

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 371371231
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Bundesweite Gefährdung der Böden durch Winderosion und Bewertung der Veränderung in- folge des Wandels klimatischer Steuergrößen als Grundlage zur Weiterentwicklung der Vorsorge und Gefahrenabwehr im Bodenschutzrecht

von

Michael Steininger
Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz, Halle

Daniel Wurbs
Geoflux GbR, Halle

Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz, Ellen-
Weber-Straße 98, 06120 Halle

Geoflux GbR, Goethestraße 31, 06114 Halle

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 2016

Kurzbeschreibung

Die Bodenerosion durch Wind ist ein natürlicher Prozess, der durch die anthropogene Nutzung von Flächen beeinflusst wird und große Auswirkungen auf die Bodenfunktionen hat. Neben den bereits gegenwärtig erkennbaren Gefährdungen und Risiken ist mit der im Zuge der Klimaveränderung zu erwartenden Häufung von Starkwinden eine Zunahme des Gefährdungspotenzials für die landwirtschaftlich genutzten Böden zu erwarten und es sind frühzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Im Rahmen eines FuE-Vorhabens wurde eine modellgestützte bundesweite Bestandsaufnahme zum Ausmaß und zur räumlichen Verteilung der Erosionsgefährdung durch Wind unter Berücksichtigung der natürlichen Standortfaktoren sowie derzeitiger Bodenbewirtschaftungsverfahren und Fruchtartenspektren vorgenommen. Daraus aufbauend erfolgte durch Verwendung eines geeigneten Klimamodells die Ableitung möglicher Tendenzen der Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und unter Annahme verschiedener Szenarien für Anbauspektren. Vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen sind auch zukünftig schädliche Bodenveränderungen zu vermindern und zu vermeiden. Hierfür sind Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen abzuleiten, welche der Gefahrenabwehr aufgrund von Bodenerosion durch Wind dienen. Da in der Bereitstellung solcher Empfehlungen gegenwärtig noch Regelungsdefizite bestehen, wurde aus vorliegenden Sachstandsberichten ein Maßnahmenkatalog erstellt und die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beschrieben.

Abstract

Soil erosion by wind is a natural process of aeolian extraction and displacement of soil material and influenced by human activity. Soil erosion by wind has one of the greatest impact on soil yield functions as well as other soil functions. In addition to hazards and risks that are already visible, increasing potential hazards for agricultural soils are to be expected with the increase in strong winds in the course of climate change. Thus countermeasures should be taken early. In the framework of a research project the nationwide risk for soil erosion by wind depending on climate and soil characteristics as well as current landscape structures, crop type spectra and soil management methods was estimated by applying an erosion model. On that basis changed wind erosion risks until 2100, implementing altered climatic conditions and cultivation spectra by applying appropriate climate models and emission scenarios were predicted. To avoid damaging effects for the soils also in the future a catalog of measures has been prepared from present factual reports and described with regard to their effectiveness.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung	11
Summary	25
1 Einführung und Zielsetzung	38
1.1 Veranlassung	38
1.2 Zielsetzung	39
2 Sachstand zur Bodenerosion durch Wind	40
2.1 Physikalische Grundlagen und Folgen der Winderosion	40
2.2 Verfahren und Modelle zur Abschätzung der Winderosionsgefährdung	44
3 Ermittlung der Gefährdungssituation für den Ist-Zeitraum	49
3.1 Modellansatz und Datengrundlagen	49
3.2 Methodische Vorgehensweise	51
3.2.1 Modellierung der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind	51
3.2.2 Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind	52
3.2.3 Bewertung der Schutzwirkung von Fruchtarten und der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung	55
3.3 Ergebnisse	60
3.3.1 Natürliche Erosionsgefährdung durch Wind	60
3.3.2 Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind	64
3.3.3 Schutzwirkung von Fruchtarten und Bewertung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung durch Wind	66
3.4 Einschränkungen und Grenzen des DIN-Ansatzes	73
3.5 Bewertung der natürlichen und potenziellen Erosionsgefährdung auf Länderbasis - Festlegung von repräsentativen Landschaftsausschnitten	74
3.5.1 Vergleich der ermittelten Erosionsgefährdung auf Bundes- und Länderebene	74
3.5.2 Festlegung repräsentativer Landschaftsausschnitte (Modellgebiete) und Klimastationen	77
4 Prognose der Gefährdungssituation bis zum Jahr 2100	80
4.1 Modellansatz	80
4.2 Auswahl von Klima- und Emissionsszenarien und Klimadatenaufbereitung	80
4.3 Bewertung zukünftiger Änderungen nach Ansatz der DIN 19706	84
4.4 Semidynamische Modellierung und Prognose der natürlichen Erosionsgefährdung bis 2100	85

4.5	Szenarienanalysen für Fruchtartenzusammensetzungen und Modellierung der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung.....	88
5	Kennzeichnung des Beitrages der Bodenerosion durch Wind zur Feinstaubbelastung.....	102
6	Aufstellen von Kriterien und Empfehlungen nach BBodSchG (§ 8 – Ermächtigung) bzw. BBodSchV.....	106
7	Konzeption und Erarbeitung eines Merkblattes „Bodenerosion durch Wind – Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr“	112
8	Fazit und Ausblick	114
9	Quellenverzeichnis.....	116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Sand-/Staubsturm auf der A14 bei Welbsleben am 08.04.2011	40
Abbildung 2:	Am Ackerrand akkumulierter Lössboden	41
Abbildung 3:	Ausblasung im Kuppenbereich eines Löss-Standortes (Aufhellung)	43
Abbildung 4:	Fließschema zur Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind nach DIN 19706 (DIN 2013) und Cross-Compliance-Vorgaben (AK EROSION 2008)	49
Abbildung 5:	Schema zur Ermittlung der Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen	53
Abbildung 6:	Höhen und Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen (Ausschnitt)	54
Abbildung 7:	Einstufung der Schutzwirkung von Fruchtarten bei konventioneller Bodenbearbeitung	56
Abbildung 8:	Anteil nichtwendender Bodenbearbeitungsverfahren laut Datenerhebung des FDZ Nord	59
Abbildung 9:	Erosionsgefährdung durch Wind – Vergleich BÜK 200 und BÜK 1000N	60
Abbildung 10:	Erodierbarkeit ackerbaulich genutzter Böden in Deutschland	61
Abbildung 11:	Erosivität des Windes in Deutschland	62
Abbildung 12:	Natürliche Erosionsgefährdung durch Wind auf ackerbaulich genutzten Böden	63
Abbildung 13:	Häufigkeit der Windrichtung ‚Südwest‘ in den Monaten Februar bis Mai	64
Abbildung 14:	Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind auf ackerbaulich genutzten Böden	65
Abbildung 15:	Anteil ackerbaulich genutzter Flächen in den Naturräumen	66
Abbildung 16:	Anteil Wintergetreide an den Fruchtarten in den Naturräumen	68
Abbildung 17:	Anteil Wintergetreide (Schutzstufe 4) an den Fruchtarten in den Naturräumen	69
Abbildung 18:	Maisanteil an den angebauten Fruchtarten in den Naturräumen	70
Abbildung 19:	Bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung auf Naturraumebene	72
Abbildung 20:	Verfügbarkeit von Daten der Bundesländer CC _{Wind} -Einstufungen	75
Abbildung 21:	Bodenerodierbarkeit ackerbaulich genutzter Flächen – Vergleich BÜK 1000N mit Länderdaten	76
Abbildung 22:	Potenzielle Erosionsgefährdung ackerbaulich genutzter Flächen – Vergleich BÜK1000N mit Länderdaten	77
Abbildung 23:	Lage und Gefährdungseinstufung der Modellgebiete	78
Abbildung 24:	Ausgewählte Klimastationen und CCLM-Rasterzellen	82
Abbildung 25:	Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Klimamessstationen und zugehörige CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)	84

Abbildung 26:	Tendenzen der zukünftigen natürlichen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten	87
Abbildung 27:	Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000	90
Abbildung 28:	Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten (RWEQ-Ansatz) für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000	91
Abbildung 29:	Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Fruchtartenzusammensetzung - Ist“	93
Abbildung 30:	Anteil des monatlichen Wetterfaktors am Jahreswetterfaktor – Referenzperiode 1971 – 2000 und 2071 – 2100 (Beispiel Schleswig-Holstein).....	95
Abbildung 31:	Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Ganzjährige Bodenbedeckung - Wintergetreide“	96
Abbildung 32:	Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „worst case – 100 % Maisanbau“	98
Abbildung 33:	Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Mittlere Anbauverhältnisse – 60 % Wintergetreide, 40 % Maisanbau“	100
Abbildung 34:	Entwicklung der PM ₁₀ -Feinstaubemission nach Quellengruppen von 1999 bis 2006 in Gigagramm (1000 Tonnen) pro Jahr	103
Abbildung 35:	PM ₁₀ -Überschreitungsphasen und Windwirkungsintegral (WWI) für die Luftgütemessstellen Berlin (urban) und Hasenholz (ländlich).....	104
Abbildung 36:	PM ₁₀ -Messungen - Stundenwerte im Tagesgang am 14.09.2006 an der Messstelle Hasenholz	105
Abbildung 37:	Entwurf Deckblatt für Merkblatt	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	On- und offsite Effekte der Winderosion	43
Tabelle 2:	Vorauswahl empirischer und (semi-)dynamischer Winderosionsmodelle und -verfahren	45
Tabelle 3:	Datengrundlagen und -quellen.....	50
Tabelle 4:	Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind nach AK EROSION (2008)	54
Tabelle 5:	Bundesweite Anbauflächen der wesentlichen Fruchtartengruppen (ohne Berücksichtigung der Sperrflächen)	67
Tabelle 6:	Bewirtschaftungsbezogene Schutzstufen in den Naturräumen.....	71
Tabelle 7:	Charakterisierung der festgelegten Landschaftsausschnitte	79
Tabelle 8:	Statistische Kennwerte zur mittleren Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] für die Messstationen und die zugehörigen CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)	83
Tabelle 9:	Windgeschwindigkeiten und Stufen der Winderosität für die Klimaszenarien an den Bezugsstationen/CCLM-Rasterzellen	85
Tabelle 10:	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf	88
Tabelle 11:	Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Fruchtartenzusammensetzung - Ist“	94
Tabelle 12:	Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Ganzjährige Bodenbedeckung - Wintergetreide“	97
Tabelle 13:	Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „worst case – 100 % Maisanbau“	99
Tabelle 14:	Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Mittlere Anbauverhältnisse – 60 % Wintergetreide, 40 % Maisanbau“	101
Tabelle 15:	Übersicht zu Maßnahmen zur Verminderung der Erosionsgefährdung durch Wind	108

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BfN	Bundesamtes für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BÜK	Bodenübersichtskarte
BOVA	Ständiger Ausschuss „Vorsorgender Bodenschutz“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)
BMELV	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CC	Cross Compliance
CERA	Climate and Environmental Retrieval and Archive
DKRZ	Deutschen Klimarechenzentrums
FDZ	Forschungsdatenzentrum
FKZ	Förderkennzeichen
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5.Auflage
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
MMK	Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung
RWEQ	Revised Wind Erosion Equation
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle
USLE	Universal Soil Loss Equation
VERMOST	Vergleichsmethode Standort
WEQ	Wind Erosion Equation
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg

Zusammenfassung

Bodenverlagerungen durch Wind- und Wassererosion haben neben Schäden durch Bodenverdichtung und der Verringerung der Humusvorräte im Boden die größten Auswirkungen auf die Ertragsfunktion der Böden, beeinflussen jedoch auch die übrigen Bodenfunktionen maßgeblich. Wind- und Wassererosion sind natürliche Prozesse, die durch die anthropogene Nutzung von Flächen beeinflusst werden und als auslösendes Moment extremer Witterungselemente, wie Starkregen oder Starkwinde, bedürfen. Sie sind demzufolge vom Klimawandel doppelt beeinflusst, einerseits durch die sich ändernde Bodensysteme und andererseits direkt durch die Klimaänderung. Neben den bereits aktuell erkennbaren Gefährdungen und Risiken ist mit der im Zuge der Klimaveränderung zu erwartenden Häufung der Starkwinde eine Zunahme des Gefährdungspotenzials für die landwirtschaftlich genutzten Böden zu erwarten und sind frühzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen (UBA 2011).

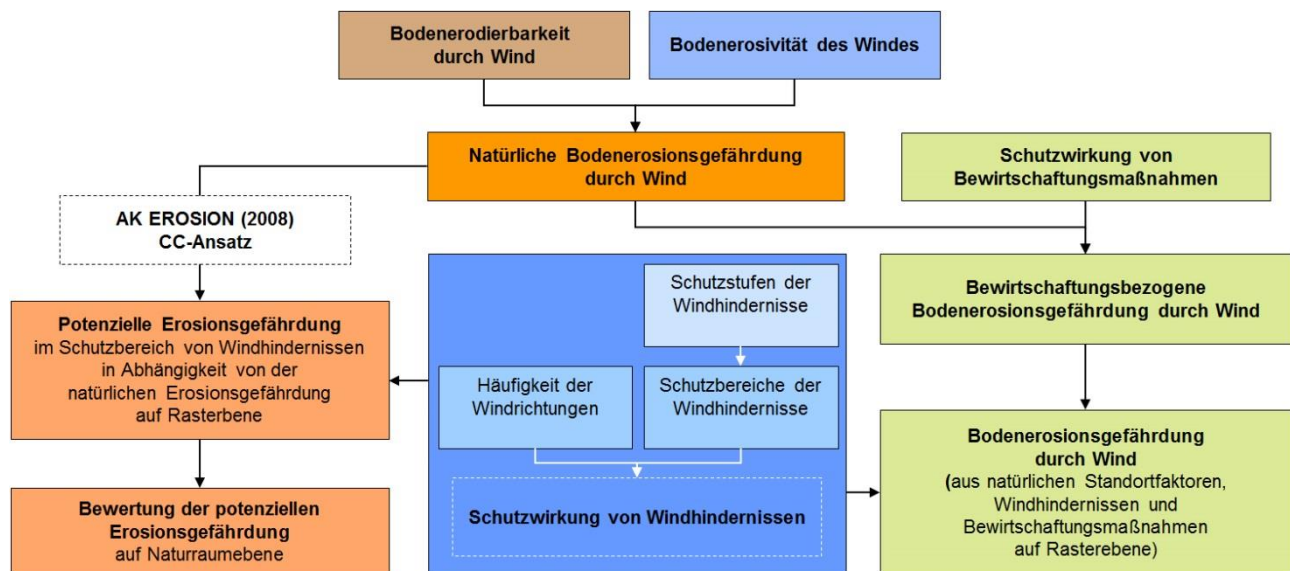
Da eine bundesweite Bestandsaufnahme zum Ausmaß und zur räumlichen Verteilung der Erosionsgefährdung durch Wind unter Berücksichtigung derzeitiger Bodenbewirtschaftungsverfahren und Fruchtartenspektren sowie der sich verändernden klimatischen Rahmenbedingungen bis dato noch nicht vorlag, hat das Umweltbundesamt unter dem Förderkennzeichen (FKZ) 3713 71 231 im Rahmen des UFOPLAN 2013 ein Forschungsvorhaben zum Thema „Bundesweite Gefährdung der Böden durch Winderosion und Bewertung der Veränderung infolge des Wandels klimatischer Steuergrößen als Grundlage zur Weiterentwicklung der Vorsorge und Gefahrenabwehr im Bodenschutzrecht“ initiiert. Ziel des Vorhabens war neben der Ermittlung und Darstellung der bundesweiten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften sowie gegenwärtigen Landschaftsstrukturen, Fruchtartenspektren und Bodenbewirtschaftungsverfahren die Prognose der veränderten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und Anbauspektren. Die Hauptziele des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- ▶ Ermittlung und Darstellung der bundesweiten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften sowie gegenwärtigen Landschaftsstrukturen, Fruchtartenspektren und Bodenbewirtschaftungsverfahren durch Anwendung eines bundesweit einsetzbaren Modellverfahrens
- ▶ Prognose der veränderten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 - unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und Anbauspektren - durch Anwendung geeigneter Klimamodelle und Emissionsszenarien
- ▶ Beschreibung des Beitrages der Winderosion zur Feinstaubbelastung in Ballungsräumen und Skizzierung von bestehenden Forschungsdefiziten bzw. zukünftigem Forschungsbedarf
- ▶ Schaffung der fachlichen Grundlagen zur Weiterentwicklung des gesetzlichen und untergesetzlichen Handlungsrahmens im Umgang mit Gefahren für eine wirksame Vorsorge nach § 17 BBodSchG und für die Gefahrenabwehr nach § 4 und § 8 BBodSchG
- ▶ Konzeption, Layout und Druck einer Broschüre, mit dem Ziel, Kriterien und Empfehlungen nach BBodSchG und BBodSchV sowie die gegenwärtig erarbeitete Kartieranleitung Winderosion, einer Zielgruppe aus Vollzug, Beratung und Praxis öffentlich verfügbar zu machen.

