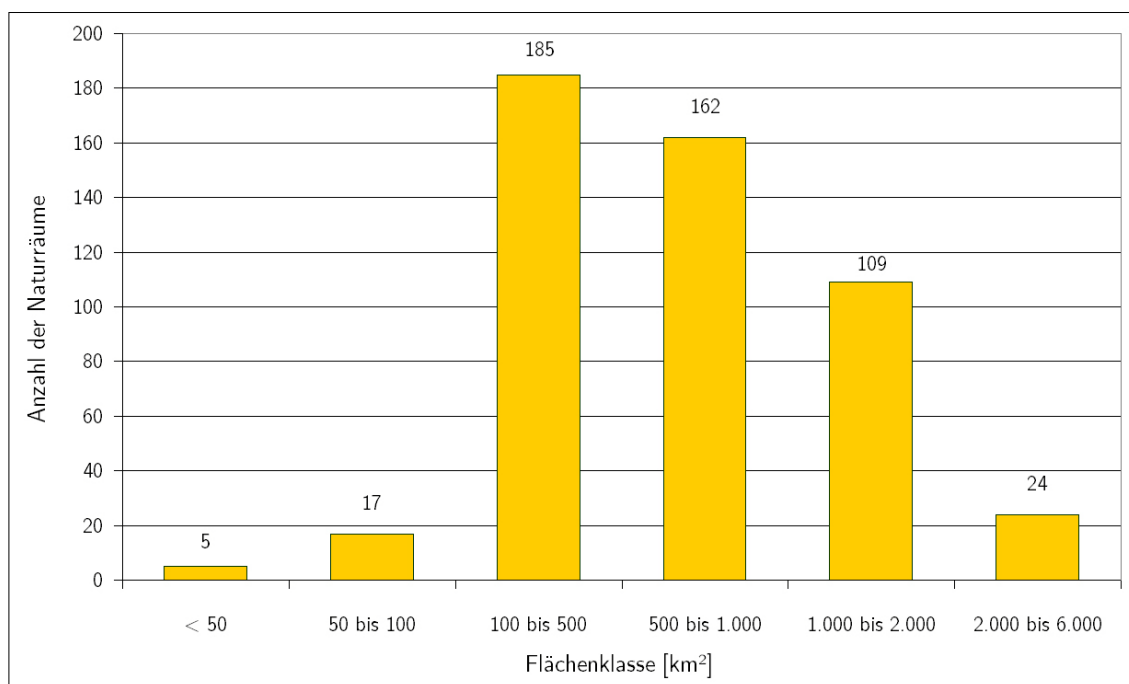


Abbildung 33: Verteilung der Naturraumeinheiten nach ihrer Flächengröße

Etwa 91 % der Naturräume weisen eine Fläche zwischen 100 und 2.000 km<sup>2</sup> auf. 5 % der Naturräume (n=27) verfügen über Flächengrößen die kleiner und 4 % (n=18), die größer als dieser Bereich sind. Aus dem Datenkollektiv der nicht mit Agrarstrukturdaten belegten Naturräume (n=40) fallen 15 in die Klasse < 100 km<sup>2</sup>, d. h., diese Naturräume erfüllten nicht die Randbedingungen bezüglich Betriebs- bzw. Gemeindeanzahl, die für die statistische Auswertung durch das Forschungsdatenzentrum vorgegeben wurden. Insbesondere in der Größenklasse < 100 km<sup>2</sup> spielte auch der Fakt eine ent-



scheidende Rolle, dass aufgrund des hauptsächlichlichen Flächenanteils einer Reihe davon keine Gemeinden zugeordnet werden konnten (siehe Tabelle 24).

Das übergebene statistische Datenmaterial deckt somit weitestgehend nur die Naturräume mit einer Größe über 100 km<sup>2</sup> ab. In Tabelle 23 ist die Verteilung der Gemeindeanzahl je Naturraum in Abhängigkeit zur Größe des jeweiligen Naturraumes aufgeführt.

Anzahl der Gemeinden je Naturraum	Flächengröße der Naturräume [km <sup>2</sup> ] – (Größenklasse)						Summe
	0 bis 50	50 bis 100	100 bis 500	500 bis 1.000	1.000 bis 2.000	2.000 bis 6.000	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
0	4	5	23	5			<b>37</b>
1 bis 10	1	12	102	40	7	1	<b>163</b>
10 bis 50			60	112	71	8	<b>251</b>
50 bis 100				4	27	9	<b>40</b>
100 bis 150					4	5	<b>9</b>
150 bis 300				1		1	<b>2</b>
Summe	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>185</b>	<b>162</b>	<b>109</b>	<b>24</b>	<b>502</b>

Tabelle 24: Verteilung der Gemeindeanzahl je Naturraum in Abhängigkeit von der Größe des jeweiligen Naturraumes

Für 37 Naturräume konnten entsprechend der beschriebenen Methodik keine Gemeinden zugeordnet werden. Ursache bei den Größenklassen (1) und (2) sowie einigen Naturräumen der Klasse (3) war, dass aufgrund der geringen Größe die hier befindlichen Gemeindeflächenanteile geringer waren als die Gemeindeflächenanteile in einem benachbarten Naturraum. Ursache bei den Klassen (3) und (4) war entweder die Ausformung des Naturraumes oder im Falle des Bundeslandes Rheinland-Pfalz der Bezug auf Verbandsgemeinden mit einer sehr großen Gemeindefläche, sodass auch in diesen Fällen die Gemeinden den benachbarten Naturräumen zugeordnet wurden.

Abbildung 34 gibt einen Überblick zu den Gemeindeverteilungen (Stand 31.12.2006) je Naturraum, die den statistischen Auswertungen zugrunde liegen.

Auf der Grundlage der durch das Forschungsdatenzentrum bereitgestellten Anbauflächen der Fruchtartenhauptgruppen in den Naturräumen Deutschlands wurden die prozentualen Anbauverteilungen abgeleitet, welche die Basis für die C-Faktoren-Ermittlungen bildeten. In Tabelle 25 und Abbildung 35 ist die Zusammenführung dieser Ergebnisse auf Ebene der Flächenbundesländer dargestellt.

Zur Güteprüfung der Agrarstrukturdaten und deren Aggregation über die Gemeinden auf die Naturräume wurden diese Daten auf Bundeslandebene zusammengefasst und mit den Anbaustatistiken der Bundesländer (STALA-Internet) verglichen. Eine Auswahl dieser Ergebnisse ist exemplarisch für 4 Bundesländer in Tabelle 26 aufgeführt.

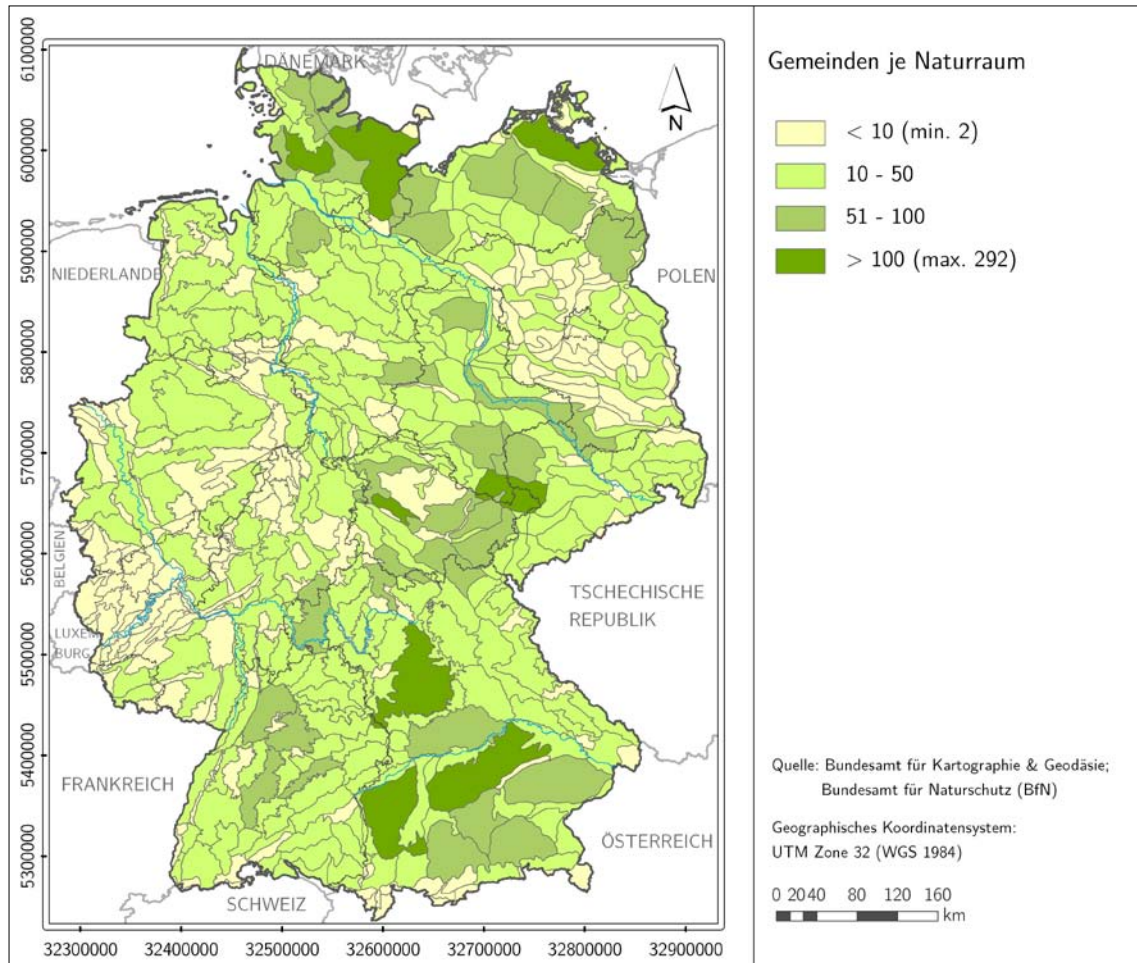


Abbildung 34: Anzahl der Gemeinden je Naturraum

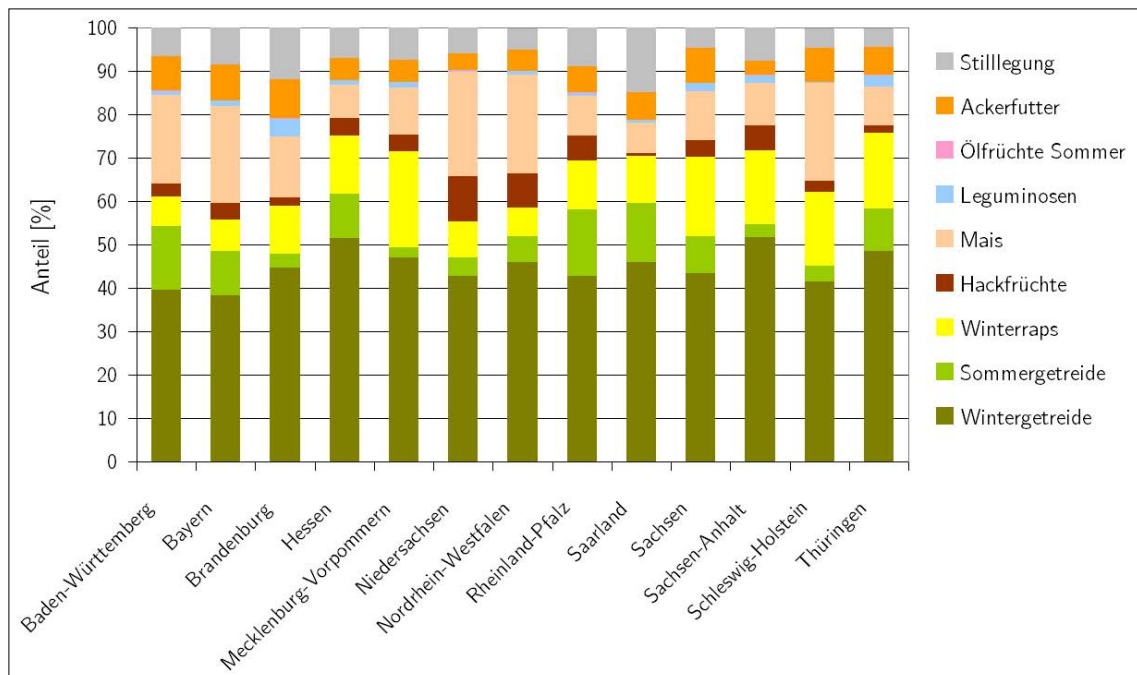


Abbildung 35: Übersicht zu den Anbauverteilungen der Fruchtartenhauptgruppen in den Flächenbundesländern Deutschlands - ermittelt auf Grundlage der Agrarstrukturdatenerhebung 2007 (FDZ 2009)





	Wintergetreide [%]	Sommergetreide [%]	Winterraps [%]	Hackfrüchte [%]	Mais [%]	Leguminosen [%]	Ölfrüchte Sommer [%]	Ackerfutter [%]	Stilllegung [%]
Baden-Württemberg	40	15	7	3	20	1	0	8	7
Bayern	38	10	7	4	22	1	0	8	9
Brandenburg	45	3	11	2	14	4	0	9	12
Hessen	51	10	13	4	8	1	0	5	7
Mecklenburg-Vorp.	47	2	22	4	11	1	0	5	8
Niedersachsen	42	4	8	10	24	0	0	4	6
Nordrhein-Westfalen	46	6	7	8	23	1	0	5	5
Rheinland-Pfalz	43	15	11	6	9	1	0	6	9
Saarland	46	14	11	1	7	1	0	7	15
Sachsen	43	9	18	4	11	2	0	8	5
Sachsen-Anhalt	51	3	17	6	10	2	0	3	8
Schleswig-Holstein	41	4	17	3	23	0	0	8	4
Thüringen	49	10	17	2	9	3	0	7	4

Tabelle 25: Anbauverteilungen der Fruchtartenhauptgruppen in den Flächenbundesländern Deutschlands (Stand 2007; Quelle: FDZ)

	Schleswig-Holstein [%]	FDZ [%]	Baden-Württemberg [%]	FDZ [%]	Sachsen-Anhalt [%]	FDZ [%]	Thüringen [%]	FDZ [%]
Getreide	46	45	56	55	54	54	61	59
davon								
Wintergetreide	42	41	k. A.	40	k. A.	51	51	49
Sommergetreide	4	4	k. A.	5	k. A.	3	10	10
Hackfrüchte	2,5	2,5	3	3	6	6	2	2
davon								
Kartoffel	1		1		1		0,4	
Zuckerrübe	1,5		2		5		1,8	
Winterraps	18	18	9	7	18	17	20	17
Mais	21	22	20	20	9	10	8	9
Ackerfutter	8	8	6	8	3	3	3	6
Stilllegung	4,5	4,5	5	6	8	8		k. A.

Tabelle 26: Fruchtartenverteilung in Deutschland auf Ebene der Naturräume - Vergleich ausgewählter Bundeslandstatistiken mit den jeweiligen Daten des FDZ (k. A. ... keine Angabe) – (Stand 2007; Quelle: STALA-Internet, FDZ)



Der Vergleich der Agrarstrukturdaten mit den Daten der Anbaustatistiken der Bundesländer weist trotz der dargelegten Auswertungs- und Aggregierungsprobleme der FDZ-Daten eine sehr gute Übereinstimmung auf. Die Abweichungen liegen im Bereich  $\pm 3\%$  und treten insbesondere bei den Fruchtarten (Winterraps, Mais) mit einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe (NAWARO-Anteil) auf. Neben den aufgeführten Einschränkungen bei der Auswertung dürften die Gründe hierfür in der Erfassungsstatistik liegen. So ist z. B. aus den Unterlagen heraus nicht eindeutig sichtbar, in welcher Kategorie ein NAWARO-Anbau auf Stilllegungs- und Energieflächen erfasst wurde. Vor diesem Hintergrund ist zu konstatieren, dass die in den Naturraumeinheiten zusammengefassten Daten der Agrarstrukturerhebung die regionalen Anbauverhältnisse sehr gut repräsentieren und für die weitere Berechnung des C-Faktors nutzbar sind. In der folgenden Abbildung 36 sind die Flächenanteile der Fruchtartenhauptgruppen bezogen auf die Naturraumeinheiten Deutschlands dargestellt.

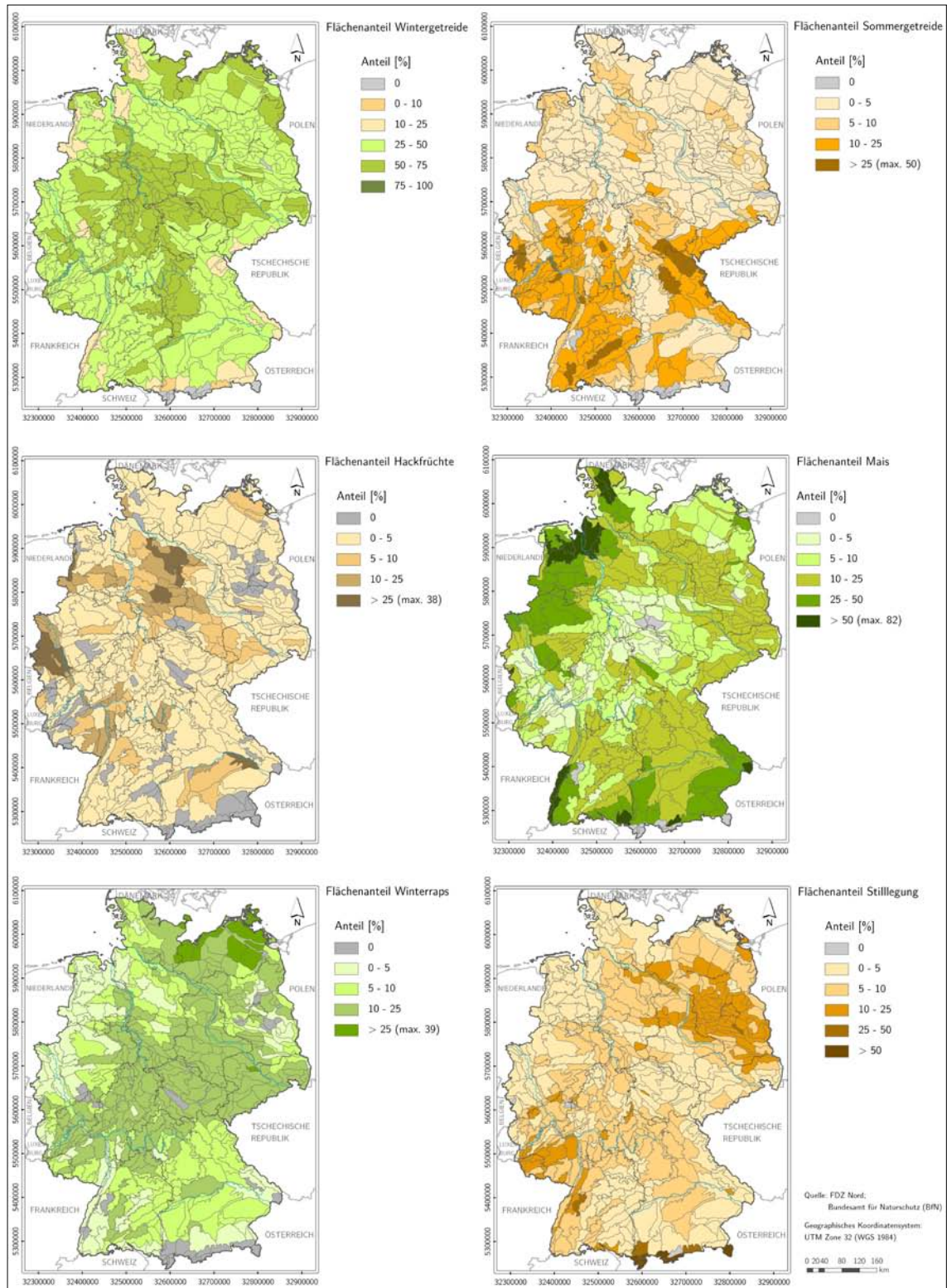


Abbildung 36: Flächenanteile der Fruchtartenhauptgruppen bezogen auf die Naturraumeinheiten



### *Festlegung der Kulturperioden*

Auf der Grundlage des durch den DWD bereitgestellten Datensatzes zu den Phänodaten ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten wurde für jeden Naturraum der mittlere Eintrittstag (fortlaufender Tag vom 01.01 = Tag ,1' bis 31.12 = Tag ,365') des Merkmals aus den Beobachterstationen des jeweiligen Naturraums berechnet. In Abbildung 37 sind als Beispiele die Merkmale Aussaat und Ernte für die Fruchtarten Winterweizen, Winterraps und Mais dargestellt. Nach der gleichen Herangehensweise wurden diese auch für die übrigen Termine und Fruchtarten ermittelt. Ausgehend von den mittleren Eintrittstagen wurden die Kulturperioden in Anlehnung an SCHWERTMANN ET AL. (1990) wie folgt festgelegt:

- Periode 1 - Bodenbearbeitung bis Saatbett (Saatbett = Phänotag Aussaat, Bodenbearbeitung = - 5 Tage bei Winterung bzw. 5 Tage vor Beginn Winter)
- Periode 2 - Saatbett bis 10 % Bodenbedeckung (siehe Tabelle 27, Kontrolltermin Phänophase Auflaufen)
- Periode 3 - 10 % bis 50 % Bodenbedeckung (s. Tabelle 27)
- Periode 4 - 50 % bis 75 % Bodenbedeckung (s. Tabelle 27)
- Periode 5 - 75 % Bodenbedeckung bis Ernte (Ernte = Phänotag Ernte)
- Periode 6 - Ernte bis Bodenbearbeitung (siehe Tag Periode 1)

Die Perioden 2 bis 4 wurden mittels eines vereinfachten Wachstumsmodells aus dem Bewertungsmodell REPRO (Tabelle 27) bestimmt, wobei bei den Winterungen definiert wurde, dass Wachstum nur in der Vegetationsperiode abläuft. Warme Perioden innerhalb des Winterzeitraumes, in denen zwischenzeitlich ein Wachstum wieder einsetzt, blieben unberücksichtigt.

Die Kulturperioden wurden für jede einzelne Fruchtart ermittelt. Die Aggregation auf die Ebene der Fruchtartenhauptgruppen erfolgte erst bei der abschließenden Berechnung des C-Faktors. Da aus den Daten des Forschungsdatenzentrums keine Fruchtartenverteilung innerhalb der Hauptgruppen ableitbar war, wurden die Anteile aus den Angaben der Anbaustatistiken der Bundesländer, gekoppelt mit einer Bewertung der landwirtschaftlichen Anbaueignung der Böden auf Grundlage der BÜK1000N, geschätzt. Diese Vorgehensweise wurde für die Ermittlung des Anbauanteils von Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen sowie von Zuckerrübe und Kartoffel angewendet.

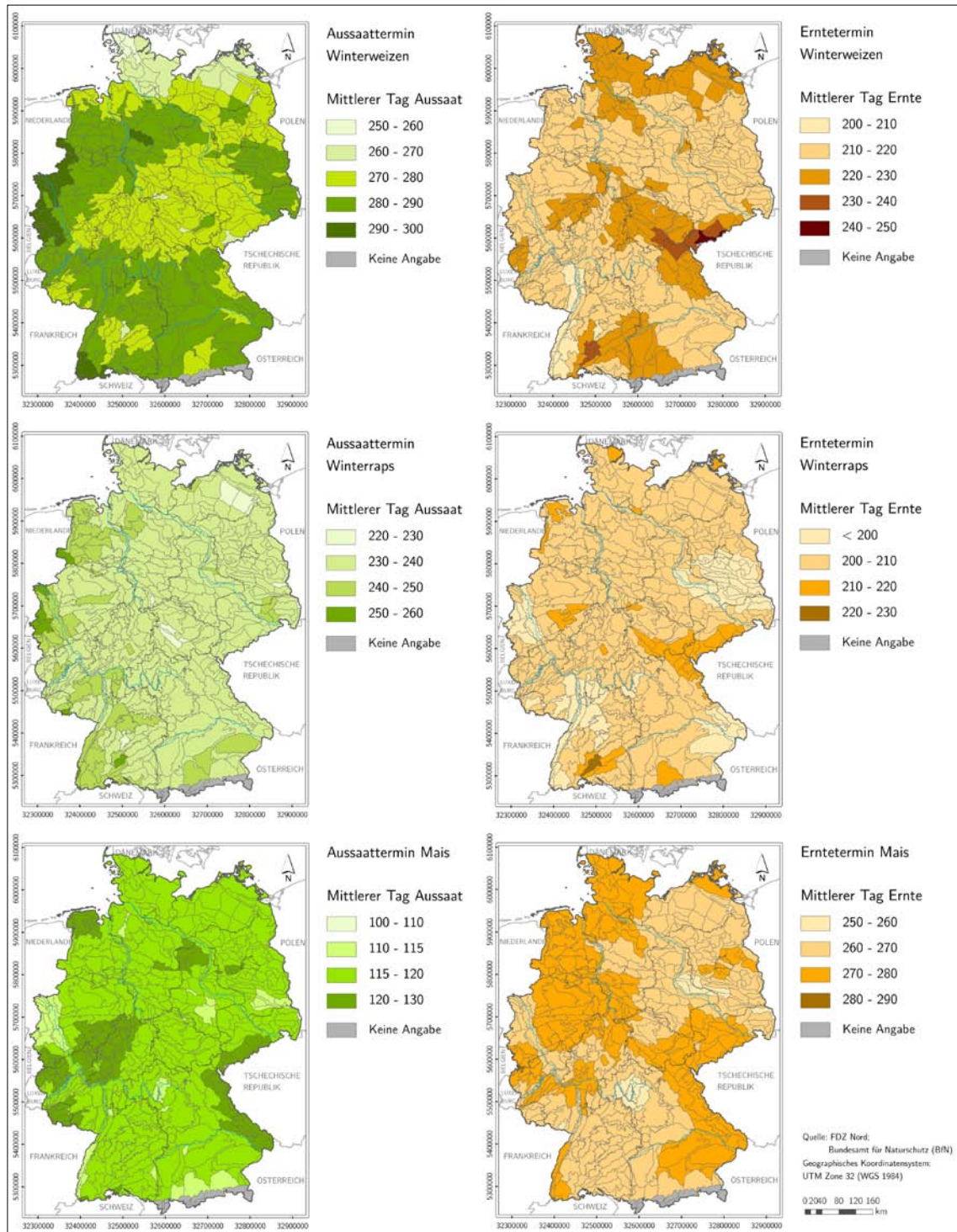


Abbildung 37: Mittlere Eintrittstage für die Merkmale Aussaat und Ernte für die Fruchtarten Winterweizen, Winterraps und Mais, bezogen auf die Naturraumeinheiten Deutschlands



Fruchtart	Bodenbearbeitung	Aussaat	Auflaufen	10 % Bodenbedeckung	50 % Bodenbedeckung	75 % Bodenbedeckung	Ernte
Winterweizen	- 5	DWD	DWD	28	68	79	DWD
Wintergerste	- 5	DWD	DWD	18	42	53	DWD
Winterroggen	- 5	DWD	DWD	20	45	57	DWD
Winterraps	- 5	DWD	DWD	16	32	40	DWD
Sommergerste	Wi - 5	DWD	DWD	28	41	51	DWD
Zuckerrübe	Wi - 5	DWD	DWD	25	40	50	DWD
Kartoffel	Wi - 5	DWD	DWD	37	51	58	DWD
Mais	Wi - 5	DWD	DWD	42	66	84	DWD
Ackerbohne	Wi - 5	DWD	DWD	28	41	51	DWD

Tabelle 27: Wachstumsmodell (Differenz Tage zum Stichtag Aussaat); DWD = mittlerer Tag entsprechend Auswertung Phänodatensatz des DWD; Wi – 5 = 5 Tage vor Beginn der Vegetationsruhe

### *Auswertung der Bodenbearbeitungssysteme*

Zu Art und Umfang der Bodenbearbeitung im Ackerbau gibt es derzeit keine amtliche bundesweite Statistik. Angaben hierzu wurden und werden in erster Linie im Rahmen von Forschungsprojekten oder speziellen Analysen erhoben und sind entweder fruchtarten- oder länderspezifisch. Als Datengrundlagen dienen Befragungen von Landwirten, Auswertungen von Förderungen oder Ergebnisse von Betriebsanalysen. Für Deutschland beziffert DEISENROTH (2008) das theoretische Potenzial für pfluglose Bodenbearbeitung auf 60 – 70 % der Ackerfläche.

HOFFMANN (2009) geht davon aus, dass unabhängig von der Fruchtart und der Region in Deutschland gegenwärtig ca. 50 % der Ackerfläche konservierend bearbeitet werden. Dabei ist die betriebliche Schwankungsbreite sehr groß, neben Landwirten die jeweils zu 100 % ein System favorisieren, wechseln zahlreiche Landwirte abhängig von der Fruchtart und der Stellung innerhalb der Fruchtfolge das Bearbeitungssystem.

EPERLEIN (2008) von der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e. V. zeigt anhand von Erhebungen der Kleffman Group am Beispiel von Wintergetreide, dass es zwischen den Bundesländern erhebliche Unterschiede bei den Bodenbearbeitungssystemen gibt (Abbildung 38). Die Flächenanteile von pfluglos bewirtschaftetem Wintergetreide schwanken zwischen 29 % in Schleswig-Holstein und 75 % in Thüringen.

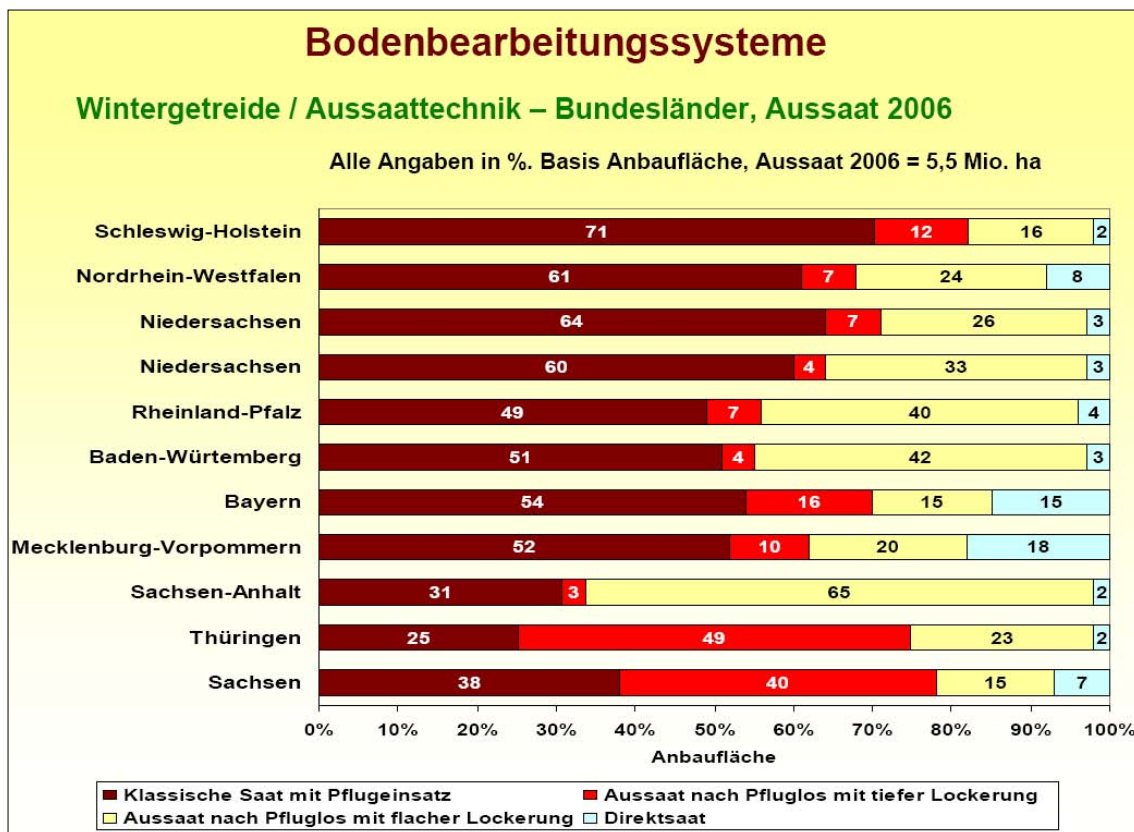


Abbildung 38: Bodenbearbeitungs-/Aussaatverfahren für Wintergetreide (EPERLEIN 2008)

VOßHENRICH et al. (2002) legten anhand einer bundesweiten Befragung von 107 Landwirten eine Stuserhebung zu den begrenzenden Faktoren in der pfluglosen Bodenbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Winterrapses an. Bereits zum damaligen Zeitpunkt der Erhebung gaben 63 % der Befragten an, bei Raps nach Getreide immer und 33 % manchmal eine pfluglose Bodenbearbeitung durchzuführen. Diese Zahlen dürften sich auch in den Jahren seit Durchführung der Studie nicht verringert haben, eher ist von einer steigenden Tendenz auszugehen.

Der Freistaat Sachsen hat Zahlen für die Jahre 1995 bis 2005 zum prozentualen Anteil der mit erosionsmindernden Maßnahmen bestellten Ackerfläche bezüglich der Gesamtackerfläche Sachsens veröffentlicht (SMUL 2008). Demnach stieg der Anteil pfluglos bewirtschafteter Ackerflächen von ca. 4 % im Jahre 1995 auf ca. 34 % im Jahre 2004, mit seitdem weiter deutlich ansteigendem Trend.

Für den Freistaat Thüringen wurden von REICH & WURLITZER (2004) Zahlen zur Verteilung der Bodenbearbeitungssysteme vorgelegt, die auf Erhebungsdaten von 217 Thüringer Landwirtschaftsbetrieben aus den Jahren 2001/2002 basieren und 31,5 % der Ackerfläche Thüringens repräsentieren. Der Anteil pflugloser Bodenbearbeitung stieg von 1996/97 zum Betrachtungszeitraum von 37 % auf 52,1 % (51,4 % Mulchsaat, 0,7 % Direktsaat). Auch hier ist von einer gleichbleibenden bis leicht steigenden Tendenz auszugehen.



Es muss konstatiert werden, dass gegenwärtig für Deutschland keine flächendeckenden Angaben mit Fruchtartenbezug zum Anteil pflugloser Bodenbearbeitung vorliegen. Die Angaben aus der Literatur bestätigen die Einschätzung von HOFFMANN (2009), dass von einem maximal 50 %-igen Anteil auszugehen ist. Als untere Flächenbegrenzung wurde ein Flächenanteil von 25 % angesetzt. Für Wintergetreide wurden für die Berechnung die Angaben von EPPERLEIN (2008) zugrunde gelegt.

#### *C-Faktoren der gegenwärtigen Nutzungs- und Bewirtschaftungsstrukturen*

Auf Basis der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Datengrundlagen wurde der C-Faktor für die gegenwärtige Nutzungs- und Bewirtschaftungsstruktur nach folgenden vier Ansätzen berechnet:

- 100 % konventionelle Bodenbearbeitung (Worst-Case-Ansatz) – Abbildung 39
- 100 % pfluglose Bodenbearbeitung (Best-Case-Ansatz) – Abbildung 42
- Annahmen eines Verhältnisses konventionelle zu konservierende Bodenbearbeitung von 50:50 (Abbildung 41)
- Annahmen eines Verhältnisses konventionelle zu konservierende Bodenbearbeitung von 75:25 (Abbildung 40)

Die Abbildungen 39 bis 42 zeigen die mittleren C-Faktoren der ackerbaulich genutzten Flächen der Naturräume Deutschlands, in Abhängigkeit von der Nutzungs- und Bewirtschaftungsstruktur. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde eine einheitliche Klassifizierung vorgenommen. Unter Annahme einer flächendeckend konventionellen Bodenbearbeitung weisen vor allem die überwiegend ackerbaulich genutzten Regionen Deutschlands (vgl. Abbildung 14) C-Faktoren zwischen 0,1 und 0,15, regional auch zwischen 0,08 und 0,1 auf. Überdurchschnittlich hohe C-Faktoren treten in den Geestgebieten Nordwestdeutschlands auf, wobei dort der Ackeranteil gering ist.



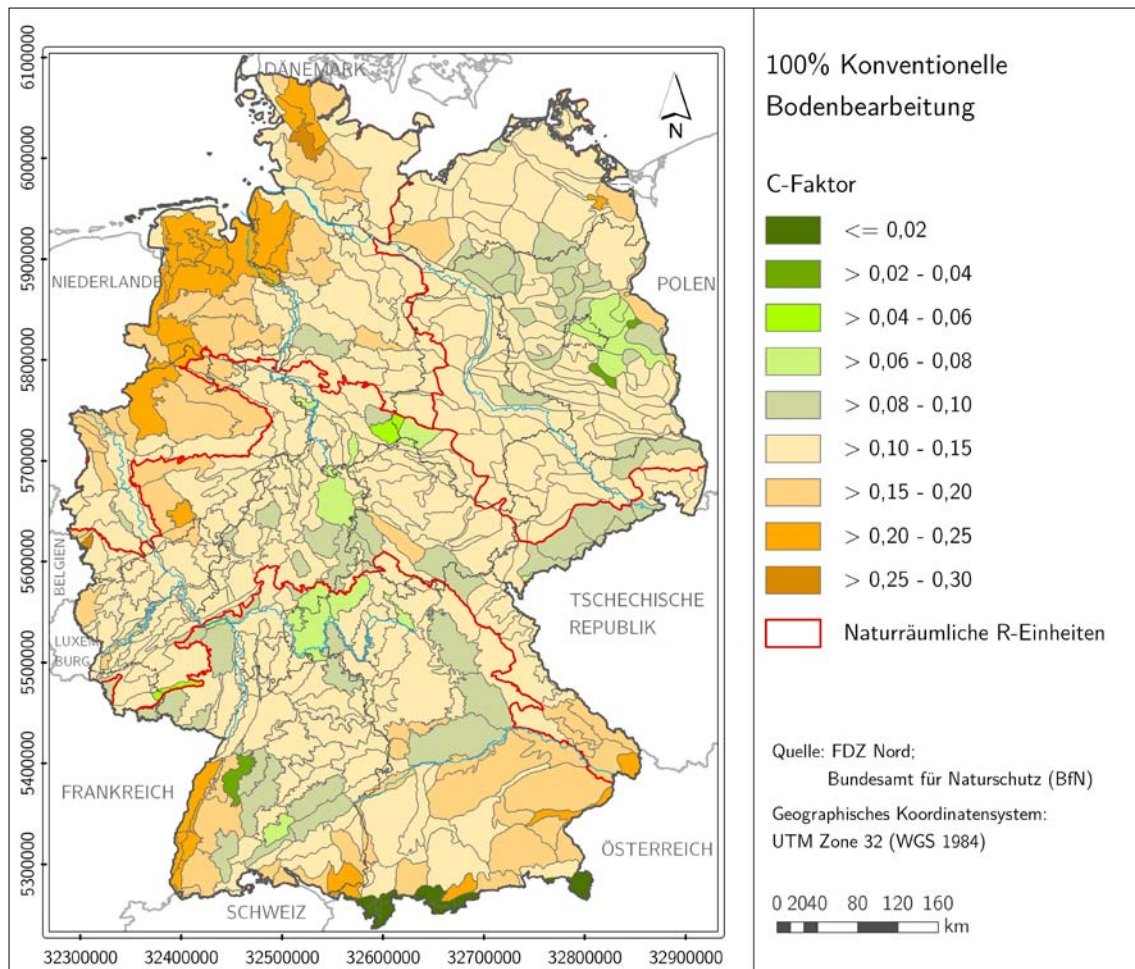


Abbildung 39: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Naturräumen Deutschlands unter Annahme einer 100 %-igen konventionellen Bewirtschaftung

Mit zunehmendem Anteil konservierender Bodenbearbeitungstechniken nimmt entsprechend der C-Faktor ab (Abbildung 40 bis Abbildung 42). Legt man die oben zitierten Arbeiten zugrunde (u. a. HOFFMANN 2009; EPPERLEIN 2008; SMUL 2008; REICH & WURLITZER 2004), so dürften die in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellten Flächenverteilungen des C-Faktors unter Annahme einer 25 %-igen bzw. 50 %-igen konservierenden Bodenbearbeitung den gegenwärtigen Zustand am ehesten repräsentieren. Dabei ist für die ostdeutschen Bundesländer von einem tendenziell höheren Anteil auszugehen. Die C-Faktoren der ackerbaulich genutzten Flächen würden bei diesen Annahmen unter 0,1 liegen.

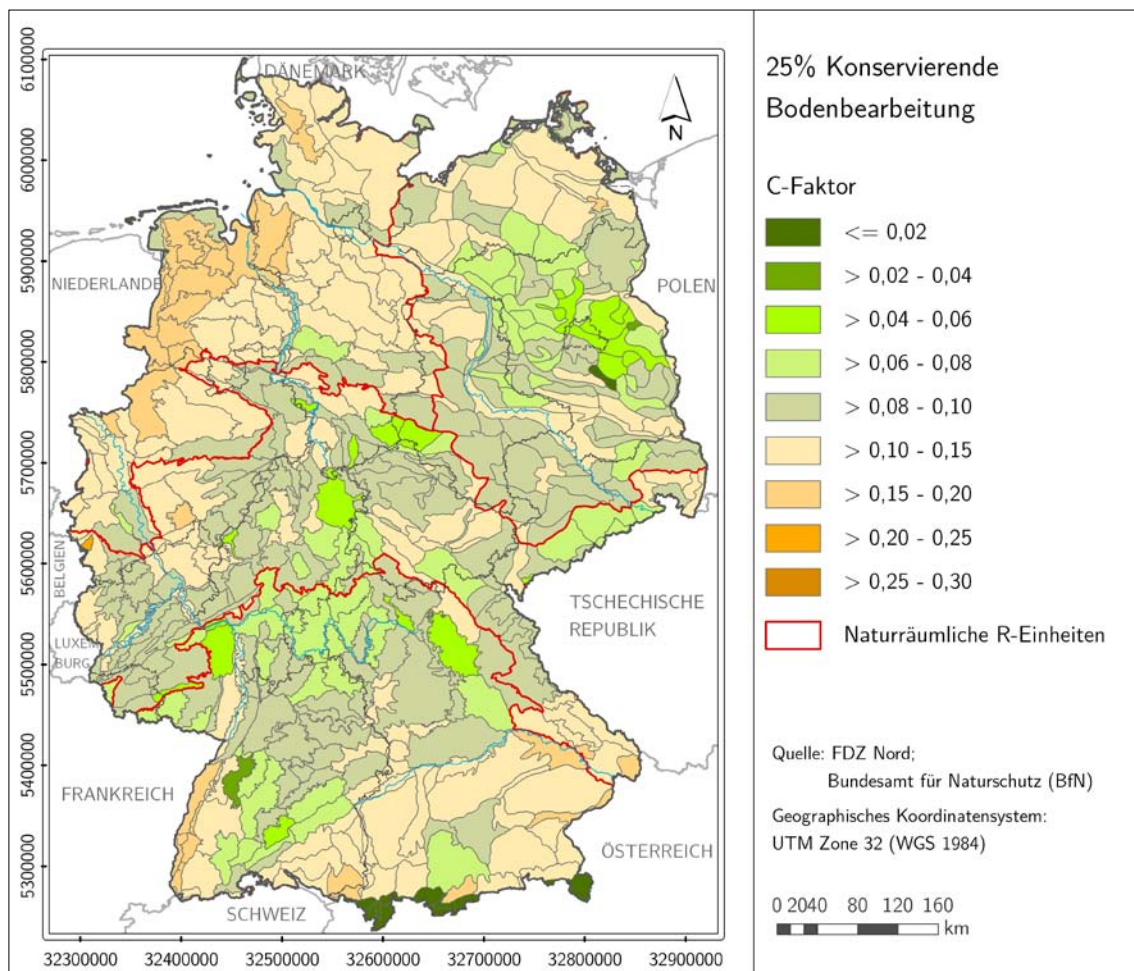


Abbildung 40: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Naturräumen Deutschlands unter Annahme einer 25 %-igen konservierenden Bewirtschaftung

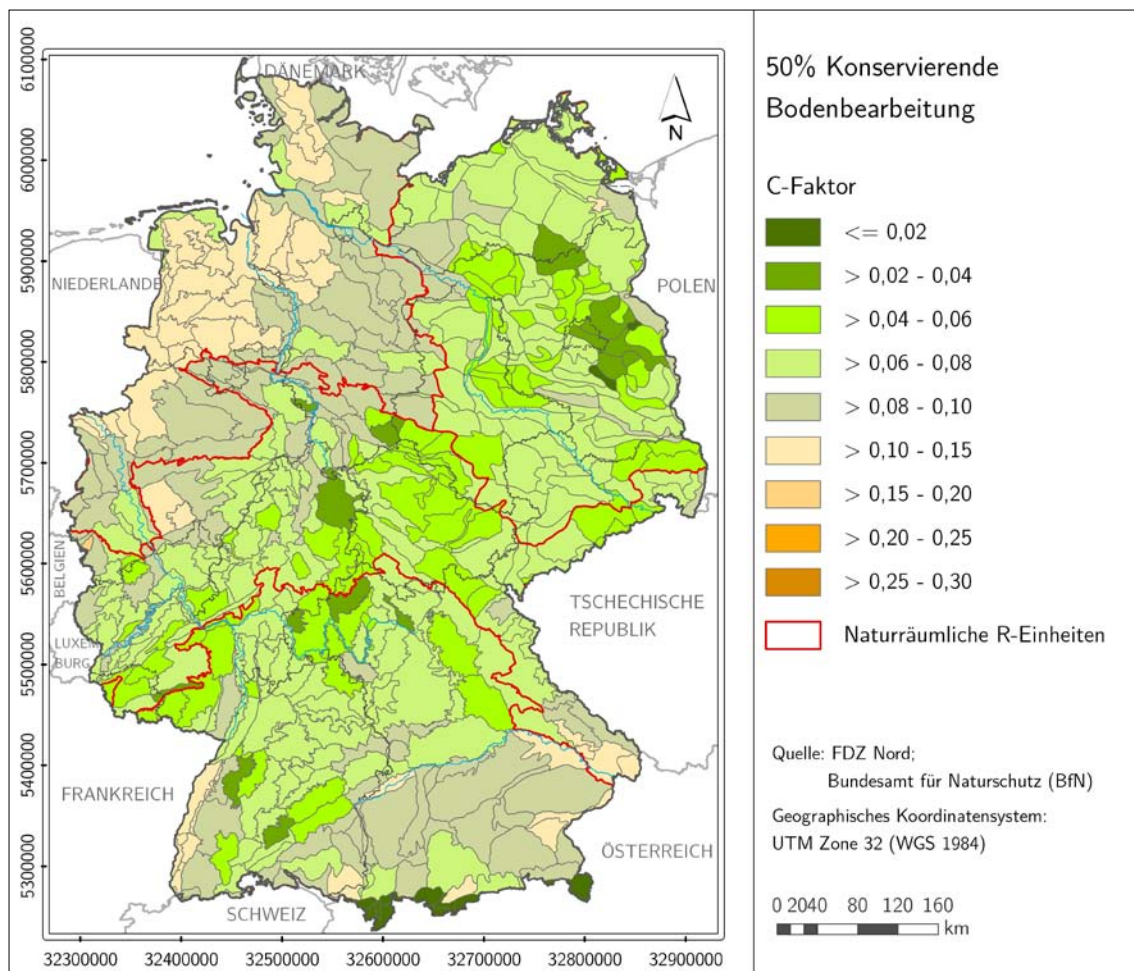


Abbildung 41: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Naturräumen Deutschlands unter Annahme einer 50 %-igen konservierenden Bewirtschaftung

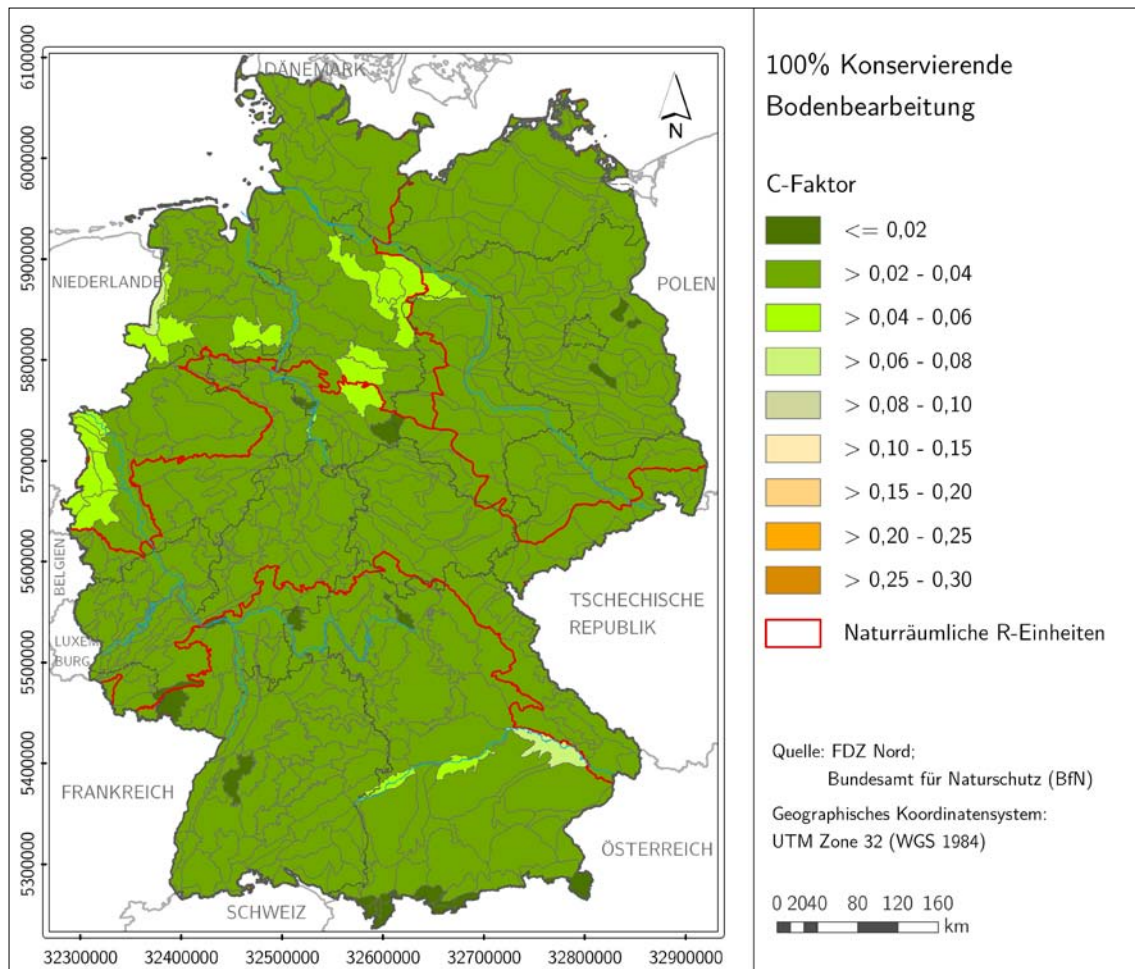


Abbildung 42: C-Faktor für die gegenwärtigen Anbauverhältnisse in den Naturräumen Deutschlands unter Annahme einer 100 %-igen konservierenden Bewirtschaftung

### 3.1.4 LS-Faktorenverteilung

Die Bestimmung des LS-Faktors erfolgte auf Basis des digitalen Geländemodells im 50-m-Raster nach Gleichung 15 (Kap. 2.3.4). Während der S-Faktor als Funktion der Hangneigung unabhängig von der Nutzungsdifferenzierung und von den berücksichtigten Erosionsbarrieren ist, beeinflussen diese hingegen die Hanglänge und somit den L-Faktor.