Bei der Winderosion handelt es sich um einen natürlichen Prozess des äolischen Abtrages und der Verlagerung von Bodenmaterial, der durch die menschliche Tätigkeit beeinflusst wird. Auslöser der Bodenerosion durch Wind (Deflation; kurz Winderosion) sind Winde, die ab einer bestimmten Geschwindigkeit Turbulenzen an der Bodenoberfläche erzeugen und Bodenteilchen zur Bewegung bringen. Kollidieren diese wiederum mit ruhenden Bodenteilchen am Boden, können diese zerschlagen und/oder in die turbulente Zone geschleudert werden und so durch eine Kettenreaktion diesen Prozess fortsetzen.

Als Modellansatz, mit dem die Winderosionsgefährdung deutschlandweit ermittelt werden kann, existiert gegenwärtig nur das Verfahren nach DIN 19706. Das Fließschema zur methodischen Vorgehensweise und den ermittelten Parametern zeigt Abb. I.

Abbildung I: Fließschema zur Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind nach DIN 19706 (DIN 2013) und Cross-Compliance-Vorgaben (AK EROSION 2008)



Für die Schaffung der Modellgrundlagen wurden die in Tabelle I aufgeführten Geo- und Klimadaten genutzt. Diese wurden das Umweltbundesamt bereitgestellt und anschließend aufbereitet. Sämtliche Datengrundlagen wurden in das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89) mit der "Universalen Transversalen Mercator (UTM) „-Abbildung transformiert. Die räumliche Auflösung beträgt 10 m.

Tabelle I: Datengrundlagen und -quellen

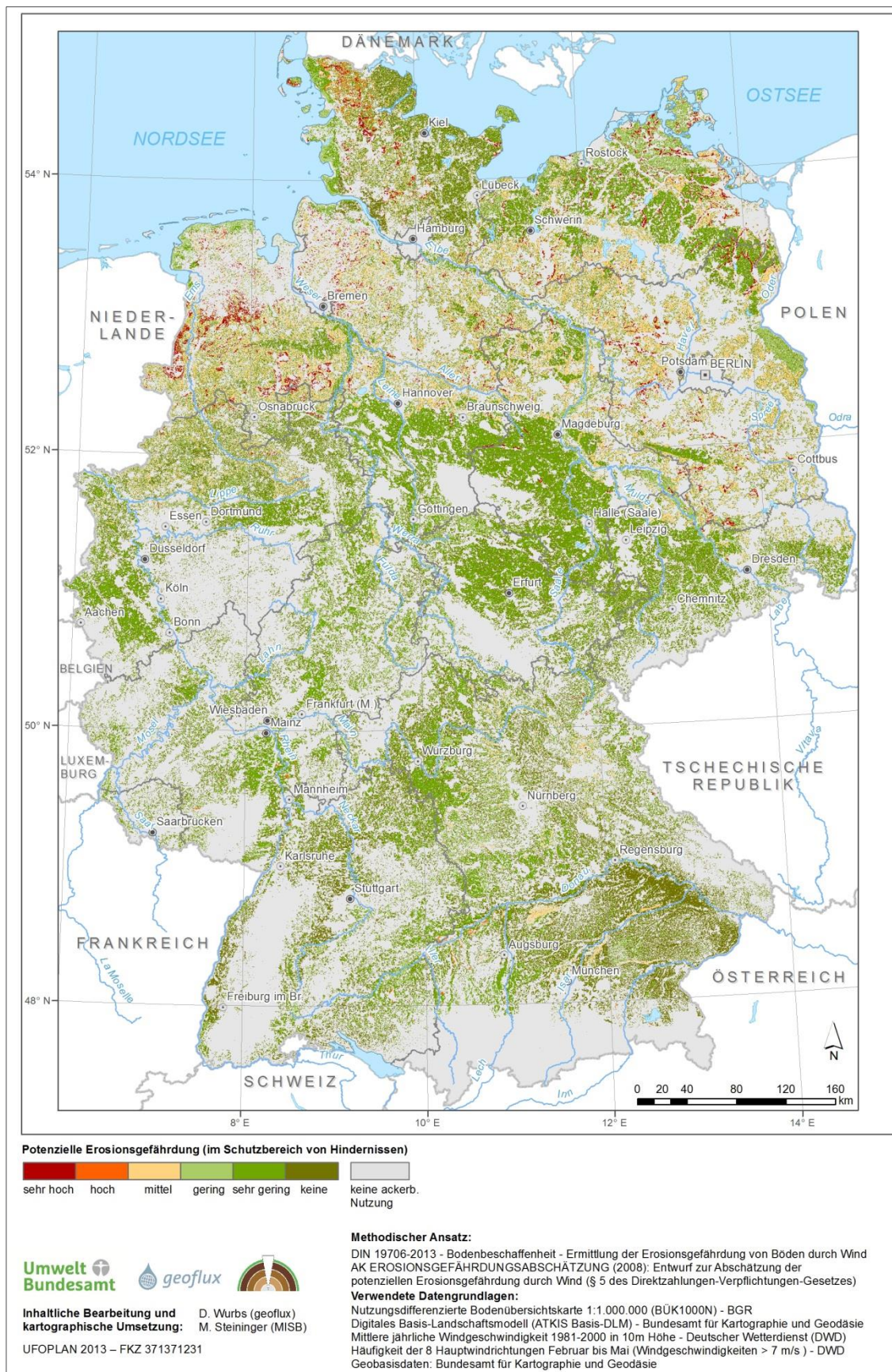
Datengrundlage	Datenquelle
Nutzungsabhängige Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1000N) mit Geometrien und Sachdaten	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) mit Geometrien und Sachdaten (verschiedene Blätter)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Naturräumliche Gliederung Deutschlands (Stand 2008)	Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Digitales Basis-Landschaftsmodell (ATKIS Basis-DLM)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
Daten der Agrarstrukturerhebung auf Gemeindebasis (Stand 2010)	Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder, bereitgestellt durch das Forschungsdatenzentrum (FDZ) Nord
Rasterkarte der mittleren Windgeschwindigkeit 10m über Grund im 200m-Raster (DWD) für die Klimaperiode 1981-2000	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Klimadaten für Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer auf Tageswertbasis für 13 Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Stärkewindrosen (8 Hauptwindrichtungen) für 85 verfügbare Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Rasterdatensatz (1x1 km) der mittleren Jahres- und Monatsniederschlagssummen 1981-2000	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Verwaltungsgrenzen von Deutschland 1:250.000 (Stand 1.12.2014)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Klimaszenariendaten des Regionalmodells COSMO-CLM (Emissionsszenarium A1B) 1971-2100	Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

Erosionsgefährdung durch Wind (IST-Situation)

Die Ermittlung der potenziellen Erosionsgefährdung, die ergänzend zum DIN-Ansatz entsprechend der Vorgaben der AK EROSION (2008) vorgenommen wurde, beinhaltet die Verknüpfung der Bodenerodierbarkeit mit der Winderosivität sowie die Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen, basierend auf den Häufigkeiten der acht Hauptwindrichtungen in den Monaten Februar bis Mai. In großen Teilen Deutschlands ist die "Süd-West-Windrichtung" mit einem Anteil von über 30 % die dominante Hauptwindrichtung und somit bedeutsam hinsichtlich der Lage und Richtung von Windhindernissen. Im Westen und Südwesten Deutschlands nimmt der Anteil der Südwestrichtung auf über 50 % deutlich zu.

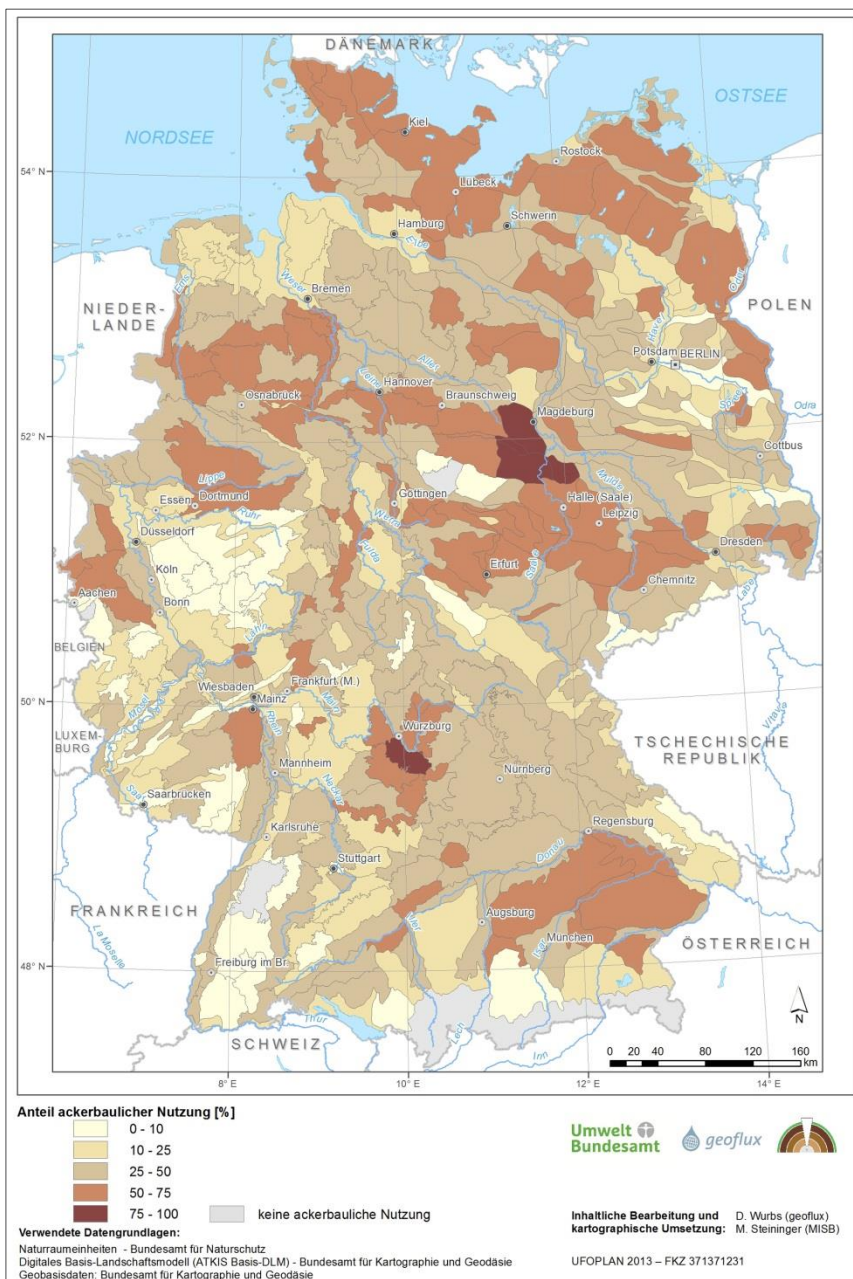
Bedingt durch die hohen Windgeschwindigkeiten und die Erodibilität der vorwiegend sandigen Böden, weisen die ackerbaulich genutzten Flächen im norddeutschen Binnenland, in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Nordrhein-Westfalen vorwiegend mittlere potenzielle Erosionsgefährdstufen auf. Flächen mit hoher bis sehr hoher Gefährdung befinden sich in größeren Ausschnitten vor allem in Schleswig-Holstein und im westlichen Niedersachsen (Abb. II). Ursache hierfür sind sowohl die vorherrschenden Bodensubstrate als auch die vergleichsweise hohen mittleren Windgeschwindigkeiten.

Abbildung II: Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind auf ackerbaulich genutzten Böden



Die Vegetationsbedeckung des Bodens, insbesondere der innerjährliche Grad der Bodenbedeckung im Bezug zum Verlauf des Windintegrals, hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gefährdungspotenzial der Standorte hinsichtlich der Winderosion. Im methodischen Ansatz nach DIN 19706 wird dieser Einfluss durch die Stufen der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen widergespiegelt. In Kombination der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen mit der natürlichen Winderosionsgefährdung wird die bewirtschaftungsbezogene Erosionsgefährdung durch Wind ausgewiesen. Für die Ermittlung der in den Naturraumeinheiten angebauten Fruchtarten wurde auf den Datenbestand des Forschungsdatenzentrums Nord in Kiel (FDZ) zur Landwirtschaftszählung 2010 zurückgegriffen. Die Daten repräsentieren den Stand 2010. Aus der Auswertung der Daten ergeben sich die in Abbildung III dargestellten Anteile von ackerbaulich genutzten Flächen in den Naturräumen Deutschlands. Dabei liegen die höchsten Anteile mit über 75 % im Bereich des nordöstlichen Harzvorlandes. Zusätzlich weisen vor allem die Lössregionen in Sachsen-Anhalt und Sachsen sowie große Bereiche in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen Ackeranteile von über 50 % auf.

Abbildung III: Anteil ackerbaulich genutzter Flächen in den Naturräumen



Auf Ebene der wesentlichen Fruchtartengruppen lassen sich ohne Berücksichtigung von Sperrflächen die in Tabelle II aufgeführten Anbauflächen zusammenfassen.

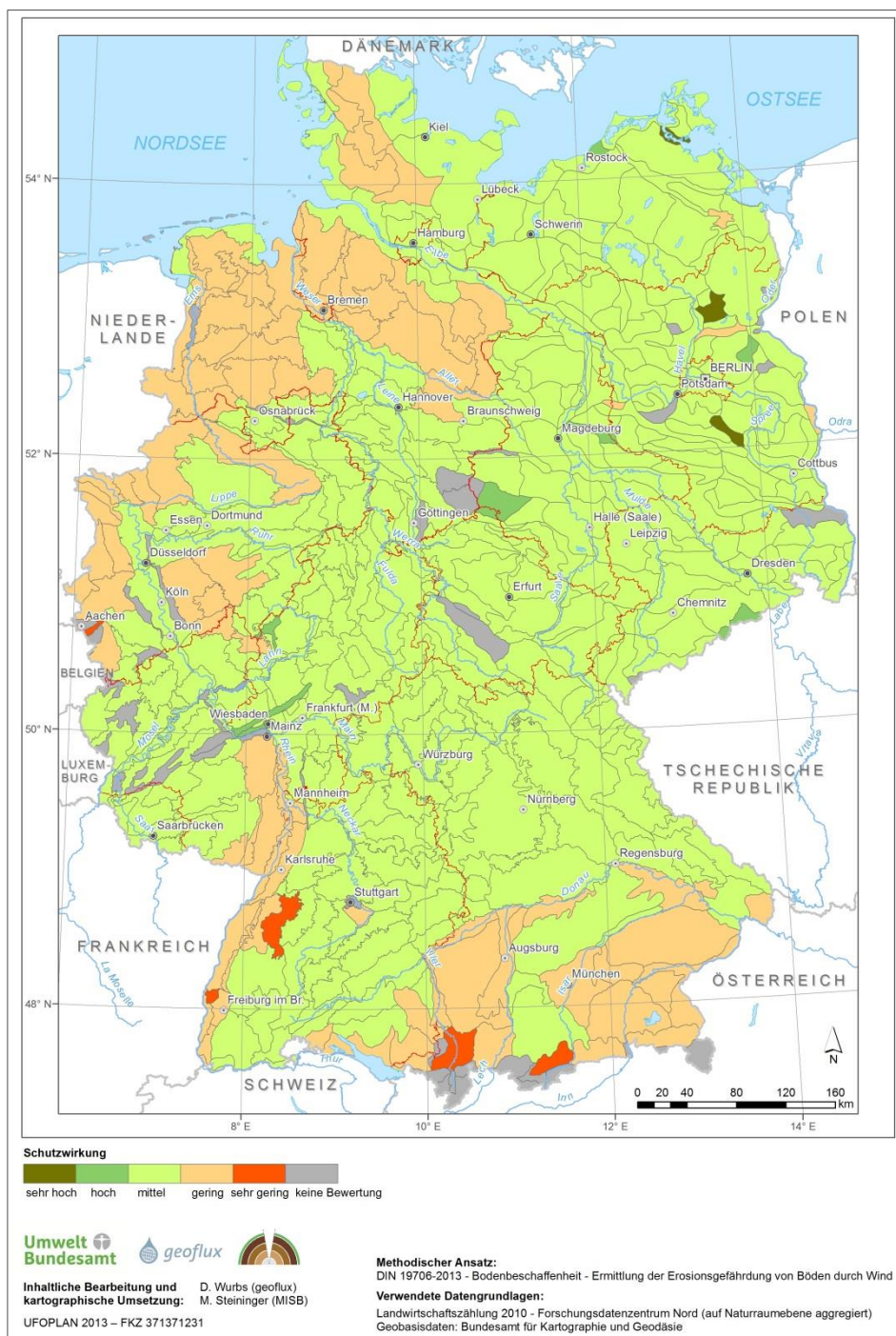
Tabelle II: Bundesweite Anbauflächen der wesentlichen Fruchtartengruppen (ohne Berücksichtigung der Sperrflächen)

Fruchtartengruppe	Anbaufläche [ha]	Anteil an Ackerfläche gesamt [%]
Wintergetreide	5.543.262	49,4
Mais	2.289.853	20,4
Winterraps	1.452.460	12,9
Ackerfutter	629.842	5,6
Sommergetreide	561.031	5
Zuckerrübe	363.092	3,2
Kartoffel	250.379	2,2
Hülsenfrüchte	94.754	0,8

Aufgrund der ermittelten Flächenanteile der angebauten Fruchtarten/-gruppen wird auf 67,9 % der Anbaufläche eine mittlere bis sehr gute bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung erreicht. Auf 31,6 % der Anbauflächen liegt jedoch nur eine geringe bis sehr geringe Schutzwirkung vor. Kritisch ist hierbei, dass sich in der Regel diese Anbausysteme auf die Standorte mit einer hohen natürlichen Winderosionsgefährdung konzentrieren.

Der Bezug der Anbauverteilung auf die Naturräume brachte eine starke, fast flächendeckende Nivellierung der Schutzwirkung in die Stufe `mittel` mit sich. Da mit dem verwendeten Ansatz die Erosionsgefährdung somit nicht korrekt abbildbar ist und es zu Abweichungen gegenüber einer schlagbezogenen Auswertung, in der Regel einhergehend mit einer Verminderung der Erosionsgefährdung kommt, die sich deutlich von den CC_{Wind}-Einstufungen der Länder unterscheiden würden, **erfolgte keine Ausweisung der bewirtschaftungsbezogenen und somit weiterführend der Erosionsgefährdung durch Wind** unter Einbeziehung von natürlichen Standortfaktoren, Windhindernissen und der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen.

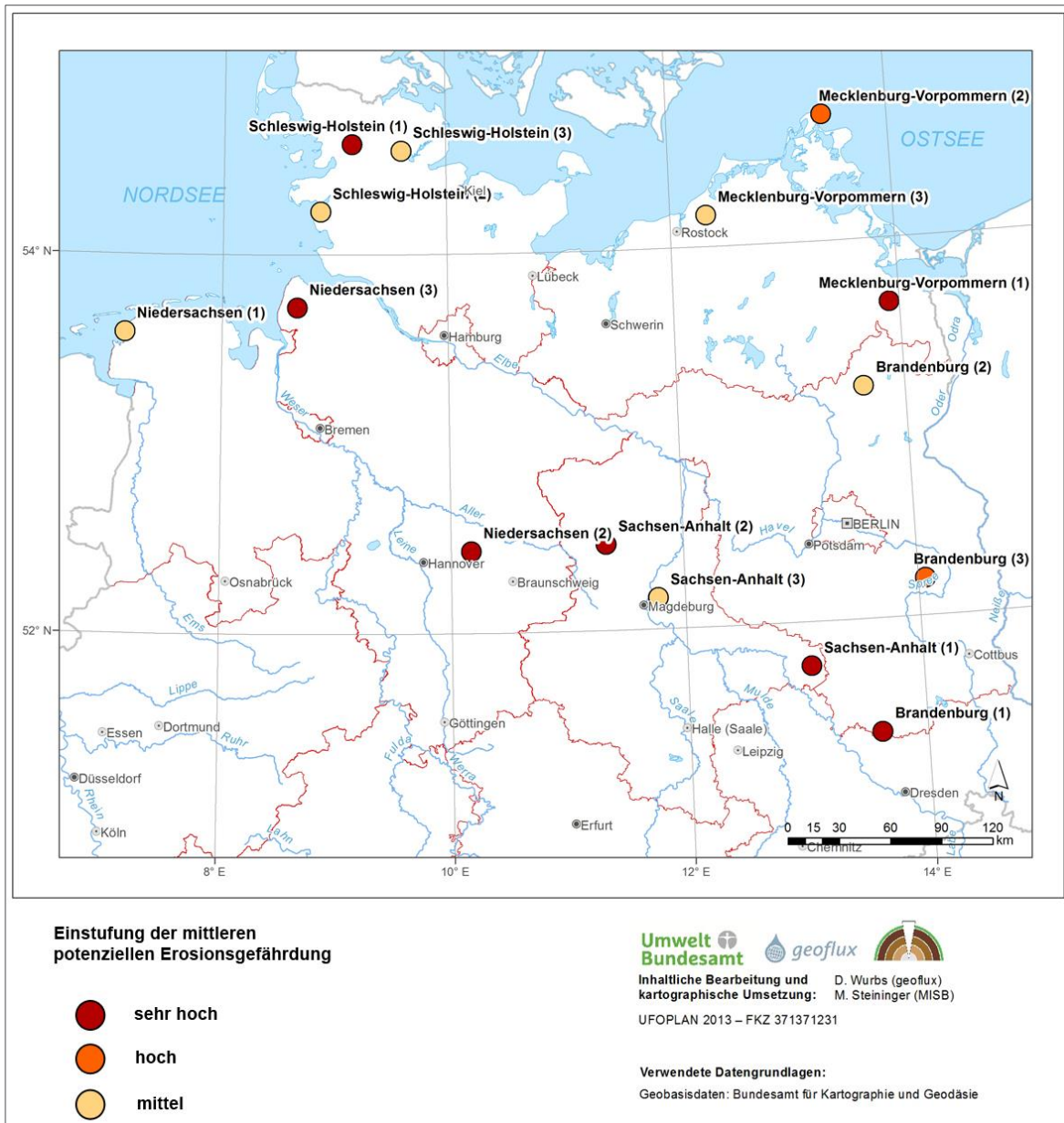
Abbildung IV: Bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung auf Naturraumebene



Für die Bewertung der zukünftigen Erosionsgefährdung durch Wind unter Einbeziehung regionaler Klimaszenarien sind neben Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeit auch die Entwicklung der zukünftigen Starkwindhäufigkeit und der Oberbodenfeuchte zu berücksichtigen. Da der Ansatz nach DIN 19706 (DIN 2013) ausschließlich die Windgeschwindigkeit als Klimasignal ausweist, können mit dem DIN-Verfahren nur bedingt Prognosen der Gefährdungssituation getroffen werden. Um dennoch großräumige Tendenzen zu erkennen, die Aussagen zur möglichen Entwicklung der Erosionsgefährdung ermöglichen, wurde ein **genesteter Modellansatz** unter Nutzung des RWEQ-Ansatzes gewählt. Hierzu wurden auf Grundlage der Ergebnisse der DIN-Modellierung unter Verwendung kleinmaßstäbig vorliegender länderbezogener Daten zur Winderosionsgefährdung 15 repräsentative Landschaftsausschnitte als Modellgebiete festgelegt. Innerhalb dieser erfolgte für den groß- bis mittelmaß-

stäbigen Bereich die Bewertung der natürlichen und, unter Einbeziehung von Szenarienannahmen, der **fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung**. Die Auswahl der Gebiete erfolgte repräsentativ unter Berücksichtigung des Ackeranteiles innerhalb des Landschaftsausschnittes, dessen Gesamtfläche, der dominierenden und mittleren Gefährdungsstufe gemäß DIN 19706 und der Verfügbarkeit von Klimadaten. Abbildung V gibt einen Überblick über die Lage und mittlere potenzielle Gefährdungseinstufung der Modellgebiete.

Abbildung V: Lage und Gefährdungseinstufung der Modellgebiete



Die Modellierungen wurden unter Verwendung des semiquantitativen Modellansatzes der RWEQ sowohl für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 als auch für drei Szenarienzeiträume bis 2100 durchgeführt. Für die Modellierung der Winderosion in den Szenarienzeiträumen bis 2100 wurden die Ergebnisse der Modellläufe des regionalen Klimamodells COSMO-CLM für das Emissionsszenarium SRES A1B genutzt (Hollweg u.a. 2008). Die Modellergebnisse sind Teil des Regionalen bzw. des Norddeutschen Klimaatlas (Meinke und Gerstner 2009; Norddeutsches Klimabüro 2009) und derzeit gültige Entscheidungsgrundlage für Handlungsempfehlungen hinsichtlich Anpassung und Vulnerabilität. Die

Daten der neuesten RCP-Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways) lagen im Verlauf der Projektbearbeitung noch nicht vollständig vor. Allerdings zeigen vorliegende Vergleichsrechnungen zwischen Klimamodellläufen der RCP- und der SRES A1B-Emissionsszenarien eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der Trends für Wind, Temperatur und Niederschlag (vgl. Jacob et al. 2014). Insofern lassen sich unter Verwendung der A1B-Szenariendaten vergleichbare Ergebnisse für erosionsrelevante Fragestellungen erwarten.

Im Vorfeld der Aufbereitung der Klimaszenariendaten erfolgte die Recherche und Aufbereitung von **aktuellen Klimadaten** repräsentativer Stationen im Bereich der festgelegten Modellgebiete. Unter Verwendung der aktuellen Klimadaten erfolgte die Anwendung eines Testlaufes des RWEQ-Modells. Zusätzlich dienten die Stationswerte einer ersten Bewertung zukünftiger Änderungen der Erosionsgefährdung nach dem Ansatz der DIN 19706 (Beispiel Windgeschwindigkeit siehe Abb. VI). Insgesamt wurden aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) 13 Stationen für die 15 Modellgebiete ausgewählt und die Klimaparameter Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$], Sonnenscheindauer [h] und Niederschlag auf Tageswertbasis für die Periode 1971-2000 aufbereitet. Die Prognose der zukünftigen Gefährdungssituation erfolgte durch den Vergleich der Modellergebnisse unter Einbeziehung der Klimaszenariendaten für den Zeitraum 2011 bis 2100 mit den Ergebnissen des Klimakontrolllaufes.

Für jedes der 15 Modellgebiete erfolgte eine spezifische Datenaufbereitung und Modellparametrisierung für das RWEQ-Modell. Die **bodenkundlichen Standortparameter** (Bodenart, Kalkgehalt, Humusgehalt) wurden aus den Kartenblättern der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) und der Beschreibung der Legendeneinheiten expertenbasiert bestimmt und daraus die entsprechenden Parameter ‚Anteil erodierbarer Bodenfraktionen‘, ‚Oberbodenkrustenfaktor‘ und ‚Rauigkeitsfaktor‘ abgeleitet. Basis für den **Wetterfaktor** bildeten die vorab beschriebenen Auswertungen der Klimaszenariendaten.

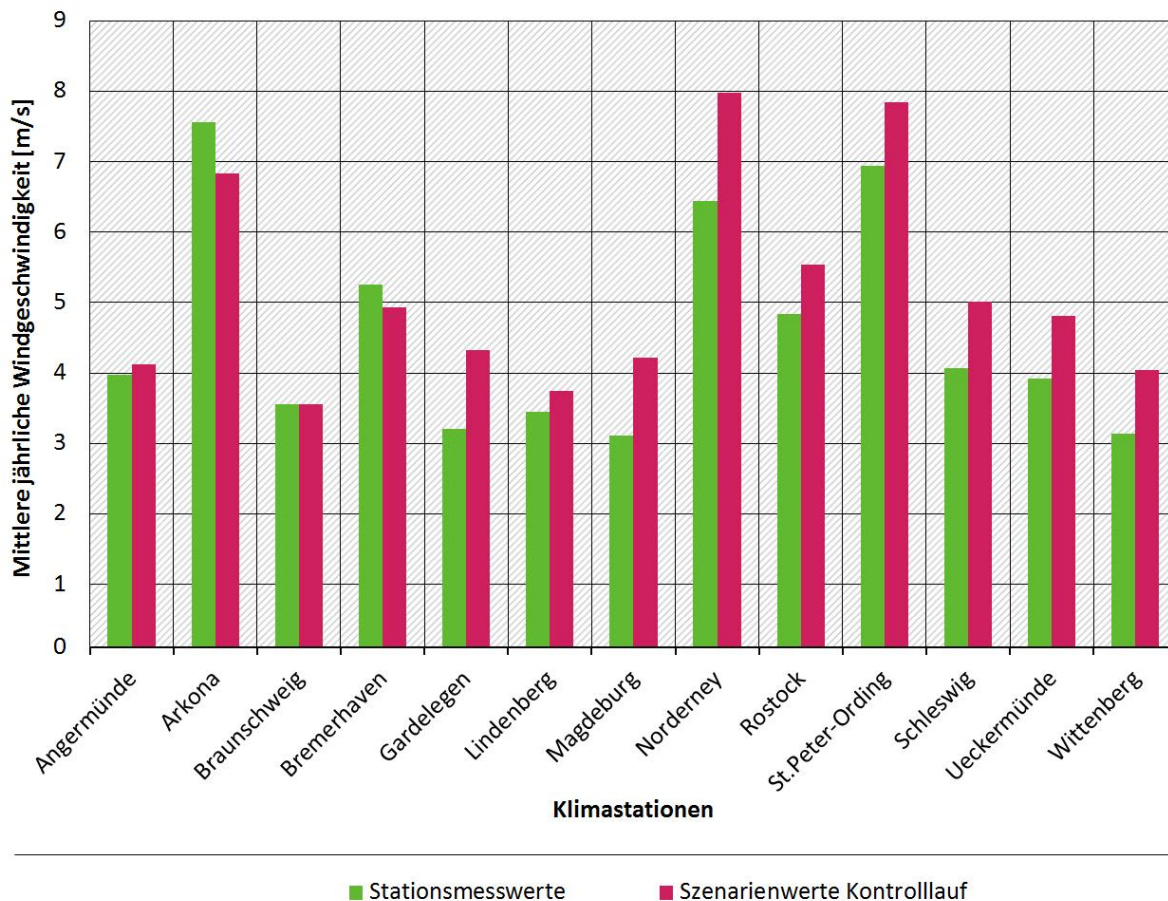
Der **Management- bzw. Bodenbedeckungsfaktor** (COG-Faktor) wurde aus den im Rahmen der Szenarienanalysen festgelegten Fruchtartenzusammensetzungen abgeleitet. Um die Auswirkung der Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag in ihren Randbedingungen und für mittlere Verhältnisse abzubilden, wurden zusätzlich zu den „realen Fruchtfolgen“ drei Szenarien zur Abbildung möglicher Anbautrends erstellt:

- ▶ **Möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (100% Wintergetreide):** Diese Annahme entspricht einer reinen Wintergetreide-Fruchtfolge mit einer Bodenbearbeitung unmittelbar vor der Aussaat oder die Einbindung von Zwischenfrüchten und Untersaaten in die Anbausysteme. Dieses Szenarium stellt das Optimum dar.
- ▶ **Maisanbau (100%):** Das Szenarium ist ein fiktiver Ansatz, der nicht zur Anwendung kommt, aber die Auswirkung einer dauerhaft langen Phase ohne Bodenbedeckung abbildet. Unter Nutzungsbedingungen stellt dieses Szenarium den ungünstigsten anzunehmenden Fall (worst case) dar.
- ▶ **Mittlere Anbauverhältnisse (60% Wintergetreide/40% Mais):** Dieses Szenarium wird abgebildet durch einen Anteil an Wintergetreide in Höhe von 60 % und einen Maisanteil von 40 %.