Bei Betrachtung der räumlichen Verteilung der S-Faktoren sind erwartungsgemäß die größten Werte in den Mittel- und Hochgebirgsregionen vorzufinden (Abbildung 43). In Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung muss dabei konstatiert werden, dass steile Hanglagen mit hohen S-Faktoren im Allgemeinen nicht als Acker genutzt werden. Geringere S-Faktoren  $< 1,0$ , die nach Gleichung 15 etwa einer mittleren Hangneigung zwischen 5 und 6 % entsprechen, weisen große Teile des Norddeutschen Tieflandes, der Mittelgebirgsvorländer und der Tiefebene von Rhein und Donau auf.



Regional können kleinräumig auch deutlich größere S-Faktoren auftreten. Eine Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf das reliefbedingte Erosionspotenzial muss unter Berücksichtigung der hier betrachteten Maßstabebene und des verwendeten DGM 50 erfolgen. Im Rahmen regionaler und großmaßstäbiger Analysen führt die Verwendung von DGM geringerer Rasterweiten zur modellbedingten Ausweisung größerer S-Faktoren, da kleinräumige Reliefformen und Hängeigungen besser abgebildet werden (vgl. VOLK et al. 2010; CHISHOLM 2008).

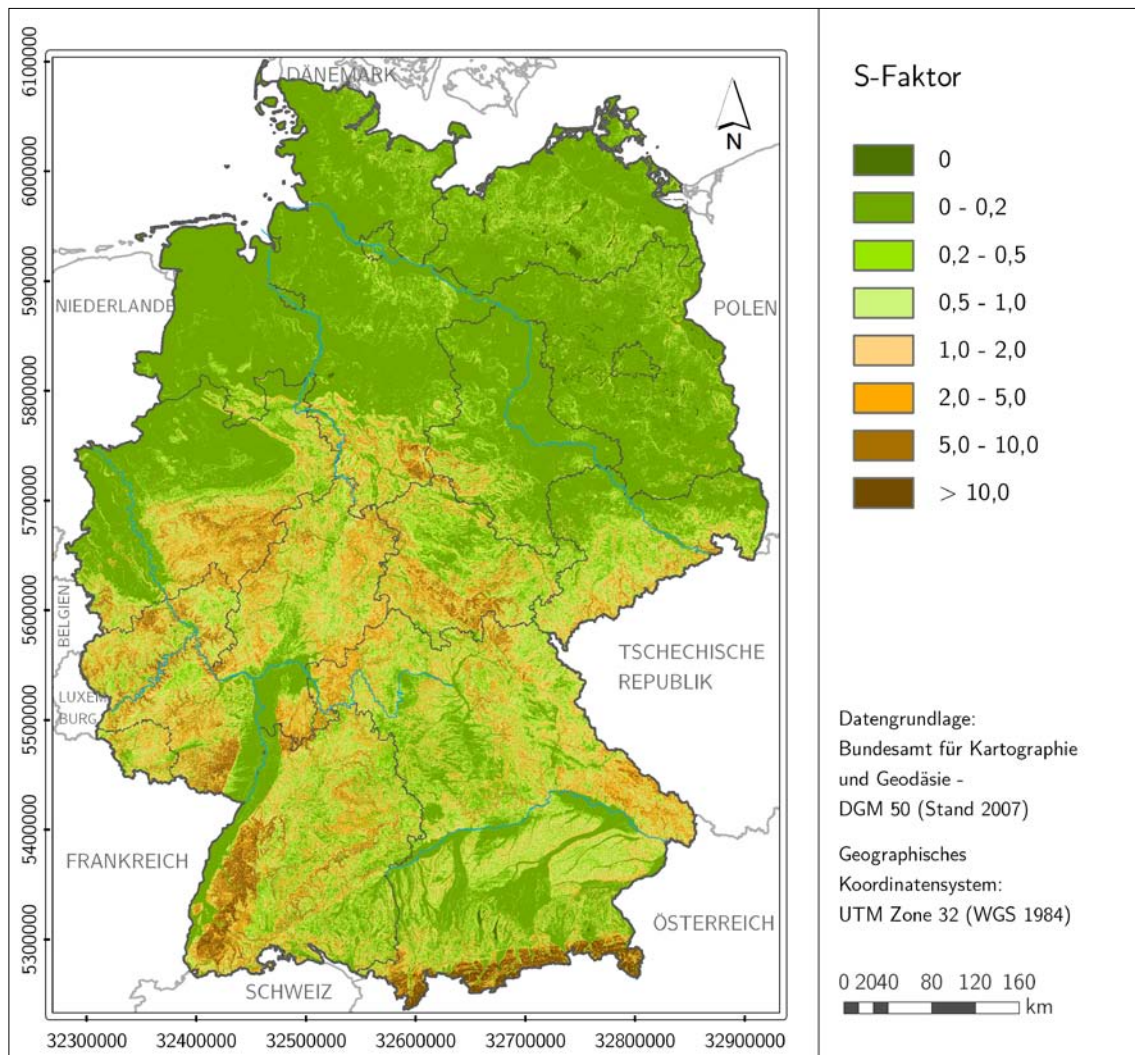


Abbildung 43: Darstellung der S-Faktoren Deutschlands (Grundlage DGM 50)

Unterschiedliche Nutzungsstrukturen und die Einbindung linienhafter Objekte als Barrieren beeinflussen maßgeblich die Bestimmung der L-Faktoren. Innerhalb verschiedener Berechnungsvarianten wurden die drei Hauptnutzungen Ackerbau, Grünland und Brachland sowohl undifferenziert als Landwirtschaftsflächen als auch unter Berücksichtigung der Nutzungswechsel betrachtet (Kap. 2.3.4, Tabelle 11). In diesem Fall stellen



Grünland- und Brachflächen keine potenziellen Abtragsbereiche dar und wirken Hang verkürzend.

In Abbildung 44 ist die Wirkung einer nutzungsdifferenzierten Betrachtung auf den L-Faktor auf den ackerbaulich genutzten Flächen abgebildet. Die Berücksichtigung der Grünlandbereiche als flächenhafte Erosionsbarrieren (Abbildung 44, rechts) führt zu einer Reduzierung der erosiven Hanglänge und somit des L-Faktors der Ackerflächen gegenüber der nicht differenzierten Betrachtung (Abbildung 44, links).

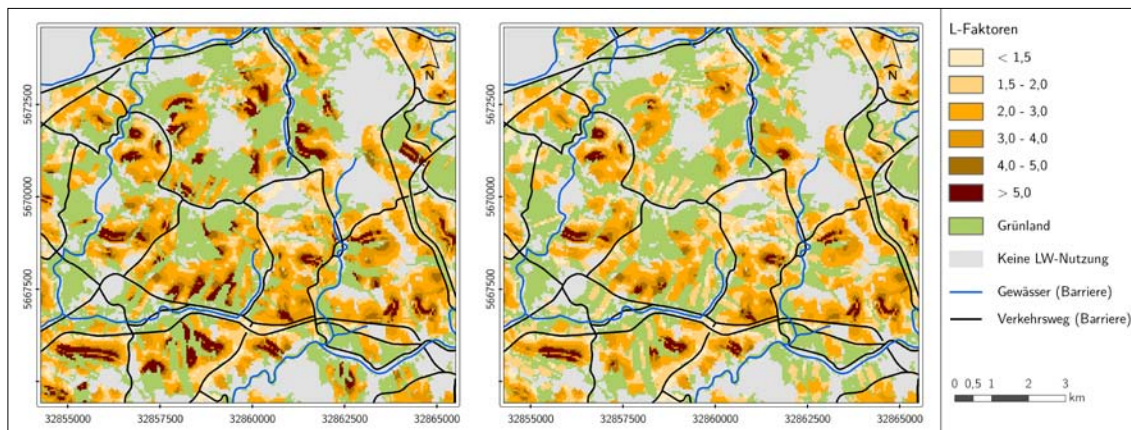


Abbildung 44: Vergleich der L-Faktoren in Abhängigkeit von der Nutzung – potenzielle LW-Flächen (links), nutzungsdifferenzierte LW-Flächen (rechts)

Abbildung 45 zeigt die bundesweite Darstellung des L-Faktors auf den ackerbaulich genutzten Flächen (nutzungsdifferenzierte Variante). Bedingt durch die großräumigen Agrarstrukturen sind die höchsten L-Faktoren (> 5) in den ostdeutschen Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen vorzufinden. Dieses Ergebnis bestätigt die Notwendigkeit, die Hanglänge direkt aus der vorhandenen digitalen Datenbasis abzuleiten, da ansonsten die Annahme einer Standardhanglänge die erosive Wirkung großer Hanglängen nicht genügend berücksichtigen würde (vgl. auch Kap. 2.3.4, u. a. Abbildung 19). Zudem kann in Tieflandbereichen (über den Hanglängenexponent) sowie in Räumen mit kleinräumigen Nutzungsstrukturen (z. B. Süddeutschland) eine Überschätzung der L-Faktoren vermindert werden.

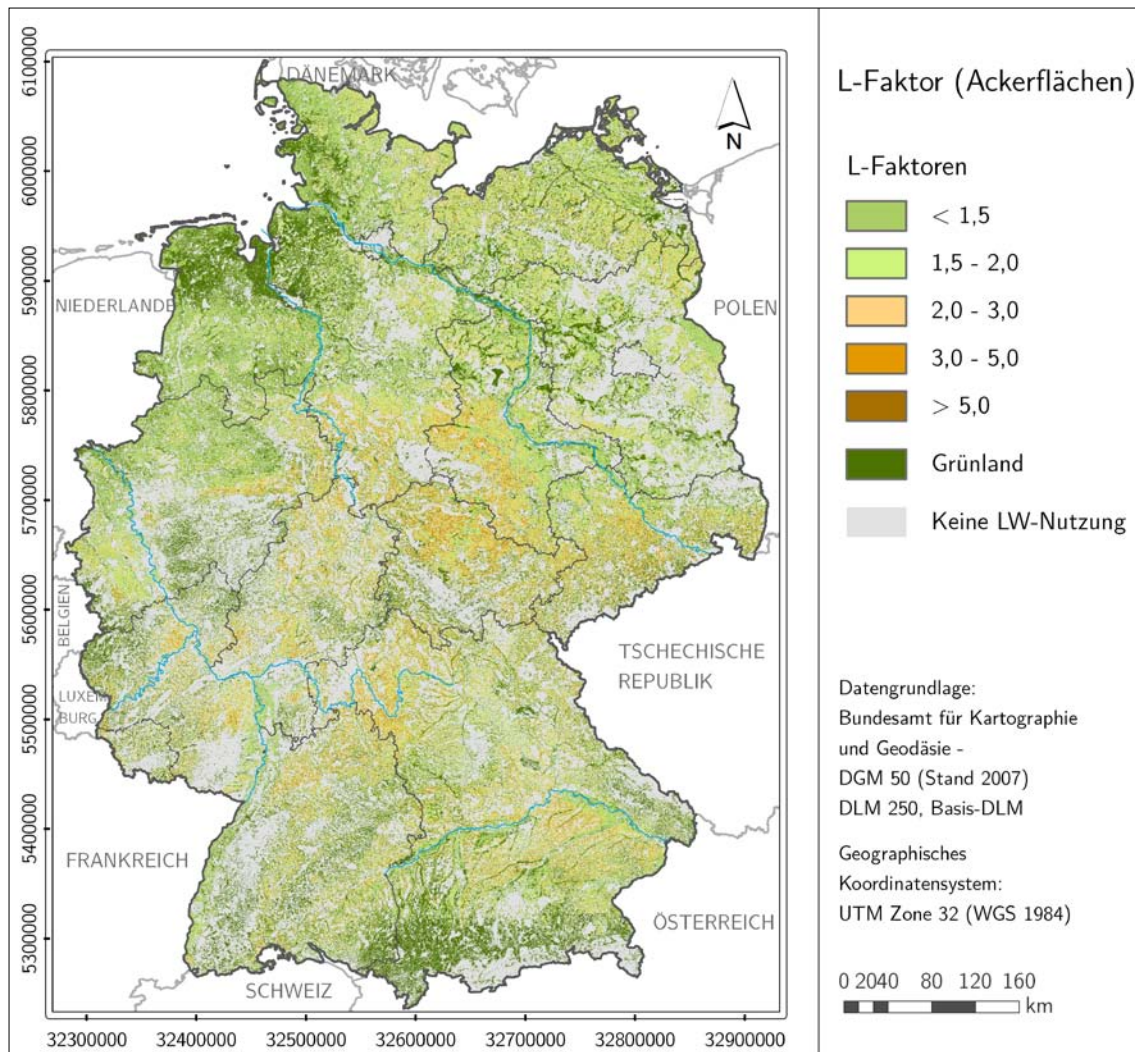


Abbildung 45: Darstellung der nutzungsdifferenzierten L-Faktoren der Ackerflächen Deutschlands

Die Berechnung des LS-Faktors wurde durch die multiplikative Verknüpfung des L- und S-Faktors umgesetzt. Unter Berücksichtigung von Hanglänge und –neigung weisen die ackerbaulich genutzten Flächen im Bereich der Mittelgebirge und ihrer Vorländer das größte reliefbedingte Erosionspotenzial auf (Abbildung 46). Das betrifft vorwiegend die Bundesländer Hessen, Sachsen, Rheinland-Pfalz und Bayern. Im Vergleich zu den Schwerpunktgebieten bei den L-Faktoren führen die nur mittleren bis geringen Hangneigungen (vgl. Abbildung 43) auf den Ackerflächen in Thüringen und Sachsen-Anhalt zu einer geringeren Einstufung der Erosionsgefährdung. Abbildung 46 zeigt die bundesweite LS-Faktoren-Verteilung für die Ackerflächen der nutzungsdifferenzierten Variante.

Für die Abschätzung der Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen wurde der LS-Faktor als Variable konstant gehalten, da ein klimatisch bedingter Einfluss auf das Relief nicht Gegenstand der Untersuchungen war.

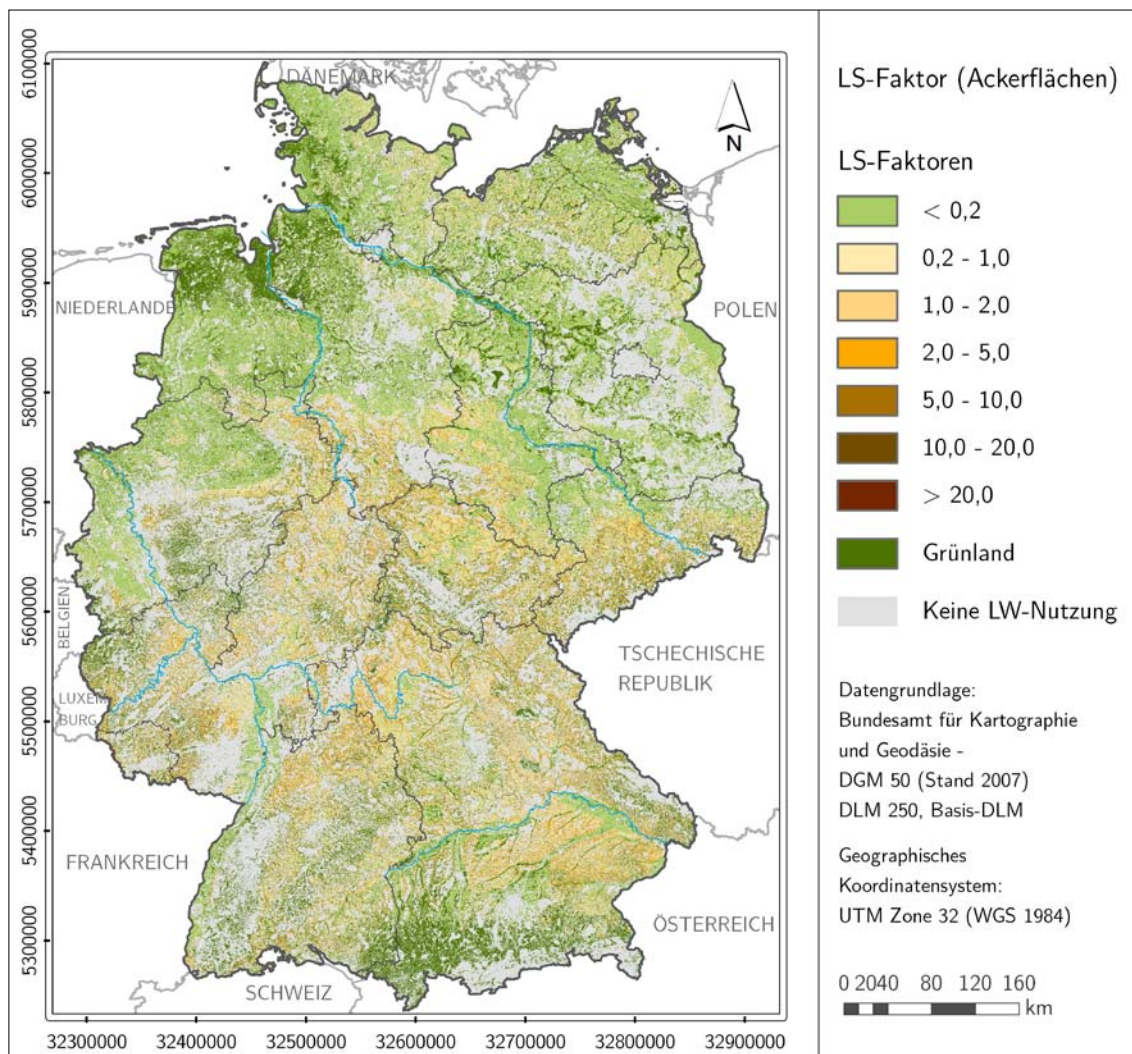


Abbildung 46: Darstellung der nutzungsdifferenzierten LS-Faktoren der Ackerflächen Deutschlands





## 3.2 Potenzielle Erosionsgefährdung in Deutschland

Die Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung wurde durch die multiplikative Verknüpfung der R-, K-, L- und S-Faktoren (vgl. Kap. 3.1) für die landwirtschaftlichen Flächen des Bundesgebietes innerhalb der Modellumgebung von *ABAGFlux* umgesetzt. Acker- und Grünlandflächen wurden als potenzielle Abtragsflächen betrachtet, ohne eine weitere Differenzierung der Nutzung vorzunehmen (vgl. Kap. 2.3.4, Tabelle 11). Die Berechnung der R-Faktoren wurde auf Basis der Regressionsgleichung unter Verwendung der Sommerniederschläge vorgenommen (vgl. Kap. 2.3.1 ). Der C-Faktor wurde standardmäßig mit 1,0 angesetzt.

Abbildung 47 zeigt für das 50-m-Raster die räumliche Verteilung der potenziellen Erosionsgefährdung ohne Einbeziehung des L-Faktors (Variante  $R \times K \times S$ ). Das Nordwest- und Nordostdeutsche Tiefland zeigen, bedingt durch niedrige K-Faktoren und kleine Hangneigungen, den geringsten potenziellen Bodenabtrag in Deutschland. Mit Zunahme der S-Faktoren und der Erodibilität der Böden (vor allem Lössstandorte) erhöht sich in den Mittelgebirgen und ihren Vorländern die Erosionsgefährdung deutlich. In den höheren Lagen der Mittelgebirge und im Bereich der Alpen verstärken zusätzlich die überdurchschnittlich hohen R-Faktoren das Erosionspotenzial.

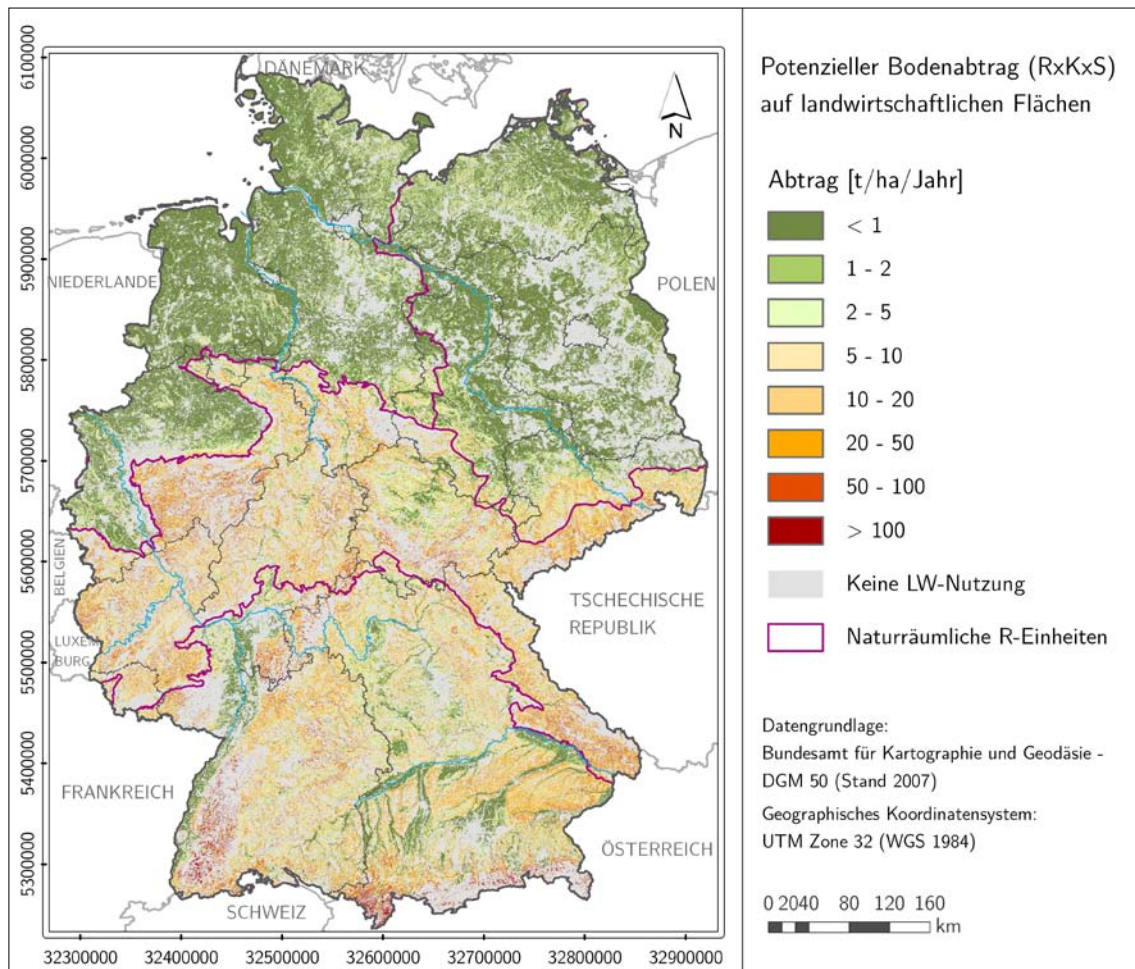


Abbildung 47: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxS) auf den landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand)

Die zusätzliche Berücksichtigung der erosiven Hanglänge (L-Faktor) führt insbesondere in Regionen mit großen Hanglängen und Hangneigungen (abgebildet über den Hanglängenkoeffizient  $m$ ) modellbedingt zu einer überdurchschnittlichen Erhöhung der potenziellen Bodenabträge gegenüber der R x K x S-Variante (Abbildung 48). Eine grundsätzliche Verlagerung von Schwerpunktgebieten kann hingegen nicht festgestellt werden.

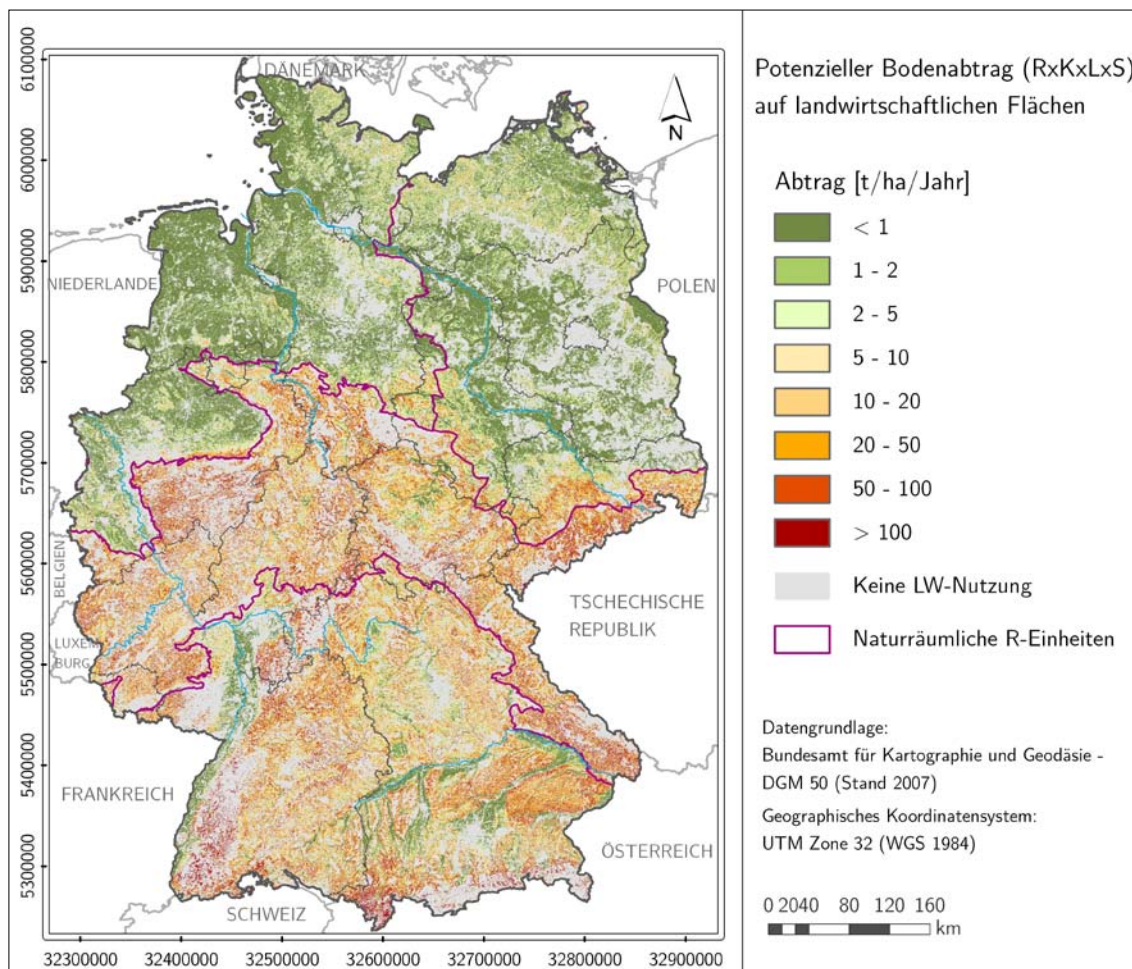


Abbildung 48: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) auf den landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand)

Die Ergebnisse wurden anschließend für die Naturräume der Bundesrepublik Deutschland aggregiert. Im Gegensatz zur rasterbasierten Darstellung lassen sich dadurch regionale Einheiten (Naturräume) hinsichtlich ihrer potenziellen Erosionsgefährdung klassifizieren und bewerten. Hinsichtlich der Wahl von Bezugseinheiten zur Berechnung mittlerer Bodenabträge bestehen zwei Möglichkeiten:

1. Aggregation der Ergebnisse mit Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche des Naturraumes - der mittlere Bodenabtrag kennzeichnet die Erosionsgefährdung aller landwirtschaftlichen Flächen eines Naturraumes, unabhängig von deren Flächenanteil an der Gesamtfläche.
2. Aggregation der Ergebnisse mit Bezug auf die Gesamtfläche des Naturraumes – der mittlere Bodenabtrag kennzeichnet die Gesamtgefährdung eines Naturraumes, unabhängig von der Gefährdung der landwirtschaftlichen Flächen.

Bei Variante (2) steht die Gesamtbilanz der Bodenabträge im Vordergrund, da der Gesamtabtrag aller landwirtschaftlichen Flächen auf die Gesamtfläche des Naturraumes



hoch gerechnet wird. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass hohe Bodenabträge nivelliert werden, wenn der Anteil landwirtschaftlicher Flächen in einem Naturraum gering ist.

Variante (1) betrachtet hingegen nur die landwirtschaftlichen Bezugseinheiten eines Naturraumes. So kann einem Naturraum auch dann ein hohes Gefährdungspotenzial zugewiesen werden, wenn der Flächenanteil landwirtschaftlicher Nutzfläche gering ist. Für die Darstellung der mittleren (aggregierten) Bodenabträge der Naturräume wurde die Darstellungsform nach Variante (1) gewählt, mit der sich das Gefährdungspotenzial der betroffenen Flächen eines Naturraumes abschätzen lässt. Hierzu ist es allerdings zwingend erforderlich, Informationen zum Flächenanteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche vorzuhalten, um die Ergebnisse vor dem Hintergrund der Gesamtbilanz eines Naturraumes interpretieren zu können.

Abbildung 49 zeigt den Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker und Grünland) an der jeweiligen Gesamtfläche eines Naturraumes. Danach weisen vor allem die durch Grünlandnutzung geprägten Naturräume des Nordwestdeutschen Tieflandes und der ackerbaulich geprägte Lössgürtel Mitteldeutschlands einen Flächenanteil von über 75 % auf.

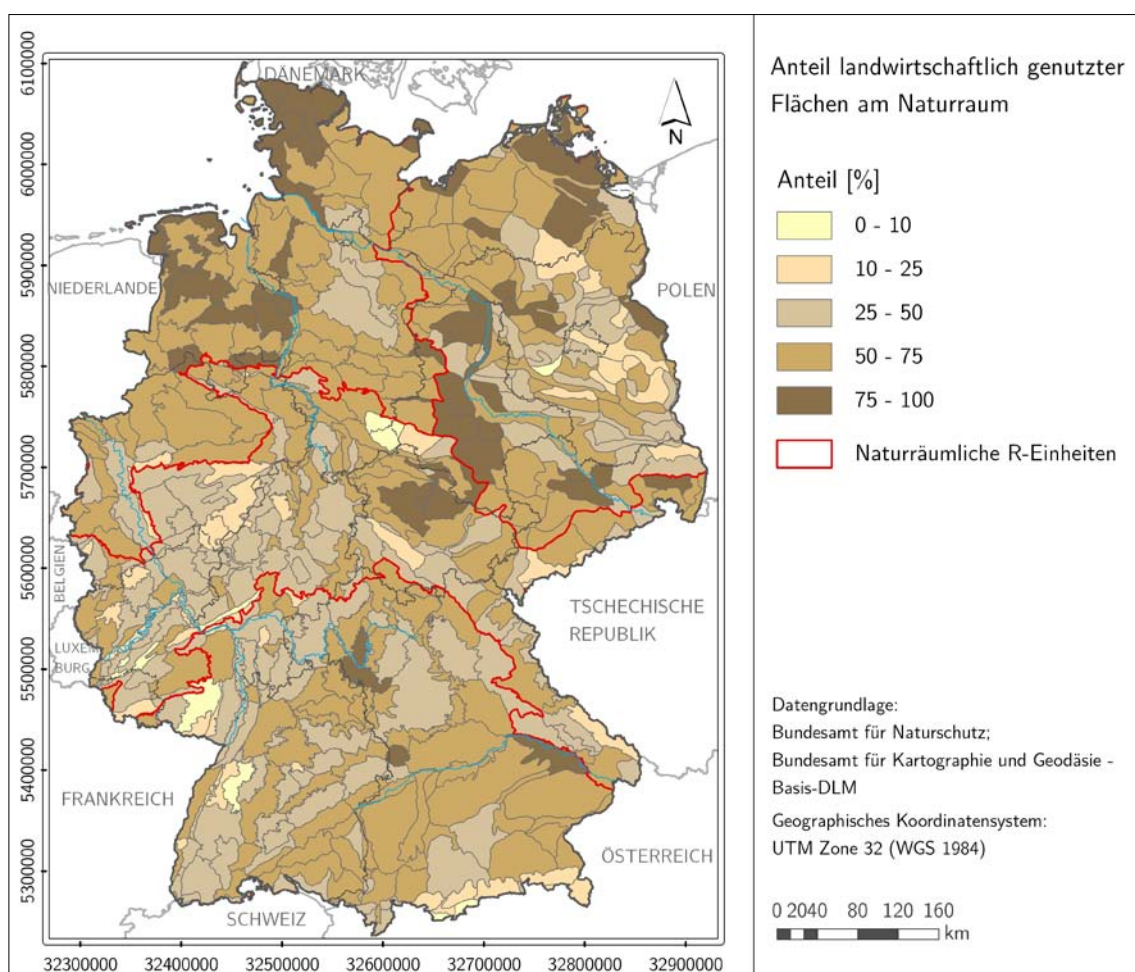


Abbildung 49: Flächenanteil landwirtschaftlicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume



Für den potenziellen Bodenabtrag des Ist-Zustandes ohne Berücksichtigung des L-Faktors (Variante R x K x S) zeigen Abbildung 50 (einschließlich Erläuterung der Box-Plot-Diagramme) und Tabelle 28 die statistischen Kenngrößen zur Charakterisierung des Abtragsverhaltens der Naturräume innerhalb der vier naturräumlichen R-Einheiten, welche zur Bestimmung der R-Faktoren-Anteile ausgewiesen wurden (Kap. 2.3.3). Demnach zeigen die Naturräume der norddeutschen Tiefländer ein ähnliches Abtragsverhalten. 50 % der Grundgesamtheit (innerhalb der Quartile) der Naturräume weisen mittlere Bodenabträge zwischen 0,3 und 1,8 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup> bzw. zwischen 0,4 und 1,6 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup> auf. Dagegen sind die potenziellen Bodenabträge in den Mittelgebirgsbereichen und in Süddeutschland erwartungsgemäß deutlich höher, wobei die Haupteinheit ‚Südliche Mittelgebirge und Alpen‘ den größten Quartilbereich aufweist (zwischen 9,2 und 36,8 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup>).

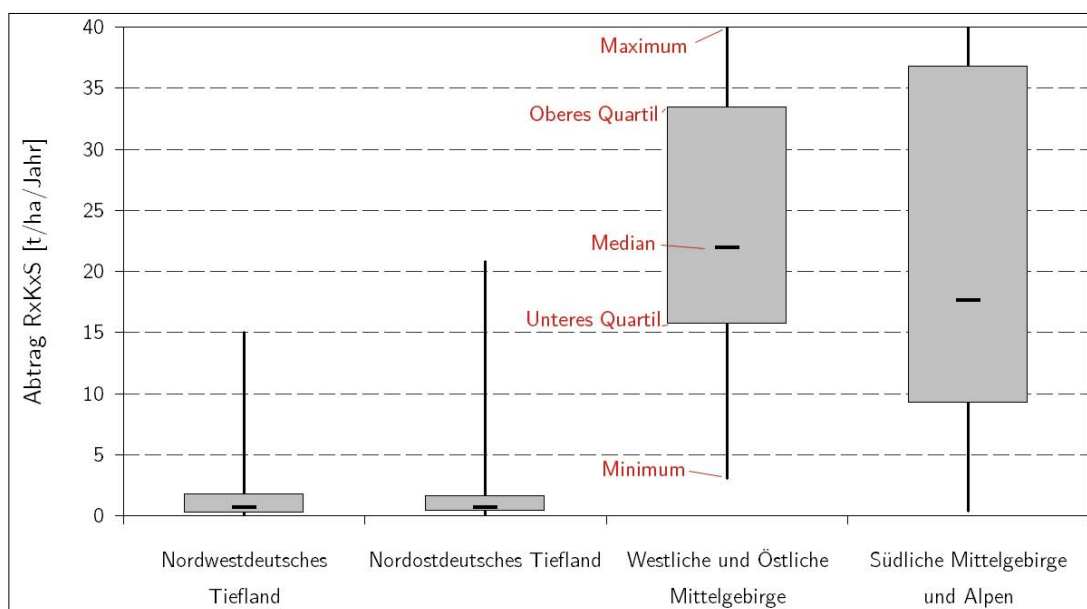


Abbildung 50: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der potenziellen Bodenabträge (RxKxS) der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten

Naturräumliche R-Einheit	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	0,6	1,5	0,0	15,1	1,8	0,3
Nordostdeutsches Tiefland	0,7	1,8	0,1	20,8	1,6	0,4
Westliche & Östliche Mittelgebirge	21,9	26,6	3,1	94,3	33,5	15,7
Südliche Mittelgebirge und Alpen	17,6	48,7	0,4	446,5	36,8	9,2

Tabelle 28: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [txha<sup>-1</sup>xJahr<sup>-1</sup>]



Abbildung 51 zeigt die räumliche Verteilung und Klassifizierung der Naturräume hinsichtlich ihres potenziellen Bodenabtrages. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung der Naturräume unabhängig vom Anteil der landwirtschaftlichen Fläche vorgenommen wurde. Demzufolge weisen Bereiche der Alpen und des Schwarzwaldes mittlere Abträge  $> 100 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$  auf, obwohl der Anteil der betroffenen Fläche in den Naturräumen nach Abbildung 49 zumeist deutlich unter 50 % liegt.

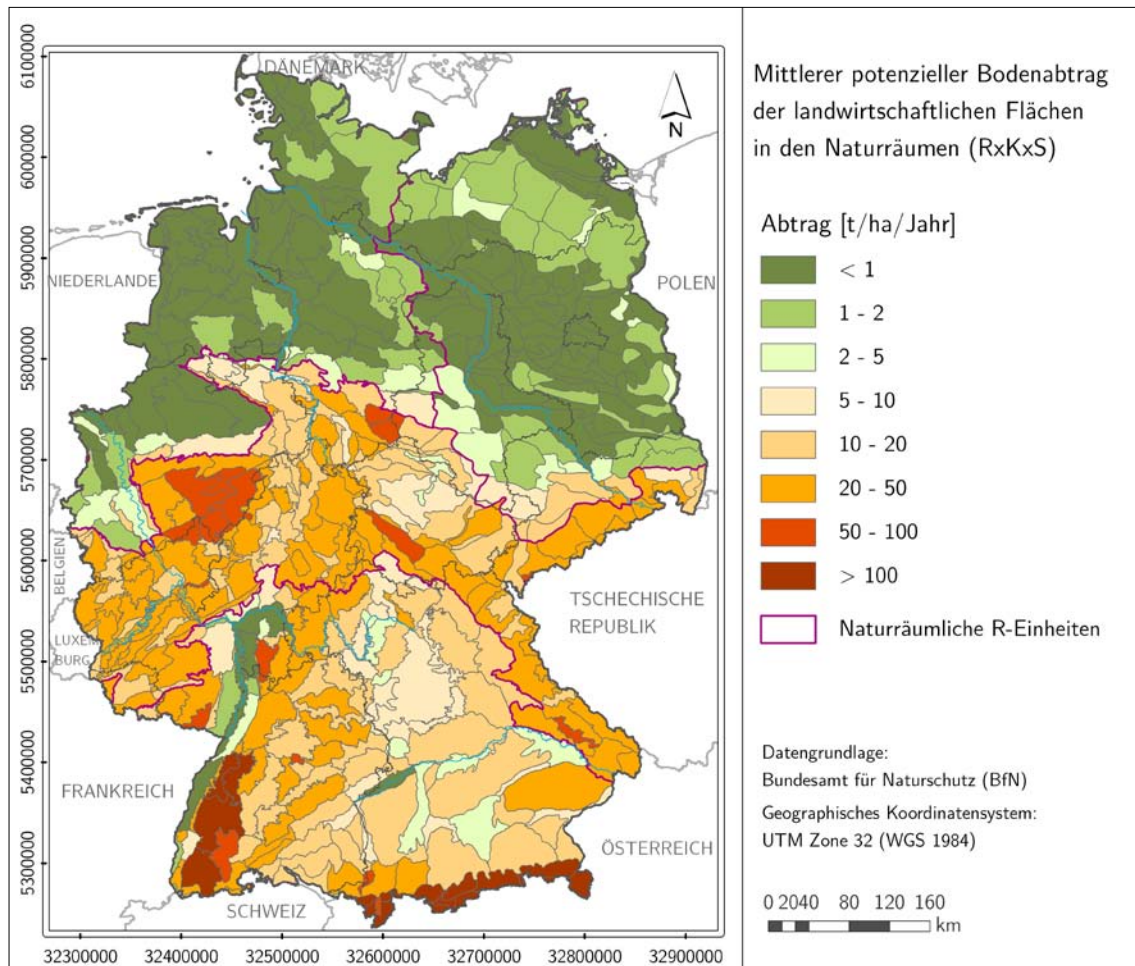


Abbildung 51: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands (Ist-Zustand)

Unter zusätzlicher Einbindung des L-Faktors zeigt sich flächendeckend eine modellbedingte Erhöhung der potenziellen Abtragsraten, da L-Faktoren  $< 1,0$  nur bei sehr geringen erosiven Hanglängen von etwa 20 m und weniger auftreten. Maßstabsbedingt können auf Basis des DGM 50 derartige Hanglängen nicht ausgewiesen werden.



Gegenüber Abbildung 50 und Tabelle 28 zeigen die statistischen Kennwerte für die norddeutschen Tiefländer sowie die südlichen Mittelgebirge und Alpen in etwa eine Verdoppelung der berechneten Bodenabträge. In den westlichen und östlichen Mittelgebirgen zeigt sich mit Blick auf Median-, Quartil- und Mittelwert hingegen eine über 100 %-ige Erhöhung der mittleren Bodenabträge in den Naturräumen.

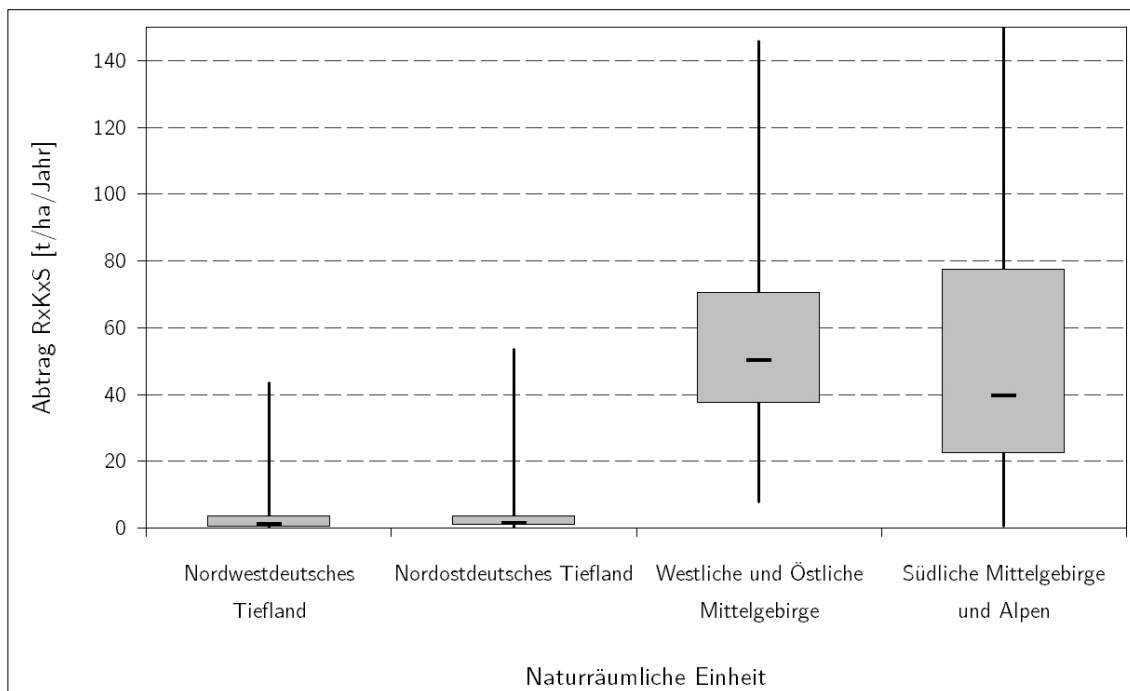


Abbildung 52: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der potenziellen Bodenabträge (RxKxLxS) der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten

Naturräumliche R-Einheit	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1,2	3,3	0,0	43,6	3,8	0,4
Nordostdeutsches Tiefland	1,4	4,4	0,2	53,4	3,5	0,8
Westliche & Östliche Mittelgebirge	50,1	56,3	7,8	145,8	70,6	37,2
Südliche Mittelgebirge und Alpen	39,5	95,5	0,6	964,8	77,5	22,4

Tabelle 29: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [ $\text{t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ ]



Abbildung 53 zeigt die räumliche Verteilung und Klassifizierung der Naturräume hinsichtlich ihres potenziellen Bodenabtrages unter zusätzlicher Berücksichtigung der erosiven Hanglänge.

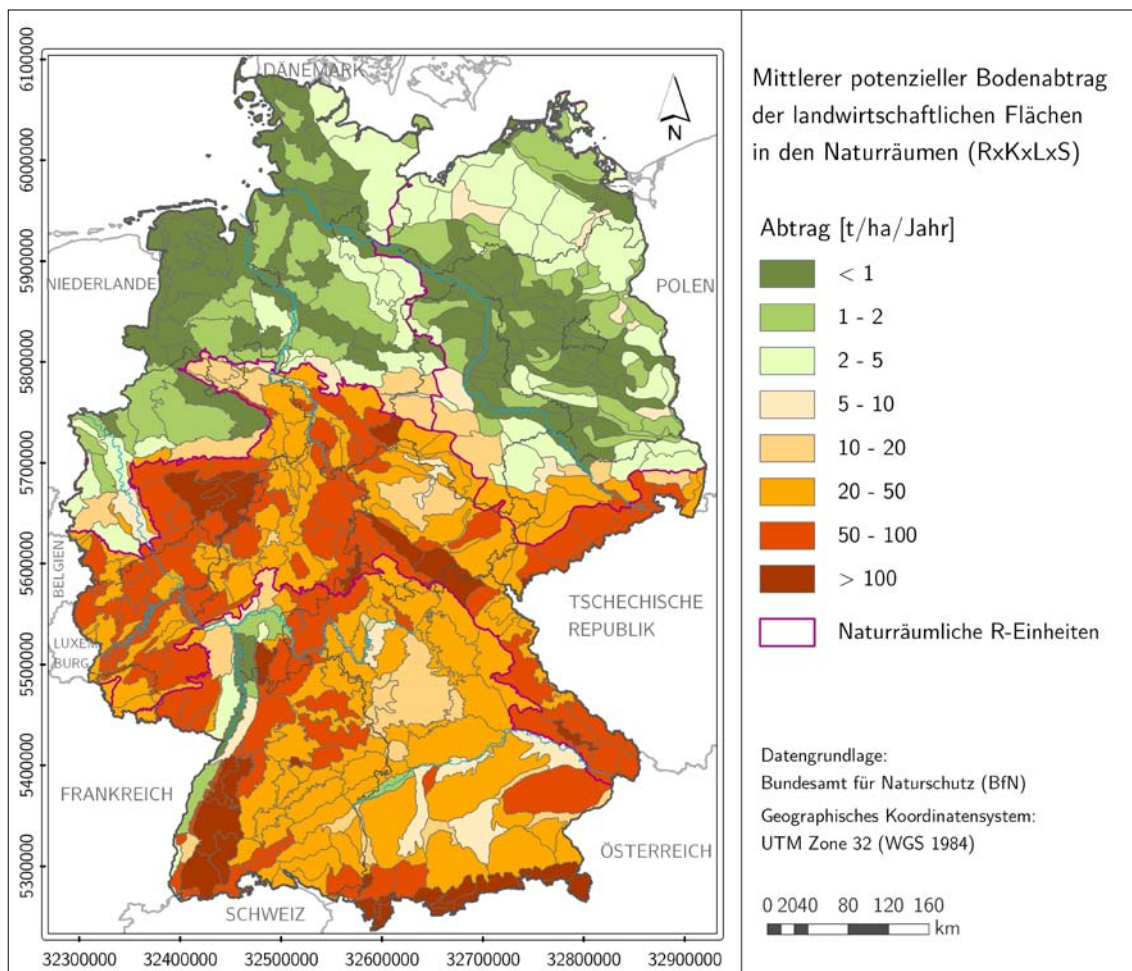


Abbildung 53: Potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands (Ist-Zustand)

Eine ausführliche Bewertung aller Naturräume kann an dieser Stelle nicht vorgenommen werden. In Tabelle 30 sind exemplarisch die Naturräume aufgeführt, die innerhalb jeder Haupteinheit die größten mittleren Bodenabträge aufweisen. Zusätzlich wurden nur Naturräume mit einer Landwirtschaftsfläche (LW) von über 100 km<sup>2</sup> und einem LW-Anteil > 50 % betrachtet (Anzahl = 256). Die Schwerpunktgebiete in den norddeutschen Tiefländern befinden sich im westlichen Harzvorland und im sächsischen Lösshügelland, das heißt, im stärker reliefierten Übergangsbereich zur Haupteinheit der westlichen und östlichen Mittelgebirge (Abbildung 54).

Deutlich höhere Bodenabträge, bei allerdings auch geringeren LW-Anteilen, zeigen die ausgewählten Naturräume der Mittelgebirge und Alpen. Eine räumliche Konzentration ist an den Alpen und im Bereich der Mittelgebirge erkennbar.





Naturräumliche R-Einheit	Naturraum	LW-Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil LW-Fläche [%]	Mittlerer Abtrag auf LW-Fläche [txha <sup>-1</sup> xJahr <sup>-1</sup> ]
Nordwestdeutsches Tiefland	Hellwegbörden	1083,7	67,3	18,5
	Harzrandmulde	946,4	74,4	17,0
	Ostbraunschweigisches Hügelland	879,8	71,4	13,5
Nordostdeutsches Tiefland	Mittelsächsisches Lösslehmhügelland	834,8	70,9	44,9
	Erzgebirgisches Becken	332,5	53,7	44,2
	Mittelsächsisches Lössgebiet	743,5	82,3	41,5
Westliche & Östliche Mittelgebirge	Unteres Westerzgebirge	616,5	51,7	91,6
	Passauer Abteiland & Neuburger Wald	548,5	50,8	91,5
	Islek	399,1	52,2	88,9
Südliche Mittelgebirge und Alpen	Illervorberge	498,1	64,2	85,9
	Hegaualb	544,3	60,4	79,9
	Alb-Wutach-Gebiet	233,6	54,4	79,5

Tabelle 30: Mittlerer potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) in ausgewählten Naturräumen [txha<sup>-1</sup>xJahr<sup>-1</sup>]

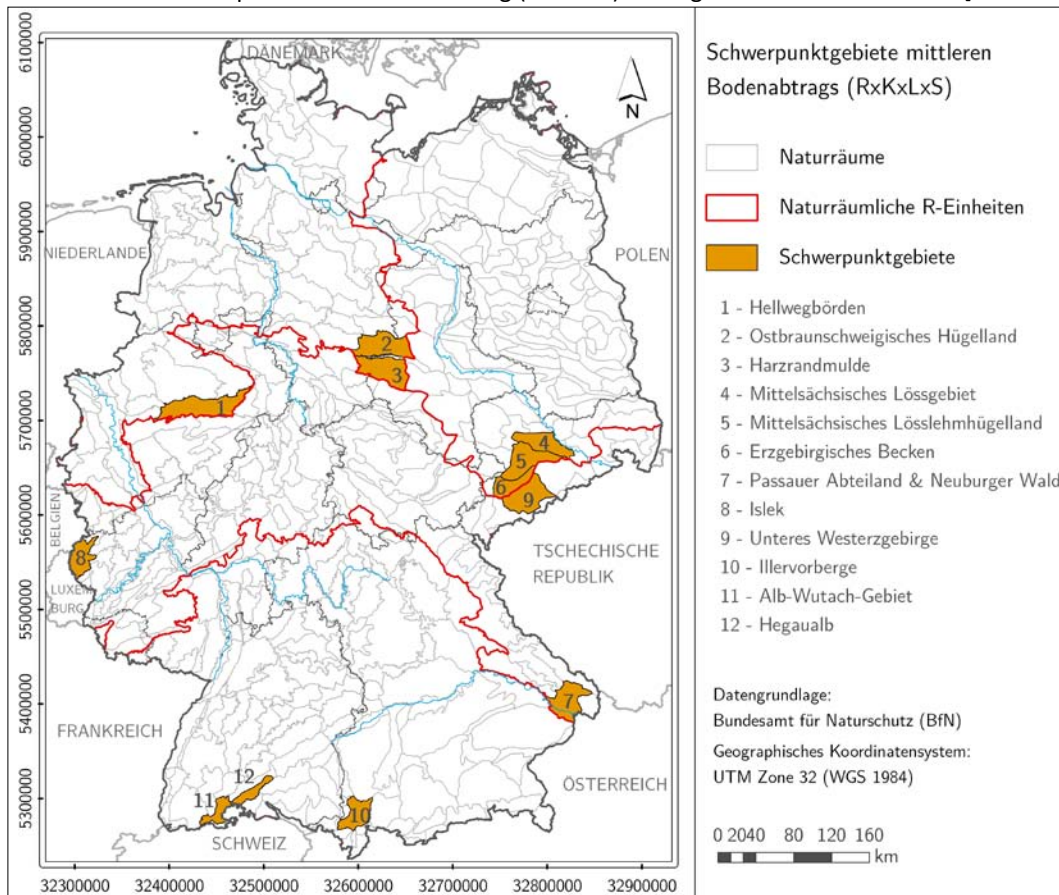


Abbildung 54: Lage ausgewählter Naturräume mit hohem potentiellen Bodenabtrag



### 3.3 Nutzungsabhängige Erosionsgefährdung in Deutschland

Die Betrachtung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung erfolgt unter Einbeziehung der verschiedenen Varianten des C-Faktors, die verschiedene Annahmen zum Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung (0 %, 25 %, 50 %, 100 %) berücksichtigen (vgl. Abbildung 39 bis 40). Im Gegensatz zum potenziellen Bodenabtrag wurde bei der Berechnung des L-Faktors der Nutzungswechsel zwischen Acker- und Grünlandstandorten als Hang verkürzend betrachtet.

Das höchste nutzungsabhängige Gefährdungspotenzial weisen die Ackerflächen im südlichen Niedersachsen und östlichen Nordrhein-Westfalen (Unteres Weserbergland, Weser-Leine-Bergland), in den mittelsächsischen Lössgebieten, im hessischen Bergland, im nördlichen Baden-Württemberg sowie im Donau-Isar- und Isar-Inn-Hügelland (Bayern) auf. Abbildung 55 zeigt den nutzungsabhängigen Bodenabtrag auf Basis des DGM 50 unter Annahme einer zu 100 % konventionellen Bodenbearbeitung. Gegenüber der potenziellen Erosionsgefährdung (vgl. Abbildung 48) wird deutlich, dass vor allem die landwirtschaftlichen Flächen der Alpen und der mittleren und hohen Lagen der Mittelgebirge nicht ackerbaulich genutzt werden und somit dort vorwiegend eine hohe potenzielle, aber nur eine sehr geringe nutzungsabhängige Erosionsgefährdung besteht. Die Ursachen des sehr geringen Ackeranteils liegen zum einen in den hohen Hangneigungen und andererseits in den klimatischen Verhältnissen (hohe Niederschlagssummen) begründet, welche beide eine ackerbauliche Nutzung kaum zulassen. Aufgrund der niedrigeren Erosionsanfälligkeit der Böden (vgl. Abbildung 32) und großräumig geringen Hangneigungen sind Regionen mittlerer und höherer Erosionsgefährdung in den norddeutschen Tieflandgebieten nur lokal vorzufinden.

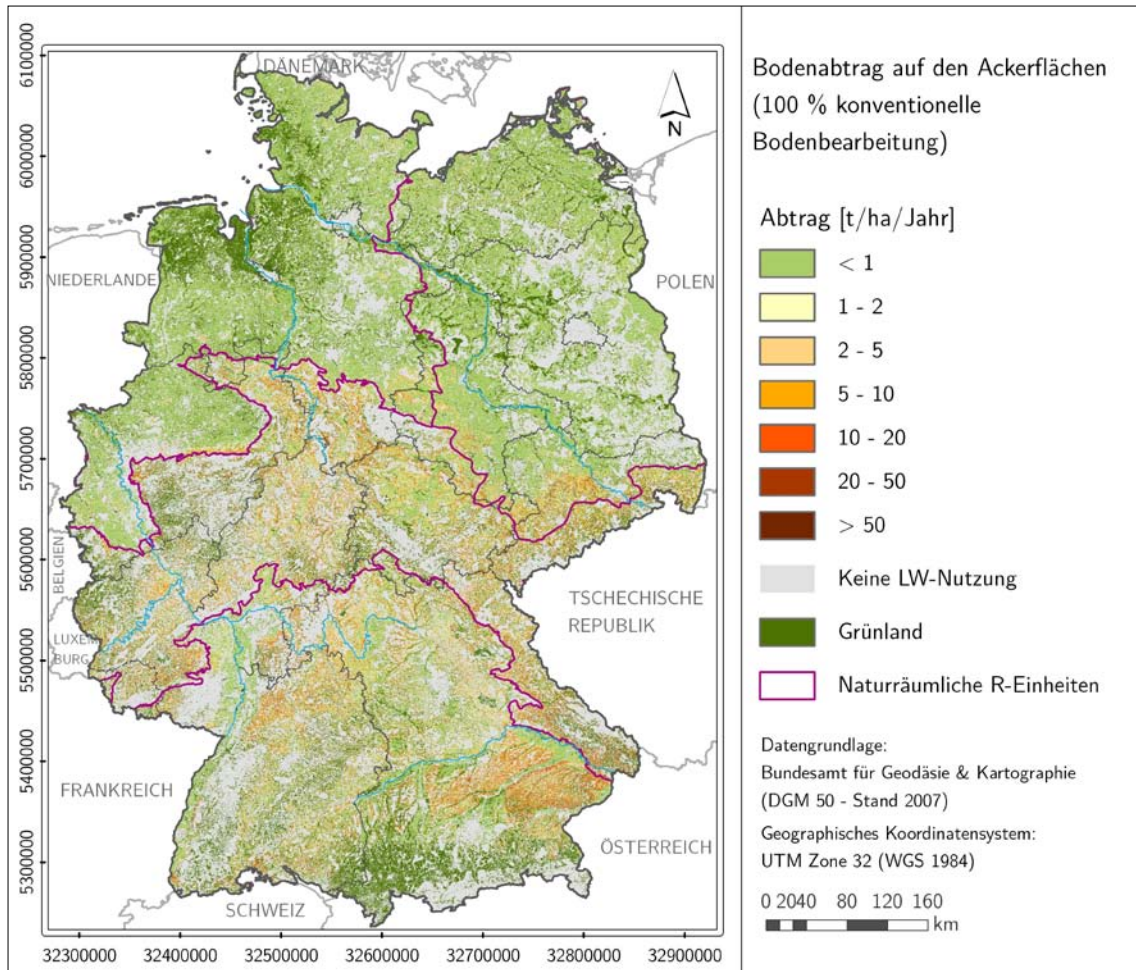


Abbildung 55: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag (100 % konventionelle Bodenbearbeitung) auf den landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands (Ist-Zustand)

Mit steigendem Anteil konservierender Bodenbearbeitungsmaßnahmen nehmen die nutzungsabhängigen Bodenabträge flächendeckend ab, wie anhand des in Abbildung 56 dargestellten Beispiels für die Annahme einer 50 % konservierenden Bodenbearbeitung deutlich wird.

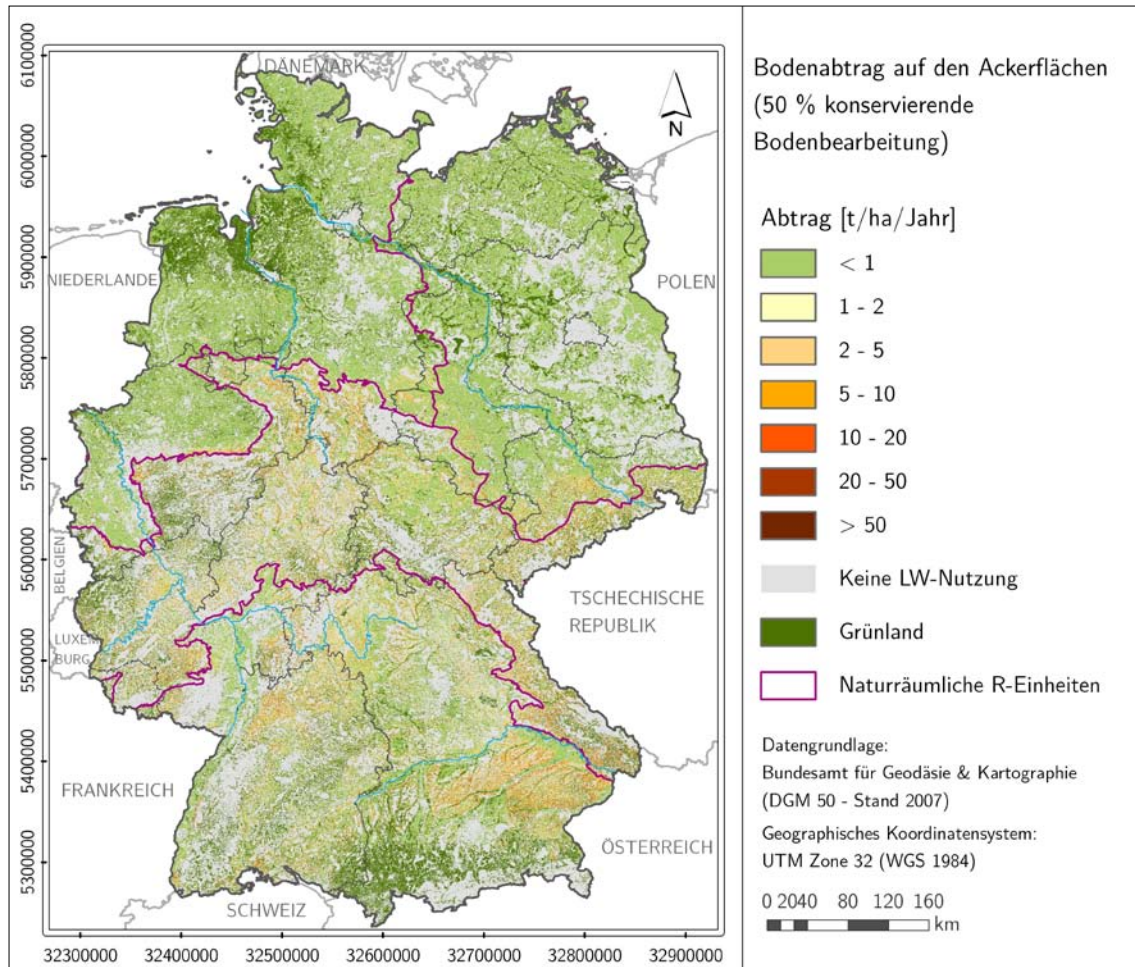


Abbildung 56: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag (50 % konservierende Bodenbearbeitung) auf den Ackerflächen Deutschlands (Ist-Zustand)

Dabei zeigt sich insbesondere in Teilen des nordostdeutschen Tieflandes ein hoher Rückgang der Bodenabträge (Tabelle 31). Andererseits weisen Regionen mit einem hohen Anteil an Hackfrüchten und Mais einen hohen C-Faktor mit entsprechend hohen Bodenabträgen auf. Die Anwendung bodenschonender Bewirtschaftungsmaßnahmen hätte für diese Fruchtarten eine überdurchschnittliche Reduzierung des C-Faktors und somit der Erosionsgefährdung zur Folge. Dagegen ist für Raps und Getreide, die vor allem in Nordwestdeutschland verbreitet angebaut werden, von geringeren Effekten hinsichtlich der Anwendung konservierender Bodenbearbeitungsmaßnahmen auszugehen (Abbildung 57).



Naturräumliche R-Einheit	Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung		
	25 %	50 %	100 %
Nordwestdeutsches Tiefland	-21,4 %	-32,5 %	-71,6 %
Nordostdeutsches Tiefland	-25,1 %	-47,1 %	-74,7 %
Westliche & Östliche Mittelgebirge	-21,9 %	-41,3 %	-72,8 %
Südliche Mittelgebirge und Alpen	-21,9 %	-39,7 %	-74,5 %
Deutschland	-22,2 %	-40,7 %	-73,6 %

Tabelle 31: Rückgang der mittleren Bodenabträge in den naturräumlichen Haupteinheiten in Abhängigkeit vom Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung

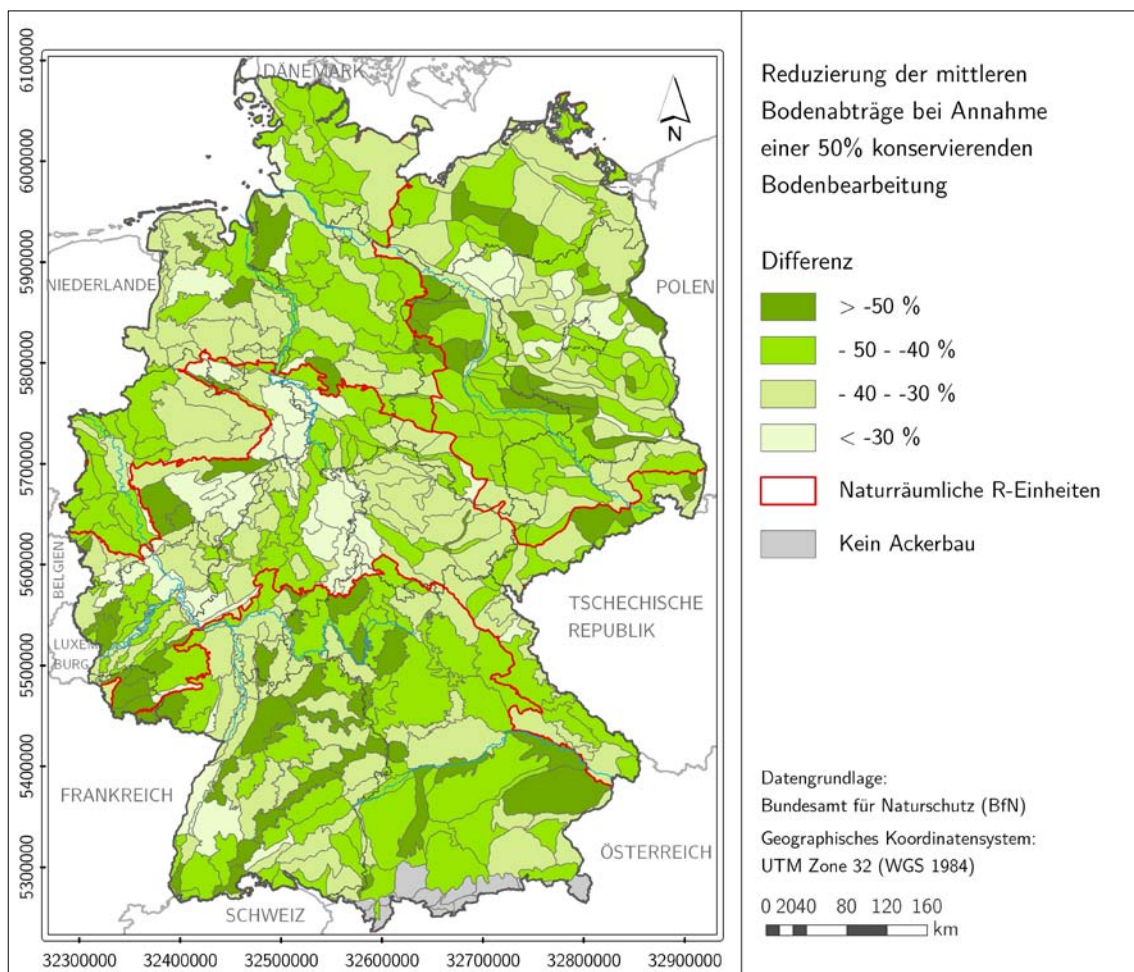


Abbildung 57: Reduzierung der Bodenabträge gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung bei Annahme einer 50 % konservierenden Bodenbearbeitung



Die Aggregation der als Rasterdatensatz vorliegenden Ergebnisse für die Naturräume Deutschlands wurde adäquat der in Kapitel 3.3 dokumentierten Vorgehensweise vorgenommen. Im Gegensatz zur potenziellen Erosionsgefährdung gelten beim nutzungsabhängigen Bodenabtrag die ackerbaulich genutzten Flächen als Bezugseinheiten. Insofern stellen die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse die mittleren Bodenabträge, bezogen auf die Ackerflächen eines Naturraumes dar. Abbildung 58 zeigt den Anteil der ackerbaulich genutzten Flächen an der jeweiligen Gesamtfläche eines Naturraumes. Danach weisen vor allem die durch fruchtbare Lössböden geprägten Standorte Ostdeutschlands die größten Flächenanteile auf.

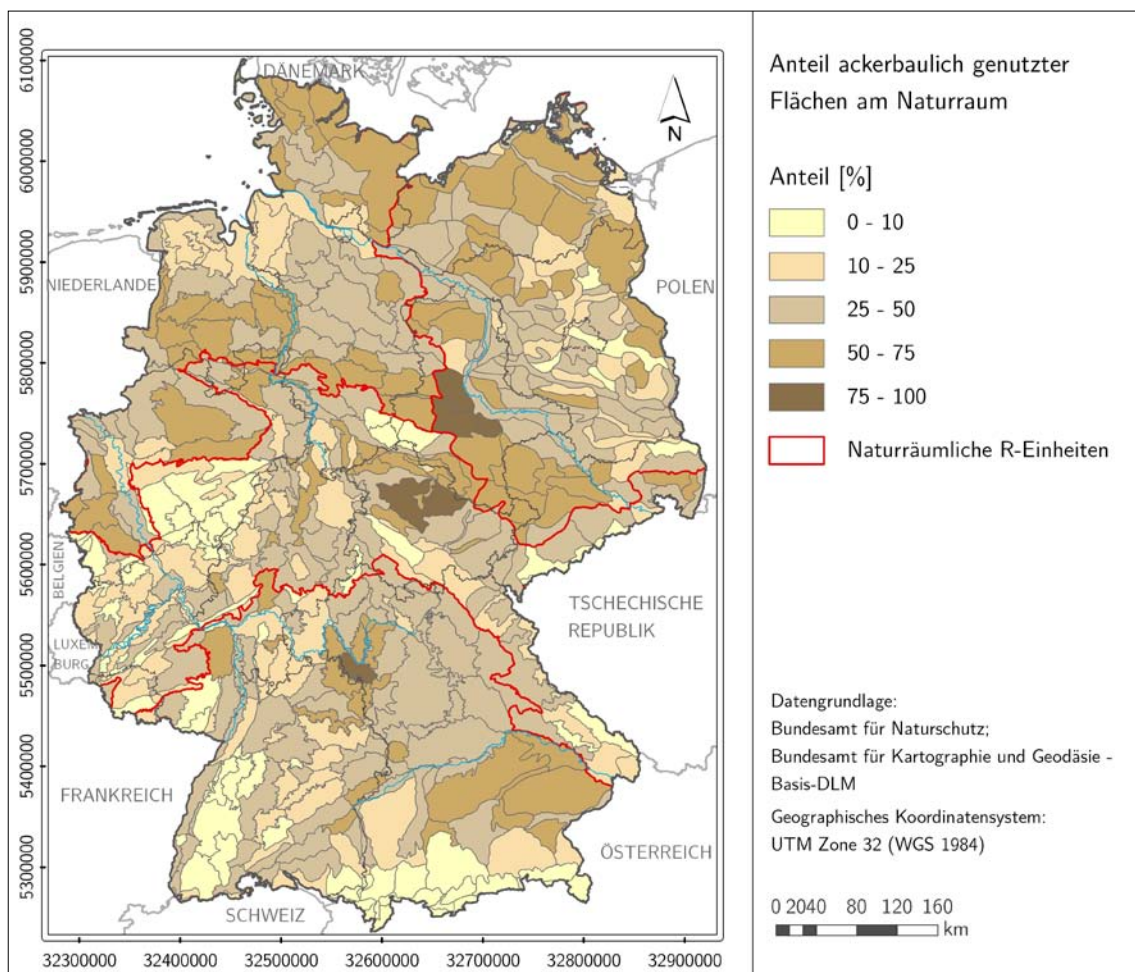


Abbildung 58: Flächenanteil ackerbaulicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume

Die statistischen Kennwerte des mittleren Bodenabtrages der Naturräume in den naturräumlichen R-Einheiten sind für die vier unterschiedlichen Annahmen zur konservierenden Bodenbearbeitung in Tabelle 32 und Abbildung 59 zusammengefasst. Entsprechend der Ergebnisse für den potenziellen Bodenabtrag zeigen auch die Resultate unter Einbeziehung der Bodennutzung für die norddeutschen Tiefländer ein vergleichbares Ergebnis, wobei die Maximalwerte im nordostdeutschen Tiefland aufgrund der höheren Erosionsgefährdung in den sächsischen Lössgebieten höher liegen. Eine Ver-



schiebung der Kennwerte ist für die beiden anderen Haupteinheiten erkennbar. In den westlichen und östlichen Mittelgebirgen weisen die durch die Quartile charakterisierten 50 % der Grundgesamtheit aller Naturräume einen höheren Wertebereich auf als die Naturräume der südlichen Mittelgebirge und Alpen. Auch die Mittelwerte sind in dieser Haupteinheit größer. Bei der potenziellen Erosionsgefährdung zeigten beide Naturraumeinheiten ein umgekehrtes Bild. Die Ursache liegt im deutlich höheren Grünlandanteil in den südlichen Mittelgebirgen und den Alpen begründet. Diese, vor allem in den erosionsgefährdeten Hanglagen bewirtschafteten Flächen, werden bei der nutzungsabhängigen Bewertung aus der Betrachtung genommen.

Naturräumliche R-Einheit	Konservierende Bodenbearbeitung (Anteil)	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	0 %	0,2	0,4	0,0	3,6	0,5	0,1
	25 %	0,2	0,3	0,0	2,8	0,4	0,1
	50 %	0,1	0,3	0,0	2,3	0,3	0,0
	100 %	0,1	0,1	0,0	1,0	0,1	0,0
Nordostdeutsches Tiefland	0 %	0,2	0,5	0,0	5,9	0,4	0,1
	25 %	0,1	0,4	0,0	4,4	0,3	0,1
	50 %	0,1	0,3	0,0	3,1	0,2	0,1
	100 %	0,1	0,1	0,0	1,6	0,1	0,0
Westliche & Östliche Mittelgebirge	0 %	5,3	6,0	0,0	24,0	6,9	3,9
	25 %	4,2	4,7	0,0	17,7	5,4	3,1
	50 %	3,1	3,6	0,0	13,9	4,2	2,3
	100 %	1,4	1,6	0,0	5,1	1,9	1,1
Südliche Mittelgebirge und Alpen	0 %	3,0	4,0	0,0	28,5	5,4	1,4
	25 %	2,5	3,1	0,0	21,4	4,2	1,1
	50 %	2,0	2,4	0,0	16,5	3,2	0,8
	100 %	0,9	1,1	0,0	16,5	1,3	0,4

Tabelle 32: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [ $\text{txha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ ]

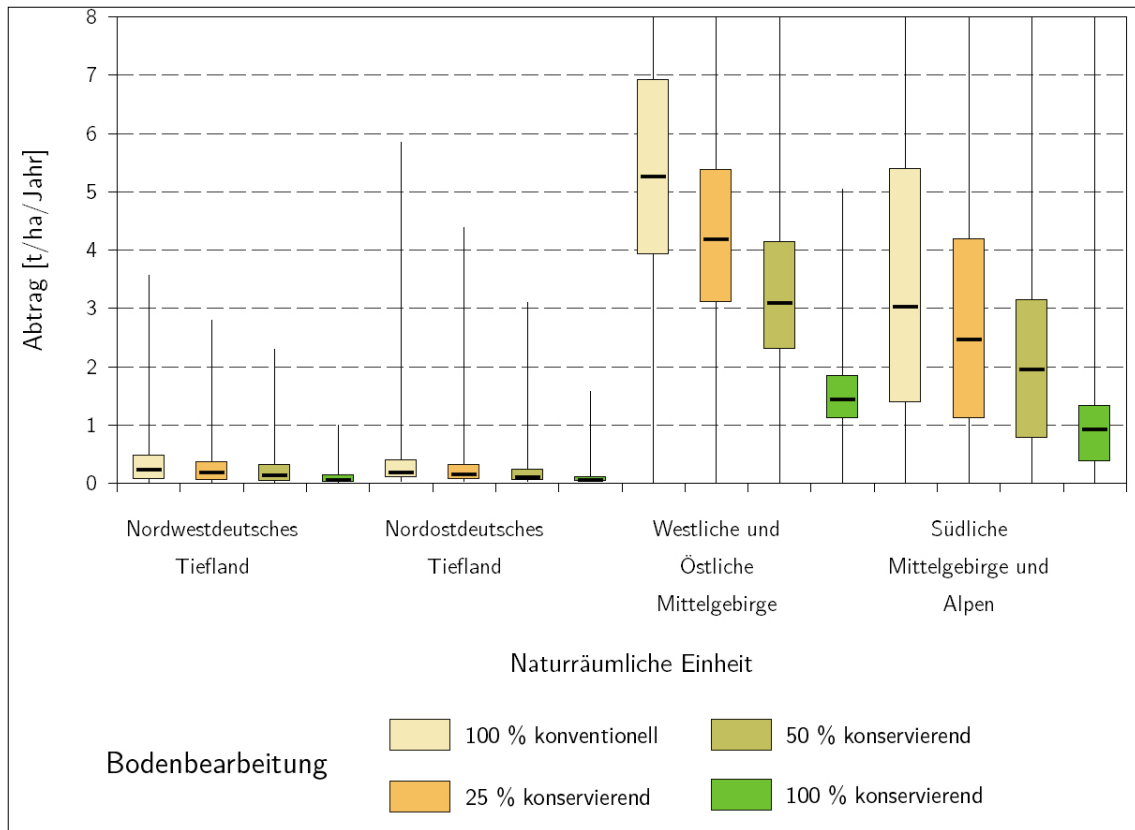


Abbildung 59: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der nutzungsabhängigen Bodenabträge der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung

Abbildung 60 zeigt die räumliche Verteilung und Klassifizierung der Naturräume hinsichtlich ihres nutzungsabhängigen Bodenabtrages für vier verschiedene Bodenbearbeitungsvarianten. Neben der Kennzeichnung der Naturräume hinsichtlich ihrer Erosionsgefährdung wird der erosionsmindernde Einfluss eines steigenden Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung erkennbar. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Klassifizierung der Naturräume unabhängig vom Anteil der ackerbaulichen Fläche vorgenommen wurde. Somit liegen vor allem in den Naturräumen des Schwarzwaldes, des Bergischen Landes und des Bayerischen Waldes bei der Variante der zu 100 % konventionellen Bodenbearbeitung die mittleren Abträge bei über  $10 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ . Gleichzeitig beträgt dort der Anteil der ackerbaulich genutzten Fläche zumeist unter 10 % (Abbildung 58).



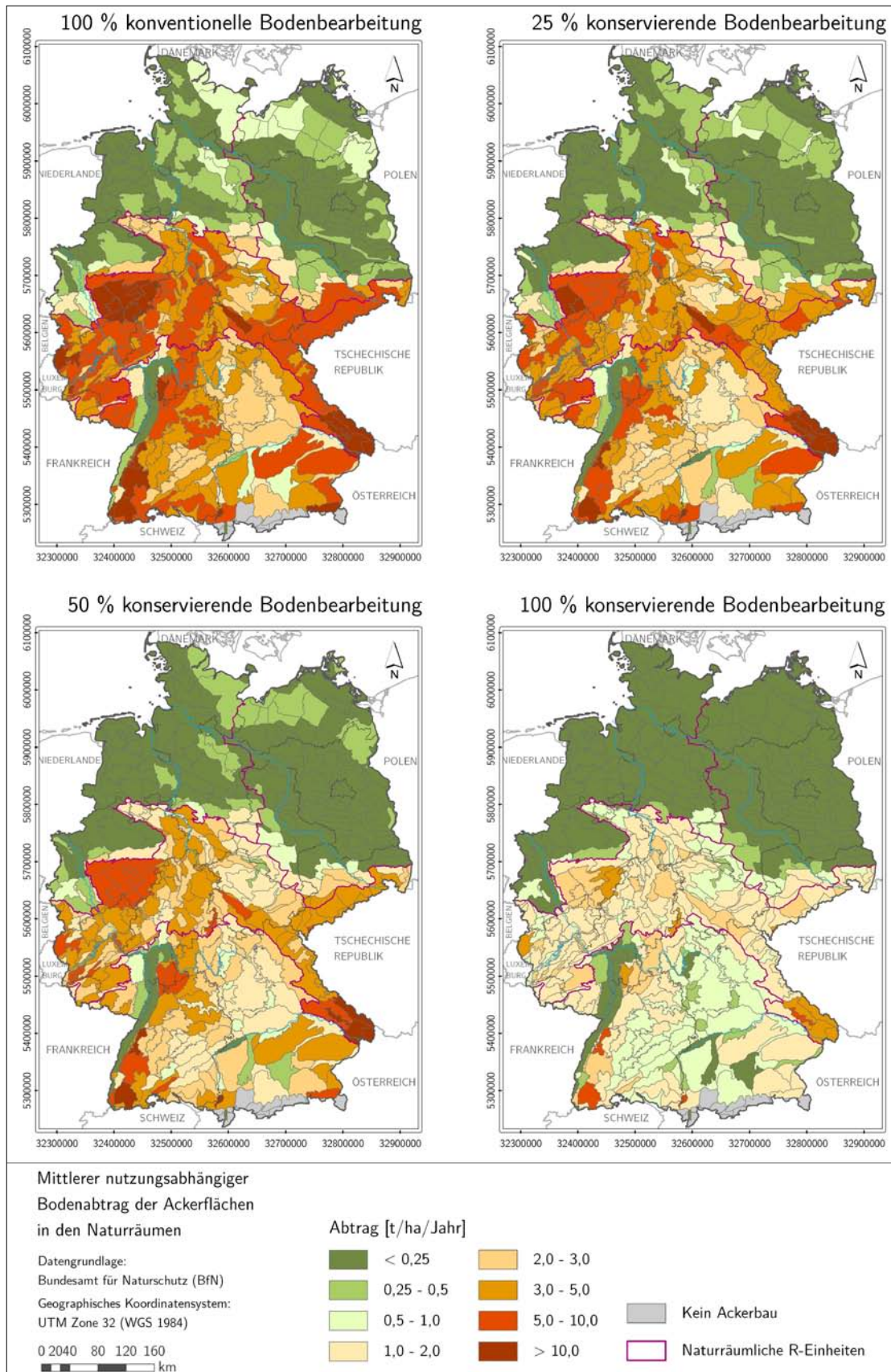


Abbildung 60: Nutzungsabhängiger Bodenabtrag der ackerbaulichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands für verschiedene Annahmen des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung



In Tabelle 33 sind die Naturräume, deren Ackerflächen die höchsten mittleren Bodenabträge aufweisen, aufgeführt. Ausgewählt wurde die Variante unter Annahme einer 50 % konservierenden Bodenbearbeitung. Betrachtet wurden dabei alle Naturräume mit einer ackerbaulich genutzten Gesamtfläche von > 100 km<sup>2</sup> und einem Ackeranteil von mehr als 25 % (Anzahl = 303).

Eine räumliche Konzentration ist im Übergangsbereich zwischen sächsischem Lösshügelland und Erzgebirge erkennbar (Abbildung 61). Mit den Naturräumen ‚Hellwegbörden‘, ‚Harzrandmulde‘, ‚Erzgebirgisches Becken‘, ‚Mittelsächsisches Lösslehmhügelland‘, ‚Unteres Westerzgebirge‘ und ‚Hegaualb‘ weisen innerhalb ihrer naturräumlichen R-Einheiten sowohl die höchsten potenziellen als auch nutzungsabhängigen Bodenabträge auf (vgl. Tabelle 30).

Naturräumliche R-Einheit	Naturraum	Ackerfläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil Ackerfläche [%]	Mittlerer Abtrag auf Ackerfläche [txha <sup>-1</sup> xJahr <sup>-1</sup> ]
Nordwestdeutsches Tiefland	Ville	68,0	31,6	1,74
	Hellwegbörden	929,1	57,7	1,48
	Harzrandmulde	861,6	67,8	1,43
Nordostdeutsches Tiefland	Erzgebirgisches Becken	223,7	36,1	3,10
	Oberes Pleißeland	150,0	59,5	3,02
	Mittelsächsisches Lösslehmhügelland	637,3	54,1	2,76
Westliche & Östliche Mittelgebirge	Falkensteiner Vorwald	347,7	33,2	5,25
	Unteres Westerzgebirge	340,0	28,5	4,95
	Glan-Alsens-Berg- und Hügelland	557,0	33,6	4,91
Südliche Mittelgebirge und Alpen	Markgräfler Hügelland	57,3	26,8	6,25
	Hegaualb	120,1	30,5	5,24
	Isar-Inn-Hügelland	1942,5	52,9	4,89

Tabelle 33: Mittlerer nutzungsabhängiger Bodenabtrag in ausgewählten Naturräumen bei Annahme eines Anteils von 50 % konservierender Bodenbearbeitung [txha<sup>-1</sup>xJahr<sup>-1</sup>]

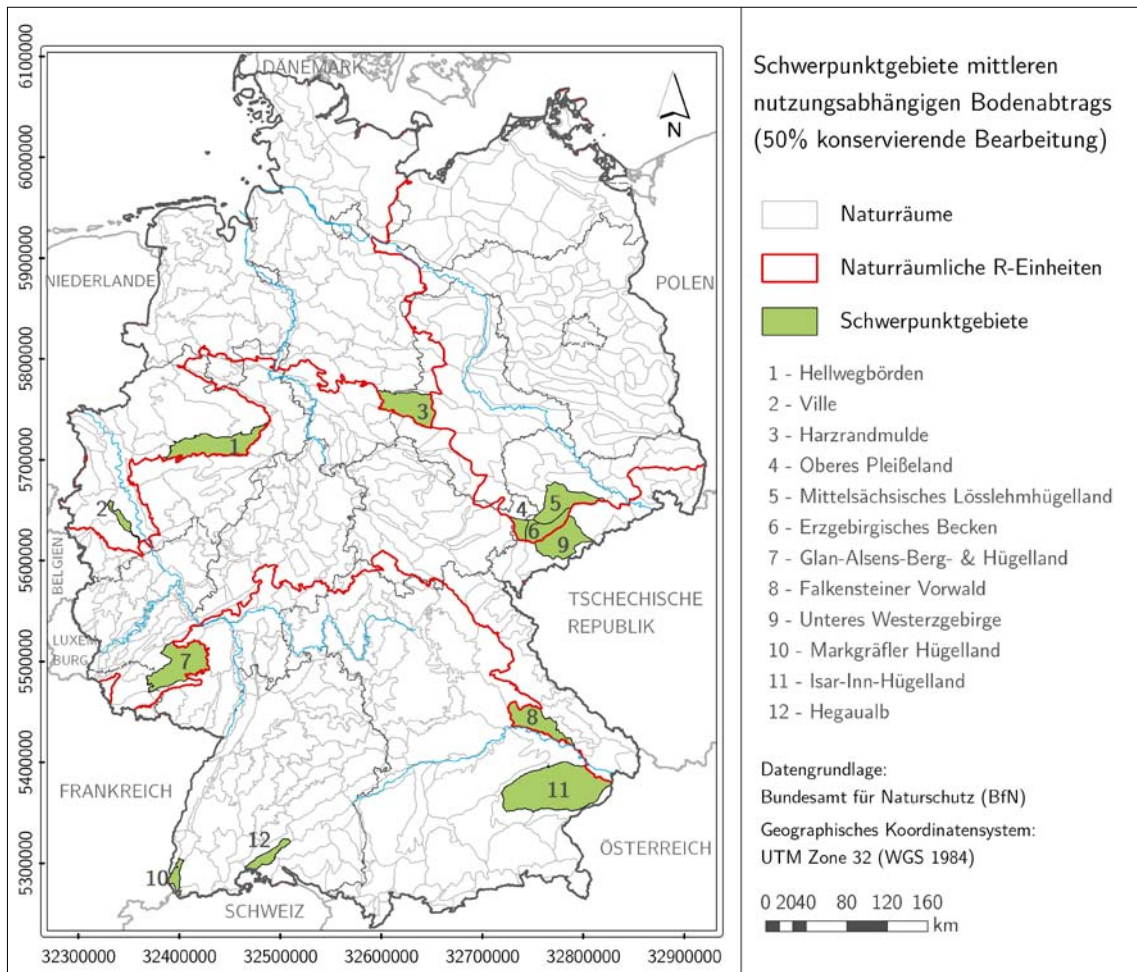


Abbildung 61: Lage ausgewählter Naturräume mit hohem nutzungsabhängigem Bodenabtrag (50 % konservierende Bodenbearbeitung)

## 4 R-Faktoren und Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen

### 4.1 R-Faktoren der Szenarienzeiträume

#### 4.1.1 Entwicklung der Niederschläge

Die Ergebnisse des WETTREG-Modells zeigen für die Entwicklung der ganzjährigen Niederschläge im ersten Szenarienzeitraum 2011 bis 2040 eine leichte Zunahme in allen naturräumlichen R-Einheiten (Tabelle 34). Innerhalb der Haupteinheiten muss die Entwicklung hingegen differenziert betrachtet werden. So zeigen einzelne Regionen auch rückläufige Tendenzen (Abbildung 63). Vor allem in Sachsen und im südlichen Brandenburg haben diese Veränderungen vor dem Hintergrund der bereits gegenwärtig geringen Niederschlagssummen (vgl. Abbildung 62) um so stärkere Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit.

Von 2041 bis 2070 und ab 2071 muss die Entwicklung der Niederschlagsverteilung in Deutschland differenziert betrachtet werden. Verzeichnen der Nordwesten und Westen Deutschlands bis 2070 eine Niederschlagszunahme, so dehnen sich die Regionen mit abnehmenden Niederschlagssummen in Ost- und Süddeutschland aus. Zwischen 2071 und 2100 nehmen die Jahresniederschläge im Nordwesten und Westen Deutschlands, aber auch im Bereich der deutschen Mittelgebirgsschwelle weiter zu. In großen Teilen Ostdeutschlands sowie Bayerns und Baden-Württembergs sind auch für den letzten Szenarienzeitraum geringere Niederschlagssummen als gegenwärtig zu erwarten, wobei gegenüber der Periode 2041-2070 vergleichsweise geringe Veränderungen auftreten.

Die in Tabelle 34 dargestellte Entwicklung der zukünftigen Sommerniederschläge zeigt für die Perioden 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100 einen deutlichen Rückgang in allen Regionen. Unter Berücksichtigung der gegenübergestellten Jahresniederschläge nimmt demnach die Bedeutung der Winterniederschläge deutlich zu. Da diese Entwicklung auch eng an die Veränderung der Starkniederschlagssummen gekoppelt ist, wurde, um die innerjährliche Verschiebung der (Stark-)Niederschlagssummen entsprechend zu berücksichtigen, die Anwendung der Regressionsgleichungen zur Regionalisierung der R-Faktoren auf Basis der Jahresniederschläge bevorzugt.