Die Erosionsmodellierung wurde schlag- bzw. feldblockbezogen vorgenommen. Über eine flächengewichtete Aggregation der Ergebnisse erfolgte die Ausgabe der Ergebnisdaten für jeden Landschaftsausschnitt bzw. jedes Modellgebiet. Berechnet wurden die langjährige **natürliche Erosionsgefährdung** auf Grundlage der Boden- und Klimateigenschaften und die **fruchtartenabhängige Erosionsgefährdung** unter Verwendung definierter Fruchtartenverteilungen in [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$] für die Referenzperiode 1971-2000 und die drei Szenarienzeiträume.

Abbildung VI: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Klimamessstationen und zugehörige CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)

Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Klimamessstationen und zugehörige CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)



Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD); Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

Prognose der natürlichen Erosionsgefährdung bis 2100

Auf Grundlage der Ergebnisse der Winderosionsmodellierung mit dem Modell RWEQ für die Klimaszenarienzeiträume zeigen sich für die Modellgebiete Tendenzen der zukünftigen Entwicklung der natürlichen Winderosionsgefährdung, die auf einem veränderten Verhalten der Starkwindentwicklung sowie der Oberbodenfeuchte (abgeleitet aus dem zeitlichen Verlauf von Niederschlag, Strahlung und Temperatur) beruhen.

Gegenüber der Referenzperiode kann für die Periode 2011 bis 2040 in allen Landschaftsräumen ein Anstieg der natürlichen Erosionsgefährdung prognostiziert werden. Überdurchschnittlich fallen dabei die Zunahmen in den küstennahen Gebieten mit einem Anstieg zwischen 20 und 40 % aus. Im Binnenland Brandenburgs und Sachsen-Anhalts beträgt der Anstieg durchgehend 10 bis 20 %. In der Folgeperiode 2041 bis 2070 zeigt sich ein abnehmender Trend der natürlichen Erosionsgefährdung gegenüber dem Zeitraum 2011 bis 2040. Dennoch können gegenüber dem Referenzzeitraum weiterhin um 10 bis 20 % erhöhte Werte festgestellt werden. Ein deutlicher Anstieg der natürlichen Erosionsgefährdung tritt in der in der letzten Betrachtungsperiode von 2071 bis 2100 ein. Hier ist eine größere Heterogenität der räumlichen Verteilung festzustellen. Sowohl in den küstennahen Gebieten als auch

im Binnenland zeigen Modellgebiete eine Zunahme der Gefährdung von über 20 %, teilweise von über 40 % auf.

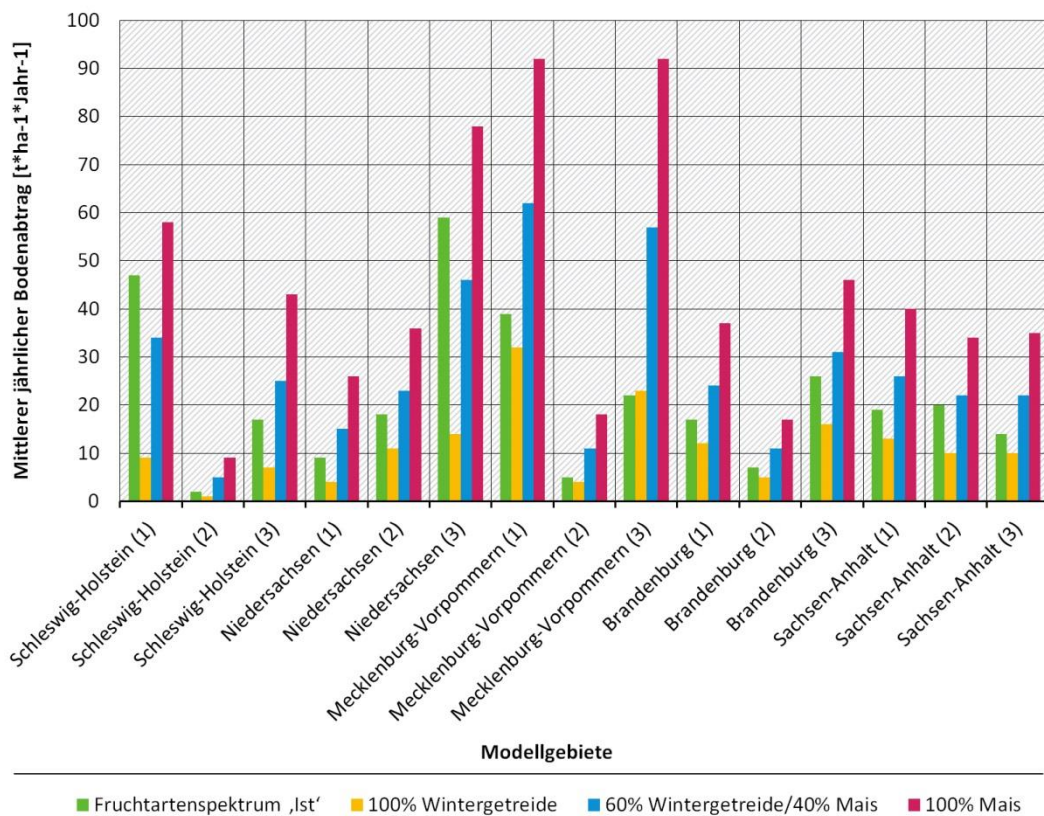
Zu berücksichtigen ist, dass mit zunehmender zeitlicher Entfernung der Szenarienzeiträume vom Referenzzeitraum die Unsicherheit der Aussagefähigkeit der Klimamodellergebnisse zunimmt. Die Auswertung der Entwicklung der natürlichen Erosionsgefährdung lässt zunächst nur eine Bewertung mittlerer jährlicher Veränderungen zu. Die Klimaentwicklung kann hingegen innerjährliche Differenzierungen aufweisen, einhergehend mit Monaten gleichbleibender oder abnehmender Erosionsgefährdung und Zeitabschnitten mit weit überdurchschnittlichem Anstieg der Winderosionsgefahr.

Szenarienanalysen zur Modellierung der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung

In Abhängigkeit von den gewählten Szenarien für die Fruchtartenzusammensetzungen wird die unterschiedliche Erosionsgefährdung in den Modellgebieten deutlich (Abb. VII). Bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000 würde ein (fiktiver) flächendeckender Maisanbau zu maximalen Abtragsraten in allen Gebieten führen. Dieser würde aufgrund der Schutzwirkung der Bodenbedeckung zwar deutlich unterhalb der Werte für den natürlichen Bodenabtrag liegen, aber dennoch ein Vielfaches der Abtragsraten des Szenariums einer möglichst ganzjährigen Bodenbedeckung mit 100 % Wintergetreide betragen. Die Differenz zwischen den Bodenabträgen des Szenariums „100 % Maisanbau“ und der gegenwärtigen Fruchtartenzusammensetzung ist in den Modellgebieten, die sich in Naturräumen mit einem heute hohen Maisanteil befinden, am geringsten.

Abbildung VII: Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000

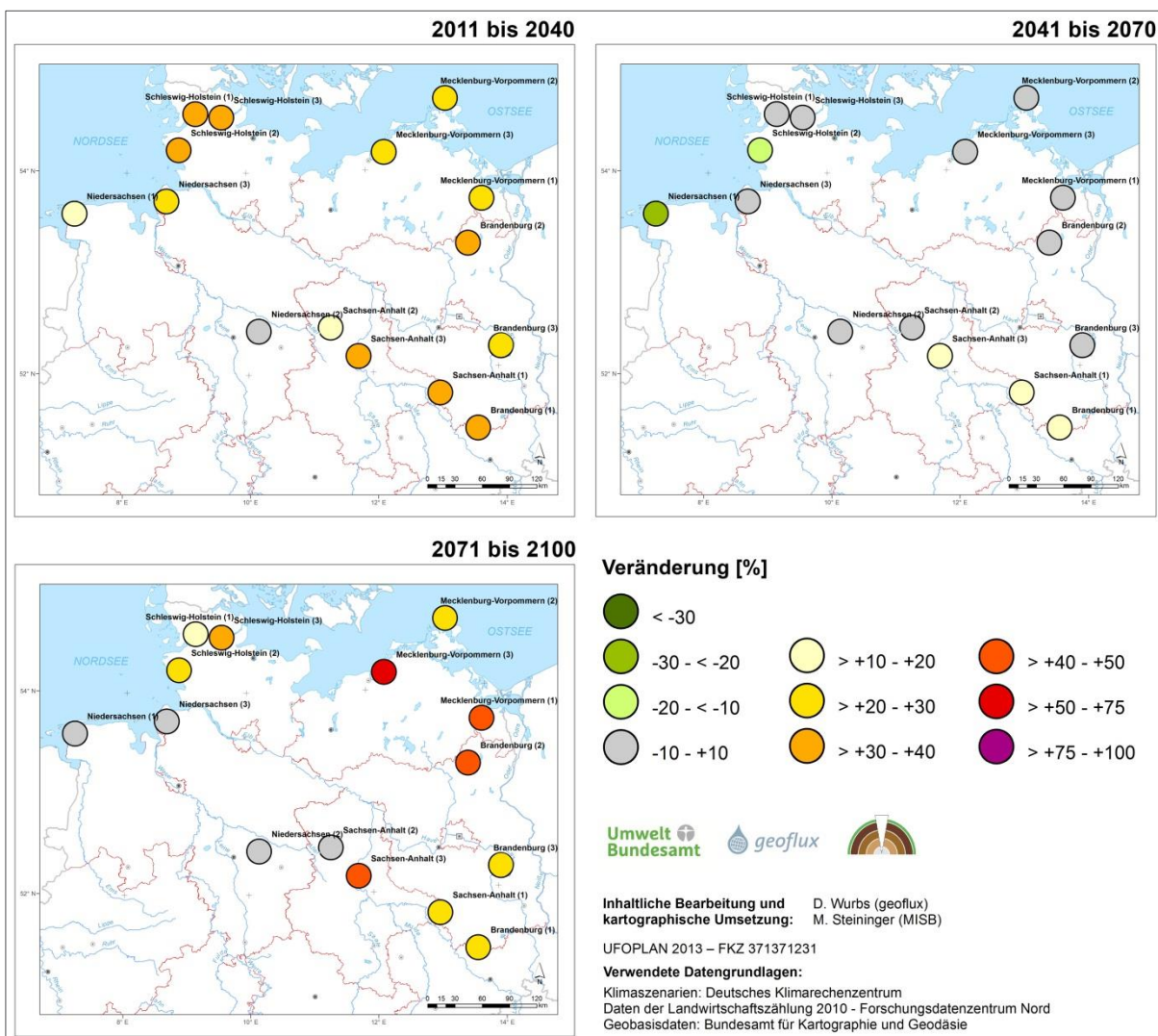
Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000



Datenquelle: Landwirtschaftszählung 2010 (FDZ Nord)

Abbildung VIII verdeutlicht, dass die Entwicklung der fruchtartenabhängigen Winderosionsgefährdung deutlich differenzierter zu bewerten ist als die der natürlichen. Im Zeitraum 2011 bis 2040 zeigen nahezu alle Modellgebiete, sowohl im Binnenland als auch in den küstennahen Regionen, einen Anstieg von 20 bis 40 %. Dagegen sind, im Gegensatz zur natürlichen Erosionsgefährdung bis 2070 gegenüber der heutigen Periode teils rückläufige Tendenzen erkennbar. Davon betroffen sind vor allem die durch hohen Maisanteil geprägten Regionen Norddeutschlands. Hier lässt sich interpretieren, dass die Zunahme der natürlichen Gefährdung vorwiegend in Monaten hoher Bedeckung erfolgt und somit kaum wirksam ist. Dagegen ist in Zeiträumen geringer Bodenbedeckung von einem leichten Rückgang der natürlichen Gefährdung auszugehen. Diese Tendenz kehrt sich in der Klimaperiode 2071-2100 weitestgehend wieder um. Abgesehen von Ausschnitten in Nordwestdeutschland nimmt in großen Teilen der betrachteten Bundesländer die Erosionsgefährdung erneut zu.

Abbildung VIII: Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Fruchtartenzusammensetzung - Ist“



In Bezug auf die landwirtschaftliche Nutzung sind die Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung nach § 17 des BBodSchG maßgeblich. Als Bewertungsgrundlagen zur Abschätzung der Erosionsgefährdung auf bundesdeutscher Ebene dienen u.a. der Entwurf zur Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetzes vom 21.07.2008 (AK EROSION 2008) und die DIN 19706:2013-02 (DIN 2013).

Regelungsdefizite und Handlungsbedarf bestehen hingegen in der Bereitstellung bundesweit einheitlicher Empfehlungen an die Vorsorge und Gefahrenabwehr und in der Erarbeitung von Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen, um langfristig die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Die Veröffentlichung „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) befasst sich länderübergreifend mit der Vorsorge gegen Bodenverdichtung und Bodenerosion sowie zur Erhaltung des Humusgehaltes und geht auf Vorsorgemaßnahmen und ihre Wirksamkeit ein. Dabei wurden die in den Arbeiten der Bundesländer dokumentierten Empfehlungen zu Schutzmaßnahmen gegenüber Winderosion teilweise übernommen. Hier sind insbesondere Arbeiten aus den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen zu nennen.

Aus den vorliegenden Sachstandsberichten wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt und die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beschrieben. In Anlehnung an die Broschüre „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) wurde die Kategorisierung nach den Maßnahmenkomplexen Pflanzenbau, Landeskultur und Agrarstruktur vorgenommen.

Um schädliche Bodenveränderungen zu vermindern und zukünftig zu vermeiden sind aus den Maßnahmenempfehlungen Handlungsempfehlungen abzuleiten, welche der Gefahrenabwehr aufgrund von Bodenerosion durch Wind dienen. Derartige Handlungsempfehlungen für die Praxis existieren bisher nicht. Als Grundlage hierfür könnte die in Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern praktizierte Vorgehensweise für die Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen dienen (MLU 2012). Darin ist festgelegt, dass bei Bestehen von Anhaltspunkten für schädliche Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser diese sowie weitere erforderliche Informationen im Rahmen einer orientierenden Untersuchung zu erfassen sind, um im weiteren Vorgehen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu ergreifen. Die Adaption dieser Vorgehensweise auf das Problemfeld „Bodenerosion durch Wind“ wäre eine wirksame Handlungsoption, Schutzmaßnahmen zur Gefahrenabwehr bei Winderosion auf landwirtschaftlichen Flächen auch planungsseitig zu begleiten.