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Jahresniederschlag [mm]	Sommerniederschlag [mm]	Veränderung Jahresniederschlag [%]	Differenz Sommerniederschlag [mm]
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	710,6	376,4		
	2011-2040	727,5	380,1	+ 2,4	+ 1,0
	2041-2070	737,2	343,7	+ 3,7	- 8,7
	2071-2100	743,3	328,8	+ 4,6	- 12,6
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	556,3	308,3		
	2011-2040	560,4	317,9	+ 0,7	+ 3,1
	2041-2070	537,4	267,9	- 3,4	- 13,1
	2071-2100	533,1	253,5	- 4,2	- 17,8
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	793,3	412,9		
	2011-2040	795,3	411,2	+ 0,3	- 0,4
	2041-2070	786,6	362,3	- 0,8	- 12,3
	2071-2100	825,9	351,8	+ 4,1	- 14,8
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	883,2	497,3		
	2011-2040	894,8	495,9	+ 1,3	- 0,3
	2041-2070	842,9	430,2	- 4,6	- 13,5
	2071-2100	864,0	400,2	- 2,2	- 19,5

Tabelle 34: Veränderung der Niederschlagssummen in den naturräumlichen R-Einheiten

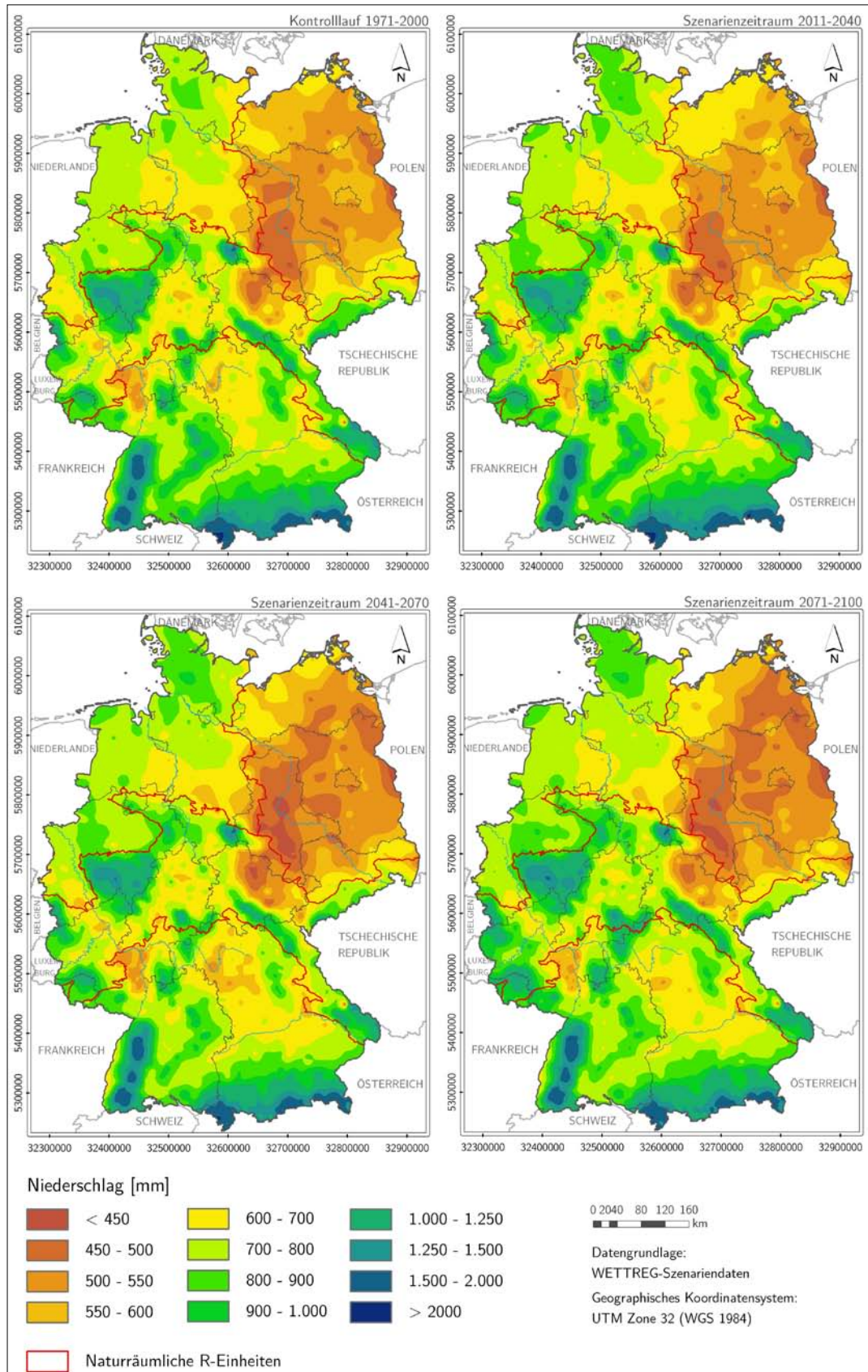


Abbildung 62: Jahresniederschlagssummen des Vergleichszeitraumes (Kontrolllauf 1971-2000) und der Szenarienzeiträume

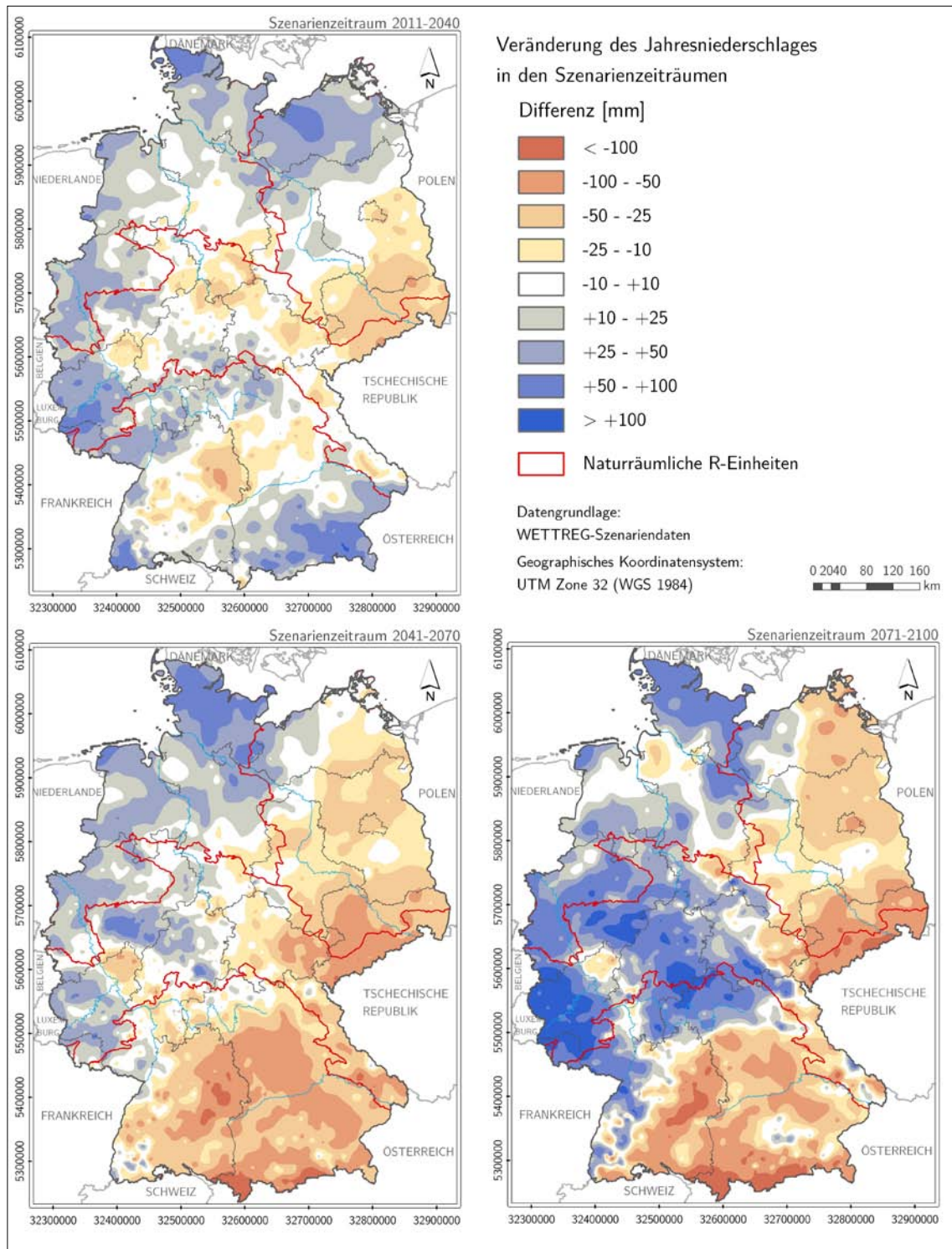


Abbildung 63: Veränderung der Jahresniederschläge der Szenarienzeiträume gegenüber dem Vergleichszeitraum 1971-2000

### 4.1.2 Darstellung der R-Faktoren für den Kontrolllauf und die Szenarien

In Abbildung 64 ist die Verteilung der R-Faktoren des WETTREG-Kontrolllaufes (1971-2000) dargestellt. Zur Anwendung kam die Regressionsgleichung auf Basis der Jahresniederschläge (Abbildung 62). Grundsätzlich zeigt sich ein ähnliches Bild, wie es mithilfe der DWD-Daten für den Ist-Zustand erarbeitet wurde (Abbildung 31). Unterschiede lassen sich durch die bei den Szenarienanalysen nicht vorgenommene Einbindung einer Höhenregression zur Regionalisierung der Niederschläge und durch die verschiedenen Datengrundlagen (WETTREG- bzw. DWD-Daten) begründen.

Geringe R-Faktoren unter 45 weisen vor allem die ostdeutschen Bundesländer Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern auf. Dagegen liegen die R-Faktoren in den Kammlagen der deutschen Mittelgebirge und in den Alpen bei über 80 (Abbildung 64).

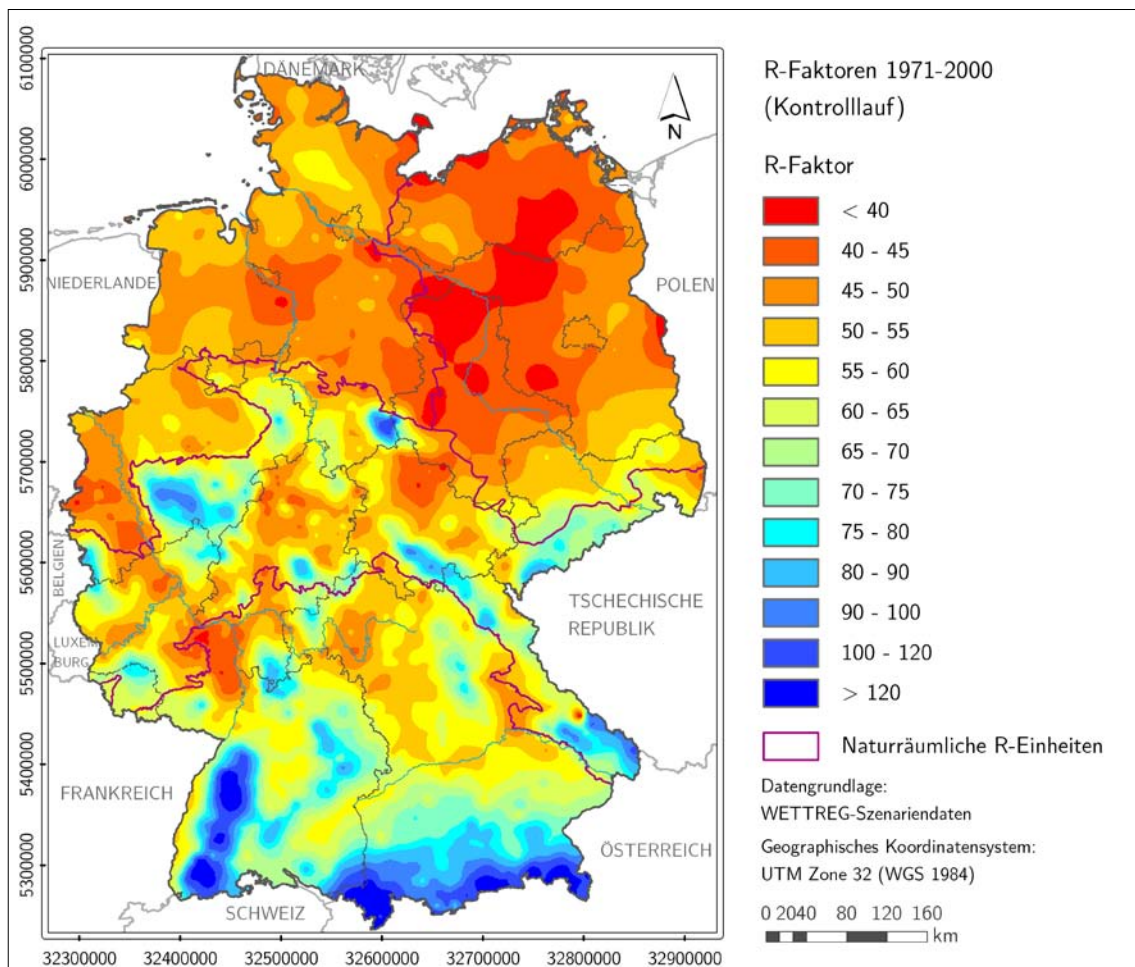


Abbildung 64: R-Faktoren des Kontrolllaufes (1971-2000)



### 4.1.3 Veränderung der R-Faktoren zwischen 2011 und 2100

Die Neubestimmung der R-Faktoren für die drei betrachteten Szenarienzeiträume wurde durch Anwendung des in Kapitel 2.4.2 dokumentierten Regressionsansatzes auf Grundlage einer umfangreichen Starkregenanalyse für ausgewählte WETTREG-Stationen umgesetzt. Die Regionalisierung der R-Faktoren erfolgte mittels der für jede CLINO-Periode erarbeiteten Regressionsgleichungen. Die nachfolgend dokumentierten Ergebnisse basieren auf den Gleichungen unter Verwendung der Jahresniederschläge. Die Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die regionalisierten R-Faktoren der drei Szenarienzeiträume für Deutschland sowie deren relative Veränderung gegenüber dem Ist-Zustand (Kontrolllauf, Abbildung 64). Für den Zeitraum 2011 bis 2040 zeigen die Szenarienergebnisse einen Rückgang der R-Faktoren im zentralen und südlichen Teil Deutschlands im Bereich von -5 bis -10 %. Stärkere Abnahmen sind nur regional erkennbar. Etwas stärker ist der Wertebereich zunehmender R-Faktoren ausgeprägt. Im Nordosten und Südwesten der Bundesrepublik zeigen sich Tendenzen zu einer Erhöhung der R-Faktoren um über 10 %. Allerdings kann auch festgestellt werden, dass in großen Bereichen Deutschlands Zu- bzw. Abnahmen des R-Faktors zwischen + 5 und -5 % auftreten können. Innerhalb dieser Werteklasse wurde aufgrund der bestehenden Modellunsicherheiten keine Differenzierung zwischen ansteigenden oder rückläufigen R-Faktoren vorgenommen.

Ab dem Zeitraum 2041 bis 2070 zeigen sich hinsichtlich der relativen Veränderung der R-Faktoren Tendenzen in Richtung Zunahme im Westen und Norden Deutschlands. Bezogen auf das quantitative und räumliche Ausmaß verstärkt sich diese Entwicklung in der Periode 2071 bis 2100. Hier zeigen große Teile Deutschlands einen Anstieg der R-Faktoren um über 10 %. 2041 bis 2070 konnten für die ostdeutschen und süddeutschen Bundesländer und ab 2071 nur noch für Teile Baden-Württembergs und Sachsens gegenüber dem Kontrolllauf geringere R-Faktoren ermittelt werden (Abbildung 66).

Bezüglich der räumlichen Verteilung weisen gegenwärtig (Abbildung 65) und im ersten Szenarienzeitraum 2011-2040 der gesamte Norden und der Osten Deutschlands die geringsten R-Faktoren auf. Ab 2041 und vor allem ab 2071 wird deutlich, dass geringe R-Faktoren (< 50) großräumig nur noch in Nordostdeutschland auftreten, während für den Nordwesten ein überdurchschnittlicher Anstieg verzeichnet werden muss.

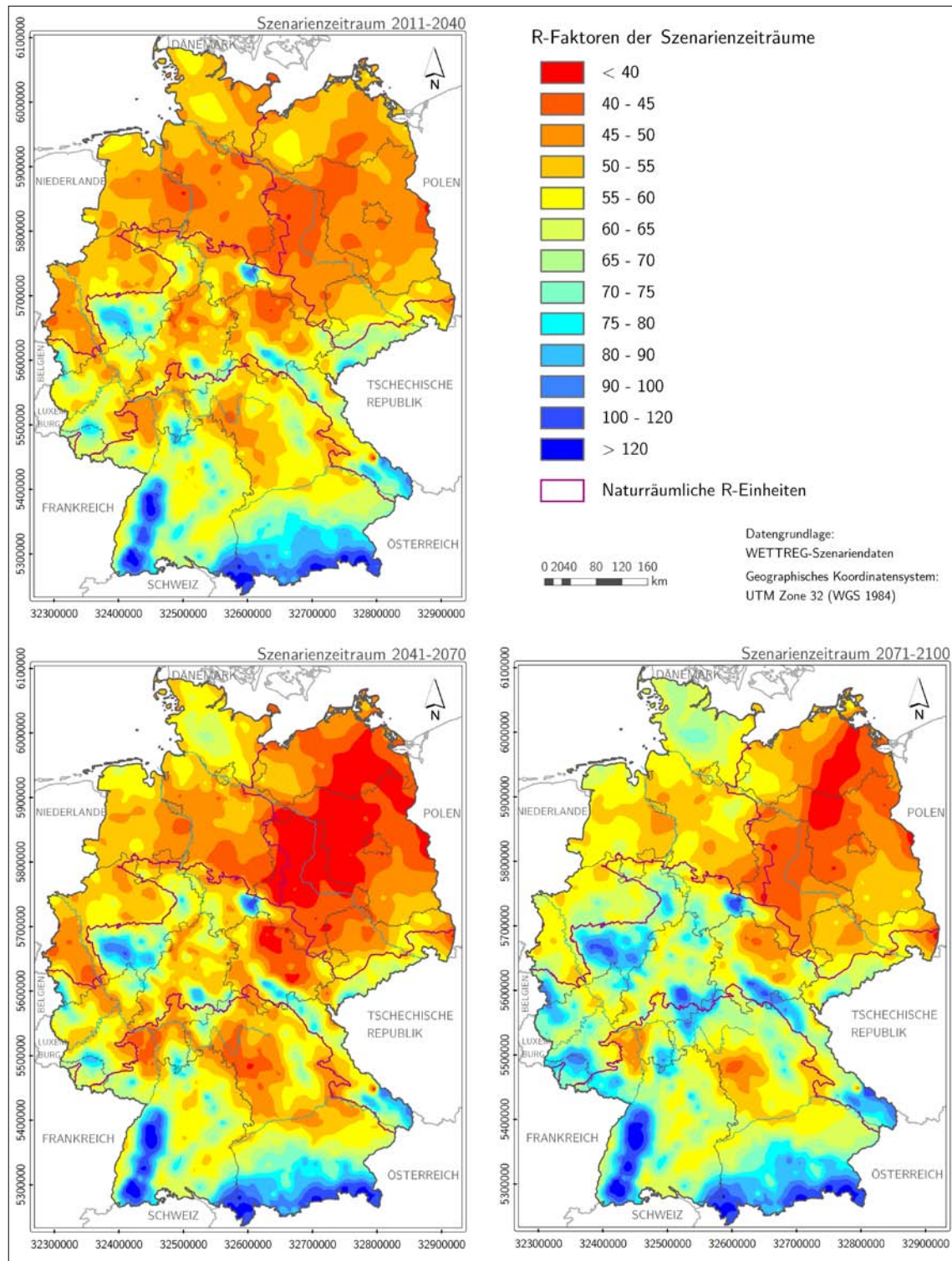


Abbildung 65: R-Faktoren der Szenarienzeiträume (2011-2100)

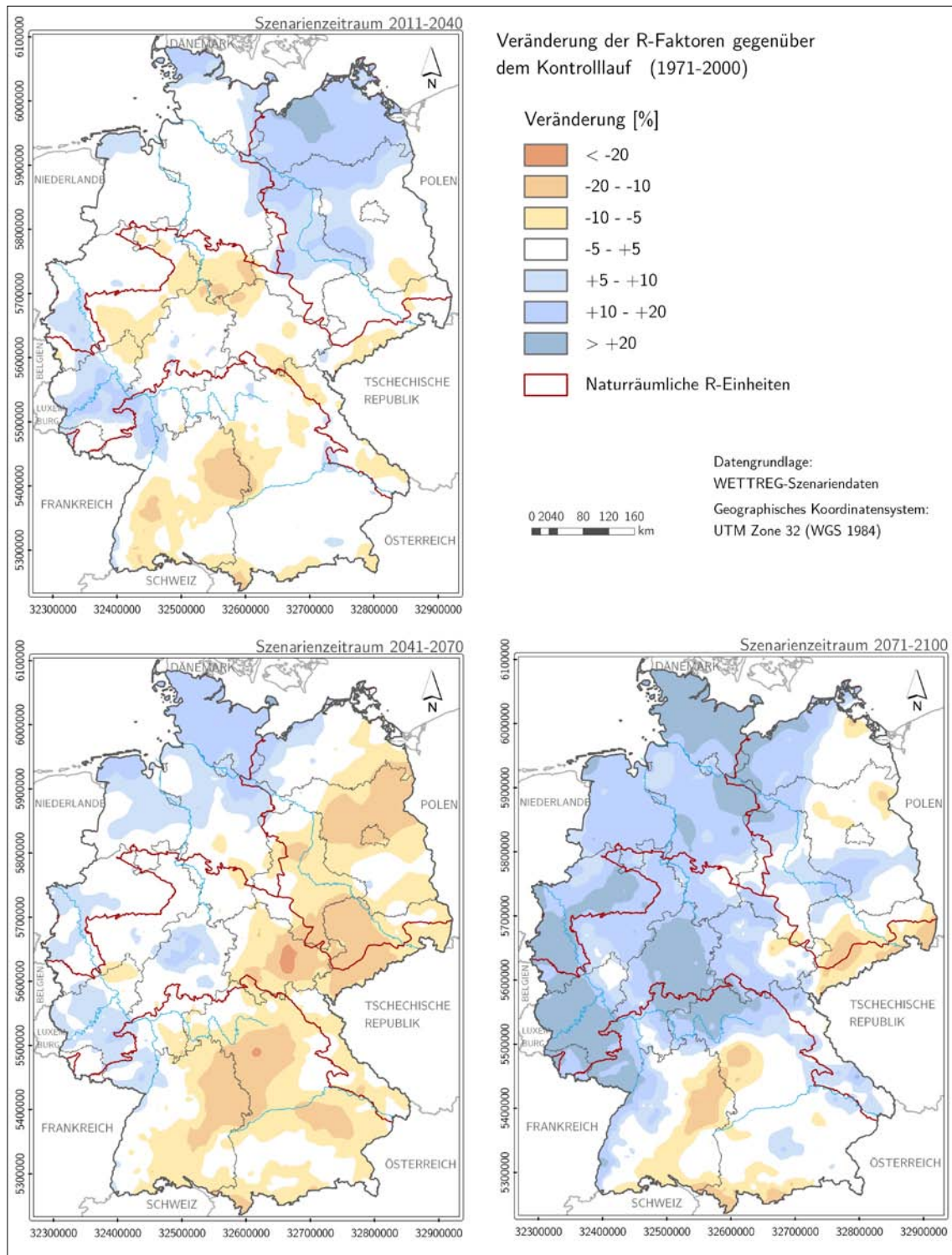


Abbildung 66: Veränderung der R-Faktoren der Szenarienzeiträume gegenüber dem Kontrolllauf

Die anhand der Karten ersichtlichen Veränderungen des R-Faktors werden differenziert für die Naturräume der naturräumlichen R-Einheiten in nachfolgendem Diagramm (Abbildung 67) und Tabelle 35 dokumentiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es innerhalb der Haupteinheiten regionale Unterschiede in Hinblick auf die R-Faktoren-Entwicklung geben kann.

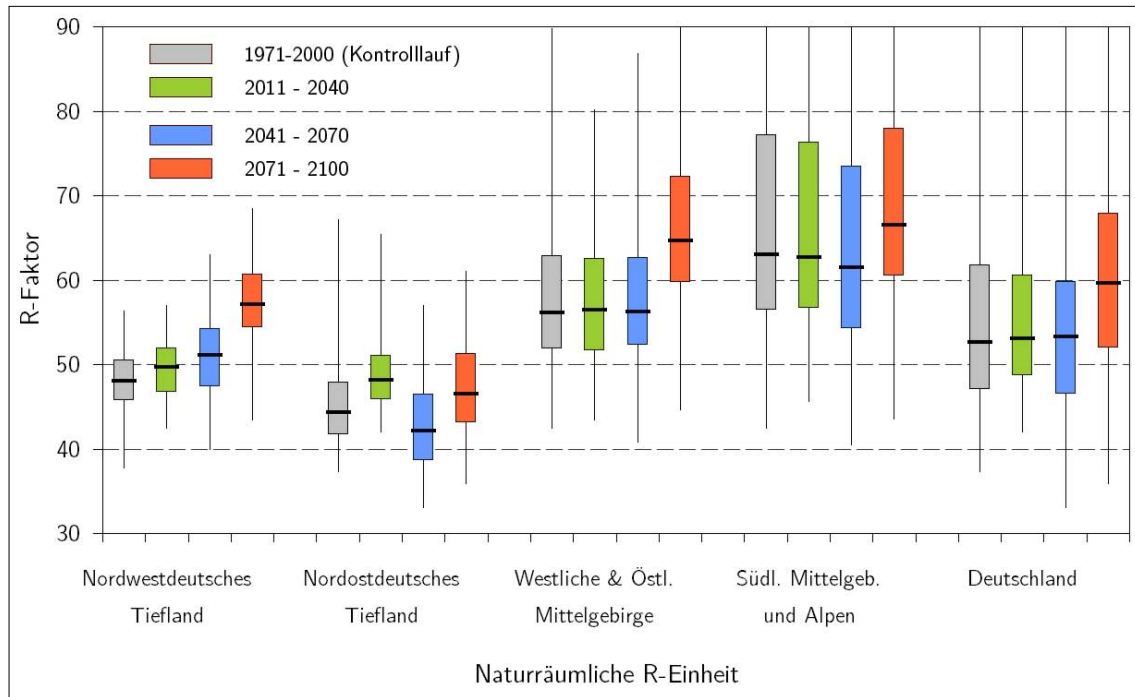


Abbildung 67: Box-Plot-Diagramme zur Kennzeichnung der mittleren R-Faktoren der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume

Für das Nordwestdeutsche Tiefland zeigt sich im Mittel ein stetiger Anstieg der R-Faktoren in allen Zeiträumen (Abbildung 67). Gleichzeitig nimmt der durch die Quartile gekennzeichnete Wertebereich der 50 %-igen Grundgesamtheit zu (Tabelle 35). Weniger eindeutig lässt sich die Entwicklung im Nordostdeutschen Tiefland beschreiben. Einem mittleren Anstieg zwischen 2011 und 2040 steht ein gegenüber heute deutlicher Rückgang der R-Faktoren im mittleren Szenarienzeitraum gegenüber. Die in der Periode 2071 bis 2100 für fast alle Regionen erkennbare Zunahme der R-Faktoren gilt dann auch wieder für das Nordostdeutsche Tiefland. Gleichzeitig nimmt auch die Spannweite der mittleren R-Faktoren der Naturräume zu. Weisen im Vergleichszeitraum 1971-2000 50 % der Naturräume im Nordosten R-Faktoren zwischen 41,7 und 48,0 auf (Differenz 6,3), so erhöht sich dieser Wertebereich auf eine Differenz von 8,2 (zwischen 43,1 und 51,3, Tabelle 35). Diese Entwicklung lässt sich durch unterschiedlich starke Veränderungen innerhalb der Haupteinheit begründen. Während vor allem im Nordwesten Mecklenburgs die Tendenz zu einer Zunahme der R-Faktoren zu verzeichnen ist, zeigen große Teile Sachsens eher gleichbleibende Werte (Abbildung 66). In den westlichen und östlichen Mittelgebirgen zeigen sich über alle Naturräume gemittelt bis 2070 zunächst nur geringe Veränderungen des R-Faktors. Dabei weisen die

Naturräume in Thüringen und im südlichen Niedersachsen eine leichte Abnahme, in Rheinland-Pfalz tendenziell eine Zunahme der R-Faktoren auf (Abbildung 66). In der Periode 2071 bis 2100 ist der für fast alle Gebiete festzustellende Trend in Richtung eines großräumigen Anstieges der R-Faktoren auch in den westlichen und östlichen Mittelgebirgen erkennbar.

Die südlichen Mittelgebirge und Alpen sind zunächst durch rückläufige R-Faktoren gekennzeichnet. Ab 2071 liegen dann auch hier die R-Faktoren im Durchschnitt über dem Vergleichszeitraum. Allerdings fällt im Süden Deutschlands der Anstieg deutlich geringer aus als in den anderen naturräumlichen R-Einheiten, was vor allem auf die gegenüber dem Kontrolllauf niedrigeren Werte im zentralen Teil Süddeutschlands zurückzuführen ist.

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	48,0	48,0	37,7	56,3	50,6	45,8
	2011-2040	49,7	49,6	42,4	57,0	52,0	46,7
	2041-2070	51,1	51,2	39,8	63,0	54,3	47,4
	2071-2100	57,1	57,2	43,3	68,5	60,7	54,4
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	44,4	45,7	37,2	67,2	48,0	41,7
	2011-2040	48,1	48,5	41,9	65,4	51,1	45,8
	2041-2070	42,2	42,9	32,9	57,0	46,5	38,7
	2071-2100	46,5	47,3	35,8	61,0	51,3	43,1
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	56,1	58,7	42,3	89,8	62,9	51,9
	2011-2040	56,5	57,7	43,3	80,2	62,6	51,6
	2041-2070	56,2	57,9	40,7	86,8	62,7	52,3
	2071-2100	64,6	66,5	44,5	99,9	72,3	59,8
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	63,0	71,8	42,4	152,0	77,2	56,4
	2011-2040	62,7	69,7	45,5	135,3	76,3	56,7
	2041-2070	61,5	67,7	40,4	132,1	73,5	54,2
	2071-2100	66,5	73,1	43,4	131,2	78,0	60,5
Deutschland Gesamt	1971-2000	52,6	57,3	37,2	152,0	61,8	47,1
	2011-2040	53,1	57,4	41,9	135,3	60,7	48,7
	2041-2070	53,3	55,8	32,9	132,1	59,8	46,5
	2071-2100	59,7	62,0	35,8	131,2	68,0	52,0

Tabelle 35: Statistische Kenngrößen der mittleren R-Faktoren der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten für die Szenarienzeiträume

Anhand der vorliegenden Ergebnisse wird deutlich, dass eine generelle, für Deutschland gültige Aussage anhand der verwendeten WETTREG-Modelldaten und unter Berücksichtigung der zur Anwendung gekommenen Methodik nicht zu treffen ist. Viel-

mehr zeigt sich, dass die zukünftige Entwicklung der R-Faktoren regional unterschiedlich und auch nicht für alle Perioden gleichgerichtet verlaufen wird. Während die Entwicklung im Nordwesten und Westen auf eine Zunahme der R-Faktoren hindeutet, zeigt sich für den Osten und vor allem den Süden Deutschlands eine rückläufige Tendenz. In der letzten Betrachtungsperiode 2071 bis 2100 zeichnet sich dann ein großräumiger Anstieg der R-Faktoren ab. Allerdings nehmen für diesen Zeitraum die Modellunsicherheiten deutlich zu. Zudem sind die statistischen Gütemaße zur Beschreibung der für alle Zeiträume abgeleiteten Regressionsbeziehungen deutlich geringer als für die vorhergehenden Perioden (vgl. Tabelle 20). Daraus lässt sich ableiten, dass im Zeitraum 2071 bis 2100 zwar die am stärksten ausgeprägte Tendenz erkennbar ist, diese aber auch mit den größten (modell- und methodisch bedingten) Unsicherheiten verbunden ist.

Für die Szenarienzeiträume 2011-2040 und 2041-2070 wird auch deutlich, dass sich anhand der WETTREG-Daten zwar eine tendenzielle Entwicklung ableiten lässt. Eine deutliche Erhöhung der Starkniederschlagssummen und der R-Faktoren, wie sie in der jüngsten Vergangenheit diskutiert wurde, kann anhand der WETTREG-Szenarien hingegen nicht bestätigt werden. Vielmehr nehmen sich die ermittelten Veränderungen in Richtung Zu- oder Abnahme eher moderat aus und liegen bis 2070 zumeist unter  $\pm 20\%$ .

### *Vergleichende Betrachtung mit vereinfachten Ansätzen zur R-Faktoren-Bestimmung*

Die vorliegend getroffenen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der R-Faktoren beziehen sich auf die Szenariendaten des WETTREG-Modells unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.4.2 dokumentierten Methodik. Eine ausführliche Diskussion hinsichtlich der Grenzen und Möglichkeiten der hier verwendeten Verfahren und Daten wird in Kapitel 6.3 vorgenommen. Mithilfe des Regressionsansatzes wurde eine Regionalisierung der R-Faktoren auf Basis von Regressionsgleichungen vorgenommen, die für jeden Szenarienzeitraum neu erarbeitet wurden. Eine Verbesserung der räumlichen Wiedergabe wurde durch die Verrechnung mit Residuen erreicht. Alternativ hätte die Auswertung und Regionalisierung der Starkregenparameter aller 1.963 WETTREG-Stationen erfolgen müssen. Dieser Ansatz wäre jedoch im Rahmen der Projektbearbeitung nicht realisierbar gewesen und würde auch dem gewählten Arbeitsziel – der Orientierung am DIN-Ansatz zur Bestimmung bundesweiter R-Verteilungen mittels Regressionsgleichungen (vgl. Kap. 2.4.2) – nicht mehr entsprechen.

Regionale Tendenzen der zukünftigen R-Faktoren- bzw. Starkregenentwicklung (auf Tageswertbasis) lassen sich auch mittels des hier verwendeten Ansatzes ableiten. Abbildung 68 zeigt den Vergleich zwischen der Veränderung der R-Faktoren (rechts) und der Starkregensummen oberhalb des definierten Schwellenwertes. Hierzu wurde eine

Interpolation der Starkregensummen mittels Kriging-Methode auf Basis aller berücksichtigter 291 Stationen vorgenommen.

Beide Methoden zeigen eine gute Übereinstimmung der tendenziellen Entwicklung am Beispiel des Zeitraumes 2011-2040. Einer Zunahme im Norden und Südwesten Deutschlands stehen Abnahmen im Osten und Süden gegenüber (Abbildung 68).

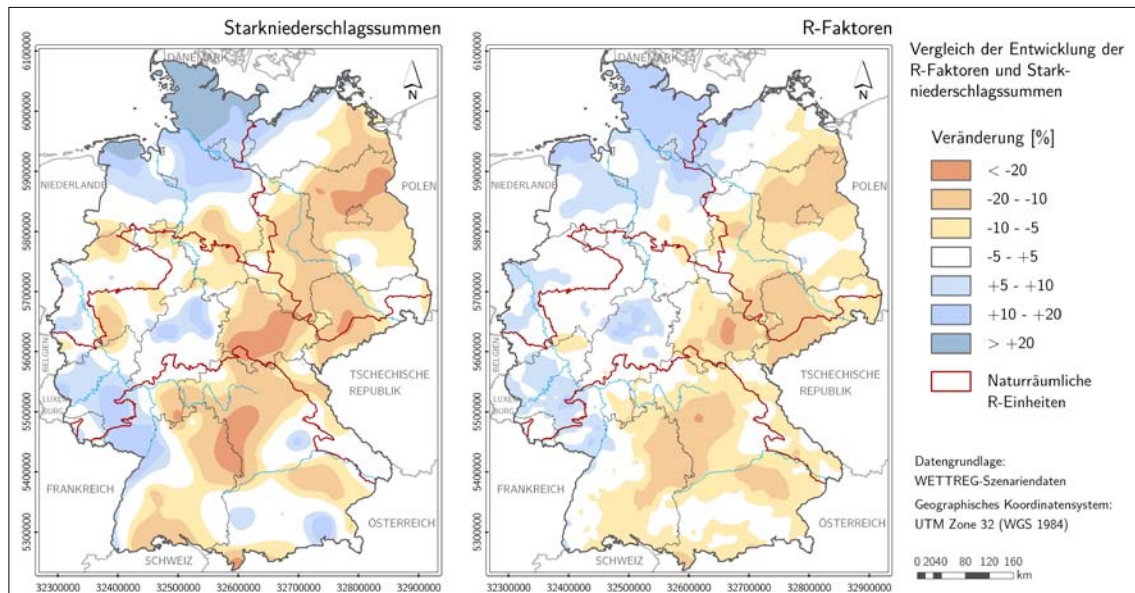


Abbildung 68: Vergleich der räumlichen Veränderung der Starkniederschlagssummen (interpoliert) und der R-Faktoren des Szenarienzeitraums 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum

Weitere, deutlich einfachere Ansätze zielen auf die Einbindung der mithilfe der Klimamodelle ermittelten Jahres- bzw. Sommerniederschläge für ausgewählte Szenarienziträume in die nach DIN 19708 (DIN 2005) vorliegenden Regressionsbeziehungen zur Ermittlung des R-Faktors ab (vgl. RIPPEL 2007, HUG 2005). Die durch die Klimaveränderung zu erwartende niederschlagsbedingte Veränderung der Erosionsgefährdung würde dabei nur über die Veränderung des Gesamtniederschlages betrachtet werden. Der Anteil und die Summe erosiv wirkender Niederschläge blieben hingegen unberücksichtigt. Nachfolgend werden beispielhaft die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu den R-Faktoren (Regressionsansatz) mit einfachen Ansätzen unter Verwendung bestehender Regressionsgleichung verglichen.

Aufgrund des insbesondere in den Sommermonaten hohen Anteils der Starkniederschlagssummen an der Gesamtniederschlagsmenge ist auch zukünftig die Entwicklung der Jahresniederschläge in gewissem Maße an die Veränderung der Starkniederschläge gekoppelt. Insofern zeigen sowohl der Regressionsansatz als auch der einfache Ansatz großräumig ähnliche Muster einer zukünftigen Starkregenentwicklung. In Abbildung 69 und Abbildung 70 sind beide Varianten jeweils für den Zeitraum 2011-2040 und 2071-2100 gegenübergestellt.

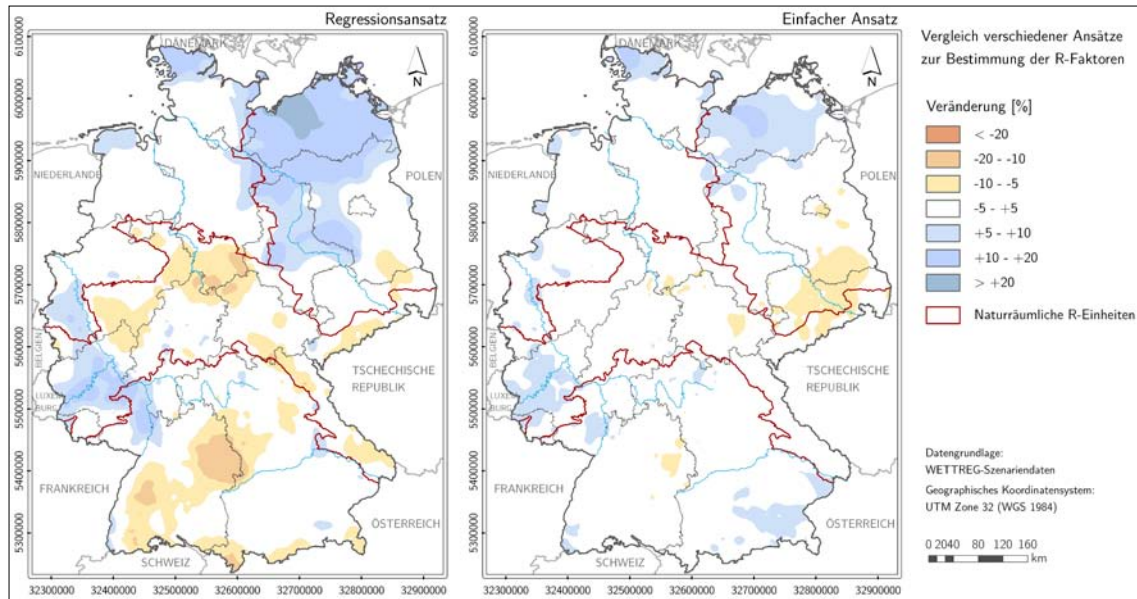


Abbildung 69: Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung der R-Faktoren in den Szenarienzeiträumen – Beispiel 2011-2040.

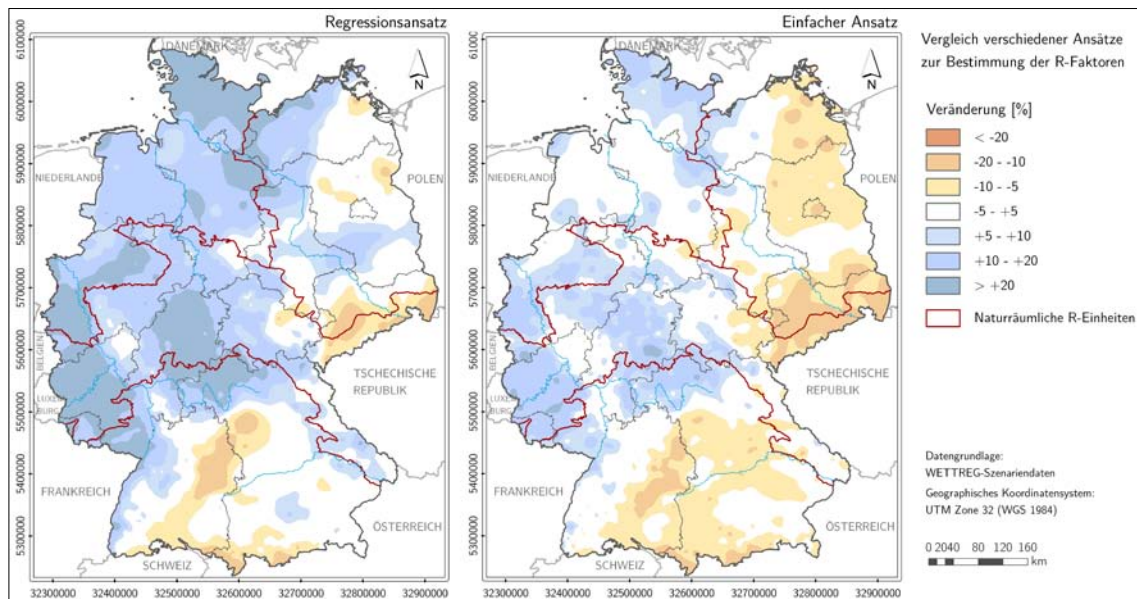


Abbildung 70: Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung der R-Faktoren in den Szenarienzeiträumen – Beispiel 2071-2100.

Der vereinfachte Ansatz unterschätzt hingegen das Ausmaß der möglichen Entwicklung, sowohl in Richtung Zunahme als auch Abnahme der R-Faktoren, deutlich, da die Veränderung der Starkregensummen und deren Anteil am Gesamtniederschlag nicht berücksichtigt werden. Für die in Abbildung 69 und Abbildung 70 dargestellten Zeiträume 2011-2040 und 2071-2100 werden Regionen mit überdurchschnittlichem Rückgang bzw. Anstieg der R-Faktoren beim einfachen Ansatz stark abgeschwächt dargestellt. Zudem können beide Ansätze auch entgegengerichtete Tendenzen aufzeigen, wenn zum Beispiel die Starkregensummen bei rückläufigen Gesamtniederschlägen



zunehmen, das heißt, deren Anteil am Jahresniederschlag steigt. Für den Zeitraum 2071-2100 trifft das unter anderem auf Bereiche Brandenburgs, Sachsen-Anhalts und Bayerns zu.

Die Unterschiede beider Verfahren hinsichtlich der Wiedergabe von Ausmaß und Richtung einer zukünftigen Entwicklung der R-Faktoren werden anhand des in Tabelle 36 dargestellten Vergleichs der naturräumlichen R-Einheiten belegt. Bezogen auf die Haupteinheiten wurde auf Basis des 50-m-Rasters die relative Veränderung der R-Faktoren berechnet. Für die Periode 2011 bis 2040 weist der einfache Ansatz für die beiden südlichen R-Einheiten eine sehr geringe Erhöhung der R-Faktoren aus, während anhand des Regressionsansatzes eine geringe Reduzierung ermittelt wurde. Diese Gegensätze, welche noch innerhalb des ‚Rauschens‘ der Modellunsicherheiten liegen könnten, werden für den Zeitraum 2071-2100 um so deutlicher. Für das Nordwestdeutsche Tiefland und die westlichen und östlichen Mittelgebirge wurden mittels des einfachen Verfahrens um 13,4 % bzw. 8,3 % geringere Anstiege der mittleren R-Faktoren bestimmt. Für das Nordostdeutsche Tiefland sowie die Südlichen Mittelgebirge und Alpen sind eindeutig gegenläufige Entwicklungen erkennbar (Tabelle 36).

Naturräumliche R-Einheit	2011-2040		2071-2100	
	Regressionsansatz	Einfacher Ansatz	Regressionsansatz	Einfacher Ansatz
Nordwestdeutsches Tiefland	+ 2,5	+ 2,5	+ 18,3	+ 4,9
Nordostdeutsches Tiefland	+ 6,8	+ 0,9	+ 3,8	- 4,5
Westliche & Östliche Mittelgebirge	- 2,2	+ 0,2	+ 12,6	+ 4,3
Südliche Mittelgebirge und Alpen	- 2,5	+ 1,3	+ 2,2	- 1,7

Tabelle 36: Veränderung der mittleren R-Faktoren der naturräumlichen R-Einheiten (Mittelwert aller Rasterzellen) für die Szenarienzeiträume in Abhängigkeit vom R-Ansatz [in %]

Grundsätzlich lassen sich durch ein einfaches ‚Einsetzen‘ veränderter Niederschlagsdaten in unveränderte, das heißt, bestehende Regressionsgleichungen erste Tendenzen einer möglichen Entwicklung erkennen. Genauere Aussagen zur Veränderung des R-Faktors können allerdings nicht getroffen werden, da von einem gleichbleibenden Anteil stärkerer Ereignisse am Gesamtniederschlag ausgegangen wird. Hierfür sind Verfahren zur Betrachtung definierter Starkregenereignisse erforderlich, wie sie in der vorliegenden Studie anhand des 98 %-Perzentils umgesetzt wurden.

## 4.2 Auswirkungen auf die potenzielle Erosionsgefährdung

Die Neubestimmung der potenziellen Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume wurde durch Anwendung der Modelle *ABAGFlux* und *TerraFlux* vorgenommen (Kap. 2.3.5). Da K-, L- und S-Faktor gegenüber dem Ist-Zustand konstant bleiben, ist bei einer rasterbezogenen Betrachtung die relative Veränderung der potenziellen Bodenabträge direkt an die in Kapitel 4.1 dokumentierte Entwicklung der R-Faktoren gekoppelt und lässt sich somit aus Abbildung 66 ableiten. Bei der Auswertung der aggregierten Szenarienergebnisse für die Naturräume ist hingegen eine flächenbezogene Auswertung erforderlich, da, im Gegensatz zu den R-Faktoren, bei der potenziellen Erosionsgefährdung ausschließlich die landwirtschaftlich genutzten Flächen betrachtet werden, deren Anteil in zahlreichen Naturräumen bei unter 50 % liegt (vgl. Abbildung 49).

Eine ausführliche Betrachtung der Auswirkungen auf die potenzielle Erosionsgefährdung wird für die Faktorenkombination R x K x L x S vorgenommen, bei der die erosive Hanglänge berücksichtigt, eine Differenzierung zwischen Acker- und Grünland aber nicht vorgenommen wird. Die Darstellung der Ergebnisse für die Faktorenkombination R x K x S erfolgt nur ergänzend und besitzt ausschließlich informellen Charakter.

In Abbildung 71 sind die mittleren potenziellen Bodenabträge für den Referenzzeitraum (Kontrolllauf 1971-2000) dargestellt. Gegenüber den Bodenabträgen des Ist-Zustandes (Abbildung 53) zeigen sich nur geringfügige Abweichungen, die sich aus den Differenzen zwischen DWD-Daten und den Daten des WETTREG-Kontrolllaufes ergeben (vgl. Kap. 2.4.1). Zusätzlich zeigt Abbildung 71 den Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Naturräumen. Da auch in Naturraumeinheiten mit einem geringen landwirtschaftlichen Flächenanteil und gegenwärtig niedrigen Bodenabträgen hohe relative Veränderungen der Bodenerosion auftreten können, dienen beide Karten der quantitativen Einordnung der nachfolgend vorgenommenen Auswertung.

Für die Perioden 2011 bis 2040 und 2041 bis 2070 kann ein mittlerer Anstieg der potenziellen Erosionsgefährdung zwischen 2 und 10 % in den Naturräumen von Rheinland-Pfalz, des Saarlandes und in Teilen Nordrhein-Westfalens festgestellt werden. In stärkerem Maße nimmt infolge der Erhöhung der R-Faktoren die Erosionsgefährdung in Nordostdeutschland (2011-2040) sowie Teilen Schleswig-Holsteins und Niedersachsens (2041-2070) zu. Für diese Naturräume erfolgt die Erhöhung auf Basis eines niedrigen Ausgangsniveaus, sodass die Auswirkungen auf die Gesamtbilanz gering bleiben (Abbildung 71). Im Zeitraum 2041 bis 2070 weisen große Teile Ost- und Süddeutschlands Rückgangsraten um bis zu 20 % auf. Dies trifft insbesondere auf die landwirtschaftlich genutzten Gebiete Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens sowie auf Teile Bayerns und Baden-Württembergs zu, die gegenwärtig mittlere Abtragsraten von über  $10 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$  aufweisen.

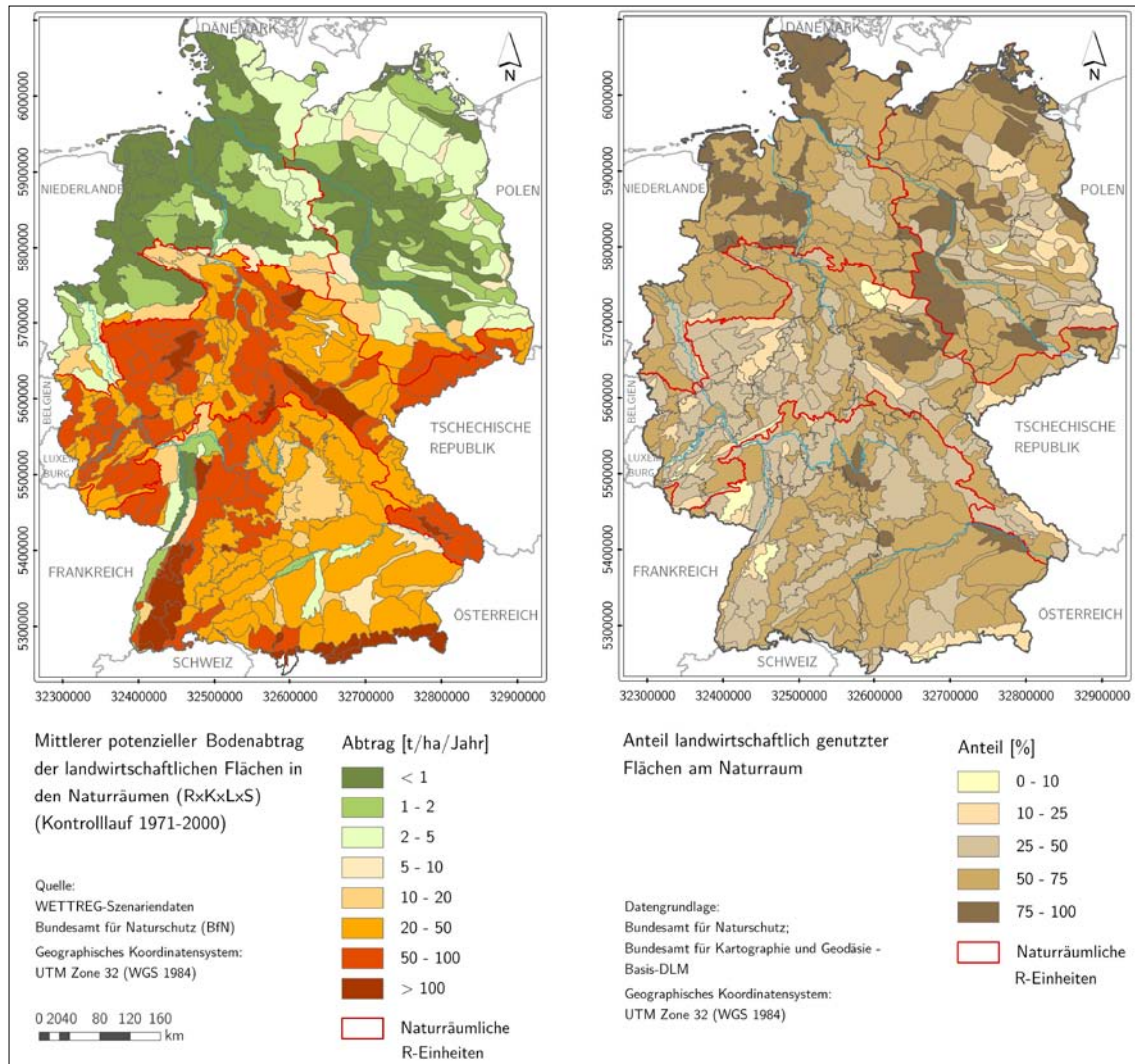


Abbildung 71: Mittlerer potenzieller Bodenabtrag (RxKxLxS) und Anteil der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands (Kontrolllauf)

Eine großräumige Erhöhung der potenziellen Erosionsgefährdung konnte nach Auswertung der WETTREG-Daten für die letzte Periode von 2071 bis 2100 ermittelt werden. Einen mittleren Anstieg um über 20 % verzeichnen die Naturräume in Rheinland-Pfalz, in der Kölner Bucht, im Hessischen Bergland, im nördlichen Bayern und Baden-Württemberg sowie in Westmecklenburg und Schleswig-Holstein. Mit Ausnahme von Regionen im Osten und Süden erhöht sich die mittlere Erosionsgefährdung auch in den weiteren Gebieten Deutschlands um 5 bis 20 %. Davon ausgenommen sind vor allem die Naturräume der Schwäbischen Alb, der Alpen und in den sächsischen Hügelland- und Mittelgebirgsbereichen, die eine leichte Abnahme der potenziellen Erosionsgefährdung aufweisen (Abbildung 72).