Summary

Soil drifts caused by wind and water erosion have the greatest impact on soil yield functions as well as other soil functions, greater than damage caused by soil compaction and reduction of humus reserves in soil. Wind and water erosion are natural processes, influenced by anthropogenic use of arable land and necessary as a trigger for extreme weather compartments, such as heavy rain or strong winds. They are therefore doubly influenced by climate change: on one hand by changing soil systems and also directly by climate change. In addition to hazards and risks that are already visible, increasing potential hazards for agricultural soils are to be expected with the increase in strong winds in the course of climate change. Thus countermeasures should be taken early (UBA 2011).

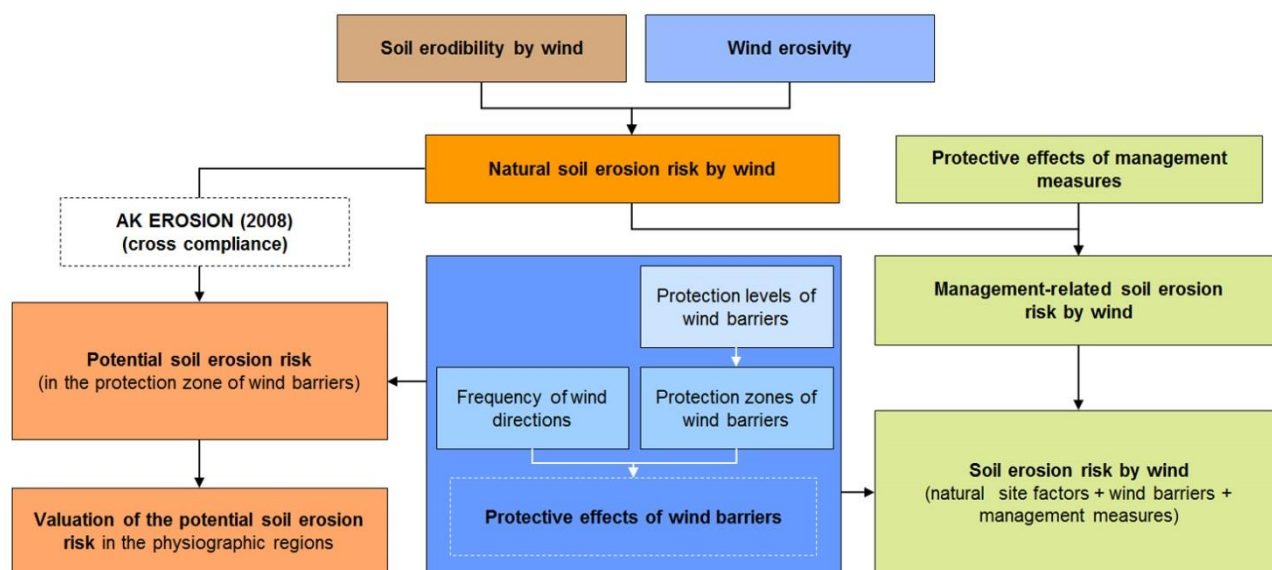
Since a nationwide inventory on extent and spatial distribution of erosion risk by wind has not yet been carried out, taking into account current soil management methods and crop type spectra, as well as changing climatic conditions, the German Federal Environmental Agency has entered the UFOPLAN 2013 under the promotion code (FKZ) 3713 71 231 Research projects on "Nationwide threat to soils caused by wind erosion as a result of climate change - modifying variables as for preventive measures and hazard avoidance in soil protection law". The aim was to forecast changed risk situations of soil erosion by wind until 2100, regarding changes in climatic conditions and climate change Cultivation spectra, taking changing soil properties, current landscape structures, crop type spectra and soil management methods in account. The main objectives of the project are summarized as follows.

- ▶ Estimation and presentation of the nationwide risk for soil erosion by wind depending on climate and soil characteristics as well as current landscape structures, crop type spectra and soil management methods by applying a erosion model
- ▶ Prediction of changed wind erosion risks until 2100, implementing altered climatic conditions and cultivation spectra by applying appropriate climate models and emission scenarios
- ▶ Description of wind erosion contribution to fine dust load in conurbations and sketching of existing research deficits or future research requirements
- ▶ Establishment of technical bases for further development of a legal and sub-legal framework regarding effective preventive measures in accordance with § 17 BBodSchG and the averting of danger according to § 4 and § 8 BBodSchG
- ▶ Conception, layout and printing of a brochure with the aim to provide criteria and recommendations according to BBodSchG and BBodSchV and to the present wind erosion mapping guide supporting a target group concerned with enforcement, advice and practice..

Wind erosion is a natural process of aeolian extraction and displacement of soil material and influenced by human activity. The cause of soil erosion by wind (deflation, in short wind erosion) are winds which, starting at a certain speed, produce turbulences on the soil surface and cause soil particles to move. Colliding with static soil particles on the ground, they can be smashed and / or thrown into the turbulent zone and thus continue this process by a chain reaction.

Currently exists only one model approach to estimate a nationwide risk of wind erosion according to DIN 19706. The flow scheme for the methodical procedure and the determined parameters is shown in Fig I.

Figure I: Flow chart for determining risk of erosion by wind according to DIN 19706 (DIN 2013) and cross-compliance guidelines (AK EROSION 2008)



Geo- and climatic data listed in Table I were provided by the Federal Environmental Agency, used as model base and subsequently processed. Geo data have been transformed into the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) using the "Universal Transversal Mercator (UTM)" mapping with a spatial resolution of 10 m.

Table I: Data bases and sources

Data	Data source
Soil Map of the Federal Republic of Germany 1:1.000.000 (BÜK 1000N)	Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR)
Soil Map of the Federal Republic of Germany 1:200.000 (BÜK 200) (various map sheets)	Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR)
Physiographic regions of Germany (year 2008)	Federal Agency for Nature Conservation (BfN)
Digital Landscape Model (ATKIS Basis-DLM)	Federal Government for Geo-Information and Geodesy (BKG)
Agricultural structure survey data on a municipality basis (year 2010)	Research data centers of the federal and state statistical offices, provided by the Research Data Center (FDZ) Nord
Grid of the mean wind speed 10m above ground in a 200m grid (DWD) for the climatic period 1981-2000	German Meteorological Service (DWD)
Climate data for wind speed, precipitation, temperature and sun duration on a daily value basis for 13 stations of the German Meteorological Service (DWD)	German Meteorological Service (DWD)
Strong winds (8 main wind directions) for 85 available stations of the German Meteorological Service (DWD)	German Meteorological Service (DWD)
Raster data set (1x1 km) of the average annual and	German Meteorological Service (DWD)

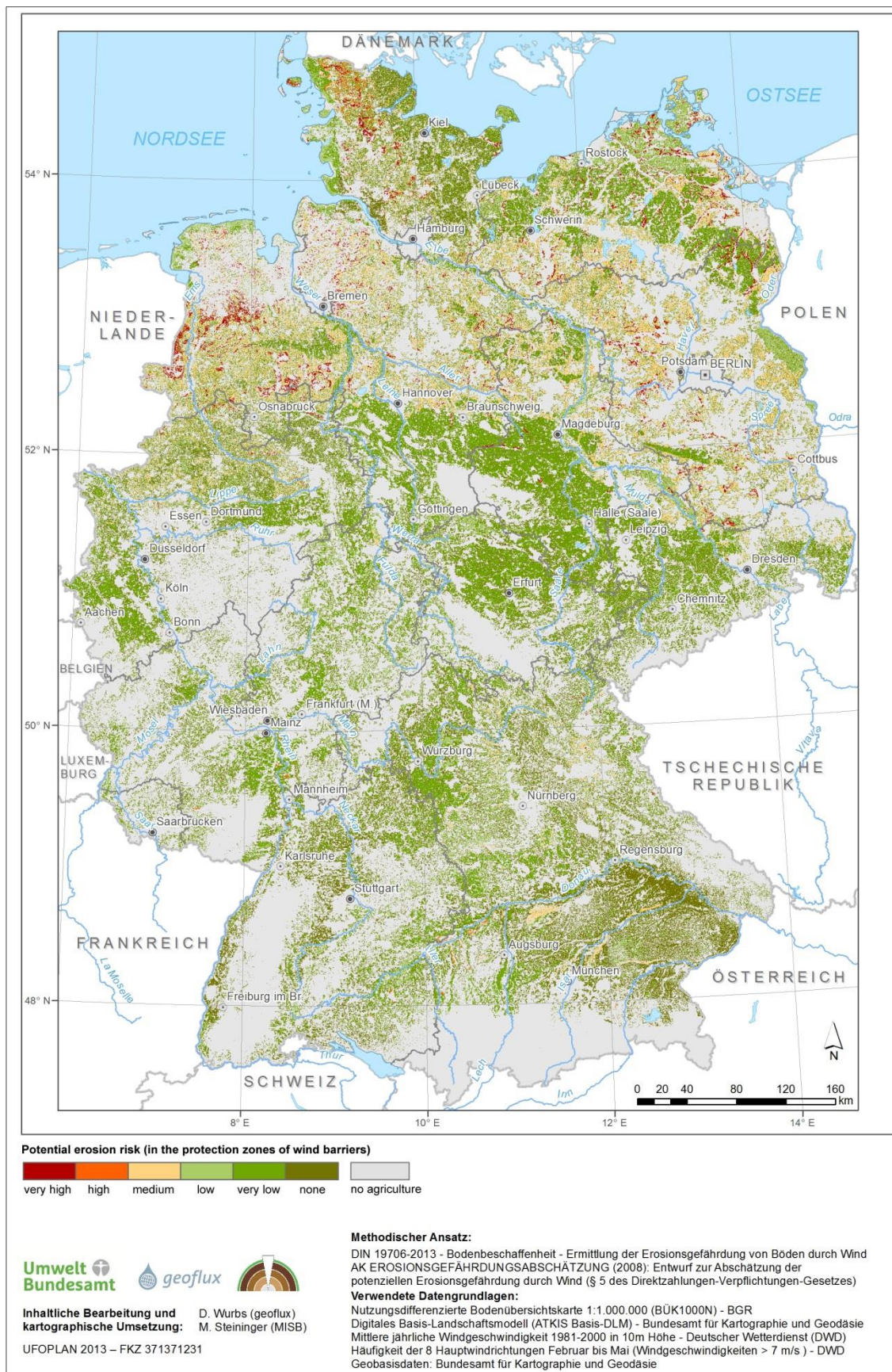
Data	Data source
monthly precipitation 1981-2000	
Administrative borders of Germany 1: 250.000 (1.12. 2014)	Federal Government for Geo-Information and Geodesy (BKG)
Climate scenario data of the regional model COSMO-CLM (emission scenario A1B) 1971-2100	German Climate Computing Center (DKRZ)

Erosion risk due to wind (current situation)

Determination of potential erosion risk, complementary to the DIN approach and according to specifications of AK EROSION (2008), include linkages of soil erodibility with wind erodibility as well as taking wind barriers in consideration based on frequencies of the eight main wind directions between February and May. In large parts of Germany the south-west wind direction has a share of more than 30% and is significant for position and direction of wind barriers. In western and south-western Germany, the share of south-west winds increases to more than 50%.

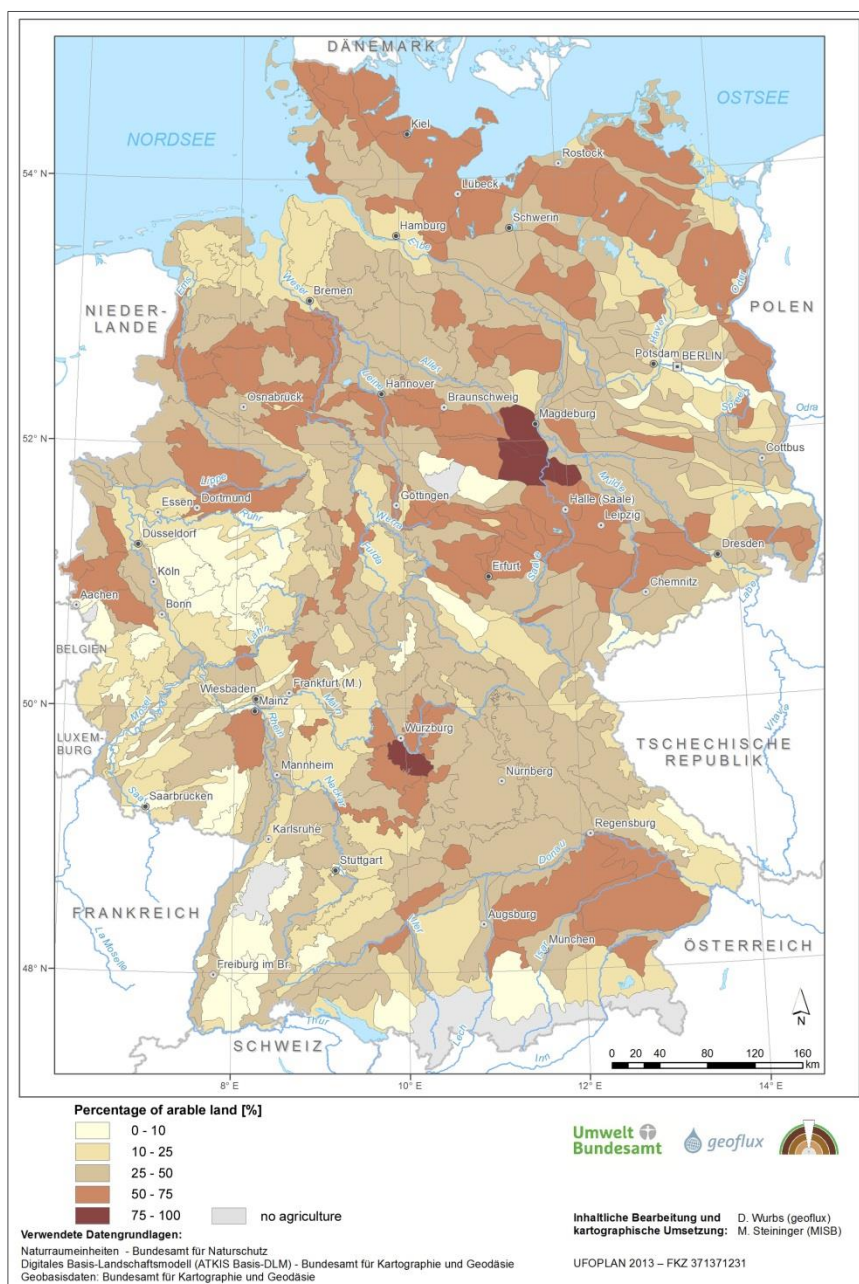
Due to the high wind speeds and the erodibility of mainly sandy soils, arable land in northern Germany, Brandenburg, Saxony-Anhalt and North Rhine-Westphalia is characterized by medium potential erosion hazards. Areas with a high to very high degree of danger are located in larger sections, especially in Schleswig-Holstein and in western Lower Saxony (Fig. II). This is due both to the prevailing soil substrates and the comparatively high average wind speeds.

Figure II: Potential erosion risk from wind on arable land



Vegetation coverage of soil, in particular the annual degree of soil coverage in relation to wind integrals, has a significant influence on potential hazards of the sites with regard to wind erosion. In the methodological approach according to DIN 19706 this influence is reflected by protection level regarding crop types and / or crop rotation. In combination with protective effects on naturally risky wind directions, management-related risk of erosion by wind should be implemented. Estimations of crops cultivated in physiographic regions of Germany used the data stock of the Research Data Center Nord in Kiel (FDZ) on the 2010 Agriculture Survey. These data represent the situation in 2010. An analysis of the data reveals proportions of arable land used in the physiographic regions of Germany. The highest shares are over 75% in the north-eastern Harz foothills. In addition, the loess regions in Saxony-Anhalt and Saxony as well as large areas in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Western Pomerania and Lower Saxony have a share of more than 50%.

Figure III: Percentage of agriculturally used areas in the physiographic regions



Regarding main crop type groups, cultivation areas listed in Table II can be summarized without taking account of barrier areas.