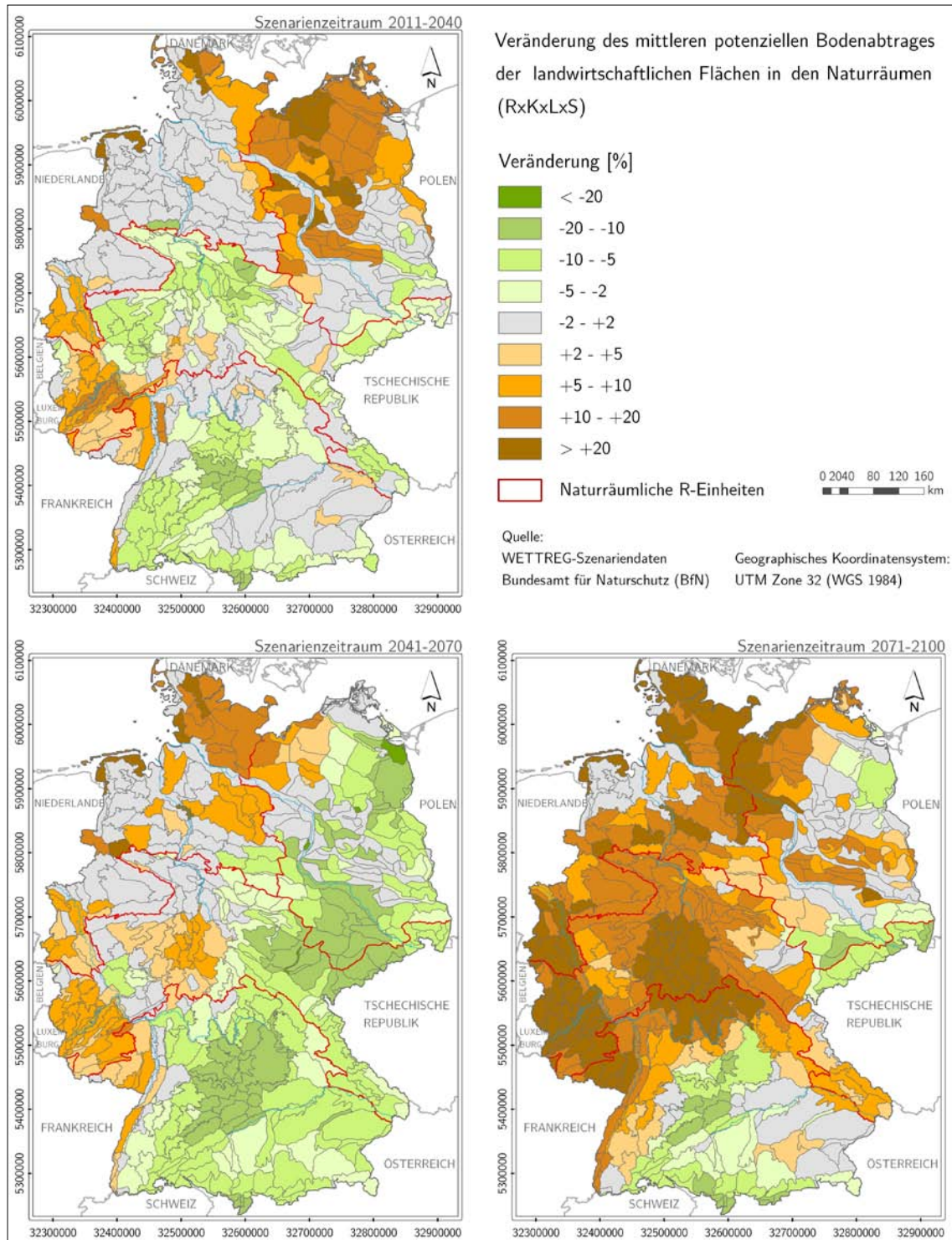


Abbildung 72: Veränderung des mittleren potenziellen Bodenabtrages (RxKxLxS) der landwirtschaftlichen Flächen in den Naturräumen Deutschlands in den Szenarienzeiträumen gegenüber dem Referenzzeitraum

Die Betrachtung der mittleren Veränderungen in den Naturräumen schließt nicht aus, dass es innerhalb der Raumeinheiten zu stärkeren Ausprägungen der zukünftigen Entwicklungen bis hin zu gegenläufigen Tendenzen kommen kann.

Aufgrund der geringeren räumlichen Differenzierung zeigt sich für die naturräumlichen R-Einheiten und Gesamtdeutschland eine mit den R-Faktoren vergleichbare Entwicklung. Dem über alle Zeiträume hinweg erfolgenden Anstieg der Erosionsgefährdung im Nordwestdeutschen Tiefland steht eine heterogene Entwicklung im Nordostdeutschen Tiefland gegenüber (Abbildung 73; Tabelle 37). Für beide Raumeinheiten ist zwar mit überdurchschnittlichen relativen Veränderungen zu rechnen, die aber aufgrund des geringen Abtragsniveaus hinsichtlich der Gesamtbilanz nur von untergeordneter Bedeutung sind. Innerhalb der Haupteinheiten ist im Bereich der Hügelländer aufgrund des tendenziell zu erwartenden Anstieges der R-Faktoren auch von einer nicht zu vernachlässigenden Erhöhung der Erosionsgefährdung auszugehen.

In den westlichen und östlichen Mittelgebirgen treten über alle Naturräume betrachtet bis 2070 kaum Veränderungen der Bodenabträge auf. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass, wie in Abbildung 72 dargestellt, einer Zunahme der Erosionsgefährdung im Westen rückläufige Tendenzen in den östlichen Mittelgebirgsbereichen gegenüberstehen. Im Zeitraum 2071 bis 2100 ist ein eindeutiger Trend in Richtung deutlicher Zunahme der potenziellen Erosionsgefährdung erkennbar. Begründet durch die räumliche Ausdehnung steigender R-Faktoren nach Osten erhöhen sich die mittleren Bodenabträge auf den landwirtschaftlichen Flächen gegenüber der Periode 2041-2070 von 55,5 auf 63,6 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup>, das heißt um über 14 % (Tabelle 37). Leicht rückläufige Tendenzen treten ausschließlich im Erzgebirge und seinem Vorland auf. Die geringsten Veränderungen zeigen die südlichen Mittelgebirge, das Alpenvorland und die Alpen. Bis 2070 ist von gleichbleibenden bzw. leicht rückläufigen Tendenzen in Hinblick auf die potenzielle Erosionsgefährdung auszugehen. Erst in der letzten Periode steigen die Medianwerte um etwa 1,5 % gegenüber dem Referenzzeitraum an (Tabelle 37), was vorrangig auf die zunehmenden Bodenabträge im östlichen und nördlichen Teil der naturräumlichen R-Einheit zurückzuführen ist.

Lässt man die regionalen Unterschiede außer Acht und betrachtet – im Sinne einer Gesamtbilanz - die anhand der WETTREG-Daten ermittelten zukünftigen Veränderungen einer potenziellen Erosionsgefährdung für Gesamtdeutschland (gemittelt aus den rasterbasierten Ergebnissen für alle landwirtschaftlichen Flächen), so zeigt sich bis 2040 ein leichter Rückgang der mittleren Bodenabträge um 2,4 %. Dieser setzt sich bis 2070 auf -4,8 % fort. Die Ursache liegt in den regionalen Schwerpunkten einer zukünftigen Zunahme bzw. Abnahme der R-Faktoren. Die Erhöhung der Starkregensummen und somit der R-Faktoren tritt vorwiegend in Norddeutschland auf, dass, reliefbedingt, nur geringe Abtragsraten aufweist. Dagegen sind in großen Teilen der stärker durch Erosion betroffenen Regionen südlich der norddeutschen Tiefländer geringere R-Faktoren als in der Referenzperiode zu erwarten. Erst in der letzten Periode von 2071 bis 2100 erhöht sich die Erosionsgefährdung gegenüber 1971-2000 um +6,5 % deutlich.

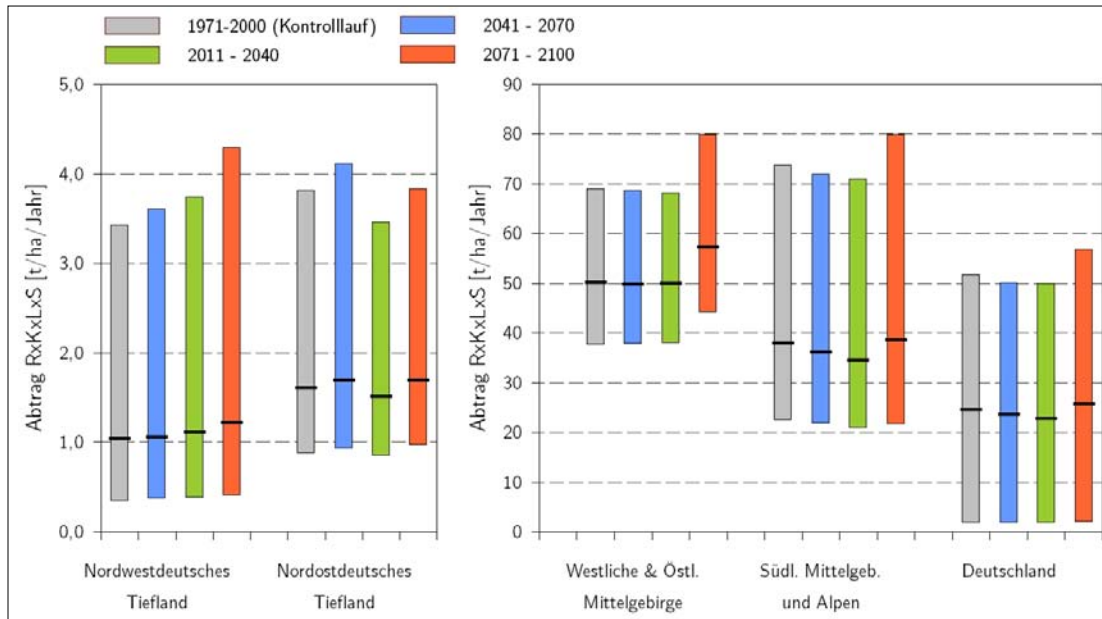


Abbildung 73: Median- und Quartilwerte des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [txha<sup>-1</sup>xJahr<sup>-1</sup>] für die Szenarienzeiträume

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	1,0	3,0	0,0	35,2	3,4	0,3
	2011-2040	1,1	3,1	0,0	38,5	3,6	0,4
	2041-2070	1,1	3,1	0,0	36,5	3,7	0,4
	2071-2100	1,2	3,6	0,0	46,5	4,3	0,4
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	1,6	5,0	0,2	60,4	3,8	0,9
	2011-2040	1,7	5,1	0,2	58,4	4,1	0,9
	2041-2070	1,5	4,5	0,2	55,1	3,5	0,9
	2071-2100	1,7	4,8	0,2	55,9	3,8	1,0
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	50,2	56,4	7,2	148,2	68,9	37,7
	2011-2040	49,8	55,3	7,0	140,3	68,7	37,8
	2041-2070	50,0	55,5	7,0	143,1	68,1	38,0
	2071-2100	57,3	63,6	8,0	157,3	79,9	44,2
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	37,9	75,8	0,6	557,4	73,8	22,4
	2011-2040	36,1	71,9	0,7	498,8	71,9	21,8
	2041-2070	34,5	70,8	0,6	483,3	70,9	20,8
	2071-2100	38,5	74,5	0,7	478,7	79,8	21,6
Deutschland Gesamt	1971-2000	24,5	40,0	0,0	557,4	51,8	1,8
	2011-2040	23,6	38,6	0,0	498,8	50,1	1,8
	2041-2070	22,8	38,2	0,0	483,3	50,0	1,8
	2071-2100	25,8	41,9	0,0	478,7	56,8	1,9

Tabelle 37: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxLxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [txha<sup>-1</sup>xJahr<sup>-1</sup>] für die Szenarienzeiträume

Ergänzend zur potenziellen Erosionsgefährdung unter Einbeziehung des L-Faktors sind in Tabelle 38 die Kennwerte für die Faktorenkombination RxKxS aufgeführt.

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	0,6	1,3	0,0	12,2	1,6	0,2
	2011-2040	0,6	1,4	0,0	13,3	1,7	0,2
	2041-2070	0,6	1,4	0,0	12,6	1,7	0,2
	2071-2100	0,7	1,6	0,0	16,0	2,0	0,3
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	0,8	2,0	0,1	23,6	1,7	0,4
	2011-2040	0,8	2,0	0,1	22,9	1,9	0,5
	2041-2070	0,8	1,8	0,1	21,6	1,6	0,4
	2071-2100	0,9	1,9	0,1	21,9	1,8	0,5
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	22,2	26,6	3,6	95,3	32,9	15,7
	2011-2040	22,2	26,1	3,6	91,1	32,8	15,9
	2041-2070	22,1	26,2	3,5	88,9	33,6	16,2
	2071-2100	25,4	30,0	4,1	95,7	37,4	19,2
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	16,4	38,4	0,4	285,6	35,7	9,0
	2011-2040	15,6	36,4	0,4	254,3	34,9	8,5
	2041-2070	15,3	35,9	0,4	248,2	35,0	8,2
	2071-2100	16,3	37,6	0,4	246,7	36,3	8,9
Deutschland Gesamt	1971-2000	9,8	19,5	0,0	285,6	23,2	0,9
	2011-2040	9,7	18,8	0,0	254,3	22,6	0,9
	2041-2070	9,0	18,7	0,0	248,2	22,1	0,9
	2071-2100	10,5	20,4	0,0	246,7	25,3	1,0

Tabelle 38: Statistische Kenngrößen des potenziellen Bodenabtrages der Naturräume (RxKxS) innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten [ $\text{txha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ ] für die Szenarienzeiträume

### 4.3 Ausweisung von Schwerpunktgebieten einer zukünftigen Entwicklung der potenziellen Erosionsgefährdung

Im vorherigen Kapitel orientierte sich die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der potenziellen Erosionsgefährdung auf die Gesamtheit aller Naturräume sowie die naturräumlichen R-Einheiten. Um Schwerpunktgebiete (Naturräume) ausweisen zu können, in denen zukünftig ausgeprägte Veränderungen zu erwarten sind, ist im Vorfeld die Auswahl von erosionsrelevanten Naturräumen erforderlich. Dabei sollten sowohl die mittleren Bodenabträge auf den landwirtschaftlichen Flächen innerhalb eines Naturraumes als auch seine Größe und der Anteil landwirtschaftlicher Flächen an der Gesamtfläche im Vordergrund stehen.

Für den Referenzzeitraum konnte für die Naturräume der Bundesrepublik Deutschland ein Medianwert des mittleren Abtrages von  $24,5 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$  bestimmt werden (Tabelle 37). Potenziell betrachtet werden alle Naturräume, die diesen Wert überschreiten. Darüber hinaus wurden alle Naturräume einbezogen, die zusätzlich einen Anteil landwirtschaftlicher Flächen an der Naturraumfläche  $> 25 \%$  und eine landwirtschaftliche Nutzfläche von über  $100 \text{ km}^2$  aufweisen. Die vorgenommene Auswahl schließt 171 Naturräume ein. Diese erbringen in der Summe  $77 \%$  aller für Deutschland ermittelten Bodenabträge im Referenzzeitraum.

In Abbildung 74 ist die Veränderung der potenziellen Bodenabträge der landwirtschaftlichen Flächen in den berücksichtigten Naturräumen für alle Szenarienzeiträume gegenüber dem Referenzzeitraum dargestellt. Gegenüber der in Abbildung 72 vorgenommenen Klasseneinteilung wurden Veränderungen geringeren Ausmaßes ( $\pm 5 \%$ ) nicht differenziert ausgewiesen. In Betracht gezogen wurden Veränderungen zwischen  $\pm 5 \%$  und  $\pm 10 \%$  sowie größer bzw. kleiner  $10 \%$ . Entgegen einer ganzheitlichen Darstellung aller Naturräume wird erkennbar, dass die Fokussierung auf überwiegend landwirtschaftlich genutzte Naturräume mit mittleren Abträgen über einem definierten Schwellenwert ( $24,5 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ ) zu einer deutlichen Reduzierung der von hohen Zu- oder Abnahmen betroffenen Naturräume führt.

Schwerpunktgebiete einer überdurchschnittlichen Erhöhung der mittleren Bodenabträge sind im Zeitraum 2011-2040 in Rheinland-Pfalz die Eifel und der Hunsrück, in dem ein Anstieg der mittleren Bodenabträge von über  $10 \%$  ermittelt werden konnte. Dagegen nehmen in der Schwäbischen Alb und im angrenzenden Schwäbischen Keuper-Lias-Land die Abtragswerte um über  $10 \%$  ab. Ergänzend hierzu sind in Tabelle 39 die Naturräume mit den jeweils größten Zu- und Abnahmen der Abtragswerte für jeden Szenarienzeitraum aufgeführt. Abbildung 75 gibt einen Überblick über die Lage der entsprechenden Naturräume.

Zwischen 2041 und 2070 kommt es zu einer räumlichen Ausdehnung der Schwerpunktgebiete. In Rheinland-Pfalz weist das Saar-Nahe-Berg- und Hügelland gegenüber



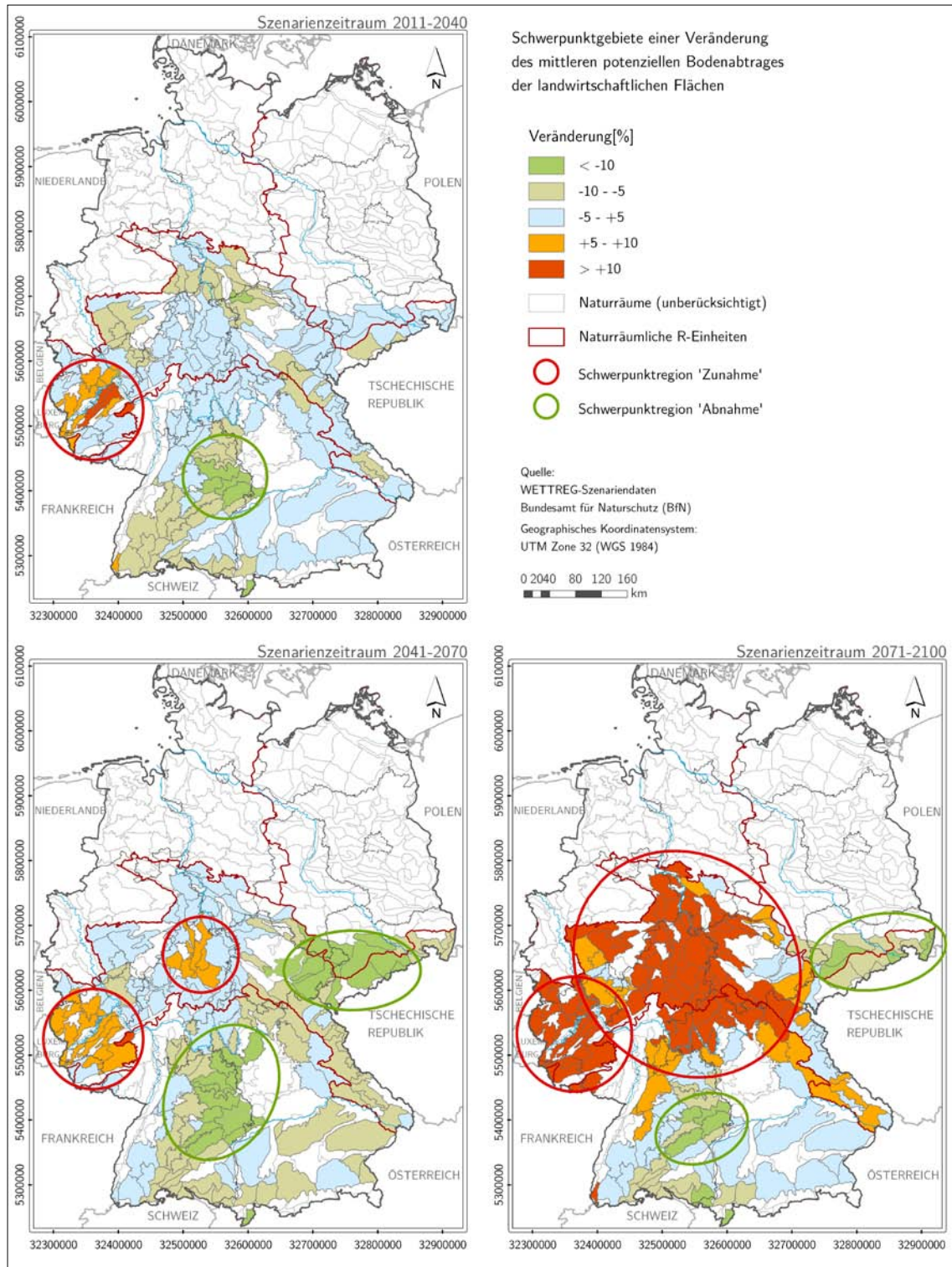


Abbildung 74: Veränderung des mittleren potenziellen Bodenabtrages der landwirtschaftlichen Flächen in Schwerpunktgebieten (Naturräume) der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum

dem Referenzzeitraum eine Zunahme der Bodenabträge > 10 % auf. Zudem ist auch das Westhessische Berg- und Hügelland überdurchschnittlich betroffen. Die bereits 2011-2040 von einer Reduzierung der potenziellen Bodenabträge gekennzeichnete

Region im östlichen Baden-Württemberg dehnt sich auf die Schwäbische Alb und das Neckar-/ Tauberland aus. Auch die Region vom Thüringer Becken bis zum Erzgebirge sowie Teile des Sächsischen Hügellandes weisen einen Rückgang der Erosionsgefährdung um über 10 % auf.

Im Zeitraum 2071 bis 2100 ändert sich das Gleichgewicht zwischen Regionen zu- und abnehmender Erosionsgefährdung in starkem Maße. Der großräumige Anstieg der R-Faktoren führt zu einer deutlichen Ausweitung der Schwerpunktgebiete einer zukünftig ansteigenden potenziellen Erosionsgefährdung. Davon betroffen sind neben den bereits genannten Gebieten die Mittelgebirgsbereiche Hessens, Frankens, das Weserbergland und das Bergische Land mit Anstiegsraten von zum Teil deutlich über 10 % (vgl. Tabelle 39). Gebiete mit einem gegenüber dem Referenzzeitraum zu erwartenden Rückgang der Erosionsgefährdung sind nur noch kleinräumig im Süden Sachsens und im Bereich der Schwäbischen Alb vorzufinden.

Zeitraum	Naturraum	LW-Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil LW-Fläche [%]	Mittlerer Abtrag auf LW-Fläche (1971-2000) [txha <sup>-1</sup> xJahr <sup>-1</sup> ]	Veränderung im Szenarienzitraum [%]
2011 bis 2040	Alzeyer Hügelland	122,3	40,5	29,8	+ 14
	Moselhunsrück	149,5	29,9	66,7	+ 11
	Hunsrückhochfläche	361,4	45,7	44,9	+ 10
	Schwäbisches Albvorland	470,8	62,9	39,9	- 13
	Albuch & Härtsfeld	387,1	37,6	37,7	- 13
	Schwäbisch-Fränkische Waldberge	443,0	32,8	64,9	- 11
2041 bis 2070	Alzeyer Hügelland	122,3	40,5	29,8	+ 10
	Burgwald	241,3	48,5	47,7	+ 9
	Oberhessische Schwelle	193,8	43,4	36,7	+ 9
	Ilm-Saale-/Ohrdrufer Platte	877,8	59,9	39,4	- 18
	Schwäbisches Albvorland	470,8	62,9	39,9	- 16
	Orlasenke	109,7	72,6	38,8	- 16
2071 bis 2100	Schwalm	133,6	59,6	29,2	+ 36
	Kalkeifel	375,6	52,1	40,8	+ 33
	Hocheifel	246,3	38,0	59,5	+ 32
	Allgäuer Hochalpen	115,8	39,6	557,4	- 14
	Ostlausitzer Vorberge	193,3	68,9	34,3	- 13
	Schwäbisches Albvorland	470,8	62,9	39,9	- 12

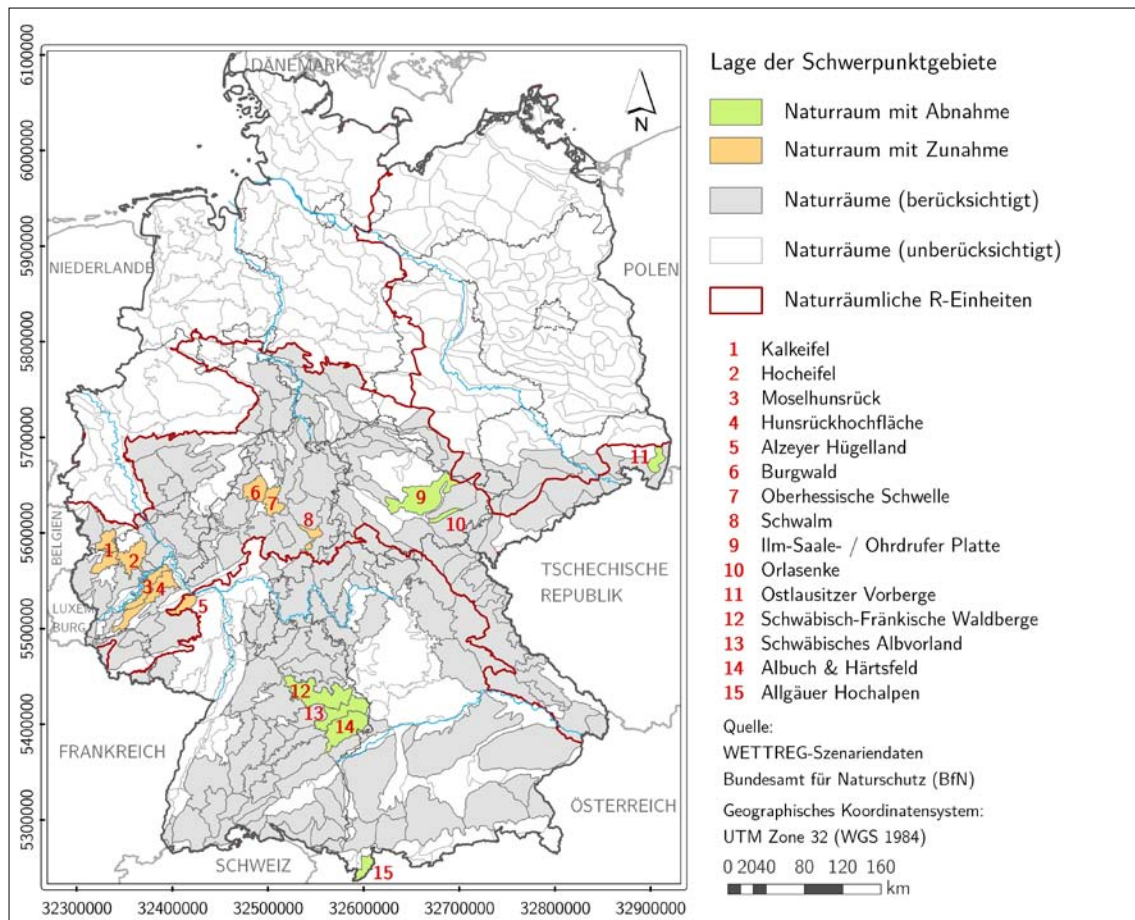


Tabelle 39: Veränderung der mittleren potenziellen Bodenabträge in Schwerpunktgebieten (Naturräume) mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum

Abbildung 75: Lage der Schwerpunktgebiete (Naturräume) mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum (s. Tabelle 39)

Mithilfe des Regressionsansatzes zur Neubestimmung der R-Faktoren konnten in den bisherigen Abschnitten Aussagen zur möglichen Veränderung der potenziellen Erosionsgefährdung in den Naturräumen Deutschlands auf Grundlage der WETTREG-Modelldaten getroffen werden. Darüber hinaus wurden Schwerpunktgebiete einer zukünftigen Erhöhung oder auch Verminderung des Abtragspotenzials auf den landwirtschaftlichen Flächen für drei Szenarienzeiträume ausgewiesen.

Neben dem direkten Einfluss der veränderten Regenerosivität auf die Erosionsgefährdung der Böden können auch indirekte Folgen eintreten, da sich die Veränderung der Temperaturen auf die gegenwärtigen Vegetationsperioden der Anbaukulturen und somit den Grad der Bodenbedeckung auswirkt. In Zusammenhang mit der prognostizierten Verschiebung der innerjährlichen Starkregenverteilung lassen sich daraus Veränderungen für die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung erwarten, welche im nachfolgenden Abschnitt dargestellt und diskutiert werden.

## 5 Abschätzung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung unter veränderten Klimabedingungen

### 5.1 C-Faktoren der Szenarienzeiträume

#### 5.1.1 Veränderung der C-Faktoren als Folge der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung (Phänophasen und Kulturperioden)

In den folgenden Ausführungen werden die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf den C-Faktor und somit das Zusammenspiel zwischen der Erosivität des Niederschlages und der entsprechenden Bodenbedeckung durch die Kulturpflanzen dargestellt. Wie sich der Gesamtkomplex der Erosionsgefährdung vor dem Hintergrund des Klimawandels verändert, wird in Kapitel 5.2 erläutert.

Tabelle 40 zeigt die Veränderungen der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode in den Prognosezeiträumen in Bezug auf den Vergleichszeitraum von 1971 bis 2000. Die Daten für die Temperaturentwicklungen lieferte das WETTREG-Modell.

Zeitraum	Phase	Termine			
		Nordwestdeutsches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland	Westliche & Östliche Mittelgebirge	Südliche Mittelgebirge und Alpen
1971 bis 2000	Beginn	03.04	03.04	02.04	07.04
	Ende	30.10	29.10	29.10	31.10
	Dauer (Tage)	211	210	211	208
2011 bis 2040	Beginn	01.04	02.04	29.03	03.04
	Ende	01.11	30.10	31.10	31.10
	Dauer (Tage)	215	212	217	212
2041 bis 2070	Beginn	26.03	29.03	24.03	28.03
	Ende	02.11	31.10	02.11	02.11
	Dauer (Tage)	222	217	224	220
2071 bis 2100	Beginn	24.03	28.03	22.03	25.03
	Ende	06.11	04.11	08.11	08.11
	Dauer (Tage)	228	222	232	229

Tabelle 40: Veränderungen der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode in den Szenarienzeiträumen in Bezug auf den Vergleichszeitraum von 1971 bis 2000

Wie bereits für Hessen in der Arbeit von STREITFERT & GRÜNHAGE (2009) aufgeführt, zeigt sich auch bei der bundesweiten Auswertung eine Verlängerung der Vegetationsperiode, die in erster Linie auf einer Verfrühung der Vegetationsperiode beruht. Ist für den ersten Zeitraum 2011 bis 2040 noch von einer vergleichsweise geringen Zunahme um 2 (westliche und östliche Mittelgebirge) bis 6 Tage (Nordwestdeutsches Tiefland) auszugehen, verlängert sich die landwirtschaftliche Vegetationsperiode im dritten Zeitraum 2071 bis 2100 um 12 (westliche und östliche Mittelgebirge) bis 21 Tage (Nordwest- und Nordostdeutsches Tiefland) gegenüber den Terminen der Vergleichsperiode 1971 bis 2000. In allen Prognosezeiträumen beruht die Verlängerung hauptsächlich auf der Verfrühung des Vegetationsbeginns. Dieser liegt im dritten Szenarienzeitraum um bis zu 13 Tage früher (Nordostdeutsches Tiefland) als im Zeitraum 1971 bis 2000.

Insgesamt ist festzustellen, dass von der Verlängerung der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode insbesondere das Norddeutsche Tiefland und hier der ostdeutsche Raum betroffen sein werden (siehe hierzu auch Abbildung 76). In dieser Region begann im Zeitraum 1971 bis 2000 mit einem Startermin um den 07. April die Vegetationsperiode am spätesten und damit 4 Tage später als im Alpenvorland. Bis zum Prognosezeitraum 2071 bis 2100 kommt es zu einer deutlichen Verfrühung. Mit einem Start ist dann bereits am 25. März (also 13 Tage früher) zu rechnen. Der Termin liegt dann in der gleichen Größenordnung wie im Alpenvorland (24. März).

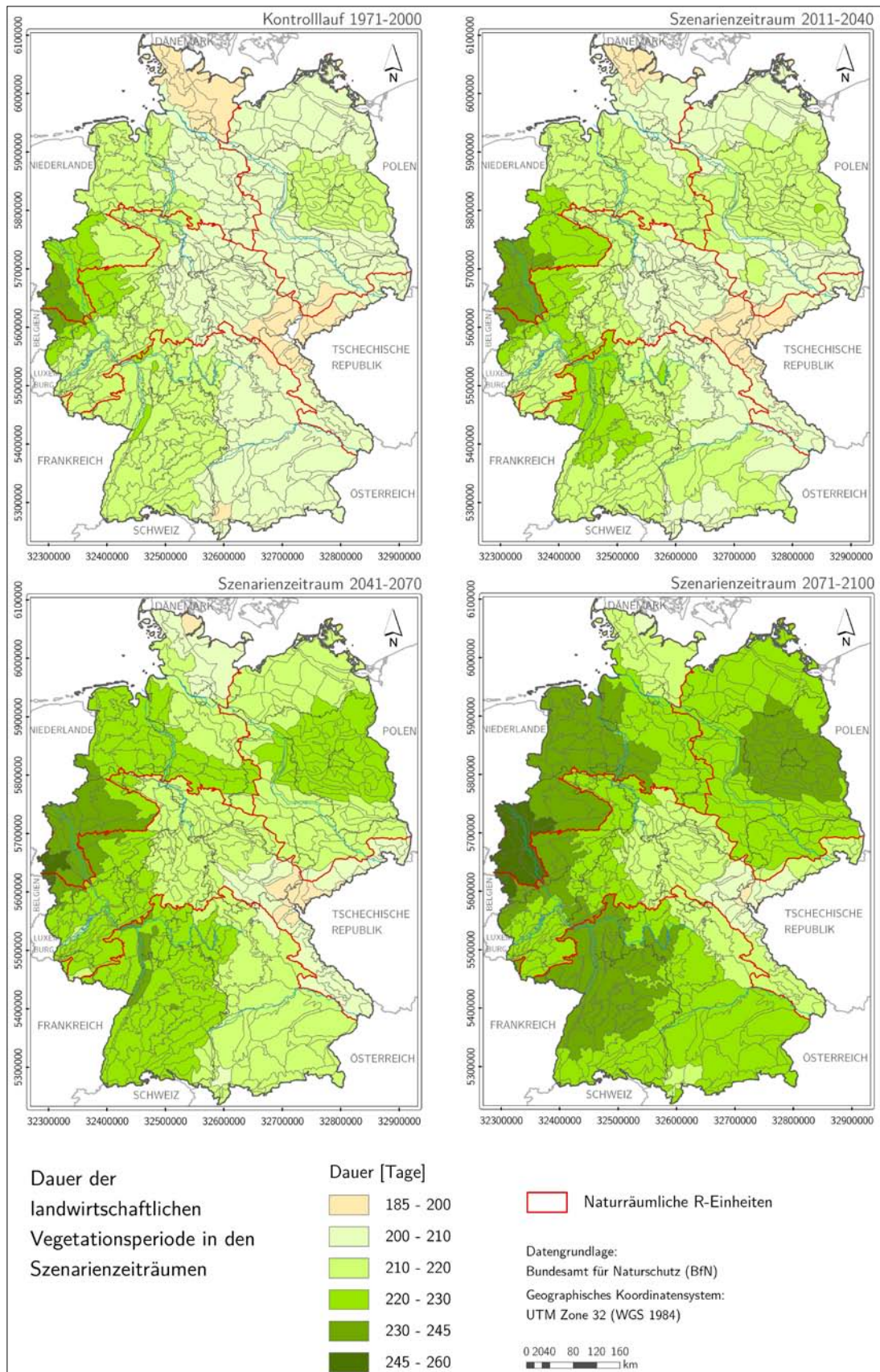


Abbildung 76: Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode der Szenarienzeiträume in den Naturräumen Deutschlands

Entscheidend für die Höhe des C-Faktors ist das Wechselspiel zwischen Bodenbedeckung und der jeweiligen Erosivität des Niederschlages, abgebildet über den R-Faktorenanteil. Ein Vergleich der Jahresverläufe der R-Faktorenanteile ist für die naturräumlichen R-Einheiten in Abbildung 77 schematisch aufgeführt.

Für alle vier Einheiten wird eine teils deutliche Zunahme der R-Faktorenanteile in den Winter- und Frühjahrsmonaten sowie die Kappung der derzeitigen Sommerspitzen erkennbar. Dieser Verlauf tritt im dritten Prognosezeitraum (2071-2100) eindeutiger hervor, als in den beiden vorangegangenen Zeiträumen. Des Weiteren muss festgestellt werden, dass sich in der Periode bis 2070 die sommerliche Spitze vom Früh- auf den Spätsommer verlagert, jedoch nur im Nordostdeutschen Tiefland die aktuellen Werte überschreitet. Diese Verschiebung in Kopplung mit der in dieser Phase vergleichsweise hohen Bodenbedeckung (Nachernte, Stoppel) wird jedoch nicht die wachsende Gefährdung in den Wintermonaten mit der vergleichsweise geringen Bodenbedeckung kompensieren, sodass aus Sicht des ganzjährigen R-Faktorenverlaufs von einer höheren Erosionsgefährdung auszugehen ist.

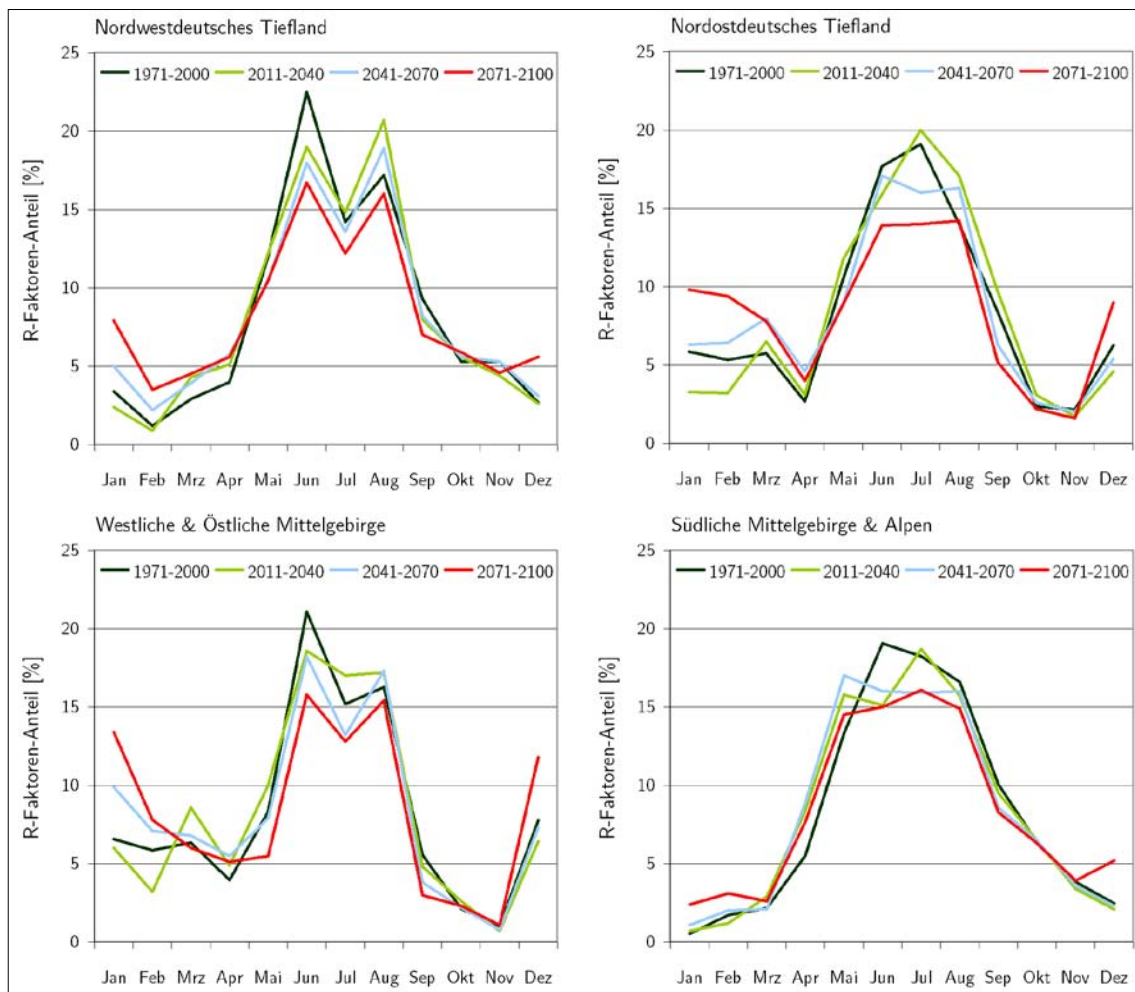


Abbildung 77: Jahreszeitlicher Verlauf der R-Faktorenanteile in den Szenarienzeiträumen

Bei der Ausgrenzung, welcher der beiden für den C-Faktor entscheidenden Einflussgrößen - Bodenbedeckung oder R-Faktorenanteil - an der zukünftigen Entwicklung den größeren Anteil trägt, kann, wie Tabelle 41 zeigt, keine eindeutige Aussage getroffen werden. Die in Tabelle 41 für Gesamtdeutschland getroffenen Annahmen sind wie folgt zu beschreiben:

- Annahme (1) - Kulturperioden und R-Faktorenverlauf entsprechen der Referenzperiode (1971-2000)
- Annahme (2) - Kulturperioden entsprechen der Referenzperiode (1971-2000); R-Faktorenverlauf entspricht dem des Szenarienzeitraums 2071 bis 2100
- Annahme (3) - Kulturperioden und R-Faktorenverlauf entsprechen denen des Szenarienzeitraums 2071 bis 2100

Annahme	Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Sommergerste	Zuckerrübe	Kartoffel	Mais	Winterweizen
(1)	0,15	0,06	0,10	0,10	0,19	0,27	0,34	0,07
(2)	0,20	0,05	0,14	0,14	0,22	0,28	0,32	0,06
(3)	0,19	0,04	0,13	0,13	0,23	0,29	0,30	0,05

Tabelle 41: Einfluss der Bodenbedeckung und des Verlaufs der R-Faktoren auf die Höhe des C-Faktors (gemittelt für Deutschland)

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Kulturperioden, die sich nur in einem engen Rahmen, der durch den Beginn und das Ende der Vegetationsperiode sowie erhöhten Temperatursummen in der Wachstumsperiode vorgegeben wird, verschieben, gegenüber der Auswirkung des R-Faktorenverlaufs auf den Trend des C-Faktors in den Hintergrund tritt. Insbesondere für Winterweizen, Winterroggen, Sommergerste und Zuckerrübe führt die Veränderung des R-Faktorenverlaufs zu einer deutlichen Erhöhung der mittleren C-Faktoren (Differenz zwischen Annahme (2) und Annahme (1) in Tabelle 41). Die zusätzliche Berücksichtigung der veränderten Kulturperioden (Annahme 3) wirkt sich hingegen geringer auf die C-Faktoren aus. Fruchtartenabhängig sind leichte Zu- bzw. Abnahmen zu verzeichnen.

Die Auswertung belegt, dass es bei Szenarienbetrachtungen zum C-Faktor unbedingt erforderlich ist, neben den Kulturperioden für die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen auch den R-Faktorenverlauf neu zu bestimmen.



### 5.1.2 Veränderung der C-Faktoren unter zusätzlicher Berücksichtigung von Annahmen zur Bodenbearbeitung

Neben einer klimabedingten Veränderung der Kulturperioden und R-Faktorenanteile kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund einer perspektivisch erforderlichen Erhöhung der Wasser-, Energie- und Kosteneffizienz die Anteile der konservierenden Bodenbearbeitung und der Direktsaatverfahren zukünftig steigen werden. Da dieser Trend allerdings quantitativ nur sehr schwer abzuschätzen ist, wurden Annahmen zum Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung von 50 %, 75 % und 100 % getroffen (vgl. Kap. 2.4.3). Daneben dient eine zu 100 % konventionelle Bodenbearbeitung dem Vergleich zwischen Szenarien- und Referenzzeitraum.

In der Tabelle 42 sind die auf der Ebene der naturräumlichen R-Einheiten und für Deutschland aggregierten Ergebnisse der C-Faktorenberechnung für die konventionelle Bodenbearbeitung ausgewählter Kulturen aufgeführt.

Die Veränderungen des C-Faktors in den Szenarienzeiträumen gegenüber dem Vergleichszeitraum werden maßgeblich vom Grad der Bodenbedeckung in den Wintermonaten bestimmt. Hier ist bei den R-Faktorenanteilen, wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, eine deutliche Zunahme der Werte zu erwarten. Die Kulturpflanzen (Winterraps, Wintergerste), die in dieser Phase eine hohe Bodenbedeckung aufweisen, erreichen aufgrund des niedrigeren Niveaus im Sommer eine deutlich bessere Schutzwirkung (= niedrigerer C-Faktor). Anders ist die Situation bei den Sommerungen (Sommergerste, Hackfrüchte) sowie bei den Wintergetreidearten Winterweizen und Winterroggen. Die genannten Fruchtarten weisen im Winter eine geringe Bodenbedeckung auf. In Verbindung mit den erhöhten R-Faktorenanteilen lässt die Schutzwirkung nach (= erhöhte C-Faktoren). Der Mais ist als neutral einzustufen. Unter Mais liegt bereits gegenwärtig ein hohes Gefährdungsrisiko vor, welches auch in den Prognosezeiträumen in etwa gleichbleibend ist. Die Winter- und Sommereffekte gleichen sich bei dieser Fruchtart aus.

Zeit- raum	Naturräumliche R-Einheit	Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Sommergerste	Zuckerrübe	Kartoffel	Mais	Winterraps
1971 bis 2000 (Referenzperiode)	Nordwestdeutsches Tiefland	0,14	0,07	0,09	0,08	0,15	0,26	0,34	0,08
	Nordostdeutsches Tiefland	0,17	0,05	0,10	0,11	0,16	0,25	0,33	0,07
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,17	0,06	0,12	0,12	0,17	0,24	0,35	0,06
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,12	0,06	0,08	0,08	0,14	0,27	0,33	0,08
	Deutschland	0,15	0,06	0,10	0,10	0,15	0,26	0,34	0,07
	Wert [%]	100	100	100	100	100	100	100	100
2011 bis 2040	Nordwestdeutsches Tiefland	0,19	0,09	0,13	0,12	0,22	0,28	0,33	0,07
	Nordostdeutsches Tiefland	0,22	0,04	0,13	0,15	0,22	0,27	0,33	0,06
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,23	0,06	0,17	0,16	0,22	0,25	0,33	0,06
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,16	0,07	0,11	0,11	0,21	0,30	0,34	0,08
	Deutschland	0,20	0,06	0,14	0,14	0,22	0,27	0,33	0,06
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	133,3	100,0	140,0	140,0	146,7	103,8	97,1	85,7
2041 bis 2070	Nordwestdeutsches Tiefland	0,15	0,05	0,10	0,10	0,21	0,28	0,29	0,07
	Nordostdeutsches Tiefland	0,18	0,04	0,10	0,12	0,21	0,27	0,29	0,06
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,19	0,03	0,14	0,14	0,21	0,26	0,33	0,06
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,13	0,05	0,08	0,08	0,23	0,31	0,33	0,07
	Deutschland	0,16	0,04	0,11	0,11	0,22	0,28	0,31	0,06
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	106,7	66,7	110,0	110,0	146,7	107,7	91,2	85,7
	Wert gg. ‚Vorperiode‘ [%]	80,0	66,7	78,6	78,6	100,0	103,7	93,9	100,0
2071 bis 2100	Nordwestdeutsches Tiefland	0,17	0,05	0,12	0,11	0,24	0,31	0,29	0,06
	Nordostdeutsches Tiefland	0,21	0,03	0,12	0,15	0,23	0,29	0,29	0,05
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,22	0,03	0,16	0,16	0,23	0,27	0,30	0,05
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,14	0,05	0,10	0,09	0,24	0,32	0,31	0,06
	Deutschland	0,19	0,04	0,13	0,13	0,23	0,29	0,30	0,05
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	126,7	66,7	130,0	130,0	153,3	111,5	88,2	71,4
	Wert gg. ‚Vorperiode‘ [%]	118,8	100,0	118,2	118,2	104,5	103,6	96,8	83,3

Tabelle 42: Veränderung der C-Faktoren in den Szenarienzeiträumen unter Annahme einer 100 % konventionellen Bodenbearbeitung

Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse für das ‚Best-Case-Szenarium‘ unter Annahme einer zu 100 % konservierenden Bodenbearbeitung. Aufgrund der sehr geringen C-Faktoren in der Referenzperiode (1971-2000) und der gebräuchlichen Angabe des C-Faktors mit 2

Dezimalstellen werden Veränderungen in der Größenordnung  $\pm 20\%$ , wie bei der konventionellen Bodenbearbeitung ausgewiesen, nur in Einzelfällen sichtbar. Insofern wurden die relativen Veränderungen zwar angegeben, besitzen jedoch nur informellen Charakter.