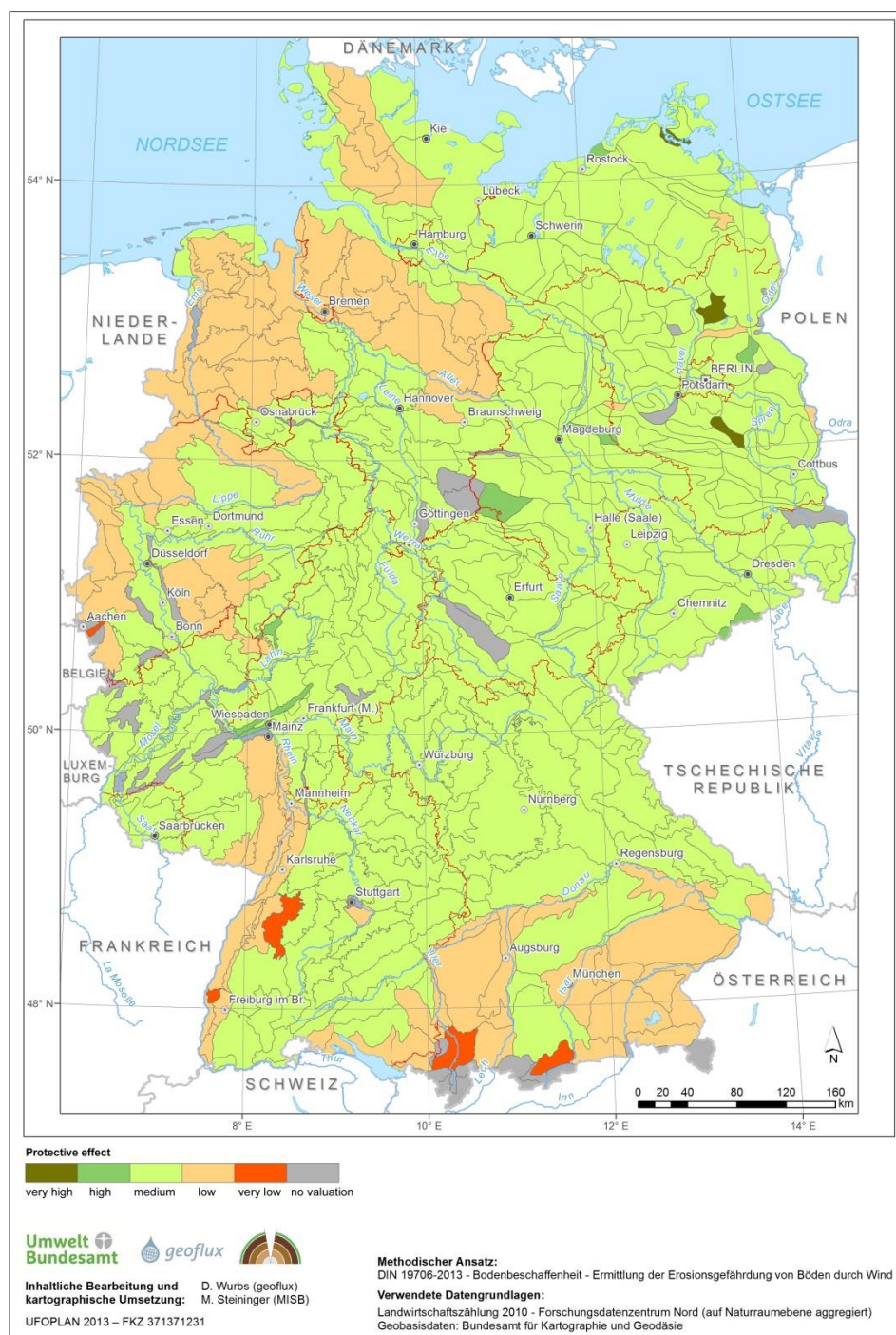
Table II: Nationwide crop areas of the main crop type groups (without consideration of restricted areas)

Crop type group	Crop area [ha]	Percentage [%]
Winter cereals	5.543.262	49,4
Corn	2.289.853	20,4
Winter rape	1.452.460	12,9
Forage crops	629.842	5,6
Summer cereals	561.031	5
Sugar beet	363.092	3,2
Potatoes	250.379	2,2
Legumes	94.754	0,8

Based on calculated areas of cultivated crop groups, an average to very good management-based protection effect is achieved on 67.9% of the crop area. However, only a small to very low protective effect is present on 31.6% of crop areas. It is critical, however, that these cultivation systems regularly concentrate on sites with high natural risks of wind erosion.

The relation between cultivation distributions to natural areas led to a strong, almost comprehensive leveling of protective effects in the middle stage. Since the used approach doesn't allow an accurate preview of erosion hazards, and deviations from a field-related evaluation, usually accompanied by a reduced risk of erosion, which would differ significantly from the CCWind - ratings of the states, no designation of management related and current erosion risk can be achieved.

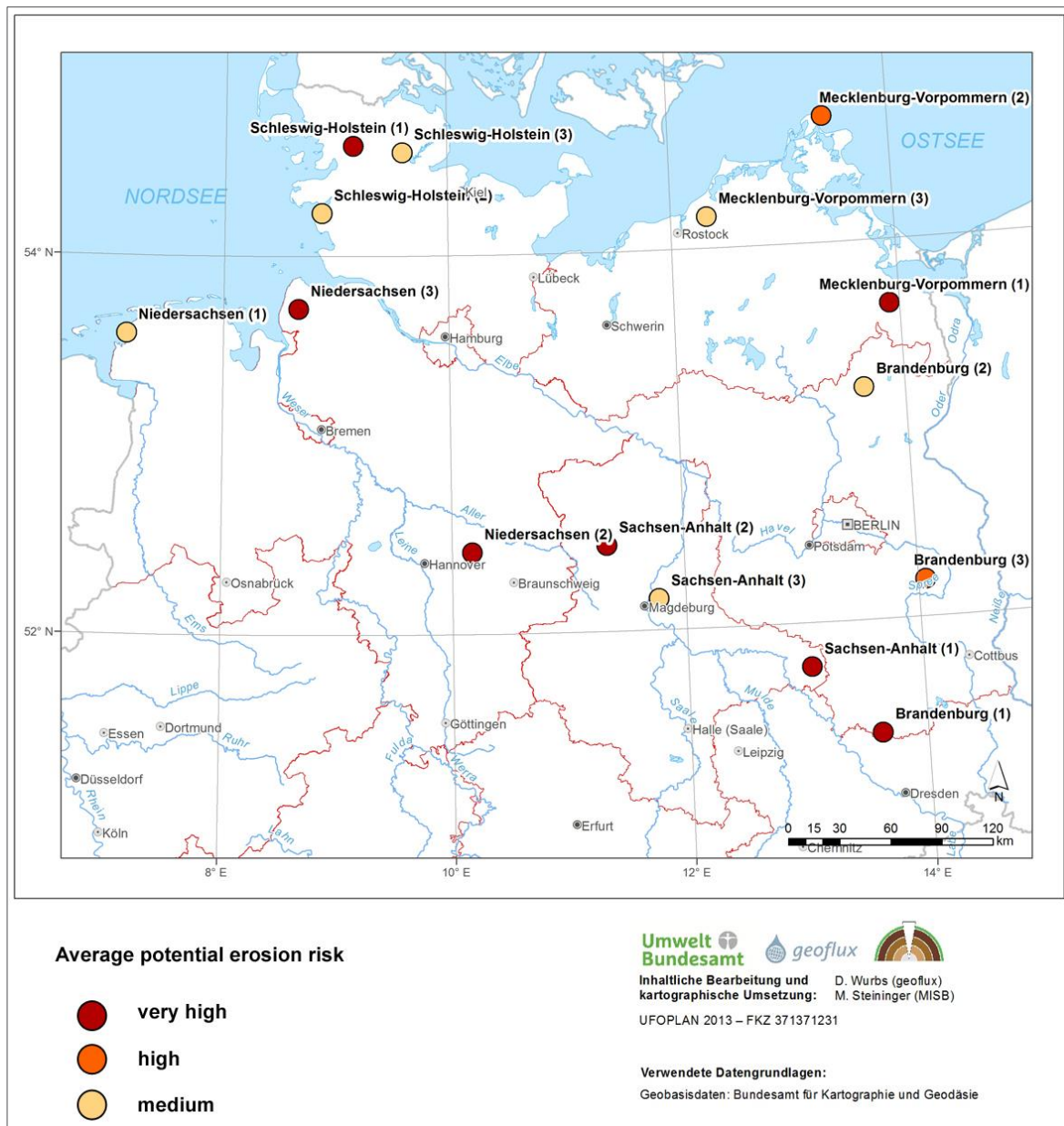
Figure IV: Management-related protection in the physiographic regions



Regarding future erosion risks by wind under consideration of regional climatic scenarios, the development in future strong wind frequency and surface moisture of soil have to be considered in addition to changes in mean wind speeds. Since the approach according to DIN 19706 (DIN 2013) exclusively shows wind speed as a climate signal, the DIN method can only be used in a quite restricted manner to make predictions of hazardous situations. However, in order to recognize large-scale tendencies that could lead to erosion risk, a nested model approach was chosen using the RWEQ model. For this purpose, 15 representative landscape sections were defined as modelling areas, based on the results of DIN modeling using small-scale state-specific data on erosion risk. Within this range, the assessment of natural and, depending on scenario assumptions, risks of crop-related erosion was carried out for medium to large areas. The selection of areas reflected the share of arable land within the landscape sec-

tion, the total area, the dominant and medium risk level according to DIN 19706 and the availability of climate data. Figure V gives an overview of the location and mean potential risk classification of the model areas.

Figure V: Location and risk classification of the model areas



Modeling was carried out using the semi quantitative model approach of RWEQ for the reference period 1971 to 2000 as well as for three scenarios up to 2100. For the wind erosion simulation up to 2100 results of the regional climatic model COSMO-CLM were used for the emission scenario SRES A1B (Hollweg et al. 2008). The model results are part of the Regional or the North German Climate Atlas (Meinke and Gerstner 2009, Norddeutsches Klimabüro 2009) and currently a valid decision base for action recommendations regarding adaptation and vulnerability. Data for the latest RCP emission scenarios (representative concentration pathways) were not yet complete during the project processing. However, current comparative calculations show a very good linkage between the climate models of RCP and SRES A1B emission scenarios with regard to trends for wind, temperature and precipitation

(see Jacob et al 2014). In this respect, comparable results for erosion-relevant questions can be expected using the A1B scenario data.

Preparing climatic scenario data as well as research and preparation of current climate data took place regarding representative stations in established model areas. A test run of the RWEQ model was carried out using current climatic data. In addition, station values were used for an initial evaluation of future erosion risk changes according to the approach of DIN 19706 (example wind speed see Fig. VI). A total of 13 stations for the 15 model areas were selected from the network of the German Meteorological Service (DWD) and the climatic parameters wind speed [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], air temperature [$^{\circ}\text{C}$], sunshine duration [h] and rainfall on a daily basis for the period 1971-2000 processed. Future threat situations were predicted comparing model results regarding climate scenarios for the period from 2011 to 2100 with results of the climatic control run.

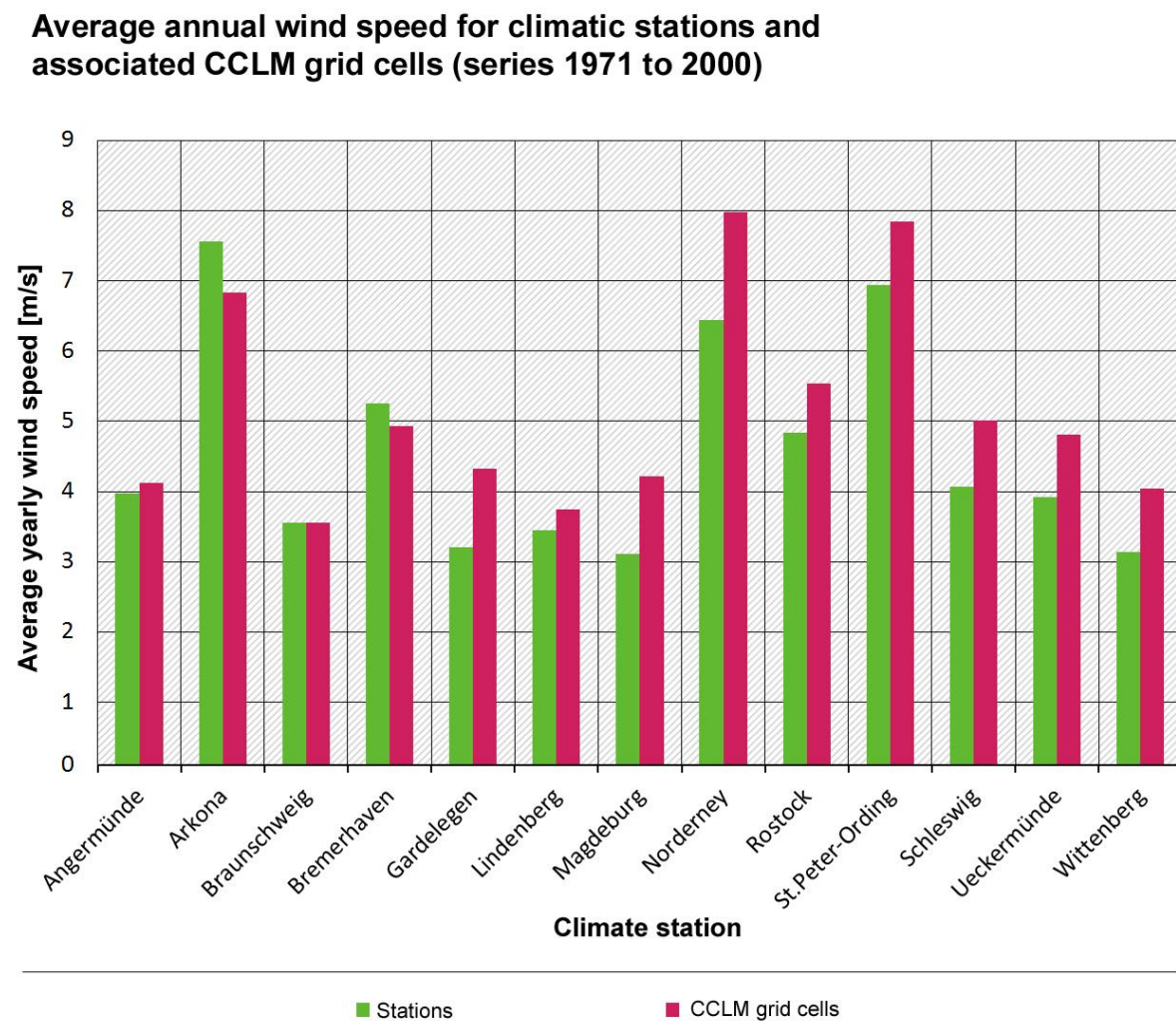
For each of the 15 model areas, a specific data preparation and model parameterization was carried out for the RWEQ model. Soil parameters (soil type, lime content, humus content) were derived from map sheets of the soil map 1: 200.000 (BÜK 200). Legend units were expert based described and corresponding parameters like share of erodible soil fractions, surface crust factor and roughness factor calculated. Previously described evaluations of climate scenario data were used for the weather factor.