Zeit- raum	Naturräumliche R-Einheit	Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Sommergerste	Zuckerrübe	Kartoffel	Mais	Winterraps
1971 bis 2000 (Referenzperiode)	Nordwestdeutsches Tiefland	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Nordostdeutsches Tiefland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Deutschland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Wert [%]	100	100	100	100	100	100	100	100
2011 bis 2040	Nordwestdeutsches Tiefland	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Nordostdeutsches Tiefland	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Deutschland	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	75,0	100,0	66,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2041 bis 2070	Nordwestdeutsches Tiefland	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Nordostdeutsches Tiefland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,05	0,03
	Deutschland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Wert gg. ‚Vorperiode‘ [%]	133,3	100,0	150,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2071 bis 2100	Nordwestdeutsches Tiefland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,07	0,05	0,03
	Nordostdeutsches Tiefland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,07	0,05	0,03
	Westl. & Östl. Mittelgebirge	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,06	0,05	0,03
	Südl. Mittelgebirge & Alpen	0,03	0,02	0,03	0,03	0,06	0,07	0,05	0,03
	Deutschland	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,07	0,05	0,03
	Wert gegenüber ‚Ist‘ [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	120,0	116,7	100,0	100,0
	Wert gg. ‚Vorperiode‘ [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	120,0	116,7	100,0	100,0

Tabelle 43: Veränderung der C-Faktoren in den Szenarienzeiträumen unter Annahme einer 100 % konservierenden Bodenbearbeitung

### 5.1.3 Veränderung der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung

In den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 wurden die für die Szenarienzeiträume ermittelten C-Faktoren fruchtartenspezifisch dokumentiert. Neben der Veränderung der Kulturperioden und R-Faktorenanteile standen dabei mögliche Annahmen zum Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung im Vordergrund. Diese entsprechen den in Kapitel 2.4.3 erarbeiteten Szenarien (1) und (2) zur Veränderung des C-Faktors. Darüber hinaus wurde in Szenarium (3) der Einfluss sich ändernder Anbauspektren als Folge einer möglichen Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und deren Umwidmung in Anbauflächen für Energiepflanzen auf den C-Faktor untersucht. Für dieses C-Faktoren-Szenarium ist eine fruchtartenspezifische Differenzierung nicht möglich.

Anhand der Auswertungen der C-Szenarienanalysen für die verschiedenen Fruchtarten (Kap. 5.1.1 und 5.1.2) werden unter zusätzlicher Berücksichtigung der Flächenstilllegungen nachfolgend die Ergebnisse für den C-Faktor zusammengefasst. Daraus lässt sich die als Folge des Klimawandels mögliche Veränderung der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung abschätzen. Die C-Faktoren wurden für die Ebenen der naturräumlichen R-Einheiten und für Deutschland aggregiert.

In Tabelle 44 sind die mittleren C-Faktoren für die Haupteinheiten und jeden Szenarienzeitraum in Abhängigkeit vom gewählten C-Faktoren-Szenarium aufgeführt. Die Szenarien (1) und (2) berücksichtigen die C-Faktoren unter veränderten Klimabedingungen (Veränderung Kulturperioden und R-Anteile) bei unterschiedlichem Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung. Dabei kann nur eine zu 100 % konventionelle Bodenbearbeitung eindeutig Szenarium (1) zugewiesen werden. Szenarium (3) berücksichtigt zusätzlich den veränderten Anteil von Flächenstilllegungen. Insgesamt wurden für jeden Szenarienzeitraum acht unterschiedliche Annahmen getroffen.

Einen besseren Überblick über die absolute Veränderung der C-Faktoren als mögliche Folge des Klimawandels gibt Tabelle 45. Da die Annahmen zum Anteil einer konservierenden Bodenbearbeitung von 25 % nur für die Referenzperiode und von 75 % für die Szenarienzeiträume getroffen wurden, wurde die vergleichende Betrachtung für die Varianten ‚100 % konventionell‘, ‚50 % konservierend‘ und ‚100 % konservierend‘ vorgenommen, da diese über alle Zeiträume hinweg ausgewertet wurden.

Zeitraum	C-Faktoren-Szenarium		Nordwestdeutsches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland	Westl. & Östl. Mittelgebirge	Südl. Mittelgeb. & Alpen	Deutschland
	Nr.	Beschreibung von Bodenbearbeitung und Anbauspektren					
1971 bis 2000 (Referenzperiode)		100 % konventionell	0,16	0,13	0,13	0,13	0,14
		25 % konservierend	0,13	0,10	0,10	0,10	0,11
		50 % konservierend	0,10	0,07	0,07	0,08	0,08
		100 % konservierend	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04
2011 bis 2040	(1)	100 % konventionell	0,18	0,15	0,15	0,15	0,16
	(2)	50 % konservierend	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09
	(2)	75 % konservierend	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06
	(2)	100 % konservierend	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,19	0,16	0,16	0,16	0,17
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,12	0,09	0,09	0,10	0,10
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
2041 bis 2070	(1)	100 % konventionell	0,17	0,14	0,13	0,14	0,15
	(2)	50 % konservierend	0,10	0,08	0,08	0,08	0,09
	(2)	75 % konservierend	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
	(2)	100 % konservierend	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,18	0,15	0,14	0,15	0,16
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
2071 bis 2100	(1)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,17	0,14	0,14	0,14	0,15
	(2)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,11	0,08	0,08	0,09	0,09
	(2)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06
	(2)	100 % konservierend	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,18	0,15	0,15	0,15	0,16
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabelle 44: Mittlere C-Faktoren in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien

Die nachfolgend in Tabelle 45 aufgeführten Veränderungen der C-Faktoren gegenüber der Referenzperiode belegen die zuvor diskutierten und in Tabelle 41 dokumentierten, fruchtartenspezifischen Erhöhungen der R-Faktoren auch für die mittleren Werte der naturräumlichen R-Einheiten. Bedingt durch die Verschiebung der Kulturperioden und der R-Faktorenverläufe innerhalb eines Jahres zeigen nahezu alle Annahmen für den Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung eine Erhöhung der C-Faktoren in der ersten Periode bis 2040. Einem Rückgang bis 2070 folgt ein erneuter leichter Anstieg bis 2100. Dennoch liegen in allen Zeiträumen und Raumeinheiten die C-Faktoren über dem heutigen Niveau. Unter Annahme einer zu 100 % konservierenden Bodenbearbeitung (grüne Felder in Tabelle 45) steigen die C-Faktoren im bundesweiten Durchschnitt bis 2070 bzw. bis 2100 gegenüber den anderen Varianten überdurchschnittlich an. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Erhöhung auf sehr geringem Niveau erfolgt und aufgrund der niedrigen C-Faktoren in absoluten Werten kaum sichtbar ist (vgl. Tabelle 45).

Die im C-Faktoren-Szenarium (3) angenommene Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und Umwandlung in Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe würde zu einer Ausweitung des Anstieges der C-Faktoren führen. Diese könnte vorwiegend Regionen mit einem höheren Anteil an ackerbaulich genutzter Fläche betreffen. Legt man einen Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung von 50 % zugrunde (grüne Felder in Tabelle 45), so weisen das Nordostdeutsche Tiefland sowie die östlichen und westlichen Mittelgebirge die größten Anstiegsraten auf. Hier würde die klimabedingte Veränderung der C-Faktoren bei zusätzlicher Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung zu einer Erhöhung der C-Faktoren bis 2100 um etwa 30 bzw. 25 % führen.

Die den relativen Veränderungen zugrunde liegenden Absolutwerte sind in (Tabelle 45) aufgeführt. Gegenüber der sonst üblichen Darstellungsweise wurden die absoluten Veränderungen des C-Faktors mit 3 Dezimalstellen angegeben, da Differenzen bei der konservierenden Bodenbearbeitung ansonsten nicht sichtbar werden.

Zeit- raum	C-Faktoren-Szenarium		Nordwestdeut- sches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland	Westl. & Östl. Mittelgebirge	Südl. Mittelgeb. & Alpen	Deutschland
	Nr.	Beschreibung von Bodenbearbeitung und Anbauspektren					
2011 bis 2040	(1)	100 % konventionell	0,021	0,019	0,021	0,015	0,019
	(2)	50 % konservierend	0,007	0,014	0,014	0,007	0,010
	(2)	100 % konservierend	0,004	0,003	0,001	0,003	0,003
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,031	0,034	0,032	0,026	0,031
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,012	0,022	0,020	0,016	0,018
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,004	0,005	-0,001	0,005	0,003
2041 bis 2070	(1)	100 % konventionell	0,013	0,015	0,007	0,004	0,010
	(2)	50 % konservierend	-0,001	0,007	0,007	0,003	0,004
	(2)	100 % konservierend	0,005	0,004	0,002	0,004	0,004
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,016	0,020	0,018	0,016	0,017
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,005	0,016	0,014	0,011	0,011
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,007	0,006	0,003	0,005	0,006
2071 bis 2100	(1)	100 % konventionell	0,013	0,011	0,013	0,008	0,011
	(2)	50 % konservierend	0,004	0,012	0,011	0,005	0,008
	(2)	100 % konservierend	0,007	0,005	0,002	0,004	0,005
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,021	0,026	0,025	0,019	0,022
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,010	0,022	0,019	0,013	0,016
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,009	0,010	0,004	0,006	0,007

Tabelle 45: Absolute Veränderung der mittleren C-Faktoren in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien gegenüber der Referenzperiode

Anhand des Beispiels eines Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung von 50 % zeigt sich, dass eine Erhöhung der C-Faktoren um zumeist weniger als 0,03 ermittelt werden konnte. Legt man hingegen zugrunde, dass die C-Faktoren in den meisten Naturräumen gegenwärtig zwischen 0,04 und 0,1 liegen (vgl. Abbildung 40), so lassen sich auch daraus Steigerungsraten im zweistelligen Bereich erwarten. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Davon in besonderem Maße

betroffen wären die ackerbaulichen Gunstflächen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen sowie in der Kölner Bucht (Abbildung 78). Aufgrund der günstigen Standortverhältnisse werden in diesen Regionen Zuckerrüben, Winterweizen oder Sommergerste angebaut. Diese Fruchtarten reagieren stark auf die Verschiebung der innerjährlichen Starkregenhäufigkeiten, was zu höheren C-Faktoren führt.

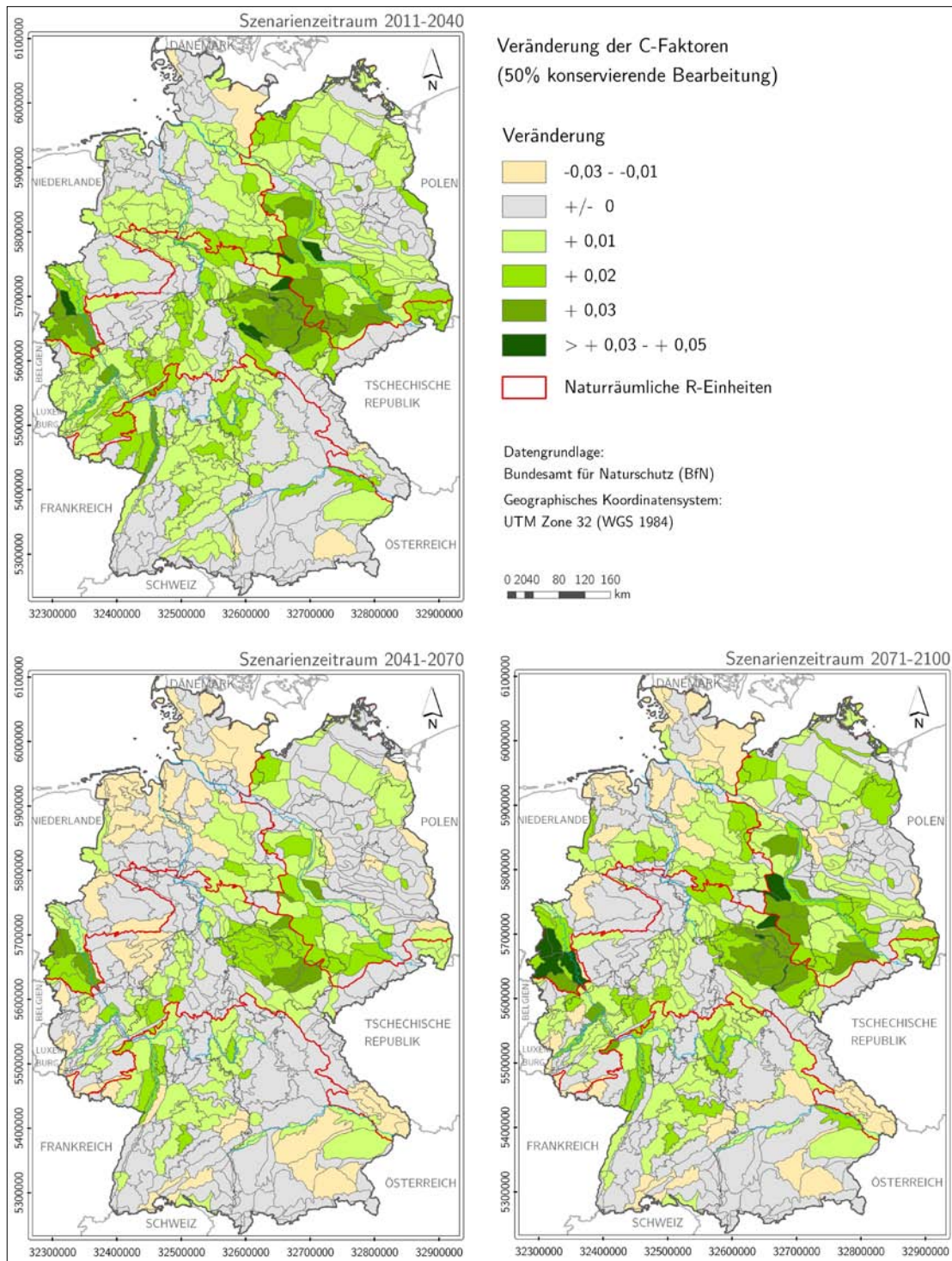


Abbildung 78: Absolute Veränderung der C-Faktoren in den Naturräumen gegenüber der Referenzperiode (Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung 50 %)



Durch den Rückgang der Stilllegungsflächen wäre in den meisten Naturräumen, vor allem in den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 2071 bis 2100, eine Verstärkung des C-Faktoren-Anstieges zu verzeichnen, wie Abbildung 79 zeigt. Deutlich wird auch, dass in einzelnen Naturräumen Nordwest- und Süddeutschlands, die gegenwärtig durch einen unterdurchschnittlichen Anteil an ackerbaulich genutzter Fläche geprägt sind, keine Änderungen der mittleren C-Faktoren zu verzeichnen sind.

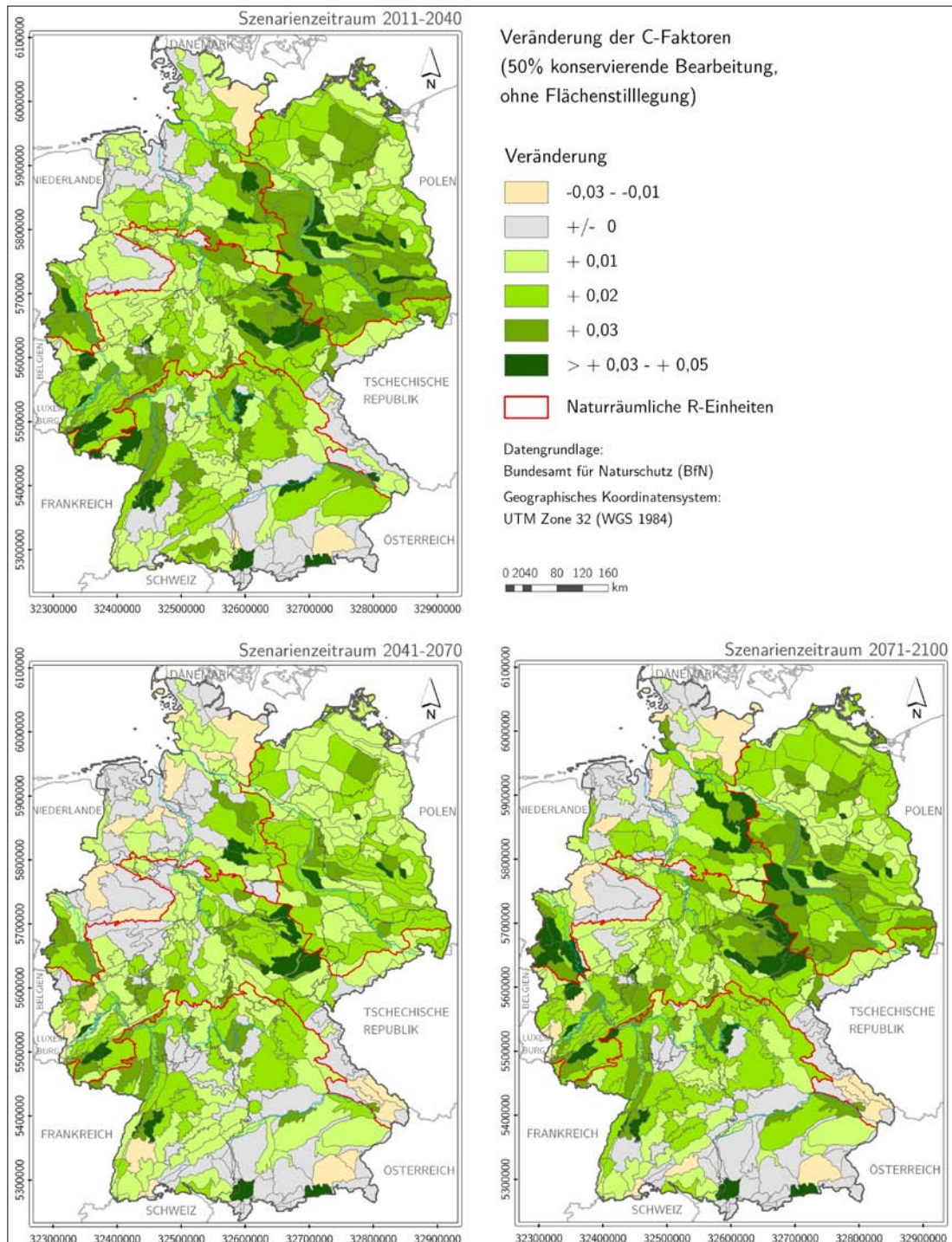


Abbildung 79: Absolute Veränderung der C-Faktoren in den Naturräumen gegenüber der Referenzperiode (Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung 50 %, keine Berücksichtigung von Stilllegungen)

## 5.2 Auswirkungen auf die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung

Wie in Kapitel 5.1.3 dargelegt, führt insbesondere die Verschiebung der innerjährlichen Starkregenanteile (R-Faktorenanteile), in Kombination mit der temperaturbedingten Veränderung der Kulturperioden zu einer Erhöhung der C-Faktoren in den meisten Regionen Deutschlands. Dieser Prozess verstärkt sich bei einer angenommenen Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und der Umwandlung von Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe. Dagegen konnte für die Entwicklung der R-Faktoren und somit für die potenzielle Erosionsgefährdung bis 2070 keine eindeutige Tendenz für Deutschland festgestellt werden. Hier wurden Regionen sowohl mit rückläufigen als auch ansteigenden R-Faktoren ausgewiesen. Erst im letzten Szenarienzeitraum kommt es großräumig zu einem Anstieg der potenziellen Erosionsgefährdung (vgl. Kap. 4.2). Welche Folgen sich aus der Veränderung der R- und C-Faktoren für die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung erwarten lassen, wird nachfolgend dokumentiert. Die Visualisierung der räumlichen Verteilung der nutzungsabhängigen Bodenabträge erfolgt auf Basis der für jeden Naturraum aggregierten Werte. Die Darstellung anhand des 50-m-Rasters ist aufgrund der Gebietsgröße im Rahmen des vorliegenden Berichtes für Gesamtdeutschland nur eingeschränkt möglich. Zudem ist es vorrangiges Ziel der Studie, entsprechend der gewählten Maßstabebene, vorrangig großräumige Veränderungen und weniger lokale Muster innerhalb der Naturräume wiederzugeben. Die rasterbasierten Ergebnisse werden als GIS-Datensatz digital vorgehalten.

Als Bezugseinheiten gelten die ackerbaulich genutzten Flächen innerhalb eines Naturraumes. Abbildung 81 zeigt den mittleren jährlichen Bodenabtrag aller Naturräume für den Referenzzeitraum (1971-2000). Dargestellt sind die Annahmen einer 100 % konventionellen und 50 % konservierenden Bodenbearbeitung. Hinsichtlich der Ursachenbeschreibung für die regionale Verbreitung der Bodenerosion wird auf Kapitel 3.3 verwiesen. Geringfügige Abweichungen zu Abbildung 55 ergeben sich ausschließlich aus den Differenzen zwischen DWD-Daten und den Ergebnissen des WETTREG-Kontrolllaufes. Zu berücksichtigen ist, dass die Klassifizierung der Naturräume unabhängig vom Anteil der ackerbaulichen Fläche vorgenommen wurde. Insbesondere die Naturräume des Schwarzwaldes, des Rheinischen Schiefergebirges und des Bayerischen Waldes weisen unter Annahme einer zu 100 % umgesetzten konventionellen Bodenbearbeitung mittlere Abtragsraten von über  $10 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$  auf. Dabei liegt in diesen Regionen der Anteil der ackerbaulich genutzten Fläche unter 10 % (Abbildung 80).

Insofern dienen Abbildung 80 und Abbildung 81 der quantitativen Einordnung der nachfolgend dokumentierten Ergebnisse vor dem Hintergrund des Anteils der Ackerflächen in den Naturräumen. Eine Auswertung mit stärkerer Fokussierung auf ackerbaulich intensiver genutzte Räume wird in Abschnitt 5.3 vorgenommen.

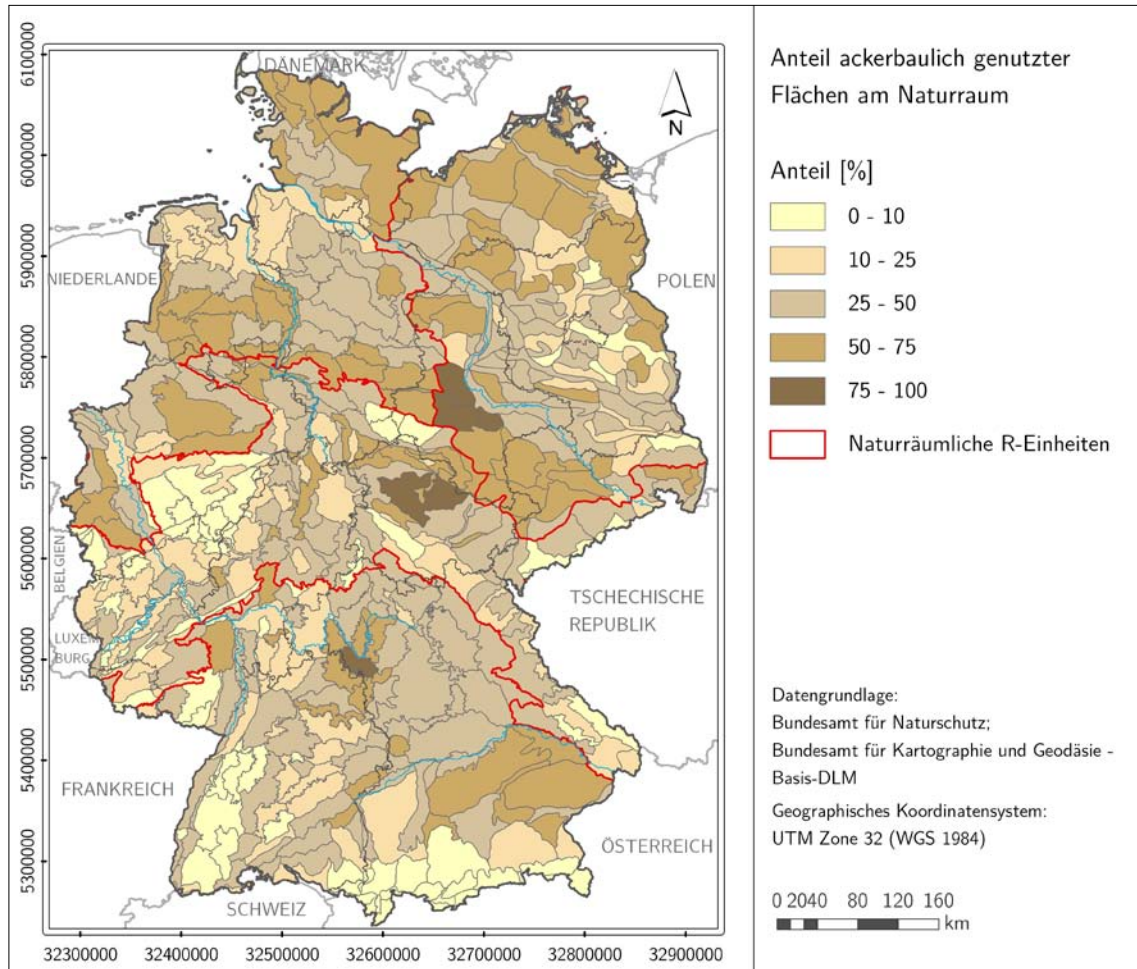


Abbildung 80: Flächenanteil ackerbaulicher Flächen an der Gesamtfläche der Naturräume

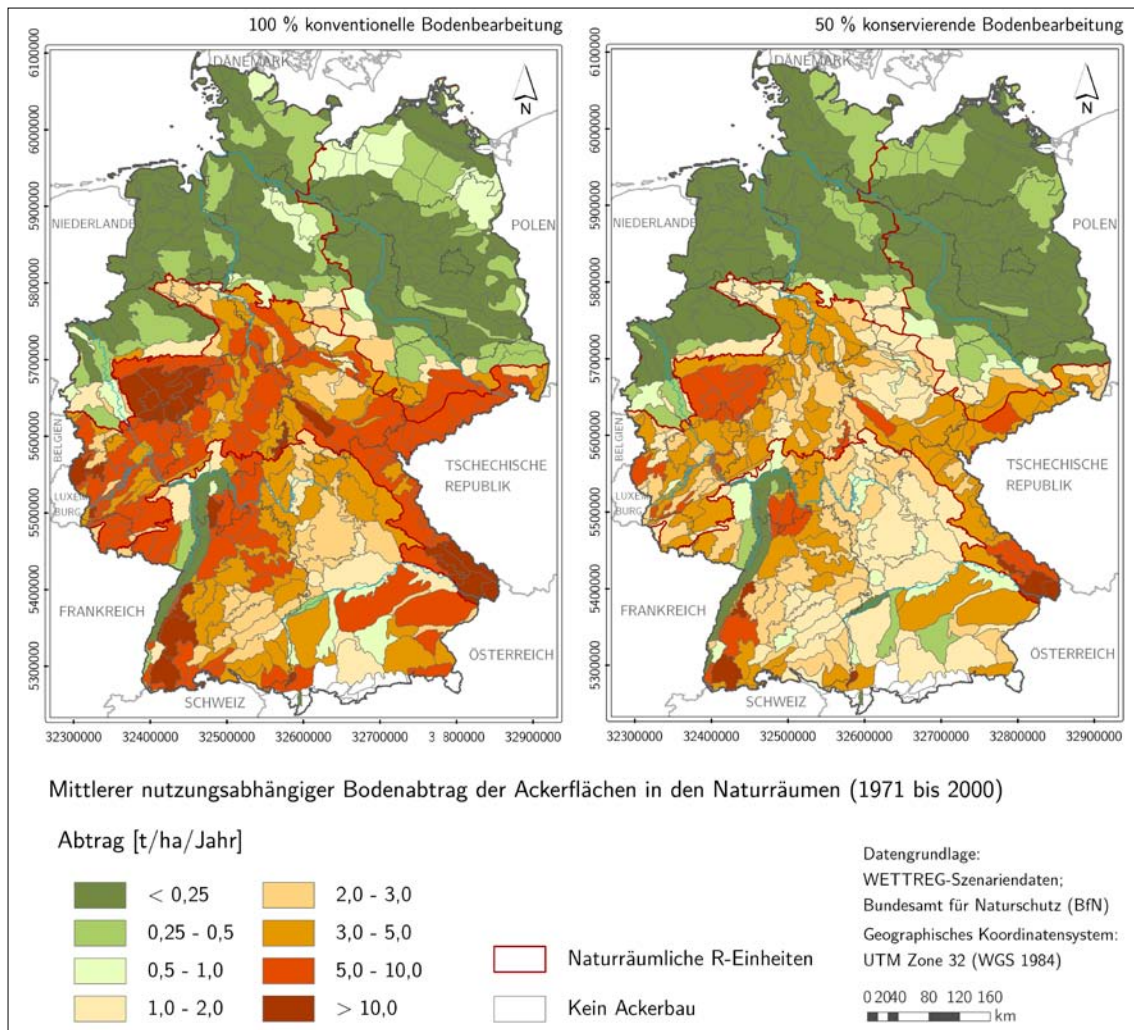


Abbildung 81: Mittlerer nutzungsabhängiger Bodenabtrag für 100 % konventionelle und 50 % konservierende Bodenbearbeitung in den Naturräumen Deutschlands (Kontrolllauf)

Abbildung 82 bis Abbildung 84 zeigen die relative Veränderung der nutzungsabhängigen Bodenerosion auf den Ackerflächen der Naturräume in den Szenarienzeiträumen gegenüber dem Referenzzeitraum. Aufgrund der Vielzahl von Annahmen zum Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung (Kap. 5.1) wird die vergleichende Betrachtung für die Bodenbearbeitungsvarianten ‚100 % konventionell‘ und ‚50 % konservierend‘ vorgenommen. Eine weitere Differenzierung erfolgt für ein mögliches Szenarium, das die Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung und deren Umwidmung in Anbauflächen für Energiepflanzen einbezieht (Szenarium 3, Kap. 2.4.3).

Im **Zeitraum 2011 bis 2040** würde es vor allem in großen Teilen Nordost- und Ostdeutschlands, aber auch westlich des Rheins zu einer Erhöhung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung um über 25 % kommen. Während die Ursachen für den Erosionsanstieg in Rheinland-Pfalz, dem westlichen Nordrhein-Westfalen und Mecklenburg-Vorpommern vor allem in einem Anstieg der Starkniederschlagssummen und somit höheren R-Faktoren liegen, spiegelt sich in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen die Veränderung der C-Faktoren als Folge einer Verschiebung der R-Faktorenanteile und

Kulturperioden wider (vgl. Abbildung 78). Aufgrund der günstigen Standortverhältnisse werden dort in einzelnen Regionen insbesondere Zuckerrüben, Winterweizen oder Sommergerste angebaut. Da diese Fruchtarten übermäßig stark auf die ermittelte Verschiebung der innerjährlichen Starkregenhäufigkeiten reagieren (vgl. Tabelle 41), kommt es vor allem in Mitteldeutschland – trotz nahezu konstanter R-Faktoren – zu einer erhöhten Erosionsgefährdung. Durch den Wegfall von Stilllegungsflächen, einhergehend mit einer intensiveren Bodenbearbeitung, würde sich der Effekt einer zunehmenden Erosionsgefährdung weiter verstärken (Abbildung 82). Naturräume mit einem Rückgang der nutzungsabhängigen Bodenabträge um 5 bis 25 % liegen vorwiegend im Bereich der Schwäbischen Alb und im Erzgebirge und seinem Vorland. Bezogen auf die naturräumlichen R-Einheiten zeigt vor allem das Nordostdeutsche Tiefland die stärksten Veränderungen (Tabelle 46 bis Tabelle 49; Abbildung 85 & Abbildung 86). Bei 50 % konservierender Bodenbearbeitung (ohne Wegfall der Stilllegungsflächen) würden die Anstiegsraten im Mittel bei + 35 % liegen und somit deutlich höher als der bundesweite Durchschnitt (+ 12,6 %). Allerdings, und das verdeutlicht Tabelle 46, liegen die mittleren Bodenabträge in den nördlichen Haupteinheiten auf vergleichsweise niedrigem Niveau, sodass sich hier überdurchschnittliche Veränderungen deutlich weniger auf die Gesamtbilanz auswirken als in den westlichen und östlichen Mittelgebirgen sowie den südlichen Mittelgebirgen & Alpen.

Für den **Szenarienzeitraum 2041 bis 2070** konnte gegenüber der vorherigen Periode ein Rückgang der Erosionsgefährdung abgeschätzt werden. Allerdings liegen in größeren Teilen Deutschlands die mittleren Abtragswerte immer noch über dem Niveau des Referenzzeitraumes (Abbildung 83). Die gegenüber heute höheren Abtragswerte im Westen und Nordwesten Deutschlands sind vor allem auf die gleichbleibend erhöhten R-Faktoren zurückzuführen (Abbildung 66). Diese sind in Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt rückläufig. Hier verstärkt sich die nutzungsabhängige Erosionsgefährdung infolge des Anstieges der C-Faktoren, bei denen sich vor allem die veränderte Starkregenverteilung im Jahresverlauf ungünstig auf das Erosionspotenzial auswirkt (Abbildung 79). Naturräume, in denen ein Rückgang der Erosionsgefährdung auftreten kann, konzentrieren sich vordergründig auf den süddeutschen Raum sowie Teile Sachsens und Brandenburgs. Die Umwandlung der Stilllegungsflächen würde auch in dieser Periode die Erosionsgefahr im Mittel erhöhen, sodass vor allem in Süd- und Ostdeutschland der Rückgang der mittleren R-Faktoren zu einer Reduzierung der potenziellen Bodenabträge führen, dieser aber durch den klima- und nutzungsabhängigen Einfluss auf die Bodenbedeckung und den daraus resultierenden Anstieg der C-Faktoren überdeckt werden würde (Abbildung 83). Im bundesweiten Durchschnitt sind nur geringfügige Veränderungen gegenüber dem Referenzzeitraum auszumachen. Einem leichten Rückgang bei der konventionellen Bodenbearbeitung um 1,3 % stehen geringe Zuwächse bei der konservierenden Bodenbearbeitung um 0,9 bzw. 2,7 % gegenüber (Tabelle 47). Durch die Umwidmung der Stilllegungsflächen wäre eine Zunahme der mittleren Abträge um > 5 % zu erwarten.

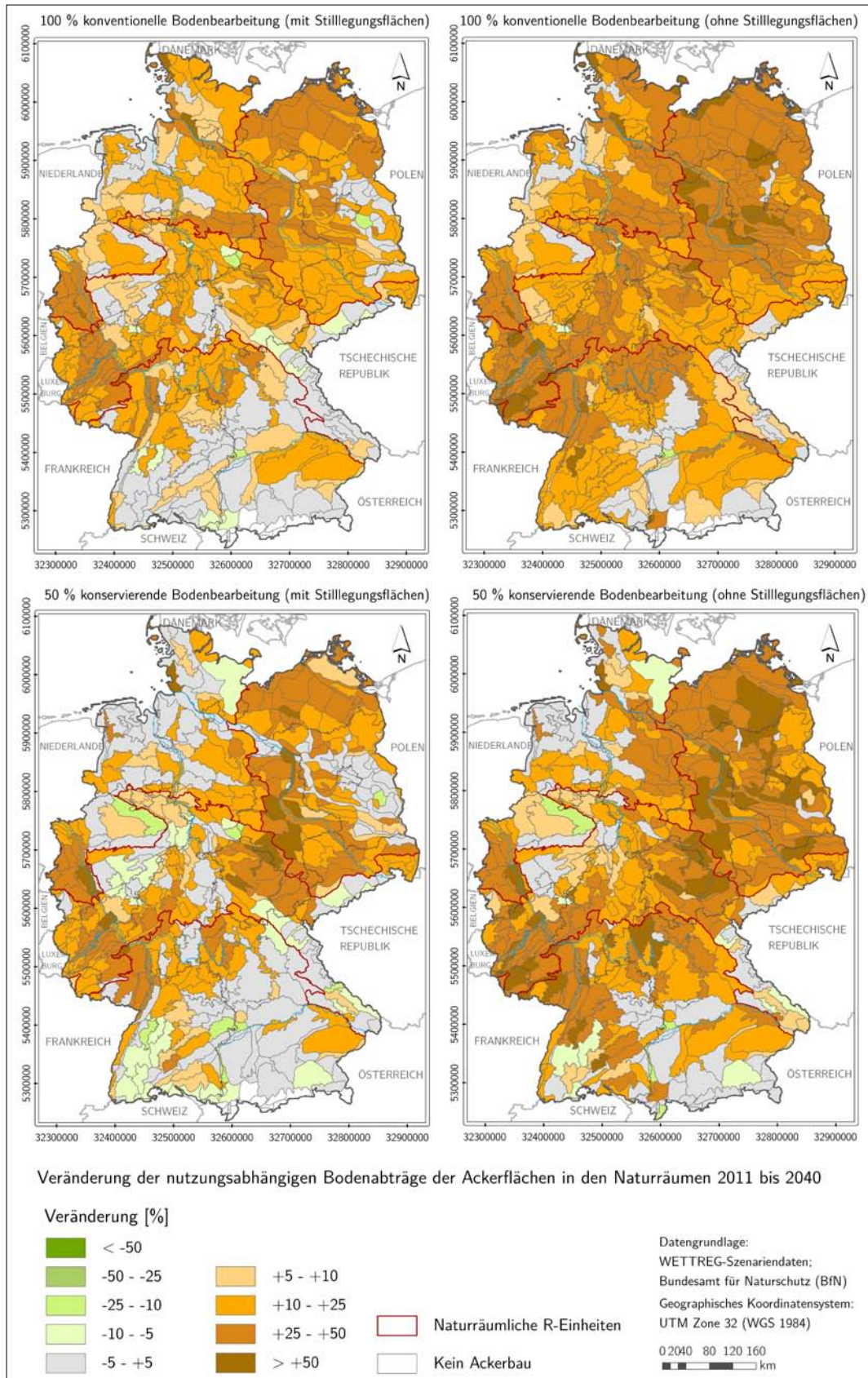


Abbildung 82: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2011-2040 gegenüber dem Referenzzeitraum

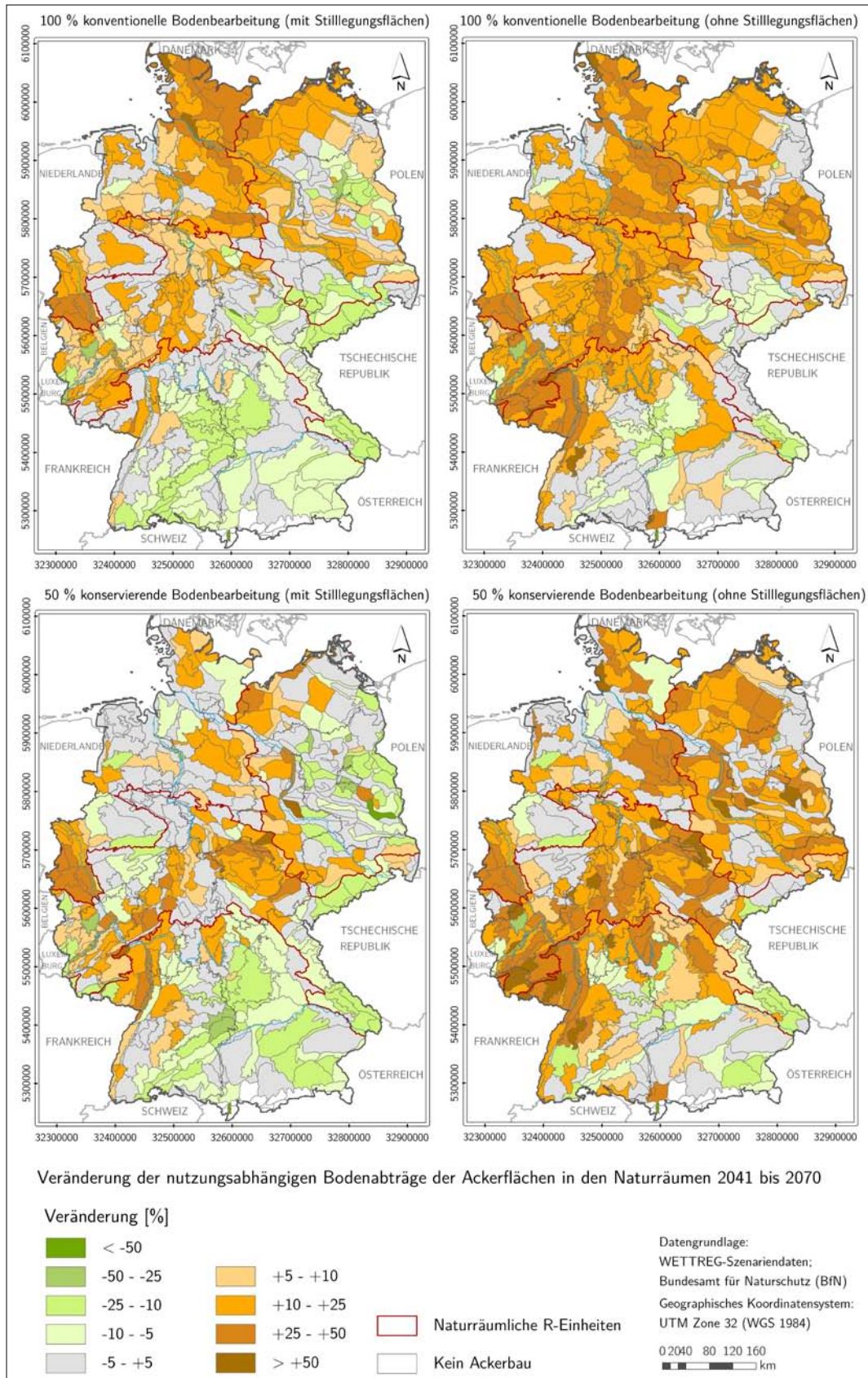


Abbildung 83: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum

Für den letzten Szenarienzeitraum von **2071 bis 2100** konnten gegenüber der Periode 2041-2070 höhere C-Faktoren ermittelt werden, die auch über denen der Referenzperiode liegen (Kap. 5.1.3). Gleichzeitig ist ein Anstieg der R-Faktoren wie in keinem anderen Szenarienzeitraum zu erwarten, der, mit Ausnahme einzelner Regionen in Ost- und Süddeutschland, zu einer großräumigen Erhöhung der potenziellen Erosionsgefährdung führt (Abbildung 72). Die Zunahme beider die Erosion beeinflussenden Faktoren lässt für den letzten Betrachtungszeitraum einen deutlichen Anstieg der nutzungsabhängigen Bodenabträge erwarten. Mit Ausnahme kleinerer Regionen in Sachsen und Brandenburg sowie größerer Gebiete in Bayern und Baden-Württemberg sind davon die meisten Naturräume in Deutschland betroffen. Insbesondere in Süddeutschland gleichen sich die entgegengerichteten Tendenzen der C- und R-Faktorenentwicklung weitestgehend aus. Im bundesweiten Durchschnitt nehmen die Abtragswerte je nach Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung zwischen 15 und 18 % zu. Am stärksten betroffen sind die norddeutschen Tiefländer, allerdings großräumig auf geringem Ausgangsniveau (Tabelle 47). Ebenfalls überdurchschnittlich ist der Anstieg in den westlichen und östlichen Mittelgebirgen. Hier steigen die mittleren Bodenabträge auf den ackerbaulichen Flächen gegenüber der Referenzperiode von 5,3 auf 6,4 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup> (100 % konventionelle Bodenbearbeitung) bzw. von 3,1 auf 3,8 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup> (50 % konservierende Bodenbearbeitung) (Tabelle 46). Besonders kritisch ist die Erhöhung der Anbauflächen von Energiepflanzen, insbesondere Mais bei konventioneller Bodenbearbeitung, zu bewerten. Vor allem im Szenarienzeitraum 2071 bis 2100 würde das Ausmaß der klimabedingten Erhöhung der Bodenerosionsgefahr deutlich verstärkt werden. Über nahezu alle Naturräume hinweg wäre gegenüber dem heutigen Zustand eine Zunahme des Bodenabtrages zu erwarten, der im bundesweiten Durchschnitt zwischen 25 und 30 % liegen würde (Tabelle 47). Für diese Fruchtarten ist in Zukunft eine konservierende Bodenbearbeitung dringend zu empfehlen.

Die erosionsmindernde Wirkung, welche die Erhöhung des Anteils an konservierenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen hat, zeigt die Betrachtung der mittleren Abtragswerte für Deutschland in den Szenarienzeiträumen (Tabelle 46). Für die Annahme einer 50 %-igen konservierenden Bodenbearbeitung zeigt sich ein Anstieg der Erosionsgefährdung um etwa 18 % von 1,4 auf 1,6 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup>. Die Umsetzung konservierender Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf 75 % aller Ackerflächen würde für den Zeitraum 2071-2100 einen mittleren Bodenabtrag von ca. 1,1 t x ha<sup>-1</sup> x Jahr<sup>-1</sup> bedeuten. Trotz des klimabedingten Anstieges der Erosionsgefährdung wäre somit gegenüber der 50 %-igen konservierenden Bodenbearbeitung des Referenzzeitraumes ein um 18 % geringerer Abtragswert zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Schwierigkeiten, die zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Erosionsgefährdung quantitativ abschätzen zu können, wird deutlich, dass durch die Veränderung der Bodenbearbeitung die als Folge des Klimawandels zu erwartende Erhöhung der Erosionsgefahr nicht nur gemindert werden kann. Vielmehr erscheint eine Reduzierung der heutigen Erosionswerte auch vor dem Hintergrund des Klimawandels möglich.