The management or soil cover factor (COG factor) was derived from crop composition data determined by scenario analysis. To illustrate the effect of soil coverage on the current soil erosion in its extreme conditions and for medium conditions, three scenarios have been developed in addition to the "real fruit sequences" to illustrate possible cultivation trends:

- ▶ Covering the entire year (100% winter cereals): This assumption corresponds to a pure winter cereals sequence with soil cultivation, immediately before integration of catch crops and sub-seeds into the cultivation systems. This scenario represents the optimum.
- ▶ Maize cultivation (100%): The scenario is a fictitious, not applied approach that reflects the impact of a long-term phase without soil coverage. Under utilization conditions, this scenario represents the worst case scenario.
- ▶ **Medium cultivation conditions (60% winter cereals / 40% maize): This scenario is represented by a winter cereals share of 60% and a maize content of 40%.**

Erosion modeling was carried out by field level. Weighted aggregation of results lead to estimations for each landscape section or model area. The long-term natural erosion risk was calculated based on soil and climate characteristics and crop-dependent erosion risk using defined crop type distributions in [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$] for the reference period 1971-2000 and the three scenarios.

Figure VI: Average annual wind speed for climatic stations and associated CCLM grid cells (series 1971 to 2000)



Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD); Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

Prognosis of natural erosion risk until 2100

Based on results of the wind erosion model RWEQ for climate scenario periods, trends for future development of natural wind erosion risk due to changed strong wind development as well as changed soil surface (derived from temporal courses of precipitation, radiation and temperature) could be identified.

Compared to the reference period, an increase in natural erosion risk can be previewed for the period from 2011 to 2040 in all landscape areas with above average increases in coastal areas between 20 and 40% and the interior of Brandenburg and Saxony-Anhalt from 10 to 20%. The period 2041 to 2070 shows a decreasing trend of natural erosion risk compared to the period 2011 to 2040. Nevertheless, 10 to 20% increase can be observed through the reference period. A significant increase in natural erosion risk occurs in the last scenario period from 2071 to 2100 with a greater heterogeneity in spatial distribution. Both, in coastal regions and the interior, model areas show an increase over 20% and in some cases more than 40%.

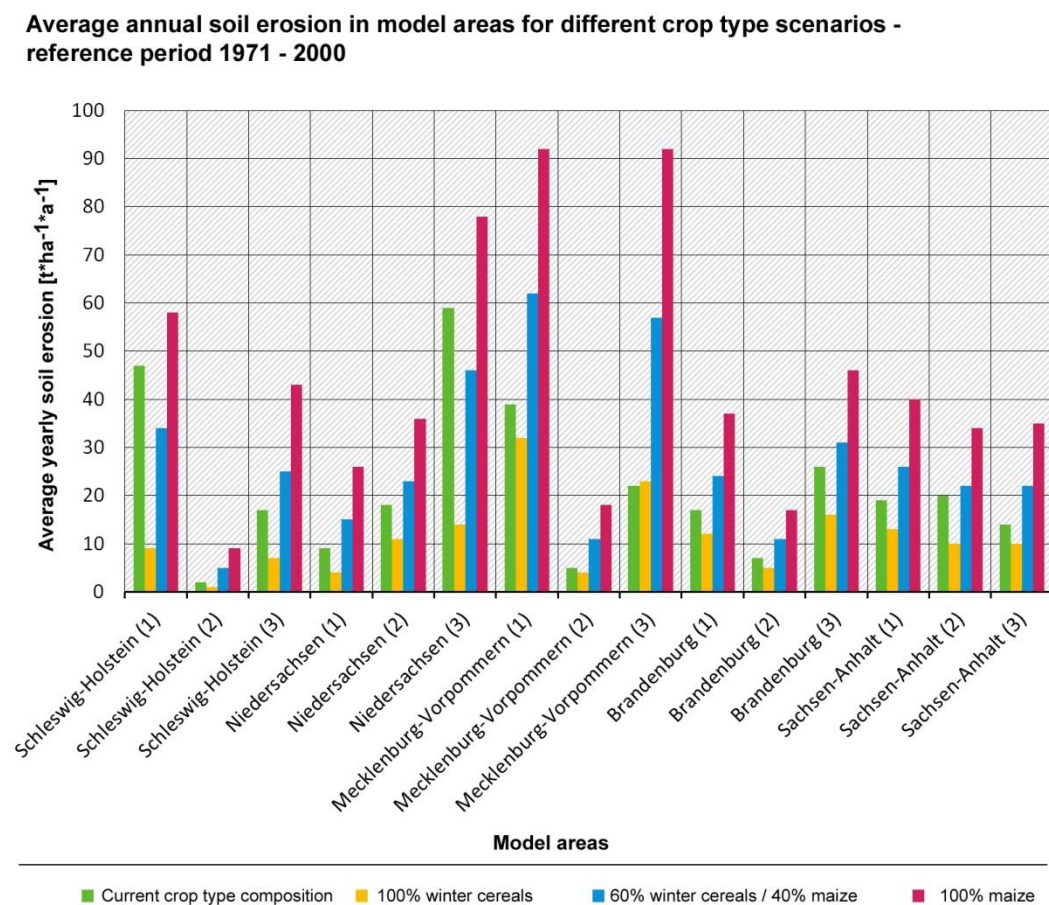
It should be borne in mind that with increasing temporal distance of scenarios from the reference period the uncertainty in climatic model results increases too. Evaluation of natural erosion risk devel-

opment initially allows only an assessment of medium-term changes. On the other hand, the development of climate can differ per annum, accompanied by months of constant or decreasing erosion and periods of time with a far above-average increase in risk of wind erosion.

Scenario analysis for crop type-dependent erosion risk

Depending on selected scenarios for crop type compositions, different erosion risks in model areas become visible (Fig. VII). In relation to the reference period 1971 to 2000, a (fictitious) maize cultivation would lead to maximum erosion rates in all areas. Due to the protective effect of soil coverage, this would be clearly below the values of natural soil erosion, but nevertheless a multiple of erosion rates scenario for an annual covering of as many years as possible with 100% winter grain. The difference between soils of the "100% maize cultivation" scenario and the current crop type composition is the lowest in model areas located in physiographic regions with a high corn content today.

Figure VII: Average annual soil erosion in model areas for different crop type scenarios - reference period 1971 - 2000

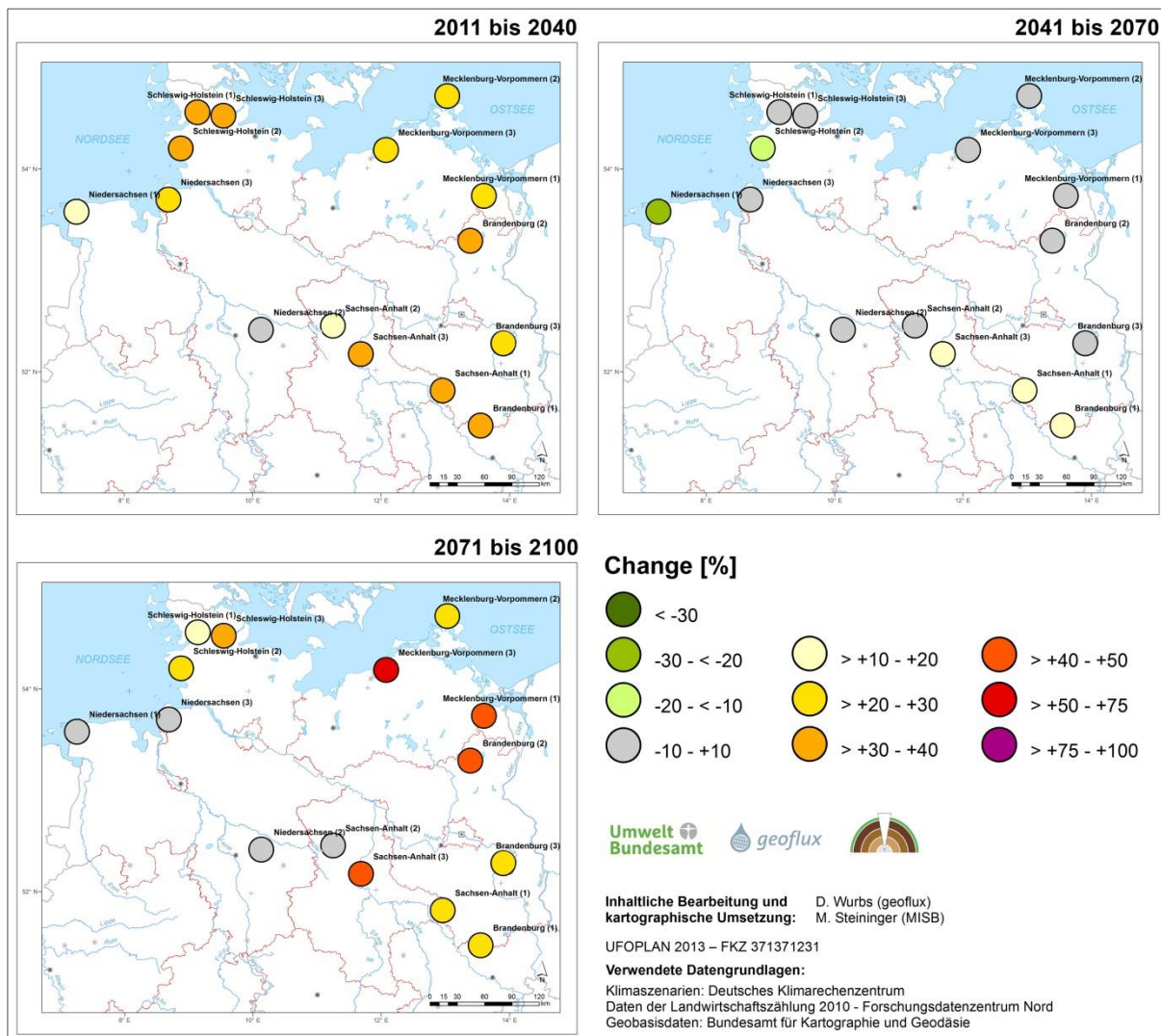


Datenquelle: Landwirtschaftszählung 2010 (FDZ Nord)

Figure VIII illustrates that the development of crop type-dependent risk of wind erosion is much more differentiated than that of natural ones. In the period 2011 to 2040 almost all model areas show an increase of 20 to 40%, both inland and in coastal regions. On the other hand, in contrast to the natural risk of erosion by 2070, the tendencies towards the present period are partly declining. This is mainly due to the high proportion of maize in northern Germany, suggesting that an increase in natural hazard is predominantly in months of high coverage and thus hardly effective. On the other hand, a slight reduction in natural hazard is assumed in periods of low soil coverage. This tendency is largely re-

versed in the climate period 2071 to 2100. Apart from sections in northwest Germany, the current erosion risk increases further in large parts of the states considered.

Figure VIII: Trends in crop type-dependent erosion risk in the model areas - "Current crop type composition"



With regard to agricultural use, the principles and recommendations for good agricultural practices are based on good professional practice on agricultural land use according to § 17 of the BBodSchG. Evaluation bases for estimations on erosion risk at federal level are supported e. g. by the draft for assessment of potential erosion risk by wind according to § 5 of the Direct Payments Obligation Act of 21 July 2008 (AK EROSION 2008) and DIN 19706:2013-02 (DIN 2013).

On the other hand, there are regulatory deficits and a need for action in provision of nationwide uniform recommendations for prevention, security and preparation of measures and execution suggestions in order to maintain soil fertility in a long term approach. The publication „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) deals with precautionary measures against soil compaction and soil erosion, as well as the preservation of humus content, and also with precautionary measures and their effectiveness. In doing so, recommendations on protective measures documented in the work of federal states have been adopted against partial dissemination of wind erosion. In particular, works from Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Saxony-Anhalt and Lower Saxony can be mentioned here.

A catalog of measures has been prepared from the present factual reports and described with regard to their effectiveness. The categorization was carried out regarding plant cultivation, rural management and agricultural structure in accordance with the brochure "Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz" (AID 2015).

1 Einführung und Zielsetzung

1.1 Veranlassung

Der Boden ist die Lebensgrundlage der Menschen für die Gegenwart und die Zukunft. Er ist der wertvollste Bodenschatz und eine wichtige, nicht vermehrbare Ressource, die weltweit, aber auch in Deutschland durch Übernutzung und Versiegelung qualitativ und quantitativ gefährdet ist.

Innerhalb des Natur- und Landschaftshaushaltes erfüllt der Boden vielfältige Funktionen. Atmosphäre, Pflanzen, Tiere, Grundwasser und Gestein treffen hier aufeinander und sind durch eine Vielzahl komplexer Wechselwirkungen und Austauschprozesse miteinander verbunden. Der Boden ist Wasserspeicher und Schadstofffilter. Er bietet Lebensraum für unzählige Bodenlebewesen, ist Kohlenstoffspeicher sowie globaler Klimafaktor. Als Pflanzenstandort ist der Boden Grundlage zur Erzeugung von Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen. Für die Landwirtschaft ist er das wichtigste Produktionsinstrument. Der Schutz des Bodens muss daher auch in Zukunft unter den sich ändernden Rahmenbedingungen, insbesondere dem Klimawandel, oberste Priorität haben.

Bei der Betrachtung der Auswirkungen der Klimaänderung auf den Boden und die damit in Verbindung stehenden Prozesse werden fast ausschließlich die Spannungsfelder Kohlenstoff, Bodenwasser, Bodenverdichtung und Wassererosion thematisiert. Zwischen Boden, den im Boden ablaufenden Prozessen und dem Klima bestehen komplexe Wechselbeziehungen mit teilweise sich verstärkenden Rückkopplungseffekten. Klimaänderungen beeinflussen den Boden, veränderte Bodenverhältnisse beeinflussen das Klima. Der Boden ist vom Klimawandel betroffen und Bodenschutz kann und muss auch Teil der Lösung des Klimaproblems sein. Jedoch ist die Rolle des Bodens im Kontext der Diskussion zum Klimawandel der breiten Öffentlichkeit und vielen Entscheidungsträgern nicht oder nicht hinreichend bewusst.

Bodenverlagerungen durch Wind- und Wassererosion haben neben Schäden durch Bodenverdichtung und der Verringerung der Humusvorräte im Boden die größten Auswirkungen auf die Ertragsfunktion der Böden, beeinflussen jedoch auch die übrigen Bodenfunktionen maßgeblich. Wind- und Wassererosion sind natürliche Prozesse, die durch die anthropogene Nutzung von Flächen beeinflusst werden und als auslösendes Moment extremer Witterungselemente, wie Starkregen oder Starkwinde, bedürfen. Sie sind demzufolge vom Klimawandel doppelt beeinflusst, einerseits durch die sich ändernde Bodensysteme und andererseits direkt durch die Klimaänderung. Neben den bereits aktuell erkennbaren Gefährdungen und Risiken ist mit der im Zuge der Klimaveränderung zu erwartenden Häufung der Starkwinde eine Zunahme des Gefährdungspotenzials für die landwirtschaftlich genutzten Böden zu erwarten und sind frühzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen (UBA 2011).

Während Wassererosion vornehmlich auf stark geneigten Standorten auftritt, ist die Winderosion auf mittleren und leichten Tieflandstandorten im Norden Deutschlands ein großes Gefährdungsrisiko für die Ertragsfunktion der Böden, aber auch direkt für die landwirtschaftlichen Kulturen infolge Ertragsausfälle durch Organbeschädigung, Windschliff oder komplette Abdeckung der Pflanzen. Darüber hinaus wächst das gesellschaftliche Schadensausmaß aufgrund von winderosionsbedingten Off-site-Schäden. Messungen des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg (ZALF) zeigen, dass auf unbedeckten Ackerflächen flächig bis zu $45 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ fruchtbarer Oberboden jährlich durch Winderosion abgetragen werden können (Funk 2015), was ähnlichen Größenordnungen wie beim wassererosionsbedingten Bodenabtrag entspricht. Somit besteht sowohl im Hinblick auf den Vorsorgegrundsatz nach § 7 BBodSchG als auch hinsichtlich der Regelungsdefizite des untergesetzlichen Regelwerkes zur Gefahrenabwehr Handlungsbedarf. Insbesondere aus Sicht der langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Gefahrenabwehr für die Allgemeinheit sind zukünftig geeignete Gegenmaßnahmen im gesamtgesellschaftlichen Rahmen zu ergreifen. Das Gefährdungspotenzial durch Winderosion wurde erkannt, in die Regelungen zum Cross Compliance aufgenommen (BMELV 2009) und in den auf Ebene der Bundesländer die gegenwärtige Winderosionsgefährdung ausgewiesen.