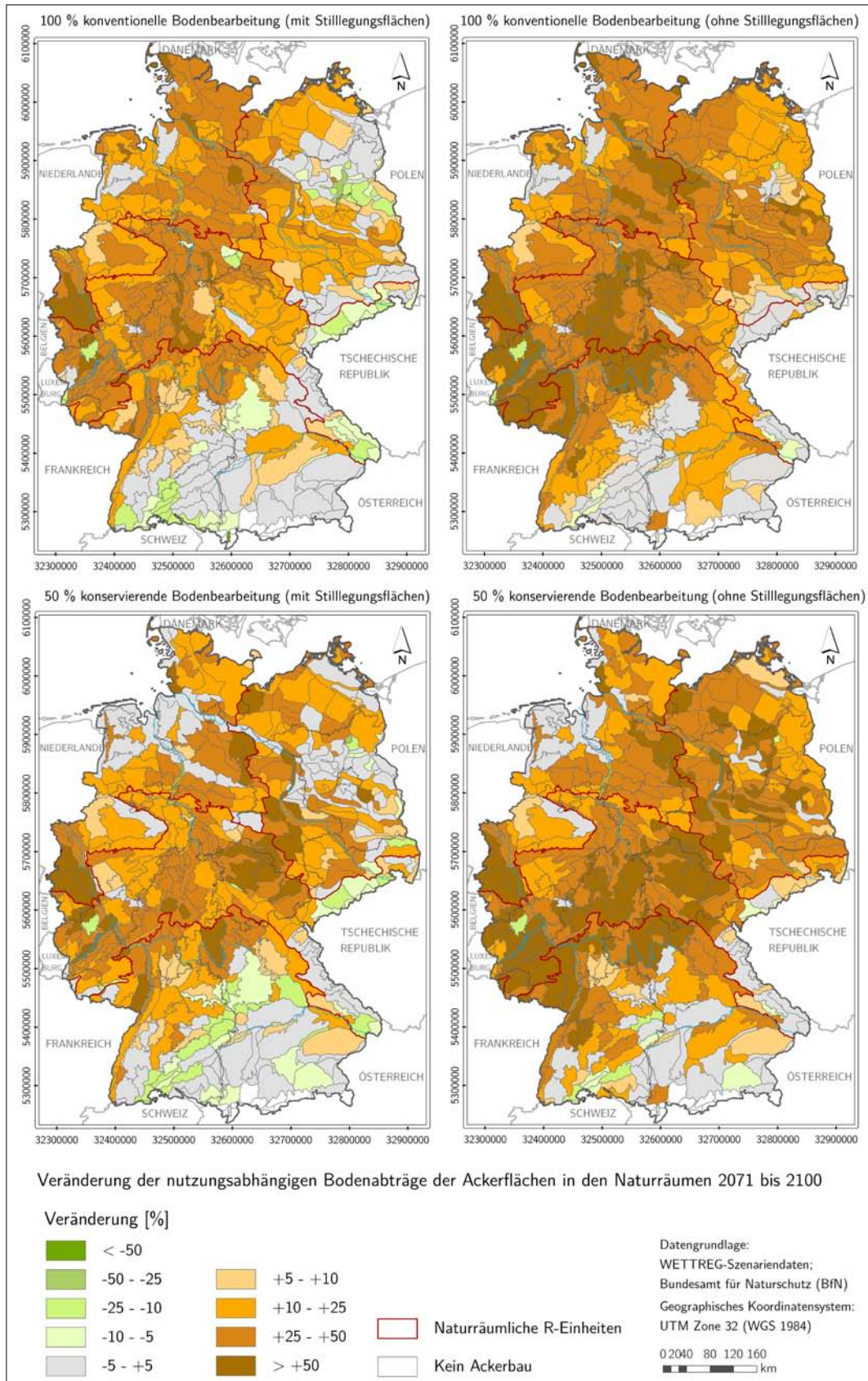


Abbildung 84: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in den Naturräumen Deutschlands im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum

Zeit-raum	C-Faktoren-Szenarium		Nordwestdeutsches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland	Westl. & Östl. Mittelgebirge	Südl. Mittelgeb. & Alpen	Deutschland
	Nr.	Beschreibung von Bodenbearbeitung und Anbauspektren					
1971 bis 2000 (Referenzperiode)		100 % konventionell	0,4	0,8	5,3	3,6	2,3
		25 % konservierend	0,3	0,6	4,1	2,8	1,8
		50 % konservierend	0,3	0,4	3,1	2,2	1,4
		100 % konservierend	0,1	0,2	1,4	0,9	0,6
2011 bis 2040	(1)	100 % konventionell	0,5	1,0	5,9	3,9	2,6
	(2)	50 % konservierend	0,3	0,6	3,5	2,3	1,5
	(2)	75 % konservierend	0,2	0,4	2,4	1,5	1,0
	(2)	100 % konservierend	0,1	0,2	1,4	1,0	0,6
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,5	1,0	6,4	4,2	2,8
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,3	0,6	3,8	2,5	1,7
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,2	0,4	2,5	1,7	1,1
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,1	0,2	1,4	1,0	0,6
2041 bis 2070	(1)	100 % konventionell	0,5	0,8	5,3	3,4	2,3
	(2)	50 % konservierend	0,3	0,5	3,2	2,1	1,4
	(2)	75 % konservierend	0,2	0,3	2,2	1,4	0,9
	(2)	100 % konservierend	0,1	0,2	1,5	0,9	0,6
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,5	0,8	5,8	3,7	2,5
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,3	0,5	3,5	2,3	1,5
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,2	0,3	2,5	1,5	1,0
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,1	0,2	1,5	1,0	0,7
2071 bis 2100	(1)	100 % konventionell	0,5	0,9	6,4	3,9	2,7
	(2)	50 % konservierend	0,3	0,5	3,8	2,4	1,6
	(2)	75 % konservierend	0,3	0,4	2,7	1,6	1,1
	(2)	100 % konservierend	0,2	0,2	1,7	1,0	0,7
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	0,6	0,9	6,9	4,2	2,9
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	0,4	0,6	4,2	2,6	1,8
	(3)	75 % konservierend ohne Stilllegung	0,3	0,4	3,0	1,8	1,2
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	0,2	0,3	1,8	1,1	0,8

Tabelle 46: Mittlere nutzungsabhängige Bodenabträge in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien [ $\text{txha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ ]

Zeit- raum	C-Faktoren-Szenarium		Nordwestdeutsches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland	Westl. & Östl. Mittelgebirge	Südl. Mittelgeb. & Alpen	Deutschland
	Nr.	Beschreibung von Bodenbearbeitung und Anbauspektren					
2011 bis 2040	(1)	100 % konventionell	22,9	20,2	12,3	9,8	12,6
	(2)	50 % konservierend	12,7	34,7	14,1	6,3	12,6
	(2)	100 % konservierend	19,3	16,8	0,4	6,1	5,1
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	28,1	26,7	21,7	18,3	21,2
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	16,1	40,3	22,3	18,4	22,0
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	17,4	17,8	-3,6	11,7	5,3
2041 bis 2070	(1)	100 % konventionell	15,5	-3,2	1,0	-5,5	-1,3
	(2)	50 % konservierend	4,5	7,3	4,2	-4,7	0,9
	(2)	100 % konservierend	23,7	4,2	1,0	1,5	2,7
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	18,6	0,2	10,2	3,9	7,1
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	8,0	12,2	15,0	5,5	10,6
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	26,6	6,6	5,5	6,2	6,9
2071 bis 2100	(1)	100 % konventionell	32,6	7,6	21,3	8,9	15,5
	(2)	50 % konservierend	26,3	25,4	23,9	9,7	18,4
	(2)	100 % konservierend	46,9	13,4	16,6	15,0	17,2
	(3)	100 % konventionell ohne Stilllegung	39,6	14,1	31,7	18,6	25,2
	(3)	50 % konservierend ohne Stilllegung	31,1	33,2	37,6	21,4	30,3
	(3)	100% konservierend ohne Stilllegung	52,2	29,2	25,2	20,1	25,0

Tabelle 47: Relative Veränderung der mittleren nutzungsabhängigen Bodenabträge in den naturräumlichen R-Einheiten für verschiedene C-Faktoren-Szenarien gegenüber der Referenzperiode [%]

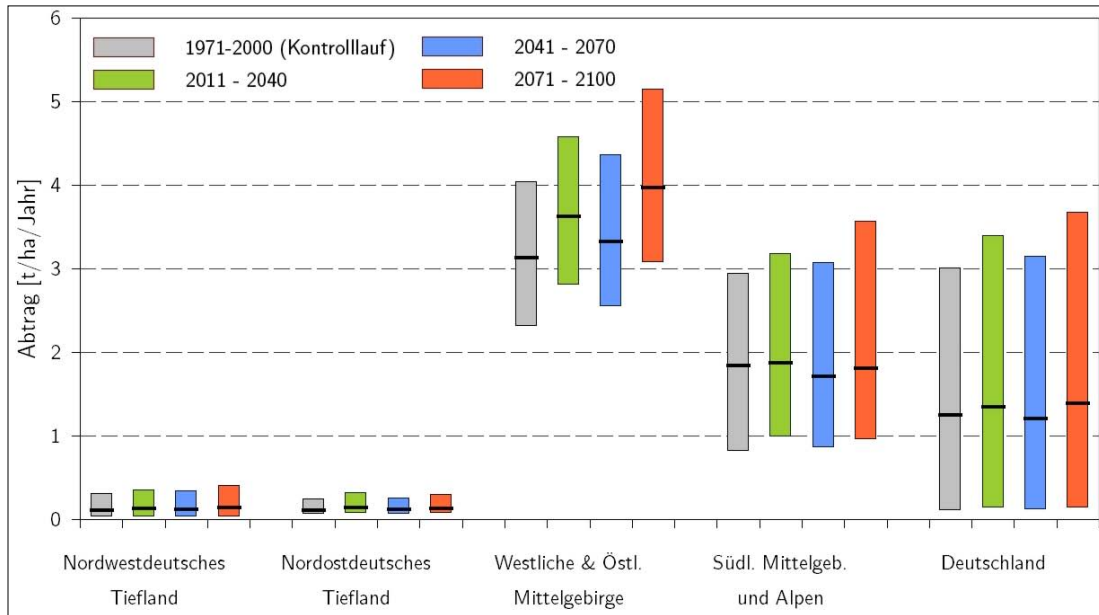


Abbildung 85: Median- und Quartilwerte des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten bei 50 %-iger konservierender Bodenbearbeitung

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	0,1	0,2	0,0	2,1	0,3	0,0
	2011-2040	0,1	0,3	0,0	2,1	0,4	0,0
	2041-2070	0,1	0,3	0,0	2,2	0,3	0,0
	2071-2100	0,1	0,3	0,0	2,5	0,4	0,0
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	0,1	0,3	0,0	3,7	0,3	0,1
	2011-2040	0,1	0,4	0,0	4,7	0,3	0,1
	2041-2070	0,1	0,3	0,0	3,7	0,3	0,1
	2071-2100	0,1	0,4	0,0	4,0	0,3	0,1
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	3,1	3,6	0,0	13,9	4,0	2,3
	2011-2040	3,6	4,0	0,0	13,0	4,6	2,8
	2041-2070	3,3	3,6	0,0	11,5	4,4	2,5
	2071-2100	4,0	4,3	0,0	13,0	5,2	3,1
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	1,8	2,3	0,0	14,8	3,0	0,8
	2011-2040	1,9	2,4	0,0	15,4	3,2	1,0
	2041-2070	1,7	2,3	0,0	14,5	3,1	0,9
	2071-2100	1,8	2,5	0,0	15,7	3,6	1,0
Deutschland Gesamt	1971-2000	1,2	1,9	0,0	14,8	3,0	0,1
	2011-2040	1,3	2,0	0,0	15,4	3,4	0,1
	2041-2070	1,2	1,9	0,0	14,5	3,2	0,1
	2071-2100	1,4	2,2	0,0	15,7	3,7	0,1

Tabelle 48: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen Haupteinheiten bei 50 %-iger konservierender Bodenbearbeitung [ $\text{t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ ]

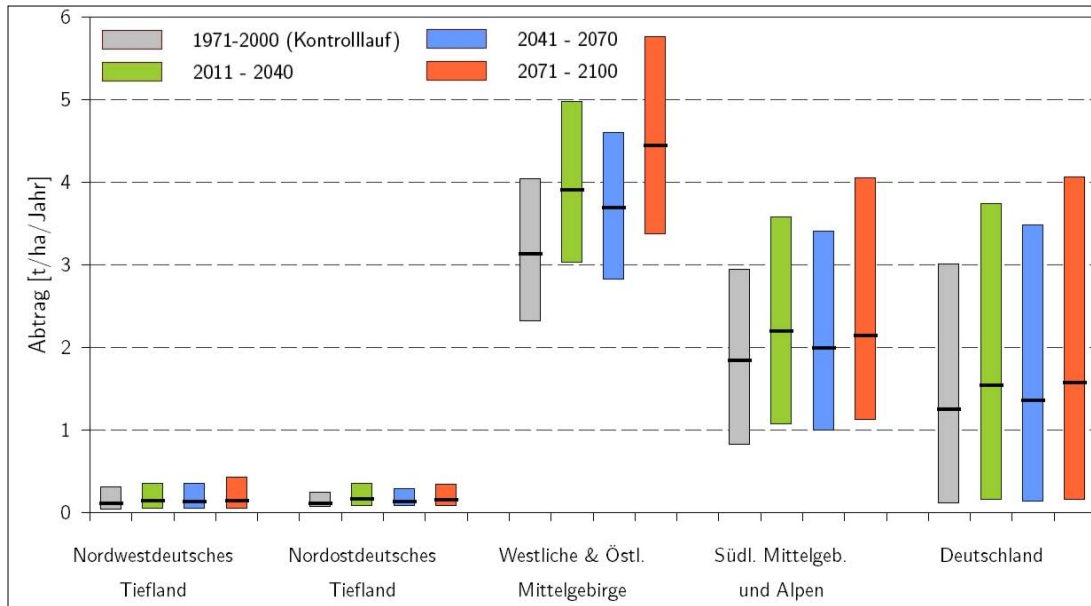


Abbildung 86: Median- und Quartilwerte des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume innerhalb der naturräumlichen R-Einheiten (50 % konservierende Bodenbearbeitung ohne Stilllegungsflächen)

Naturräumliche R-Einheit	Zeitraum	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Oberes Quartil	Unteres Quartil
Nordwestdeutsches Tiefland	1971-2000	0,1	0,2	0,0	2,1	0,3	0,0
	2011-2040	0,1	0,3	0,0	2,1	0,4	0,0
	2041-2070	0,1	0,3	0,0	2,2	0,4	0,0
	2071-2100	0,1	0,3	0,0	2,5	0,4	0,0
Nordostdeutsches Tiefland	1971-2000	0,1	0,3	0,0	3,7	0,3	0,1
	2011-2040	0,2	0,4	0,0	4,7	0,4	0,1
	2041-2070	0,1	0,4	0,0	3,7	0,3	0,1
	2071-2100	0,2	0,4	0,0	4,4	0,3	0,1
Westliche & Östliche Mittelgebirge	1971-2000	3,1	3,6	0,0	13,9	4,0	2,3
	2011-2040	3,9	4,3	0,0	13,0	5,0	3,0
	2041-2070	3,7	4,1	0,0	11,5	4,6	2,8
	2071-2100	4,4	4,9	0,0	13,0	5,8	3,4
Südliche Mittelgebirge und Alpen	1971-2000	1,8	2,3	0,0	14,8	3,0	0,8
	2011-2040	2,2	2,8	0,0	20,0	3,6	1,1
	2041-2070	2,0	2,6	0,0	19,4	3,4	1,0
	2071-2100	2,1	2,9	0,0	20,9	4,1	1,1
Deutschland Gesamt	1971-2000	1,2	1,9	0,0	14,8	3,0	0,1
	2011-2040	1,5	2,3	0,0	20,0	3,7	0,2
	2041-2070	1,4	2,1	0,0	19,4	3,5	0,1
	2071-2100	1,6	2,5	0,0	20,9	4,1	0,2

Tabelle 49: Statistische Kenngrößen des nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Naturräume in den naturräumlichen R-Einheiten (50 % konserv. Bodenbearbeitung ohne Stilllegungsflächen) [ $\text{t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{Jahr}^{-1}$ ]

### 5.3 Ausweisung von Schwerpunktgebieten einer zukünftigen Entwicklung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung

Die in Kapitel 5.2 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf alle Naturräume, unabhängig von Anteil und Gesamtgröße der bewirtschafteten Ackerflächen. Im Sinne der bundesweiten Gesamtbetrachtung, bei der auch eine regional differenzierte Abschätzung der Gesamtbilanz erfolgen sollte, ist eine Fokussierung auf Naturräume erforderlich, die aufgrund ihrer natürlichen Eigenschaften und ihrer Nutzungsstruktur bereits gegenwärtig relevant für die Ausweisung von Schwerpunktgebieten einer nutzungsabhängigen Bodenerosion sind. In Anlehnung an die in Kapitel 4.3 dokumentierte Vorgehensweise zur potenziellen Erosionsgefährdung erfolgte eine Vorauswahl von Naturräumen.

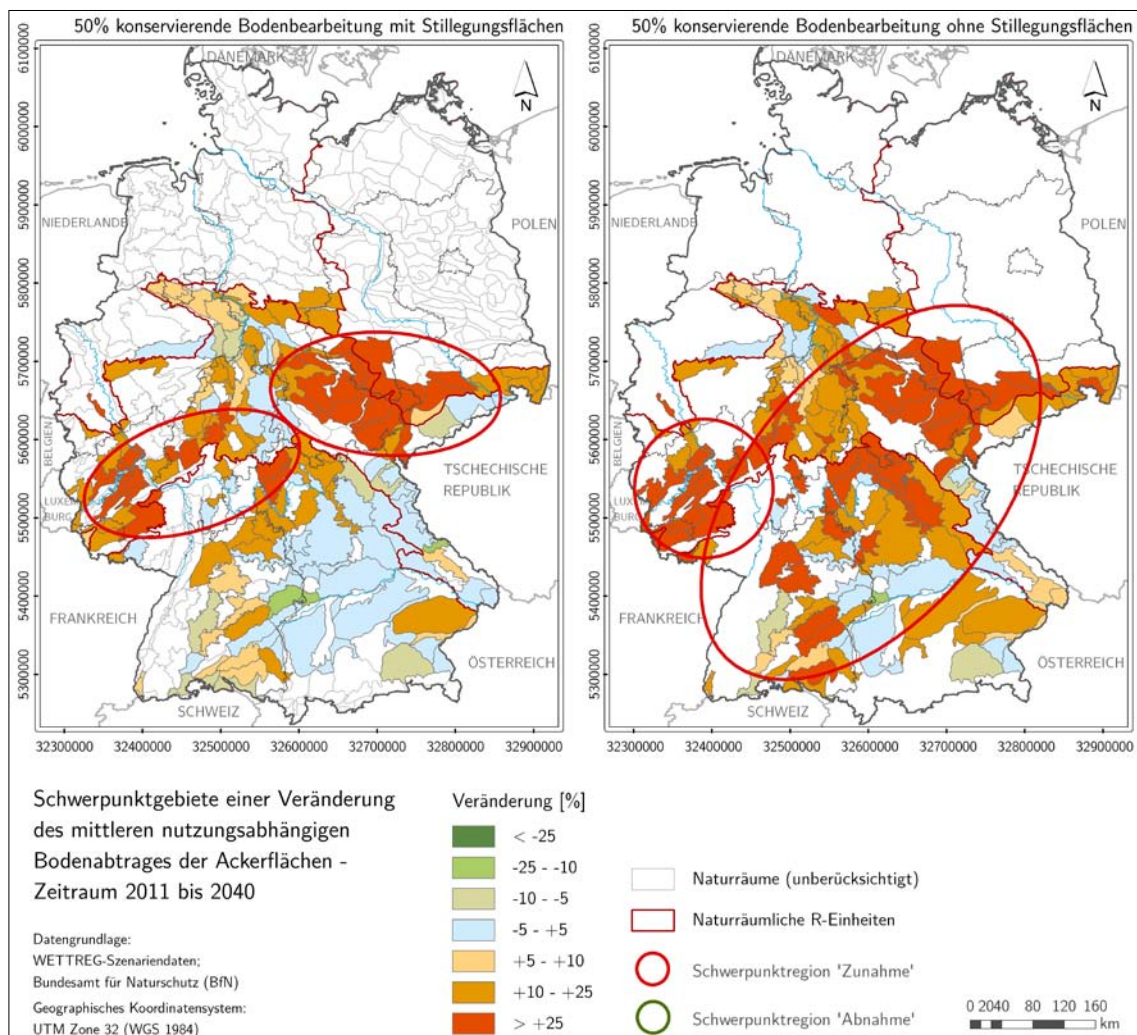
Für den Zeitraum 1971-2000 konnte ein mittlerer Bodenabtrag in Deutschland von ca.  $2,3 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x Jahr}^{-1}$  für die konventionelle Bodenbearbeitung und  $1,4 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x Jahr}^{-1}$  für eine zu 50 % konservierend praktizierte Bearbeitung ermittelt werden (Tabelle 46). Von diesen Werten ausgehend, wurden potenziell alle Naturräume betrachtet, die einen mittleren Bodenabtrag von  $2,0 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x Jahr}^{-1}$  (konventionell) bzw.  $1,0 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x Jahr}^{-1}$  (50 % konservierend) überschreiten. Das betrifft 263 der 502 Naturraumbenen, die auch eine geringe Größe und einen sehr geringen Ackerflächenanteil aufweisen können. Um die Anzahl der Betrachtungsräume weiter einzuschränken, wurde nur auf Naturräume mit einer Ackerfläche  $> 50 \text{ km}^2$  und einem Anteil der Ackerfläche am Naturraum von  $> 15 \%$  orientiert. Die vorgenommene Auswahl umfasst insgesamt 165 Naturräume. Diese erbringen sowohl für die konventionelle als auch eine zu 50 % konservierende Bodenbearbeitung insgesamt 81 % aller für Deutschland ermittelten nutzungsabhängigen Bodenabträge im Referenzzeitraum.

Die nachfolgenden Karten zeigen die Veränderung der nutzungsabhängigen Bodenabträge in den ausgewählten Naturräumen unter Annahme eines Flächenanteils der konservierenden Bodenbearbeitung von 50 %. Dieses Szenarium dürfte unter Berücksichtigung des zu erwartenden Wasser- und Energiebedarfs und des gegenwärtigen Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung, der in Ostdeutschland bereits gegenwärtig bei 50 % liegt (vgl. Kap. 3.1.3), als die Wahrscheinlichste der drei Annahmen (0 %, 50 %, 100 % konservierende Bodenbearbeitung) gelten. Neben den klassifizierten Veränderungen sind Schwerpunktregionen zunehmender (rot) und abnehmender (grün) Erosionsgefährdungen grob umrissen.

Im Zeitraum **2011 bis 2040** sind, vor allem begründet durch steigende C-Faktoren, die Naturräume vom sächsischen Lösshügelland bis zum Thüringer Becken mit seinen Randplatten, einschließlich von Teilen des Harzvorlandes durch einen Anstieg der mittleren Erosionsraten um über 25 % betroffen (Abbildung 87). Einen Anstieg der Erosionsgefahr in gleicher Größenordnung weisen der Hunsrück sowie Gebiete im Saar-Nahe-Berg- & Hügelland, in der Eifel, dem Taunus und im Westhessischen Berg- und

Hügelland auf. Unter Einbeziehung des Wegfalls bisheriger Stilllegungsflächen käme es zu einer räumlichen Ausdehnung der Schwerpunktgebiete auf das Weserbergland und Naturräume in Hessen und Franken. Größere Regionen mit einem signifikanten Rückgang der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung können nicht ausgewiesen werden. Nur in großen Teilen Bayerns treten im ersten Szenarienzeitraum geringe Veränderungen von  $\pm 5\%$  auf. Im Vergleich zur potenziellen Bodenerosionsgefährdung (vgl. Abbildung 74) wird deutlich, dass sowohl das quantitative als auch das räumliche Ausmaß des Anstieges der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung deutlich zunimmt, was vor allem auf die klimabedingte Veränderung der Kulturperioden und die Verschiebung der R-Faktorenanteile zurückzuführen ist.

Abbildung 87: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten (Naturräume) der Erosionsgefährdung (2011-2040) gegenüber dem Referenzzeitraum



Zwischen 2041 und 2070 führt der Rückgang der R-Faktoren im Erzgebirge, im Bayerischen Wald und in einem größeren, von der Schwäbischen Alb bis zum Steigerwald

reichenden Gebiet zu einem Rückgang der Bodenabträge um 10 bis 25 % gegenüber dem Referenzzeitraum. Die Schwerpunktgebiete zunehmender Erosionsgefahr orientieren sich am Zeitraum 2011-2040, bei allerdings geringeren Ausdehnungen. Insbesondere zwischen dem sächsischen Lösshügelland und dem Thüringer Becken sowie im Bereich der vom Hunsrück bis zum Weserbergland reichenden Mittelgebirgskette tritt eine Erhöhung der Erosionsgefährdung um deutlich mehr als 10 % auf (Abbildung 88).

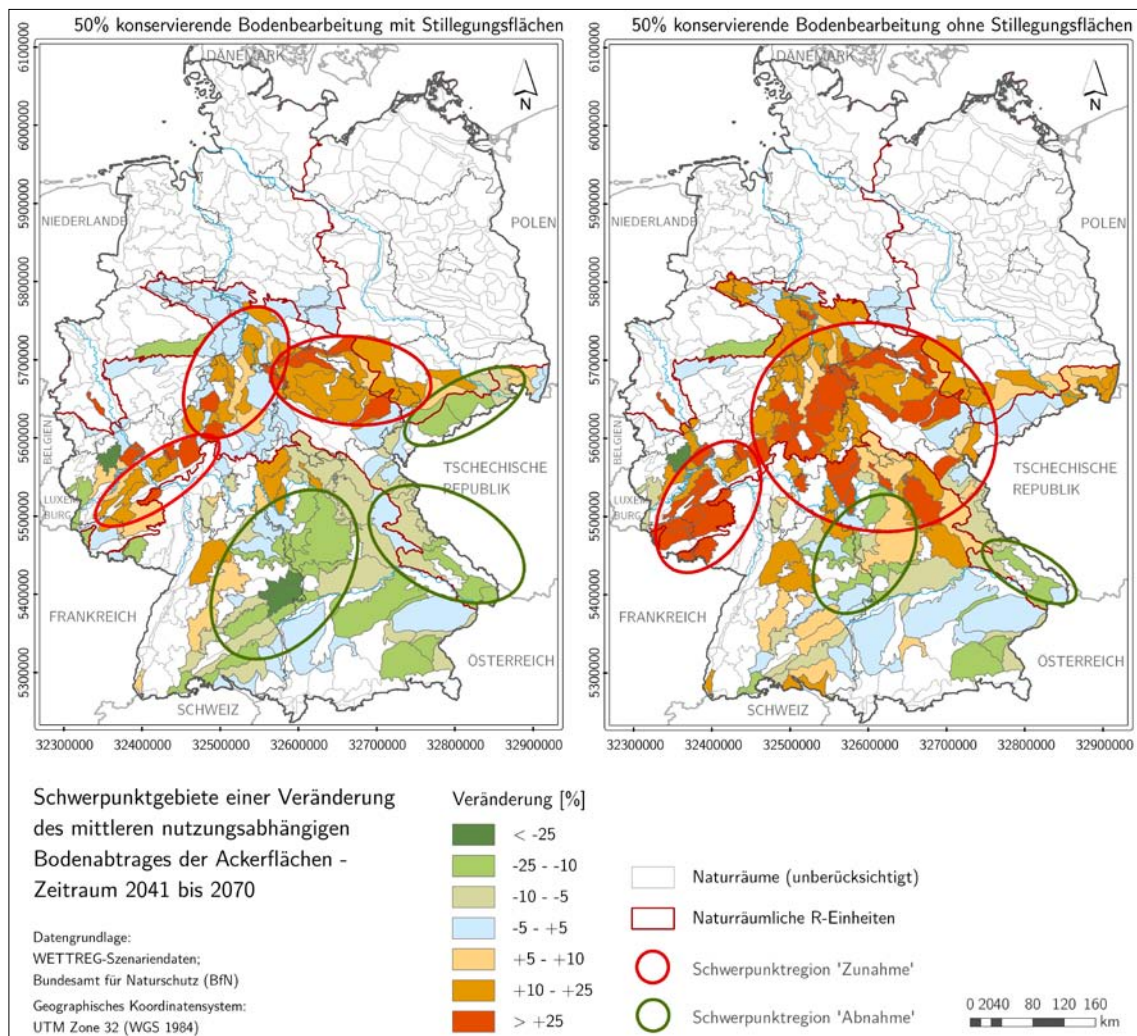


Abbildung 88: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten (Naturräume) der Erosionsgefährdung (2041-2070) gegenüber dem Referenzzeitraum



Infolge deutlich ansteigender R-Faktoren sowie der gegenüber 2041-2070 höheren C-Faktoren weist die Periode zwischen 2071 und 2100 die größte Ausdehnung von Schwerpunktgebieten mit erhöhter Erosionsgefährdung von über 25 % auf. Davon betroffen wäre der gesamte Bereich zwischen Hunsrück und Eifel im Westen, den sächsischen Lössgebieten im Osten, dem Weserbergland im Norden sowie Mainfranken im Süden. Die Umwidmung bisheriger Stilllegungsflächen würde vor allem zu einer quantitativen Verschärfung der Situation führen, in der ein Großteil aller Naturräume einen Anstieg der mittleren Abtragsraten von > 25 % aufweist (Abbildung 89).

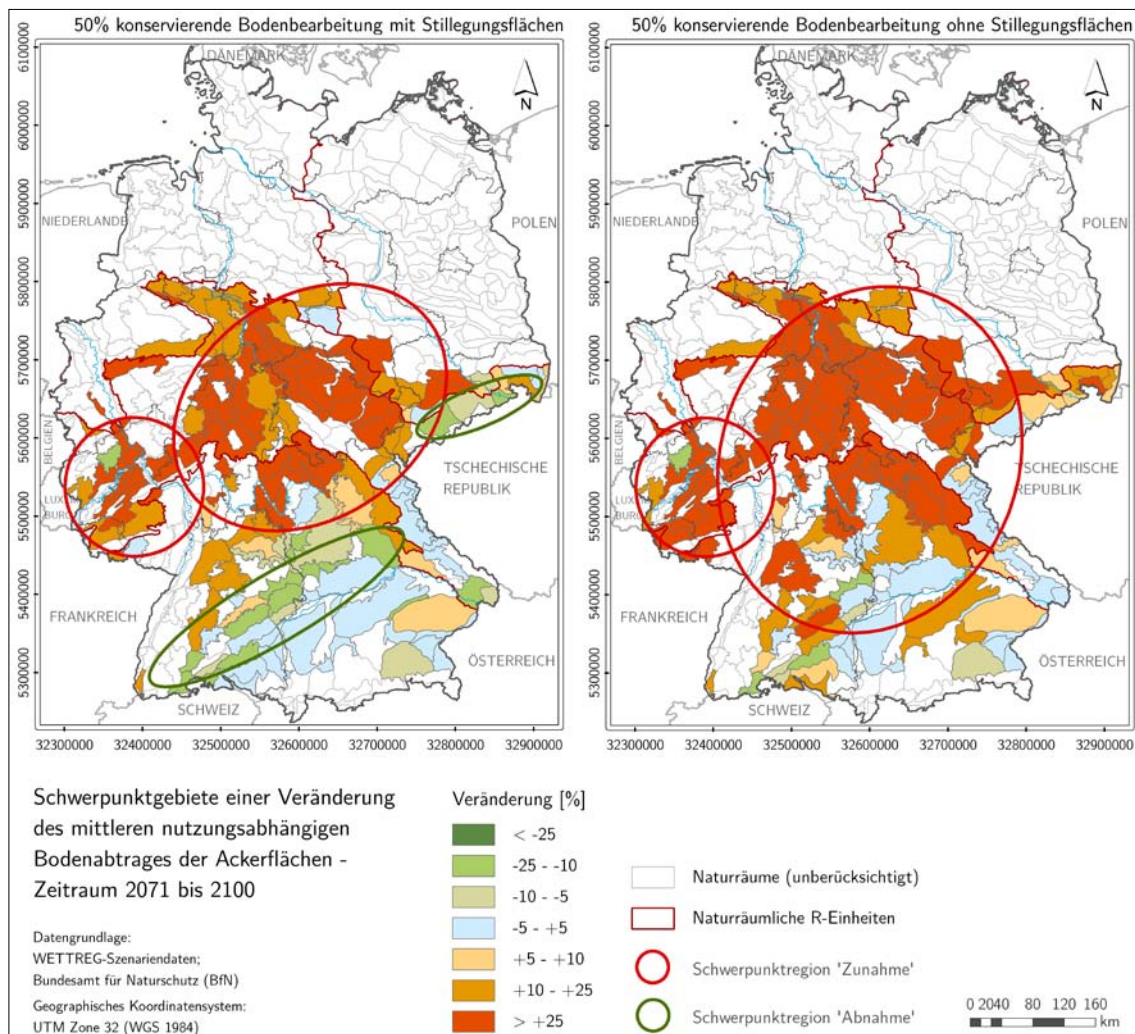


Abbildung 89: Veränderung des mittleren nutzungsabhängigen Bodenabtrages der Ackerflächen in Schwerpunktgebieten (Naturräume) der Erosionsgefährdung (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum

Im Rahmen der vorgenommenen Schwerpunktausweisung hinsichtlich einer zukünftig zu erwartenden Veränderung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung wird deutlich, dass in allen betrachteten Szenarienzeiträumen Gebiete mit ansteigender Erosionsgefahr überwiegen. Hier wird die Entwicklung der R-Faktoren durch die klimabe-

dingte Veränderung des C-Faktors zum Teil überdeckt oder sogar verstärkt. Auch kann über alle Zeiträume hinweg ein ‚Kerngebiet‘ zunehmender Erosionsgefährdung ausgewiesen werden, das vom Hunsrück bis zum Weserbergland und über das Thüringer Becken bis in die sächsischen Lössgebiete reicht. In Abhängigkeit vom Szenarienzeitraum und der Annahme einer möglichen Umwidmung von Stilllegungsflächen kommt es zur räumlichen Ausdehnung der Schwerpunktregion bei ansteigender Erosionsgefährdung.

In Tabelle 50 sind – bezogen auf die 165 berücksichtigten Naturräume - die Einheiten mit den stärksten Anstiegen bzw. Rückgängen der Erosionsgefährdung aufgeführt. Hier zeigt sich, dass mit der Östlichen Harzabdachung, dem Alzeyer Hügelland und dem Mittelrheinischen Becken drei Naturräume in allen Perioden am stärksten von einer Erhöhung der Erosionsgefährdung betroffen sind. Einen Überblick über die Lage der aufgelisteten Naturräume gibt Abbildung 90.

Zeitraum	Naturraum	Acker- Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil Acker- Fläche [%]	Mittlerer Abtrag auf Ackerfläche (1971-2000) [txha <sup>-1</sup> xJahr <sup>-1</sup> ]	Veränderung im Szenarienzeitrau- m [%]
2011 bis 2040	Östliche Harzabdachung	159,8	34,5	2,0	+ 87
	Alzeyer Hügelland	86,5	28,6	1,2	+ 60
	Mittelrheinisches Becken	280,1	48,7	2,3	+ 56
	Östliches Harzvorland	1.048,0	65,5	1,1	+ 55
	Cham-Further Senke	98,0	33,0	4,1	- 15
	Albuch & Härtsfeld	268,6	26,1	2,2	- 12
2041 bis 2070	Östliche Harzabdachung	159,8	34,5	2,0	+ 55
	Alzeyer Hügelland	86,5	28,6	1,2	+ 55
	Mittelrheinisches Becken	280,1	48,7	2,3	+ 34
	Ville	68,0	31,6	1,4	+ 33
	Hocheifel	97,8	15,1	4,5	- 29
	Albuch & Härtsfeld	268,6	26,1	2,2	- 27
2071 bis 2100	Alzeyer Hügelland	86,5	28,6	1,2	+ 107
	Östliche Harzabdachung	159,8	34,5	2,0	+ 95
	Mittelrheinisches Becken	280,1	48,7	2,3	+ 75
	Wern-Lauer-Platte	392,0	49,1	2,2	+ 71
	Albuch & Härtsfeld	268,6	26,1	2,2	- 24
	Unteres Isartal	160,2	55,5	1,5	- 22

Tabelle 50: Veränderung der mittleren nutzungsabhängigen Bodenabträge in Schwerpunktgebieten (Naturräume) mit großer Veränderung der Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum (50 % konservierende Bodenbearbeitung)

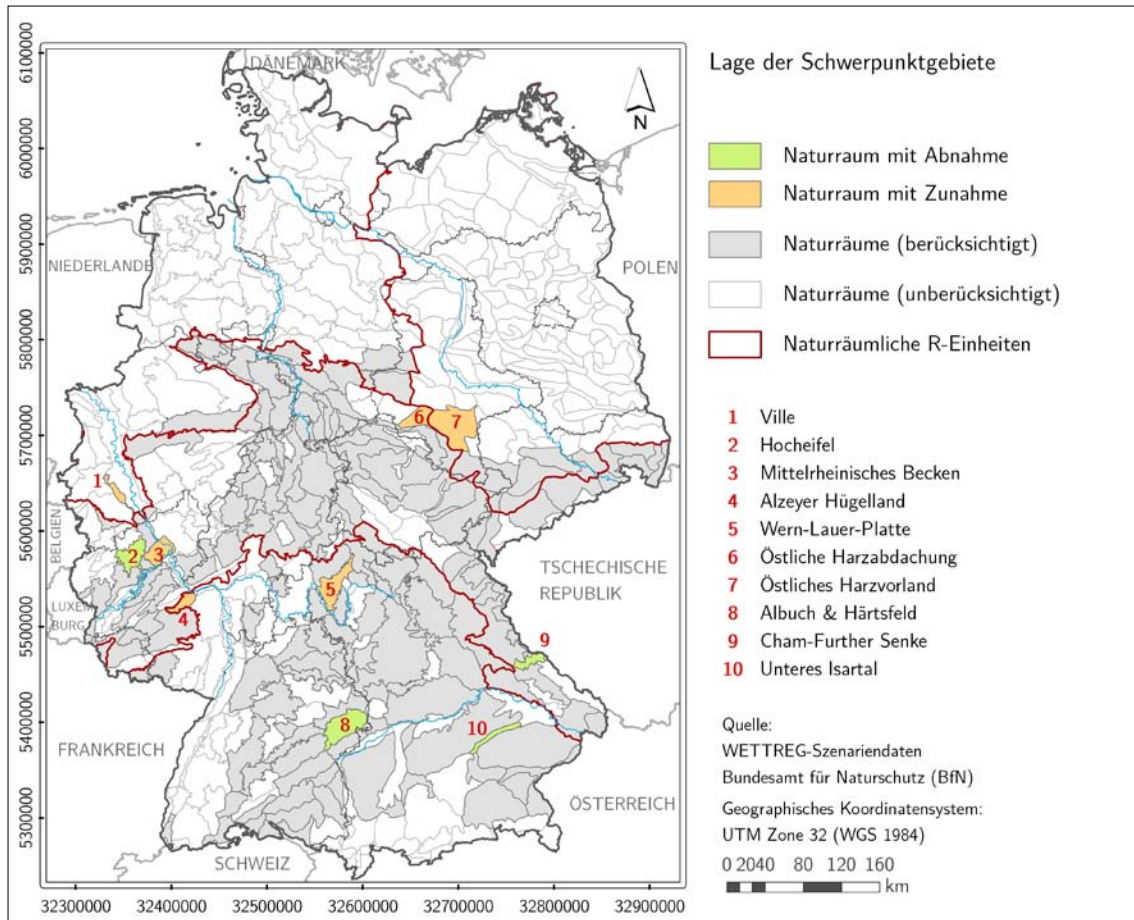


Abbildung 90: Lage der Schwerpunktgebiete (Naturräume) mit großer Veränderung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung gegenüber dem Referenzzeitraum (s. Tabelle 50)



## 6 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

### 6.1 Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Erosionsgefährdung und Ausweisung von Schwerpunktregionen

Aufgrund der für das 21. Jahrhundert prognostizierten Klimaänderungen sind für die zukünftige Erosionsgefährdung Auswirkungen zu erwarten, die aus der Veränderung von Niederschlagsregime und Bodenbedeckung als Folge einer Anpassung der Vegetationsperioden landwirtschaftlicher Kulturpflanzen an die klimatischen Verhältnisse resultieren. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden die möglichen Folgen für die Bodenerosionsentwicklung in Deutschland untersucht. Grundlage bildete das Emissionsszenarium A1B des regionalen Klimamodells WETTREG. Den Szenarienbetrachtungen vorangestellt war die Schaffung einer Vergleichsgrundlage, mit der - unter Verwendung aktuellen Datenmaterials - bundesweite Aussagen zum IST-Zustand der potenziellen und nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung der landwirtschaftlich genutzten Flächen Deutschlands auf Basis der Agrarstrukturhaupterhebung von 2007 auf Ebene der Naturräume getroffen werden.

Die Betrachtung des Bodenabtrages wurde auf Grundlage eines modifizierten Modellansatzes der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) vorgenommen. In Hinblick auf die Bewertung klimabedingter Veränderungen des Bodenabtrages ist der direkt über das Klima gesteuerte **R-Faktor** von Bedeutung, über den Aussagen zur Veränderung der **potenziellen Erosionsgefährdung** getroffen werden können. Die Ableitung der R-Faktoren für die Szenarienzeiträume erfolgte auf Grundlage von Tagesniederschlagssummen des WETTREG-Modells, sodass aufgrund der Zeitschrittweite des Modells konvektive Starkregenereignisse nicht ausreichend betrachtet werden.

Die auf den WETTREG-Szenariendaten basierenden Ergebnisse verdeutlichen, dass die zukünftige Entwicklung des potenziellen Bodenabtrages sowohl räumlich als auch zeitlich differenziert zu betrachten ist und keine bundesweit einheitlichen Tendenzen ermittelt werden konnten. Für den Szenarienzeitraum 2011 bis 2040 konnten für große Teile Deutschlands keine ausgeprägten Entwicklungstendenzen festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet der Nordosten Deutschlands, für den eine Erhöhung der R-Faktoren um über 10 % ermittelt wurde. Ab dem zweiten Zeitabschnitt (2041 bis 2070) zeigen sich Tendenzen in Richtung Zunahme der potenziellen Erosionsgefährdung im Westen und Nordwesten Deutschlands. Bezogen auf das quantitative und räumliche Ausmaß verstärkt sich diese Entwicklung in der Periode 2071 bis 2100. Hier weisen große Teile Deutschlands einen Anstieg der R-Faktoren um über 10 % auf. In den ost-



und süddeutschen Bundesländern führt zwischen 2041 und 2070 der Rückgang der berücksichtigten Niederschlagssummen zu einer Verringerung der R-Faktoren gegenüber dem Vergleichszeitraum 1971 bis 2000. Die Rückgangsraten liegen zumeist zwischen -5 und -10 %, regional auch zwischen -10 und -15 %. Bis zum Jahr 2100 sind auch diese Landesteile überwiegend von einem Anstieg der R-Faktoren und der potenziellen Erosionsgefährdung betroffen.

Für die Abschätzung der zukünftigen Erosionsgefährdung auf den ackerbaulich genutzten Flächen Deutschlands ist gegenüber dem potenziellen Bodenabtrag die Betrachtung der **nutzungsabhängigen Erosion** von erheblich größerer Bedeutung, da hierbei über den **C-Faktor** das Zusammenspiel zwischen der Erosivität des Niederschlages und seiner innerjährlichen Verteilung und der entsprechenden Bodenbedeckung durch die Kulturpflanzen betrachtet werden kann. Hier zeigen die Untersuchungsergebnisse eine – insbesondere in den Perioden 2011 bis 2040 und 2071 bis 2100 - ausgeprägte Tendenz zum Anstieg der Erosionsgefährdung. Dieser ist auch in Regionen erkennbar, in denen ein Rückgang der R-Faktoren ermittelt werden konnte. Die Ursache liegt vor allem in der teils deutlichen Zunahme der R-Faktorenanteile in den Winter- und Frühjahrsmonaten bei vergleichsweise geringer Bodenbedeckung begründet, die auch durch die Kappung der derzeitigen Sommerspitzen in einem Zeitraum hoher Bodenbedeckung nicht kompensiert werden kann. Die deutliche Erhöhung der C-Faktoren trifft insbesondere auf Regionen zu, die gegenwärtig einen hohen Anteil an Winterweizen, Winterroggen, Sommergerste und Zuckerrübe aufweisen. Diese vor allem in Mitteldeutschland angebauten Fruchtarten reagieren besonders stark auf die Verschiebung der innerjährlichen Starkregenhäufigkeiten. Im Rahmen der Untersuchungen konnte zudem festgestellt werden, dass der Einfluss der Kulturperioden, die zukünftig vor allem durch eine Temperatur bedingte Verlängerung der Vegetationsperiode geprägt sein werden, gegenüber der Auswirkung des R-Faktorenverlaufs auf den Trend des C-Faktors in den Hintergrund tritt.

Die Ausweisung von Schwerpunktgebieten für die Bodenerosion orientierte vordergründig auf ackerbaulich genutzte Naturräume, die bereits gegenwärtig ein definiertes Erosionspotenzial aufweisen. Davon betroffen sind überwiegend die Landschaftseinheiten südlich des Norddeutschen Tieflandes und nördlich der Alpen, in denen Boden-, Niederschlags- und vor allem Reliefcharakteristik, in Verbindung mit einer intensiven ackerbaulichen Nutzung, erosionswirksam sind. Hinsichtlich einer zukünftig zu erwartenden Veränderung der nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung wird deutlich, dass in allen betrachteten Szenarienzeiträumen Gebiete mit zunehmender Erosionsgefahr überwiegen. Hier wird die Entwicklung der R-Faktoren durch die klimabedingte Veränderung des C-Faktors teils überprägt oder sogar verstärkt. Über alle Zeiträume hinweg konnte ein ‚Kerngebiet‘ zunehmender Erosionsgefährdung ausgewiesen werden. Es umfasst große Teile der Deutschen Mittelgebirgsschwelle, vom Rheinischen Schiefergebirge über das Hessische und Niedersächsische Bergland bis zum Thüringer Becken und in die sächsischen Lössgebiete hinein. Für diese Regionen wurde ein Anstieg der



nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung um über 10 %, in den Betrachtungszeitraum 2011 bis 2040 und 2071 bis 2100 sogar um über 25 % bestimmt. Dagegen sind im süddeutschen Raum die Entwicklungstendenzen deutlich geringer ausgeprägt. Neben einer nahezu gleich bleibenden Erosionsgefährdung im Zeitraum 2011 bis 2040 kann in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum sowohl von einem leichten Rückgang (2041 bis 2070) bzw. einem Anstieg (2071 bis 2100) des mittleren Bodenabtrages ausgegangen werden.

Im Rahmen weiterer Szenarienbetrachtungen wurde zum einen der Einfluss der Abschaffung der geförderten Flächenstilllegung zugunsten der Umwidmung in Anbauflächen für Energiepflanzen auf die Erosionsgefährdung untersucht. Hier käme es in allen Landschaftsräumen über alle Szenarienzeiträume hinweg zu einer nicht zu vernachlässigenden Erhöhung der Erosionsgefährdung. Allerdings sind hierfür weitere Untersuchungen zur Substituierung erosionsfördernder Fruchtarten beim Anbau nachwachsender Rohstoffe erforderlich. Darüber hinaus wurden verschiedene Annahmen zum zukünftigen Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung getroffen, um das erosionsmindernde Potenzial der Umstellung von Bodenbearbeitungssystemen im Zusammenhang mit der klimabedingten Veränderung der Bodenerosion betrachten zu können. Unter Berücksichtigung einer zu erwartenden Verbesserung der Wasser-, Energie- und Kosteneffizienz kann perspektivisch von einer Erhöhung des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung bis hin zum verstärkten Einsatz von Direktsaatverfahren ausgegangen werden. Daraus ließe sich nicht nur eine Verminderung der Erosionsgefährdung unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen erwarten. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass sich durch die Erhöhung des Anteils konservierender Bodenbearbeitungsmaßnahmen in stärkerem Maße der Bodenabtrag reduzieren ließe, als es durch den Klimawandel zu einem Anstieg der Erosionsgefährdung kommen würde.

## 6.2 Handlungsstrategien zur Verminderung der Erosionsgefährdung

Bodenerosion durch Wasser stellt bereits gegenwärtig ein Problemfeld aus Sicht der Landwirtschaft und des Bodenschutzes dar. Insbesondere in den Schwerpunktgebieten müssen diesbezüglich verstärkt Schutzmaßnahmen durch die Landwirtschaft erfolgen, um die `Anforderungen der guten fachlichen Praxis` zu erfüllen. Wie die Ergebnisse der Szenarienbetrachtung zeigen, könnten durch den strikten Einsatz von konservierenden Bodenbearbeitungssystemen die Auswirkungen der sich häufenden Starkregenereignisse auf die Bodenerosionsgefährdung kompensiert bzw. diese sogar minimiert werden. Die dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung ist somit ein wichtiger Baustein in der Vorsorge und zur Verminderung von Bodenerosion. In Zukunft müssen hierzu neben den bereits großflächig praktizierten Mulchsaatverfahren verstärkt Direktsaatverfahren in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert werden. Neben den Maschinen-



herstellern sind hierbei die landwirtschaftlichen Fachbehörden der Bundesländer, Forschungseinrichtungen und die landwirtschaftlichen Fachberater gefragt, komplexe Erosionsschutzsysteme in landwirtschaftlichen Praxisversuchen zu erproben, in die Betriebsabläufe einzubinden und in der landwirtschaftlichen Praxis zu demonstrieren. Diese Verfahren bieten einerseits die Möglichkeit eines noch höheren Erosionsschutzes, insbesondere in Phasen der Vegetationsruhe und in Stadien mit einer geringen Bodenbedeckung des aktuellen Aufwuchses, bedeuten aber andererseits auch erhöhte Anforderungen an die Betriebsführung, besonders im Schädlingsmanagement. Prinzipiell ist eine Erhöhung der Bodenbedeckung in Zeiten der Winter- bzw. Sommerbrache notwendig. In Gebieten mit ausreichend Niederschlag ist hierzu die weitere Etablierung von Zwischenfrüchten in der landwirtschaftlichen Praxis umzusetzen. In den Trockengebieten ist aus Gründen der dann steigenden Wasser Konkurrenz den oben genannten Verfahren der Vorzug zu gewähren.

Der Humusproduktion kommt aus Sicht der Minderung der Bodenerosionsgefährdung eine wachsende Bedeutung zu. Humus hat nicht nur eine große Bedeutung für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit generell, sondern hat auch Einfluss auf die Aggregatstabilität und die Regenverdaulichkeit der Böden. Zur Sicherung der Humusproduktion sind geeignete Bilanzierungsansätze in die Praxis zu überführen, die über die gegenwärtig gängige Cross-Compliance-Methode hinausgehen.

Im Zusammenhang mit Cross Compliance ist generell anzumerken, dass diese Maßnahmen die Vorsorge nicht ersetzen. BBodSchG und Cross Compliance stellen zwei getrennte Handlungsfelder dar, was in der Praxis oft nicht richtig kommuniziert wird. Bereits die aktuelle Gefährdungssituation zeigt, dass bei der Gestaltung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungseinheiten wesentliche Grundsätze in Bezug auf die Erosionsgefährdung nicht betrachtet wurden. So führen in vielen Gebieten übergroße Hanglängen und falsche Bearbeitungsrichtungen zu einer Verschärfung der Erosionssituation. Durch Etablierung regionaler Erosionsberatung und Schulung der Landwirte in Kombination mit dem Einsatz geeigneter Beratungsinstrumente ist diesem Trend entgegen zu wirken.

Seitens der Forschung ist ein wesentliches Defizit für die Erosionsmodellierung in Deutschland das gegenwärtige Fehlen eines systematischen, vergleichbaren und deutschlandweiten Erosionsmonitorings, besonders im Hinblick auf tatsächliche Abträge bzw. Frachten in Bezug auf Flächenbewirtschaftung und Starkregenereignisse. In diesem Zusammenhang steht auch die Aufgabe der Gewinnung empirisch belastbarer Aussagen zum Zusammenhang zwischen der über Messsysteme (z. B. RADOLAN des DWD) erfassten räumlichen Starkregenverteilung und dem tatsächlichen Auftreten von Erosionsereignissen im Gelände. Diese Betrachtungen erleichtern die Prognose und dienen gleichzeitig als Validierungsgrundlage für Erosionsmodelle. Auf Ebene der Bundesländer sind diesbezügliche Untersuchungen durchzuführen. Die länderübergreifende Zusammenarbeit muss hierzu ausgebaut werden.



### 6.3 Möglichkeiten und Grenzen der Ergebnisinterpretation hinsichtlich verwendeter Methoden und Modelle

Die vorliegenden Ergebnisse des Projektes „Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser“ lassen bundesweite Aussagen zur Erosionsgefährdung durch Wasser für den Ist-Zustand sowie zur tendenziellen Abschätzung der Erosionsgefährdung unter sich ändernden Klimabedingungen für ausgewählte Szenarienzeiträume bis zum Jahr 2100 zu. Die Analyse, Auswertung und Interpretation erfolgte für die Szenarienergebnisse des regionalen Klimaszenarienmodells WETTREG, welche auf den Prognosen des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM für das Emissionsszenarium A1B basieren. Vor dem Hintergrund der Vielzahl an vorhandenen globalen Klimamodellen und den verschiedenen Emissionsszenarien (u. a. A2, B1, B2) stellen die vorliegenden Ergebnisse nur einen Teil eines Ensembles verschiedener Entwicklungsmöglichkeiten dar. Gleichfalls liefern die in Deutschland am häufigsten zum Einsatz kommenden Regionalmodelle STAR, REMO, CLM und WETTREG durchaus unterschiedliche Aussagen im Hinblick auf die zu erwartenden Niederschlagsveränderungen. Daraus ergibt sich, dass die Bewertung und Interpretation der vorliegenden Resultate nur unter Nennung der verwendeten Szenarien- und Modellgrundlage (WETTREG, A1B) erfolgen kann und eine Übertragung auf weitere Klimamodelle oder Szenarien nicht zulässig ist. Hierzu ist weiterführend eine vergleichende Betrachtung der genannten Regionalmodelle und Szenarien im Sinne eines Ensembleansatzes erforderlich. Diesbezüglich lassen sich erste Erkenntnisse aus dem Projekt ‚ZWEK‘ (*Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung*) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erwarten. Eine tendenzielle Erstabschätzung der zukünftigen Entwicklung der Erosionsgefährdung auf der Bundesebene ist mittels der hier vorliegenden WETTREG-Ergebnisse grundsätzlich zulässig.

Neben der modellbezogenen Ergebnisinterpretation ist die Berücksichtigung der betrachteten Maßstabsebene unerlässlich (z. B. Bodenübersichtskarte 1:1.000.000, Naturraumeinheiten). Die vorliegenden Ergebnisse dienen der bundesweiten Übersichtsdarstellung der Erosionsgefährdung in Deutschland und sind auch entsprechend des kleinmaßstäbigen Bereiches zu interpretieren. Die undifferenzierte Verwendung der Ergebnisse für großmaßstäbige Analysen (z. B. in mittleren und kleinen Einzugsgebieten) widerspricht hingegen einer maßstabsgerechten Auswertung.

Am kleinmaßstäbigen Betrachtungsraum orientierte sich mit dem verwendeten modifizierten ABAG-Ansatz auch die Auswahl eines geeigneten Erosionsmodells sowie die daran geknüpfte Erarbeitung der raum- und zeitbezogenen Eingangsdaten. In Hinblick auf die zukünftige Erosionsgefährdung lassen sich somit Tendenzen für großräumige Schwerpunktgebiete erkennen, die auf Landes- oder Flusseinzugsgebietsebene einer Untersetzung unter Verwendung höher aufgelöster Datengrundlagen bedürfen, um die regionale Aussageschärfe der Ergebnisse zu erhöhen. Das schließt gleichzeitig die Verwendung physikalisch-basierter, dynamischer Erosionsmodelle zur Abbildung erosiver





Einzelereignisse ein. Für deren Verwendung ist die gegenwärtige Weiterentwicklung der Regionalmodelle in Richtung einer Erhöhung der Raumauflösung und einer Verringerung der Zeitschrittweite (Berücksichtigung konvektiver Starkregenereignisse) erforderlich. Dabei wird zu prüfen sein, wie belastbar zeitlich hoch auflösende Klimaprognosen vor dem Hintergrund der Unsicherheiten sein werden, die gegenwärtig bei der Wiedergabe des Niederschlagsgeschehens auf Tageswertbasis auftreten.

Beispiele für die länderbezogene Betrachtung des zukünftigen Erosionsrisikos bilden derzeit u. a. eine *KLIWA-Konzeptstudie* in Zusammenarbeit der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zum Forschungsvorhaben ‚Bodenabtrag durch Wassererosion infolge von Klimaveränderungen‘ (KOHL & GROH 2009), das Projekt *KlimLandRP* in Rheinland-Pfalz (MUFV RLP 2008) und insbesondere eine Konzeptstudie im Freistaat Sachsen zum Thema ‚Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser‘ welche dem oben aufgeführten Ansatz entspricht, die bundesweit verfügbaren Datengrundlagen auf Landesebene zu spezifizieren. Innerhalb des Vorhabens werden die Daten des WETTREG-Modells für zeitlich hoch auflösende Erosionsanalysen anhand vorliegender Klimastationsdaten landesspezifisch angepasst. Aus den regionalen Untersuchungen lassen sich gegebenenfalls auch Abweichungen vom vorliegend dokumentierten Ausmaß der zukünftigen Erosionsgefährdung erwarten, die sich durch den veränderten Betrachtungsmaßstab sowie länderspezifische Eingangsdaten, Methoden und Modelle begründen lassen.



## 7 Perspektiven und Ausblick

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich Empfehlungen für weiterführende Arbeiten und Handlungsfelder ableiten, die nicht nur unter dem Blickwinkel des Klimawandels zu sehen sind, sondern auch bedeutsam für die aktuelle Bewertung von Ursachen, Ausmaß und Folgen der Bodenerosion sein können.

Die Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion wird – nicht zuletzt mit Blick auf die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) – auch perspektivisch ein Forschungsschwerpunkt sein. Um die Spannweite der zukünftigen Erosionsentwicklung bewerten zu können, ist, wie in Kap. 6.3 erwähnt, die **Betrachtung eines Modell- und Szenariensembles** unter Einbeziehung der Modelle WETTREG, REMO, CLM und STAR erforderlich. Hierzu ist allerdings nicht nur die Weiterentwicklung der Modelle in Hinblick auf eine Erhöhung der Raum- und Zeitauflösung voranzutreiben, sondern vor allem auch die **Verbesserung der quantitativen und räumlichen Wiedergabe des beobachteten Niederschlagsverhaltens** durch die Modellkontrollläufe. Hier zeigen gegenwärtig vor allem die dynamischen Szenarienmodelle noch Defizite. Die bestehenden Unsicherheiten der Klimaprognosen unterstreichen, dass für die Bewertung der Starkregenentwicklung und der Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen der **Klimadiagnose** verstärkt Bedeutung beigegeben werden muss. Hierzu ist bereits aus Sicht des heute zu praktizierenden vorsorgenden Bodenschutzes die **Aufrechterhaltung und Verbesserung der Validierungsbasis** unter Nutzung eines systematischen **Erosionsmonitorings** erforderlich. Hierbei sollten unterschiedliche Interessen im Sinne eines interdisziplinären Ansatzes in Hinblick auf Bodenschutz, Gewässerschutz (EU-Wasserrahmenrichtlinie) und landwirtschaftliche Beratung gebündelt werden. Eine neue, beratungsrelevante Möglichkeit der ereignisgenauen, räumlichen Gegenüberstellung von Starkregenereignissen und tatsächlichen Bodenabträgen bieten die **RADOLAN-Daten** des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Möglichkeiten einer Verknüpfung der RADOLAN-Daten mit einer bundesweit vorliegenden Erosionsgefährdungskarte, wie sie durch die vorliegende Studie erarbeitet wurde, wären dabei zu eruieren.

Der R-Faktor zur Bewertung der Niederschlagserosivität ist innerhalb der ABAG ein wesentlicher Bestandteil für großräumige Betrachtungen. Die umfangreichen Untersuchungen innerhalb dieser Studie bestätigen die Notwendigkeit, die Wissens- und Datenbasis zum **R-Faktor für den Ist-Zustand zu verbessern**. Dies erscheint nicht zuletzt in Hinblick auf die Einstufung von Feldblöcken bezüglich ihrer Erosionsgefährdung gemäß Cross Compliance zwingend erforderlich, wonach die bisher nach DIN (2005) gültigen Regressionsgleichungen der Bundesländer zur Bestimmung der R-Faktoren Verwendung finden können. Eine Aktualisierung und Homogenisierung der Stationszeitreihen sowie die Erhöhung von Anzahl und Dichte der bisher vorliegenden Klimastationen auf Basis des Messnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wäre hierfür an-



zustreben, um nicht nur neue R-Faktoren-Werte zu erhalten, sondern gleichzeitig **neue Regressionsgleichungen auf Landes- und Bundesebene** zu bestimmen. Vorliegende Ergebnisse aus Nordrhein-Westfalen (Geologischer Dienst) und Sachsen (ELHAUS & HILLER 2007) bestätigen die zu erwartende Verbesserung der statistischen Güte. Gleichzeitig wäre anzudenken, **neue Ansätze zur Ableitung von Regressionsbeziehungen** einzubeziehen, in denen nicht nur die statistischen Zusammenhänge zwischen stationsbezogen ermittelten R-Faktoren und Jahres- bzw. Sommerniederschlagssummen, sondern auch die Abhängigkeit der R-Faktoren von definierten Starkniederschlagssummen (z. B. 98 %-Perzentil) untersucht werden sollten.

Aus Sicht des C-Faktors der ABAG sind verstärkte **Forschungsaktivitäten zur Substituierung erosionsfördernder Fruchtarten** erforderlich. Dies trifft im Besonderen auf den Anbau nachwachsender Rohstoffe und neuer Kulturen (z. B. Soja) zu, die aufgrund der zu erwartenden Verlängerung der Vegetationsperiode zukünftig ins Blickfeld geraten können. Perspektivisch ist, nach deren Fertigstellung, die bundesweite Fortschreibung und **Neubestimmung nutzungsdifferenzierter K-Faktoren** unter Verwendung der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) vorzunehmen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie beziehen sich ausschließlich auf die Bodenerosion durch Wasser. Gegenwärtig ist die **Winderosion** – nicht zuletzt aufgrund der deutlich komplexeren Anforderungen an das Monitoring – ein zu wenig beachtetes Thema. Die prognostizierten Klimaveränderungen lassen als Folge einer Veränderung der Windgeschwindigkeiten, der Bodenbedeckung und der Bodenfeuchte durch die Erhöhung der Häufigkeit trockener Perioden auch für die Winderosion negative Auswirkungen erwarten, deren Ausmaß noch zu untersuchen ist.



## 8 Literaturverzeichnis

AUERSWALD, K. (2002): Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen. - Landnutzung und Landentwicklung, 43, 1-5. Berlin.

AUERSWALD, K. (1996): Jahresgang der Eintrittswahrscheinlichkeit erosiver Starkregen in Süddeutschland. - Z.f.Kulturtechnik und Landentwicklung 37, 81-84.

AUERSWALD, K. & F.SCHMIDT (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern – Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. - GLA-Fachberichte, 1. Geologisches Landesamt, München.

BADER, S. & U. SCHWERTMANN (1980): Die Erosivität der Niederschläge von Hüll (Bayern). - Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 21, 1–7.

BUNDESRAT (2008): Zweite Verordnung zur Änderung der Direktzahlungen-Verpflichtungen-Verordnung. Drucksache 836-08, 07.11.2008.

CHISHOLM, M. (2008): Analyse der Bodenerosion mit der AVErosion-Extension für ArcView. – Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

CONRAD, O. (1998): Derivation of hydrologically significant parameters from Digital Terrain Models. Universität Göttingen.

DESMET, P. & P. GROVERS (1996): A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. - Journal of Soil and Water Conservation, 1, 427–433.

DEISENROTH, C. (2008): Stand und Perspektiven der pfluglosen Bodenbearbeitung. – Kurzfassung des Vortrages zur Kuratoriumstagung 2008 am 10.01.2008. Ochsenfurt.

DEUMLICH, D. (1999): Erosive Niederschläge und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit im Nordosten Deutschlands. – Meteorologische Zeitschrift N.F. 8, 155 – 161.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2005): DIN 19708 - Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Beuth Verlag, Berlin.

ELHAUS, D. & D. HILLER (2007): Berechnung R-Faktoren - Ableitung der Regenerosivität (R-Faktor) für Sachsen auf der Grundlage von Daten des Deutschen Wetterdienstes. Im



Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Krefeld (Geologischer Dienst NRW) & Hofstetten (Büro für Bodenschutzplanung).

EPPERLEIN, J. (2008): 10 Jahre GKB - Aktuelle Trends in der Bodenbearbeitung. Plädoyer für ein Umdenken mit der Ressource Boden. – Vortrag zur Ackerbautagung Bernburg/Iden 26.11/27.11.2008

ERHARD, M., EVERINK, C., JULIUS, C. & P. KREINS (2002): Bundesweite Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Agrarstatistikdaten und aktuellen Daten zur Bodennutzung. Umweltbundesamt. UBA-Texte 71/02. Berlin.

FOHRER, N., MOLLENHAUER, K. & T. SCHOLTEN (2003): Bodenerosion. – INSTITUT FÜR LÄNDERKUNDE [Hrsg.]: Nationalatlas der Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden, Wasser. Bd.2. Heidelberg, Berlin.

GERSTENGARBE, F.-W., ORLOWSKY, B. & P.C. WERNER (2006): Changes of Temperature and Precipitation Extremes. – GLOWA-ELBE-II-Statuskonf. 14.12.06. Potsdam.

GRIESER, J. & C. BECK (2002): Extremniederschläge in Deutschland – Zufall oder Zeichen? – DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.]: Klimastatusbericht 2002, 141-150. Offenbach.

HENNINGS, V. [Hrsg.] (2000): Methodendokumentation Bodenkunde – Auswertemethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. SG1 in Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe G. Hannover. 2. Auflage.

HIRCHE, D. (1990): Die Erosivität der Niederschläge in Niedersachsen. - Dipl.-Arb. Univ. Braunschweig [unveröffentl.].

HLUG – HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2005): Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012, Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen – Abschlussbericht. Wiesbaden

HOFFMANN, B. (2009): Mündliche Mitteilungen.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Climate Change 2007 – Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.

JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P & K.SIECK (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Climate Change 11/2008. Umweltbundesamt.

JANSSEN, W. (2009): Alternative Definition der Vegetationszeit. - Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, 12 S., unveröffentlicht.



JONAS, M., STAEGER, T. & C.-D. SCHÖNWIESE (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Forschungsbericht. Climate Change 7/2005. Umweltbundesamt

KOHL, R. & S. GROH (2009): Klimawandel und Bodenerosion. - Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Kurzberichte zum 4. KLIWA-Symposium-03.-04.12.2009, Mainz.

KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. & W. ENKE (2009): Abschätzung zukünftiger Starkregenereignisse im Rahmen von Klimamodellen. – Bodenschutz im Klimawandel II, Workshop 27.-28.4.2009, Dresden.

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN [Hrsg.] (2007): Bodenerosion durch Wasser. Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW. Münster.

MERRITT, W., LETCHER, R. & A. JAKEMAN (2003): A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, 18, 761–799.

MEYNEN, E. [Hrsg.] (1953-1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde. Remagen.

MOORE, I. & G. BURCH, G. (1986): Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. - Soil Science Society of America Journal, 50, 1295–1298.

MOORE, I. & J. WILSON (1992): Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation. - Journal of Soil and Water Conservation, 47(5), 423–428.

MUFV RLP - MINISTERIUM FÜR UMWELT, FORSTEN UND VERBRAUCHERSCHUTZ RHEINLAND-PFALZ (2008): KlimLandRP - Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz. Langfassung zum Projekt. Mainz.

PANDEY, M.D., VAN GELDER, P.H.A.J.M. & J.K. VRIJLING (2003): The Use of L-Moments in the Peak Over Threshold Approach for Estimating Extreme. - Quantiles of Wind Velocity. European Safety and Reliability Conference 2003 - ESREL 2003, June 15 – 18.2003, Maastricht. <http://www.waterbouw.tudelft.nl/public/gelder/paper74.pdf>.

REICH, J. & J. WURLITZER (2004): Pfluglose Bodenbearbeitung in Thüringen auf dem Vormarsch. - Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena.

RIPPEL, R. (2007): Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt – aus der Sicht des Erosionsschutzes. - Klimaänderung und Landwirtschaft - Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern, Tagungsband 6. Kulturlandschaftstag.



RIPPEL, R. & F. STUMPF (2008): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern bis 2050. - 5. Marktredwitzer Bodenschutztag, Tagungsband: Boden und Klima im Wandel, Marktredwitz 2008, 20-27.

RIPPEL, R.; AUERSWALD, K. & A. MÜLLER (2004): PC-ABAG, Version 3.0. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Selbstverlag. Freising.

SMUL – SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2008): Konservierende Bodenbearbeitung. <http://www.smul.sachsen.de/landwirtschaft/8120.htm>

SAUERBORN, P. (1994): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland - Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. - Bonner Bodenkundliche Abhandlungen 13.

SAUPE, G. (1985): Die Erosivität der Niederschläge im Süden der DDR - ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion. - Archiv Naturschutz und Landschaftsforschung 25, 3. S. 155-169. Berlin.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl. Stuttgart.

DE SMITH, M.J., GOODCHILD, M.F. & P.A. LONGLEY (2007): Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools. Second Edition. Winchelsea Press. Winchelsea.

SPEKAT, A., ENKE, W. & F. KREIENKAMP (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Endbericht. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: "Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland" des Umweltbundesamtes. Potsdam.

STEININGER, M., ALTERMANN, M., ROSCHE, O. & M. MÖLLER (2004): Ermittlung der potenziellen diffusen Nährstoffeinträge (Emission N und P) in Oberflächengewässer des Landes Sachsen-Anhalt auf Basis der Wasserkörper gemäß Anhang II EU-WRRL. Projektteil: Erarbeitung von Datengrundlagen und flächendeckende Parametrisierung der Landnutzung und der Bodeneigenschaften zur Berechnung der Bodenerosion (Abschwemmung). Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt. Halle.

STREITFERT, A. & L. GRÜNHAGE (2009): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. - INKLIM 2012 Baustein II plus. - Institut für Pflanzenökologie, Gießen.



STUMPF, F. & K. AUERSWALD (2006): Hoch aufgelöste Erosionsprognosekarten von Bayern - Die Wasserwirtschaft, 96 (7-8), 70-74.

UBA – UMWELTBUNDESAMT (2008): Böden im Klimawandel – Was tun ?! Workshop des Umweltbundesamtes am 22./23. Januar 2008. – UBA-Texte 25/08.

VAN ROMPAEY, A.J.J.; VERSTRAETEN, G.; VAN OOST, K.; GOVERS, G. & J. POESEN (2001): Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. - Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1221-1236.

VOLK, M., MÖLLER, M. & D. WURBS (2010): A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies. – Land Use Policy, 27, 997-1009.

VOßHENRICH, H.-H, KORTE, K., ORTMEIER, B. & J. BRUNOTTE (2002): Stuserhebung zu begrenzenden Faktoren in der pfluglosen Bodenbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Winterrapses. Abschlussbericht; UFOP. [http://www.ufop.de/publikationen\\_agrar\\_forschung.php](http://www.ufop.de/publikationen_agrar_forschung.php).

WISHMEIER, W. & D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA Agr. Handbook, H. 537. Washington, DC: US Department of Agriculture Science and Education Administration.

WISHMEIER, W. & D. SMITH (1958): Rainfall energy and its relationship to soil loss. - Transac. Am. Geophys. Union, 39, 131–137.

WURBS, D. & W. KÖNIG (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion in vulnerablen Regionen - Beispiel Sachsen-Anhalt - und hieraus erwachsender Konsequenzen für eine Regionalisierung der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung. Abschlussbericht (unveröff.). Im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt. Halle.

WURBS, D., KOSCHITZKI, T., & MÖLLER, M. (2007). ABAGflux – ein hierarchischer Modellansatz zur Maßnahmenplanung im Boden- und Gewässerschutz. Mittlg. Dt. Bodenkdl. Ges., 110, 721–722.

ZEBISCH, M., GROTHMANN, T, SCHRÖTER, D., HABE, C., FRITSCH, U. & W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Potsdam.





# Anhang

## Anhang 1 – R-Faktoren und Niederschlagssummen der verwendeten Stationen

Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Aachen-Soers	79,6	743,5	2
Ahrensburg	50,1	797,0	1
Albacher Hof	38,0	632,0	1
Alsdorf-Bettendorf	56,5	597,2	2
Angermünde	53,0	548,0	5
Artern	38,1	469,0	1
Augsburg	78,9	811,0	1
Bad Hersfeld	48,9	691,0	1
Bad Kissingen	50,8	747,0	1
Bad Lippspringe	45,9	895,0	1
Bad Nauheim	44,5	596,0	1
Bad Salzuflen	49,2	807,0	1
Bad-Honnef-Bruengsberg	72,1	686,5	2
Bamberg	51,6	635,0	1
Beerfelden	66,1	1065,0	1
Berchtesgaden	151,6	1539,0	1
Berus	54,5	917,6	1
Beventalsperre	106,3	947,3	2
Bielefeld			4
Bielefeld-Sudbrack	59,7	705,4	2
Bildchen	54,6	717,6	2
Birkesdorf	46,1	531,7	2
Bochum	57,7	672,6	2
Boenen	51,1	599,9	2
Boizenburg	40,8	665,0	1
Bonn			4
Bonn-Heizkraftwerk	42,5	529,7	2
Bonn-Lessenich	50,3	585,3	2
Borschemich	54,3	613,1	3
Bottrop-Eigen	64,4	678,1	2
Brenzingen	80,3	900,7	2
Brilon1	82,6	897,5	2
Castrop-Rauxel	53,9	668,0	2
Chemnitz	85,9	719,0	6



Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Coburg	64,6	693,0	1
Darmstadt	70,1	696,0	1
Dellingsen	44,8	851,0	1
Detmold-Rp	50,5	736,4	2
Dietershausen	55,7	722,0	1
Dorsten	57,2	659,3	2
Dortmund			4
Dortmund-Aplerbeck	63,6	703,6	2
Dortmund-Kurl	57,3	626,8	2
Dortmund-Marten	57,8	675,4	2
Dremmen	43,3	561,8	2
Dresden	69,7	632,0	6
Duelken	41,0	578,5	2
Düsseldorf			4
Düsseldorf-Gerresheim	59,6	662,8	2
Düsseldorf-LUA	45,5	593,0	2
Ebeleben	50,2	544,0	1
Eggebek	69,8	833,3	1
Eichstrutt	70,0	811,0	1
Eitorf	78,3	809,1	2
Elsdorf	21,9	481,0	1
Ensheim	62,7	875,8	1
Erfurt	45,8	528,0	1
Erndtebrück	72,1	1178,0	1
Eschmar	54,1	607,3	3
Eschweiler-Weisweil.	58,2	649,6	2
Essen			4
Essen-LUA	70,1	727,9	2
Essen-Steele	73,7	695,0	2
Esterbach	62,4	806,4	3
Fichtelberg	85,2	1115,0	6
Flensburg	51,6	818,2	1
Frankfurt (O.)	35,1	531,0	1
Freckenhorst	34,7	579,1	2
Freilingen	48,7	580,5	2
Freising	71,3	811,0	1
Frelenberg	54,7	594,4	2
Freudenstadt	159,9	1586,0	1
Frielingsdorf	112,4	1077,2	2



Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Fronhausen	51,9	621,0	1
Fuhrberg	33,7	677,0	1
Geisenheim	38,3	536,0	1
Geldern	48,2	614,2	2
Gelsenkirchen-Hessler	68,7	688,8	2
Gemuend	64,4	651,9	2
Georgsmarienhütte	53,9	875,0	1
Gera	86,2	608,0	1
Gießen	51,9	587,0	1
Gifhorn	30,6	638,0	1
Glückstadt	47,4	743,7	1
Görlitz	70,2	661,0	6
Goslar	48,1	784,0	1
Gotha	42,8	513,0	1
Göttingen	26,5	635,0	1
Grafhorst	33,7	591,0	1
Grefrath	44,8	586,5	2
Greifswald	44,0	552,0	5
Groß Lüsewitz	40,5	618,0	1
Haenscheid	80,5	883,9	2
Hamm	44,7	612,8	2
Hannover	31,3	645,0	1
Havert	52,7	609,7	2
Helgersdorf	51,0	776,0	1
Helgoland	32,6	684,1	1
Helse	43,4	789,5	1
Herchenhain	82,3	1189,0	1
Herringen	63,1	645,4	2
Herzogenrath-Worm	60,0	662,6	2
Hof	61,0	718,0	1
Hohn	41,8	768,2	1
Homburg-Broel	87,4	978,8	2
Horn	39,8	740,0	1
Hüll	69,4	823,0	1
Kahler Asten	89,7	1525,0	1
Kaltennordheim	65,6	767,0	1
Karlsruhe	70,4	741,8	1
Kassel	44,8	629,0	1
Kempton	90,2	1300,0	1



Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Kiel	56,8	751,3	1
Kleve	29,4	517,0	1
Klippeneck	95,8	869,0	1
Kornelimünster	61,3	636,0	1
Kupferdreh	59,5	646,0	1
Lauenburg	40,3	647,8	1
Leck	45,7	807,7	1
Leer	39,2	723,0	1
Leinefelde	61,9	641,0	1
Leipzig	58,4	578,0	6
Lensahn	40,1	663,5	1
Leverkusen			4
Leverkusen-Bayer-Ag	56,1	634,7	2
Lindenberg	35,1	553,0	1
Lindscheid	90,3	868,4	2
List	42,7	736,1	1
Lübeck	32,1	628,1	1
Luenen	56,5	611,8	2
Magdeburg	39,9	521,0	1
Mannheim	70,6	641,4	1
Marburg	50,3	638,0	1
Marienfeld	74,9	903,8	2
Marnitz	37,3	673,0	1
Meppen	62,9	749,0	1
Mühdorf	72,9	896,0	1
Müncheberg	49,0	525,0	5
München	81,8	891,0	1
Münster	51,1	576,0	1
Neubrandenburg	41,7	569,0	1
Neumünster	50,9	753,8	1
Neustrelitz	35,7	584,0	1
Niederkastenholz	38,2	464,5	3
Nordenham	32,6	707,0	1
Nordhausen	56,3	556,0	1
Nottuln	47,4	706,0	1
Nürnberg	46,4	632,0	1
Oberhausen-Buschhausen	50,4	630,3	2
Oberstdorf	142,6	1857,0	1
Öderquart	48,3	748,0	1



Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Oleftalsperre	69,5	798,3	2
Oschatz/Torgau	67,0	558,0	7
Paderborn			4
Paderborn-Ps3	52,8	620,5	2
Passau	66,7	985,0	1
Plauen	68,3	564,0	6
Plön	55,3	663,2	1
Rauischholzhausen	35,5	646,0	1
Regensburg	42,9	648,0	1
Rehringhausen	65,4	842,0	1
Rheinfeld	50,5	619,9	2
Rheinhausen-Bismarckstr.	51,4	626,0	2
Rhynern	58,7	657,6	2
Roetgen	110,3	907,9	2
Rolfshagen	56,6	715,0	1
Rondorf	53,1	571,7	2
Rorup	44,5	826,0	1
Ruit	62,6	786,0	1
Salzgitter	40,2	678,0	1
Salzwedel	60,9	548,0	1
Schwelm	80,5	914,8	2
Schwerin	55,0	622,0	5
Schwesing	51,1	800,8	1
Sonneberg	101,4	917,0	1
Sorpetalsperre	76,4	993,0	1
St. Arnold	64,2	683,0	1
St. Arnual	51,6	911,8	1
Stoltebüll	31,6	721,3	1
Suderburg	57,3	607,0	1
Teterow	29,0	546,0	1
Tholey	59,8	1016,7	1
Ueckermünde	35,9	562,0	1
Unna	62,6	635,5	2
Varenesch	57,6	729,0	1
Villingen	79,9	922,0	1
Waltrop	68,5	669,6	2
Waren	36,0	575,0	5
Warenholz	47,6	616,0	1
Weiden	54,7	669,0	1



Stationsname	R-Faktor (Jahr)	Niederschlagssumme (Jahr) [mm]	Erläuterung (s.Tabellenende)
Weimar	52,6	557,0	1
Weisen	46,0	683,0	1
Weißenburg	48,8	629,0	1
Wernigerode	56,7	734,0	1
Weseke	53,8	713,6	2
Westhofen	92,0	1140,4	2
Wippringsen	58,9	685,2	3
Würzburg	48,9	633,0	1

Erläuterung (Spalte 4):

- 1 – Stationen und Werte aus SAUERBORN (1994) übernommen
- 2 – Stationen und Werte für Nordrhein-Westfalen durch Geologischen Dienst NRW bereitgestellt und aufgenommen
- 3 - Werte für Nordrhein-Westfalen durch Geologischen Dienst NRW bereitgestellt und aktualisiert
- 4 – Stationen und Werte aus SAUERBORN (1994) nicht übernommen, da aktualisierte Werte im Stadtgebiet vorhanden
- 5 – Werte für Nordost-Deutschland nach DEUMLICH (1999) aktualisiert
- 6 – Werte für Sachsen nach ELHAUS & HILLER (2007) aktualisiert
- 7 – Stationen und Werte für Sachsen nach ELHAUS & HILLER (2007) ergänzend aufgenommen



## Anhang 2 – Bezeichnung der Legendeneinheiten der BÜK 1000N

Legenden-Nr.	Bezeichnung
1	Podsol-Regosol / Lockersyrosem aus trockenen Sanden
2	Wattboden im Gezeitenbereich der Nordsee
3	Kalkmarsch aus marinen Ablagerungen
4	Kleimarsch aus brackischen Ablagerungen
5	Kleimarsch aus fluviatilen Ablagerungen
6	Niedermoorboden
7	Hochmoorboden
8	Auenboden / Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten
9	Gley-Tschernosem aus kalkhaltigen, tonig schluffigen Ablagerungen in Flusstälern der Schwarzerdegebiete
10	Auenboden / Gley aus sandigen bis lehmigen Flusssedimenten
11	Auenboden / Gley aus sandigen bis tonigen Flusssedimenten in kleinflächigem Wechsel
12	Gley der sandigen Urstromtäler und Niederungen
13	Pararendzina / Auenpararendzina aus kalkhaltigen, sandig-lehmigen Hochflut- und Auenaablagerungen
14	Parabraunerde aus schluffig-lehmigen Deckschichten auf eiszeitlichen Schotterplatten
15	Parabraunerde aus lössbedeckten, lehmig-sandigen Terrassenablagerungen
16	Podsol-Braunerde aus sandigen Terrassenablagerungen
17	Podsol / Braunerde-Podsol / Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen
18	Braunerde / Parabraunerde / Pararendzina aus lössvermischten Tertiärablagerungen
19	Parabraunerde / Fahlerde / Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebelehm
20	Parabraunerde-Tschernosem / Parabraunerde aus Geschiebemergel oder Beckenaablagerungen
21	Braunerde / Parabraunerde / Pararendzina aus lehmig-sandigen, kalkhaltigen Moränenablagerungen
22	Pseudogley aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm
23	Pseudogley aus lehmig-sandigem Geschiebemergel
24	Pseudogley-Tschernosem aus Geschiebelehm mit lehmig-sandiger Deckschicht
25	Podsol-Parabraunerde / Podsol-Fahlerde aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm
26	Fahlerde / Bänderparabraunerde / Braunerde aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm
27	Pararendzina / Regosol / Bänderparabraunerde im engräumigen Wechsel aus sandigen bis lehmigen Bildungen der Endmoränen
28	Podsoliierte Pseudogley-Braunerde / Pseudogley-Fahlerde aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm
29	Braunerde-Pseudogley / Podsol-Pseudogley aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm



Legenden-Nr.	Bezeichnung
30	Braunerde / Pseudogley aus kalkhaltigen, lehmig-sandig-kiesigen, lössvermischten Moränenablagerungen
31	Braunerde-Podsol / Podsol-Braunerde aus trockenen, nährstoffarmen Sanden
32	Braunerde / Bänderparabraunerde aus nährstoffreichen Sanden
33	Eisenhumuspodsol / Podsol-Regosol aus trockenen, nährstoffarmen Sanden
34	Regosol / Lockersyrosem aus trockenen, nährstoffarmen Sanden
35	Pararendzina aus Löss im Wechsel mit Rendzina aus Mergel- und Kalkstein
36	Tschernosem der Mitteldeutschen Trockengebiete aus Löss
37	Tschernosem / Braunerde aus Löss im Wechsel mit Rendzina aus Mergel- und Kalkstein
38	Tschernosem / Pseudogley-Tschernosem aus Löss über Ton- und Mergelgesteinen
39	Tschernosem aus Löss und lössähnlichen Schluffablagerungen
40	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löss oder Lösslehm
41	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde aus sandigen Lössdecken über Schmelzwassersedimenten oder Geschiebelehm
42	Parabraunerde / Fahlerde / Pseudogley aus Löss oder Lösslehm über verschiedenen Gesteinen
43	Parabraunerde-Pseudogley aus Löss oder Lösslehm ueber verschiedenen Gesteinen
44	Parabraunerde / Fahlerde / Braunerde-Pseudogley aus lössvermischten Verwitterungsprodukten verschiedener Silikatgesteine
45	Braunerde / Parabraunerde / Fahlerde aus sandvermischem Löss oder Lösslehm
46	Parabraunerde / Fahlerde / Braunerde aus Sandlöss über Sand oder Lehm
47	Braunerde / Pseudogley aus basaltgrushaltigem Lösslehm
48	Pseudogley / Braunerde / Parabraunerde aus Löss oder Lösslehm
49	Rendzina / Braunerde-Rendzina / Pararendzina aus Hangschutt ueber Kalk-, Mergel- und Dolomitgesteinen im Wechsel mit flacher Braunerde ueber Terra fusca / Terra fusca-Parabraunerde aus schluffig-tonigen Umlagerungsprodukten der Kalksteinverwitterung
50	Braunerde und Terra fusca aus Umlagerungsprodukten der Kalk-, Mergel- und Dolomitstein-Verwitterung sowie Rendzina aus Kalkstein
51	Pelosol-Braunerde / Pelosol-Pseudogley aus Verwitterungsprodukten von Mergel- und Tongesteinen
52	Braunerde aus Mergelgesteinen und kalkhaltigen Schottern
53	Braunerde aus basischen und intermediären magmatischen Gesteinen
54	Braunerde aus basenreichen Tuffen
55	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
56	Braunerde / Braunerde-Pseudogley aus lössvermischten Verwitterungsprodukten von kristallinen Schiefen, Sandstein, Quarzit und sauren bis intermediären magmatischen Gesteinen
57	Podsol-Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
58	Braunerde / Podsol-Braunerde aus Schluff-, Sand- und Tonsteinen





Legenden-Nr.	Bezeichnung
59	Braunerde / Podsol Braunerde aus hartem Ton und Schluffschiefern mit Anteilen von Grauwacke, Sandstein, Quarzit und Phyllit
60	Podsol-Braunerde aus harten Ton- und Schluffschiefern, Grauwacken und Phyllit
61	Podsolige Braunerde aus basenarmen quarzitischen Sandsteinen und Konglomeraten
62	Podsolige Braunerde aus lösshaltigen Deckschichten ueber Sandstein und Quarzit
63	Braunerde-Podsol / Podsol aus basenarmen Sandsteinen und Quarziten
64	Pseudogley / Podsol-Pseudogley aus lössvermischten, grusig-lehmigen Deckschichten ueber Sandstein und Quarzit
65	Braunerde / Podsol-Braunerde / Braunerde-Rendzina / Parabraunerde im engräumigen Wechsel aus Tonschiefer, Grauwacken und Kalkgesteinen sowie Lösslehm ueber verschiedenen Gesteinen
66	Rendzina / Pararendzina / Ranker / Podsol-Braunerde / Pelosol-Braunerde / Parabraunerde / Pseudogley im engräumigen Wechsel aus Kalk- und Mergelgesteinen, Sand-, Schluff- und Tonsteinen sowie Lösslehm ueber verschiedenen Gesteinen
67	Flache Braunerde ueber Fersiallit / Ferrallit-Relikten der tertiären Bodenbildung
68	Böden der montanen und subalpinen Höhenstufen der Alpen aus Kalk- und Dolomitgesteinen (z. B. Rendzina, Kalkbraunerde) sowie aus kalkfreien Silikatgesteinen (z. B. Ranker, Podsol-Braunerde, Pseudogley)
69	Rohböden (Syrosem) der alpinen, subnivalen und nivalen Fels- und Frostschtgebiete



Anhang 3 – K-Faktoren der Legendeneinheiten der BÜK 1000N in Abhängigkeit von Klimagebiet und Hauptnutzung (Bearbeitung: BGR)

Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
1	33	Ackerland	0,23
1	35	Ackerland	0,23
1	33	Grünland	0,23
1	35	Grünland	0,23
3	33	Ackerland	0,37
3	33	Grünland	0,37
4	33	Ackerland	0,29
4	33	Grünland	0,29
5	33	Ackerland	0,45
5	33	Grünland	0,17
6	33	Ackerland	0,17 <sup>(1)</sup>
6	34	Ackerland	0,17
6	35	Ackerland	0,17 <sup>(1)</sup>
6	33	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
6	34	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
6	35	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
6	38	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
7	33	Ackerland	0,00
7	34	Ackerland	0,00
7	35	Ackerland	0,00
7	33	Grünland	0,00
7	34	Grünland	0,00
7	35	Grünland	0,00
7	38	Grünland	0,00
8	33	Ackerland	0,32
8	34	Ackerland	0,32
8	35	Ackerland	0,36
8	33	Grünland	0,40
8	34	Grünland	0,40
8	35	Grünland	0,40
8	38	Grünland	0,40 <sup>(1)</sup>
9	33	Ackerland	0,33
9	34	Ackerland	0,33
9	35	Ackerland	0,33
9	33	Grünland	0,33
9	34	Grünland	0,33 <sup>(1)</sup>
9	35	Grünland	0,33



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
10	33	Ackerland	0,19
10	34	Ackerland	0,19
10	33	Grünland	0,17
10	34	Grünland	0,17
10	38	Grünland	0,17
11	33	Ackerland	0,36
11	34	Ackerland	0,37
11	35	Ackerland	0,36
11	38	Ackerland	0,37 <sup>(1)</sup>
11	33	Grünland	0,28
11	34	Grünland	0,28
11	35	Grünland	0,28
11	38	Grünland	0,28
12	33	Ackerland	0,16
12	35	Ackerland	0,16
12	33	Grünland	0,16
12	35	Grünland	0,16
13	34	Ackerland	0,39
13	35	Ackerland	0,39
13	34	Grünland	0,35 <sup>(2)</sup>
13	35	Grünland	0,35
14	34	Ackerland	0,48
14	34	Grünland	0,42
14	38	Grünland	0,42 <sup>(1)</sup>
15	33	Ackerland	0,56
15	34	Ackerland	0,56
15	35	Ackerland	0,56
15	33	Grünland	0,56
15	34	Grünland	0,56 <sup>(1)</sup>
15	35	Grünland	0,56 <sup>(1)</sup>
16	33	Ackerland	0,20
16	34	Ackerland	0,20
16	33	Grünland	0,20
16	34	Grünland	0,20
17	33	Ackerland	0,19
17	34	Ackerland	0,19
17	35	Ackerland	0,22
17	33	Grünland	0,11
17	34	Grünland	0,11 <sup>(1)</sup>



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
17	35	Grünland	0,11
18	34	Ackerland	0,32
18	35	Ackerland	0,32 <sup>(1)</sup>
18	34	Grünland	0,29
18	35	Grünland	0,29 <sup>(1)</sup>
19	33	Ackerland	0,22
19	35	Ackerland	0,22
19	33	Grünland	0,17
19	35	Grünland	0,17
20	33	Ackerland	0,13
20	35	Ackerland	0,13
20	33	Grünland	0,13 <sup>(2)</sup>
20	35	Grünland	0,13 <sup>(2)</sup>
21	34	Ackerland	0,27
21	38	Ackerland	0,27 <sup>(1)</sup>
21	34	Grünland	0,24
21	38	Grünland	0,24
22	33	Ackerland	0,22
22	34	Ackerland	0,22
22	35	Ackerland	0,22
22	33	Grünland	0,19
22	34	Grünland	0,19
22	35	Grünland	0,19 <sup>(1)</sup>
23	35	Ackerland	0,24
23	35	Grünland	0,09
24	33	Ackerland	0,22
24	35	Ackerland	0,22
24	33	Grünland	0,20 <sup>(2)</sup>
24	35	Grünland	0,20 <sup>(2)</sup>
25	33	Ackerland	0,16
25	33	Grünland	0,15
26	33	Ackerland	0,19
26	35	Ackerland	0,19
26	33	Grünland	0,15
26	35	Grünland	0,15
27	33	Ackerland	0,32
27	35	Ackerland	0,32
27	33	Grünland	0,28 <sup>(1)</sup>
27	35	Grünland	0,28



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
28	33	Ackerland	0,27
28	34	Ackerland	0,27
28	35	Ackerland	0,27
28	33	Grünland	0,18
28	34	Grünland	0,18 <sup>(1)</sup>
28	35	Grünland	0,18
29	33	Ackerland	0,32
29	35	Ackerland	0,32
29	33	Grünland	0,27
29	35	Grünland	0,27
30	34	Ackerland	0,32
30	34	Grünland	0,32
31	33	Ackerland	0,16
31	34	Ackerland	0,16
31	35	Ackerland	0,16
31	33	Grünland	0,16
31	34	Grünland	0,16
31	35	Grünland	0,16
32	33	Ackerland	0,22
32	35	Ackerland	0,22
32	33	Grünland	0,20
32	35	Grünland	0,20
33	33	Ackerland	0,21
33	34	Ackerland	0,21 <sup>(1)</sup>
33	33	Grünland	0,13
33	34	Grünland	0,13 <sup>(1)</sup>
34	33	Ackerland	0,26
34	35	Ackerland	0,26
34	33	Grünland	0,22 <sup>(2)</sup>
34	35	Grünland	0,22 <sup>(2)</sup>
35	34	Ackerland	0,37
35	34	Grünland	0,23
36	35	Ackerland	0,48
36	35	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
37	35	Ackerland	0,48
37	35	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
38	33	Ackerland	0,48
38	34	Ackerland	0,48 <sup>(1)</sup>
38	35	Ackerland	0,48



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
38	33	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
38	34	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
38	35	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
39	34	Ackerland	0,48
39	34	Grünland	0,48 <sup>(2)</sup>
40	33	Ackerland	0,37
40	34	Ackerland	0,37
40	35	Ackerland	0,37
40	33	Grünland	0,33 <sup>(1)</sup>
40	34	Grünland	0,33
40	35	Grünland	0,33 <sup>(1)</sup>
41	35	Ackerland	0,37
41	35	Grünland	0,33v
42	33	Ackerland	0,48
42	34	Ackerland	0,48
42	35	Ackerland	0,48
42	33	Grünland	0,48
42	34	Grünland	0,48
42	35	Grünland	0,48 <sup>(1)</sup>
43	34	Ackerland	0,50
43	35	Ackerland	0,50
43	34	Grünland	0,44 <sup>(2)</sup>
43	35	Grünland	0,44 <sup>(2)</sup>
44	34	Ackerland	0,50
44	35	Ackerland	0,50
44	34	Grünland	0,50
44	35	Grünland	0,50
45	34	Ackerland	0,50
45	35	Ackerland	0,50
45	34	Grünland	0,44 <sup>(2)</sup>
45	35	Grünland	0,44 <sup>(2)</sup>
46	33	Ackerland	0,45
46	34	Ackerland	0,45
46	35	Ackerland	0,53
46	33	Grünland	0,45
46	34	Grünland	0,45 <sup>(1)</sup>
46	35	Grünland	0,45
47	34	Ackerland	0,59
47	35	Ackerland	0,59



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
47	34	Grünland	0,37
47	35	Grünland	0,37 <sup>(1)</sup>
48	33	Ackerland	0,44
48	34	Ackerland	0,44
48	35	Ackerland	0,44
48	33	Grünland	0,37 <sup>(1)</sup>
48	34	Grünland	0,37
48	35	Grünland	0,37 <sup>(1)</sup>
49	33	Ackerland	0,15
49	34	Ackerland	0,15
49	35	Ackerland	0,15
49	33	Grünland	0,21 <sup>(1)</sup>
49	34	Grünland	0,21
49	35	Grünland	0,21
50	34	Ackerland	0,29
50	34	Grünland	0,16
51	33	Ackerland	0,23
51	34	Ackerland	0,23
51	35	Ackerland	0,23
51	33	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
51	34	Grünland	0,17
51	35	Grünland	0,17 <sup>(1)</sup>
52	33	Ackerland	0,12
52	34	Ackerland	0,31
52	38	Ackerland	0,17
52	33	Grünland	0,17
52	34	Grünland	0,17
52	38	Grünland	0,17
53	34	Ackerland	0,37
53	35	Ackerland	0,37
53	34	Grünland	0,24
53	35	Grünland	0,24
54	34	Ackerland	0,31
54	34	Grünland	0,28 <sup>(2)</sup>
55	34	Ackerland	0,44
55	35	Ackerland	0,44
55	34	Grünland	0,29
55	35	Grünland	0,29
56	34	Ackerland	0,39



Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
56	35	Ackerland	0,39
56	34	Grünland	0,35 <sup>(2)</sup>
56	35	Grünland	0,35 <sup>(2)</sup>
57	34	Ackerland	0,31 <sup>(1)</sup>
57	35	Ackerland	0,31
57	34	Grünland	0,28 <sup>(1)</sup>
57	35	Grünland	0,28
58	33	Ackerland	0,27
58	34	Ackerland	0,27
58	33	Grünland	0,24 <sup>(1)</sup>
58	34	Grünland	0,24
59	33	Ackerland	0,32
59	34	Ackerland	0,32
59	35	Ackerland	0,32
59	33	Grünland	0,32
59	34	Grünland	0,32
59	35	Grünland	0,32
60	34	Ackerland	0,27
60	34	Grünland	0,24
61	33	Ackerland	0,42
61	34	Ackerland	0,42
61	35	Ackerland	0,42
61	33	Grünland	0,32 <sup>(1)</sup>
61	34	Grünland	0,32
61	35	Grünland	0,32 <sup>(1)</sup>
62	34	Ackerland	0,45 <sup>(2)</sup>
62	34	Grünland	0,40
63	33	Ackerland	0,41
63	34	Ackerland	0,41
63	35	Ackerland	0,41
63	33	Grünland	0,35 <sup>(1)</sup>
63	34	Grünland	0,35
63	35	Grünland	0,35 <sup>(1)</sup>
64	34	Ackerland	0,32
64	35	Ackerland	0,32
64	34	Grünland	0,29
64	35	Grünland	0,29 <sup>(1)</sup>
65	33	Ackerland	0,50
65	34	Ackerland	0,50





Legenden-Nr.	Klimagebiet	Hauptnutzung	K-Faktor
65	35	Ackerland	0,50
65	33	Grünland	0,29 <sup>(1)</sup>
65	34	Grünland	0,29
65	35	Grünland	0,29 <sup>(1)</sup>
66	33	Ackerland	0,32
66	34	Ackerland	0,32
66	35	Ackerland	0,32
66	33	Grünland	0,41 <sup>(1)</sup>
66	34	Grünland	0,41
66	35	Grünland	0,41 <sup>(1)</sup>
67	34	Ackerland	0,37
67	34	Grünland	0,33
68	38	Ackerland	0,33 <sup>(2)</sup>
68	38	Grünland	0,29
69	38	Grünland	0,05 <sup>(2)</sup>

Erläuterung (Spalte 4):

- 1) Zuordnung der K-Faktoren erfolgte anhand gleicher Boden-Nutzungskombinationen aus benachbarten Klimagebieten
- 2) Zuordnung der K-Faktoren erfolgte durch die BGR manuell anhand Plausibilitäts- und Wahrscheinlichkeitsabschätzung

Erläuterung Klimagebiete (entsprechend Abb. 6 im Berichtsteil)

33 – Ozeanisch (subozeanisch) geprägtes Klima des Nordwestdeutschen Tieflandes

34 - Maritimes Klima Westeuropas

35 - Kontinental geprägtes Klima des Nordostdeutschen Tieflandes und der Östlichen Mittelgebirge

38 - Klima der Alpen