Da eine bundesweite Bestandsaufnahme zum Ausmaß und zur räumlichen Verteilung der Erosionsgefährdung durch Wind unter Berücksichtigung derzeitiger Bodenbewirtschaftungsverfahren und Fruchtartenspektren sowie der sich verändernden klimatischen Rahmenbedingungen bis dato noch nicht vorlag, hat das Umweltbundesamt unter dem Förderkennzeichen (FKZ) 3713 71 231 im Rahmen des UFOPLAN 2013 ein Forschungsvorhaben zum Thema „Bundesweite Gefährdung der Böden durch Winderosion und Bewertung der Veränderung infolge des Wandels klimatischer Steuergrößen als Grundlage zur Weiterentwicklung der Vorsorge und Gefahrenabwehr im Bodenschutzrecht“ initiiert.

Ziel des Vorhabens war neben der Ermittlung und Darstellung der bundesweiten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften sowie derzeitigen Landschaftsstrukturen, Fruchtartenspektren und Bodenbewirtschaftungsverfahren die Prognose der veränderten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und Anbauspektren. Im Ergebnis der Untersuchungen steht die Schaffung der fachlichen Grundlagen zur Weiterentwicklung des gesetzlichen und untergesetzlichen Handlungsrahmens im Umgang mit Gefahren für eine wirksame Vorsorge nach § 17 BBodSchG und für die Gefahrenabwehr nach § 4 und § 8 BBodSchG.

Das erarbeitete Merkblatt stellt die wesentlichen Untersuchungsergebnisse des Forschungsvorhabens, insbesondere die Auswirkung des Klimawandels auf das Gefährdungspotenzial des Bodenabtrages durch Wind dar. Darüber hinaus beinhaltet das Merkblatt Maßnahmen zur Vorsorge und Vermeidung von schadhaften Bodenveränderungen durch Winderosion. Diese wurden auf Grundlage vorliegender Regeln, wissenschaftlicher Erkenntnisse und Vorschlägen der Bundesländer erarbeitet.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung des Projektes orientiert sich an den vorhandenen Fachgrundlagen zum Thema Bodenerosion durch Wind unter derzeitigen und zukünftigen Klima- und Nutzungsbedingungen. Ein Hauptziel besteht demnach in der bundesweiten Ermittlung und Bewertung der Gefährdungssituation sowie die deren prognostische Abschätzung vor dem Hintergrund des Klimawandels bis zum Jahr 2100. In diesem Zusammenhang ist der Beitrag der Winderosion zur Feinstaubbelastung zu beschreiben und zukünftiger Forschungsbedarf zu skizzieren. Da die Winderosion bislang nicht Bestandteil der Gefahrenabwehr nach BBodSchV ist, sind aus den Untersuchungsergebnissen Grundlagen herauszuarbeiten, um Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Gefahren zu schaffen. Ziel ist abschließend, Kriterien und Empfehlungen in einem Merkblatt für Beratung und Praxis zusammenzufassen und zu veröffentlichen. Die Hauptziele des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- ▶ Ermittlung und Darstellung der bundesweiten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften sowie Landschaftsstrukturen, Fruchtartenspektren und Bodenbewirtschaftungsverfahren durch Anwendung eines bundesweit einsetzbaren Modellverfahrens
- ▶ Prognose der veränderten Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 - unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und Anbauspektren - durch Anwendung geeigneter Klimamodelle und Emissionsszenarien
- ▶ Beschreibung des Beitrages der Winderosion zur Feinstaubbelastung in Ballungsräumen und Skizzierung von bestehenden Forschungsdefiziten bzw. zukünftigem Forschungsbedarf
- ▶ Schaffung der fachlichen Grundlagen zur Weiterentwicklung des gesetzlichen und untergesetzlichen Handlungsrahmens im Umgang mit Gefahren für eine wirksame Vorsorge nach § 17 BBodSchG und für die Gefahrenabwehr nach § 4 und § 8 BBodSchG
- ▶ Konzeption, Layout und Druck einer Broschüre, mit dem Ziel, Kriterien und Empfehlungen nach BBodSchG und BBodSchV sowie die gegenwärtig erarbeitete Kartieranleitung Winderosion, einer Zielgruppe aus Vollzug, Beratung und Praxis öffentlich verfügbar zu machen.

2 Sachstand zur Bodenerosion durch Wind

2.1 Physikalische Grundlagen und Folgen der Winderosion

Bei der Winderosion handelt es sich um einen natürlichen Prozess des äolischen Abtrages und der Verlagerung von Bodenmaterial, der durch die menschliche Tätigkeit beeinflusst wird.

Auslöser der Bodenerosion durch Wind (Deflation; kurz Winderosion) sind Winde, die ab einer bestimmten Geschwindigkeit Turbulenzen an der Bodenoberfläche erzeugen und Bodenteilchen zur Bewegung bringen. Kollidieren diese wiederum mit ruhenden Bodenteilchen am Boden, können diese zerschlagen und/oder in die turbulente Zone geschleudert werden und so durch eine Kettenreaktion diesen Prozess fortsetzen. Je nach Windgeschwindigkeit und Größe der Bodenteilchen sind drei Bewegungsformen zu beobachten:

Schweben (Suspension)

Kleine Bodenteilchen mit einem Durchmesser $< 0,1$ mm können, nachdem sie durch Turbulenzen oder Kollisionen in Bewegung versetzt wurden, in große Höhen aufgewirbelt und im Luftstrom über teils große Entfernungen transportiert werden. Beispiele hierfür sind Staubstürme oder Staubtransporte aus der Sahara bis nach Mitteleuropa. Im Durchschnitt gelangt fünf bis fünfzehn Mal innerhalb eines Jahres Saharastaub bis nach Mitteleuropa.

Diese Form der Winderosion ist besonders gefährlich. Mit der Staubwolke werden die fruchtbarsten Bestandteile des Bodens, wie Schluff- und Tonminerale, Humus und Pflanzennährstoffe über große Entfernungen, meist weit über den Ackerschlag hinaus, transportiert und können am Ablagerungsort wiederum große Schäden in Form von Pflanzenüberdeckung aber auch Blattschliff erzeugen. Am Ausblasungsort bleiben nur die groben, humusarmen Bodenteilchen zurück, was zu einer deutlichen Verringerung der Bodenfruchtbarkeit führt. Für den Menschen gefährlich können große, dichte Staubwolken werden, die zu Sichtbehinderungen oder anderen Schäden führen können.

Abbildung 1: Sand-/Staubsturm auf der A14 bei Welbsleben am 08.04.2011



Infolge eines Sandsturmes kommt es am 08. April 2011 zu einer gefährlichen Verringerung der Sichtweiten für Autofahrer auf der Autobahn A14 bei Welbsleben. © Foto: Helbig 2011

Springen (Saltation)

Bodenteilchen mit einem Durchmesser von 0,1 bis 0,5 mm Durchmesser bewegen sich vorwiegend springend in Sprunghöhen zwischen 0,1 und 1 m über den Boden. Beim Herabfallen kollidieren diese mit an der Oberfläche ruhenden Teilchen, können diese zerschlagen bzw. in Abhängigkeit von deren Größe wiederum in Bewegung versetzen.

Rollen/Kriechen

Größere Bodenteilchen ($> 0,5$ mm) bewegen sich durch den Winddruck oder werden durch Kollision in Bewegung gesetzt bzw. gehalten. Sie bewegen sich kriechend oder rollend an der Bodenoberfläche.

Im Gegensatz zum Schweben bewegen sich Bodenteilchen durch Springen und Rollen in der Regel nur im Bereich des Ackerschlages und lagern sich im Bereich von Windhindernissen (Ackerrandstreifen, Windschutzstreifen) ab.

Abbildung 2: Am Ackerrand akkumulierter Lössboden



Infolge eines Winderosionsereignisses akkumuliert Lössmaterial an der Luv-Seite eines Windschutzstreifens.

© Foto: Helbig 2011

Wirkfaktoren

Analog der Wassererosion wird das Ausmaß der Winderosion von den Wirkfaktoren Klima/Hydrologie, Erodierbarkeit des Bodens, Landschafts- und Agrarstruktur, Landbewirtschaftung und Schutzmaßnahmen bestimmt. Die einzelnen Wirkfaktoren sind zum Teil Summenparameter aus verschiedenen Einflussgrößen.

Klima/Hydrologie

Von den Klimaelementen ist die Windgeschwindigkeit der auslösende Faktor für die Winderosion. In Abhängigkeit von der Bodenteilchengröße steigt das Erosionsrisiko ab Windgeschwindigkeiten an der Bodenoberfläche von $> 4,5$ m/s (entspricht 7 m/s in 10 m Höhe) stark an.

Die Windrichtung ist für die Schutzwirkung von Hindernissen von Bedeutung, da in deren Lee-Bereichen der Bodenabtrag bis in eine Entfernung vom 25-fachen der Höhe der Windhindernisse vermindert ist.

Weiterhin bedeutend ist infolge der hohen Kohäsionskräfte des Wassers die Feuchte an der Bodenoberfläche. Die Abtragsgefährdung steigt mit zunehmender Trockenheit.

Erodierbarkeit des Bodens

In Abhängigkeit von der Größe der Bodenteilchen an der Bodenoberfläche, die sich im Wesentlichen aus der Bodenart, dem Humusgehalt sowie dem Bodengefüge ergibt, unterliegen Böden einer unterschiedlichen Empfindlichkeit gegenüber der Winderosion. Generell gilt, je größer das Bodenteilchen umso größer ist die notwendige Windgeschwindigkeit, um das Teilchen in Bewegung zu versetzen. Sandböden mit ihrem Einzelkorngefüge und geringem Gehalt an organischer Substanz sind deshalb gefährdeter als Tonböden, die zwar von der Korngröße her kleiner sind, jedoch in der Regel sehr große verkittete Aggregate/Bodenteilchen aufweisen.

Landschafts- und Agrarstruktur

Ein wichtiges Kriterium für die Winderosionsgefährdung ist die Windoffenheit. Im Lee- und Luv-Bereich von Windschutzelementen kommt es zum Absinken der Windgeschwindigkeit und somit zur Abnahme des Abtragsrisikos.

Landbewirtschaftung

Bodenbedeckung und Nutzungswechsel sind entscheidende Elemente, die die Winderosionsgefährdung beeinflussen. Geschlossene Bodenbedeckungen verhindern die Angriffsmöglichkeiten des Windes auf die Bodenteilchen und vermindern so das Abtragsrisiko. Kleinräumige Nutzungswechsel verringern die Turbulenzen in Bodennähe.

Landbewirtschaftung

Als Schutzmaßnahmen zur Minderung des Schadensrisikos durch Winderosion sind in erster Linie die Erhöhung der Bodenbedeckung sowie die Verringerung der Windoffenheit in der Agrarlandschaft zu nennen. Eine wirksame Maßnahme hierzu sind netzartig angelegte Windschutzpflanzungen. Neben den klassischen Windschutzpflanzungen kommen vermehrt auch Agro-Forstsysteme zum Einsatz.

Abbildung 3: Ausblasung im Kuppenbereich eines Löss-Standortes (Aufhellung)



Durch langjährige Auswehung von Feinbodenmaterial kommt es im Kuppenbereich eines Lössstandortes zum Abtrag des Ap-/Ah-Horizontes bis in den Bereich des C-Horizontes. © Foto: Helbig 2011

Bei den Folgen der Winderosion ist in onsite- und offsite-Schäden zu unterscheiden. Während onsite-Schäden ausschließlich das System Boden (Abb. 3) betreffen sowie Abrasionseffekte an Pflanzen hervorgerufen, sind vielfältige offsite-Schäden, zum Teil auch mit einem direkten Gefährdungspotenzial für die Menschen, zu beobachten. Ein Überblick der wesentlichen on- und offsite-Schäden ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: On- und offsite Effekte der Winderosion

Effekt	Schädigung
Onsite-Effekte	System Boden ▶ Auswehung von Feinboden ▶ Anreicherung größerer Korngrößen im Auswehungsbereich ▶ Auswehung organischer Substanz ▶ Abnahme der Wasserkapazität des Oberbodens ▶ Schädigung der Bodenstruktur ▶ Förderung der Oberbodenversauerung Schäden durch Abrasion ▶ Windschliff an Pflanzen ▶ Infektion von Nutzpflanzen durch Einwehung von an Bodenpartikeln anhaftenden Krankheitserregern ▶ Förderung der Staubfreisetzung
Offsite-Effekte	Kurzfristige Wirkungen ▶ Deposition von Feinboden ▶ Einträge von Sedimenten, Nähr- und Schadstoffen in sensible Ökosysteme ▶ Abnahme der Sichtweite, Gefährdung des Verkehrs ▶ Sedimenteintrag in Gebäude, technische Anlagen und Infrastruktur

Effekt	Schädigung
	Langfristige Wirkungen • Aufnahme der mit dem Wind transportierten Partikel, insbesondere Feinstaub durch Mensch und Tier • Atemwegserkrankungen • Anreicherung von nicht oder schwer abbaubaren Stoffen • Gewässereutrophierung • Eutrophierung nährstoffarmer Ökosysteme
Onsite- und Offsite-Effekte	• Akkumulation von Bodenmaterial geringer Qualität • Substratablagerung an und in Feldgrenzen und Windhindernissen • Überdeckung von Pflanzen mit Bodenmaterial • Verlust von Saatgut und Jungpflanzen

Quelle: Duttman u.a. (2011) - verändert

Bodenerosion stellt eine schädliche Bodenveränderung dar, wenn erhebliche Bodenabträge und -ablagerungen durch Wind auftreten (vgl. § 3 BBodSchV). Zentrale Grundlage für den Schutz des Bodens ist das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG). Maßgebend für die landwirtschaftliche Nutzung sind die Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung nach § 17 des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Sie enthalten konkretisierte Grundsätze und Handlungsempfehlungen zu § 17 BBodSchG. Diese Maßnahmen sind zum Schutz vor Bodenabträgen mittlerer Jährlichkeiten ausgerichtet.

Darüber hinaus greifen die Cross-Compliance-Vorgaben zur Erosionsminderung, die im Ersten Gesetz zur Änderung des Direktzahlungen-Verpflichtungengesetzes (DirektZahlVerpflG) vom 04. November 2008 sowie der 2. Verordnung zur Änderung der Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung (DirektZahlVerpflV) vom 07. November 2008 verankert wurden. Demnach müssen seit dem 1. Juli 2010 Pflanzenbaumaßnahmen auf den Erosionsgefährdungsgrad der Böden ausgerichtet sein. Hierzu mussten die Länder bis zum 30. Juni 2010 Informationen über Erosionsgefährdungsklassen zur Verfügung stellen.

Die Ausweisung der Gefährdungsklassen bezüglich Winderosion erfolgte bundeslandbezogen nach dem Ansatz gemäß DIN 19706 (vgl. Kap. 3.2) auf Feldblockebene. Im Falle der Eingruppierung des Feldblockes in die Gefährdungsstufe Enat5 liegt eine sehr hohe Winderosionsgefährdung vor und es sind folgende Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung der Winderosion zu ergreifen: Bei Aussaat vor dem 1. März ist der Pflugeinsatz erlaubt, Pflügen ab dem 1. März ist nur bei einer unmittelbar folgenden Aussaat, außer bei Reihenkulturen zulässig. Dies gilt nicht, falls vor dem 1. Dezember quer zur Hauptwindrichtung Grünstreifen im Abstand von höchstens 100 Metern zueinander und in einer Breite von jeweils mindestens 2,5 Metern eingesät werden sowie im Falle des Anbaus von Kartoffeln, soweit die Kartoffeldämme quer zur Hauptwindrichtung angelegt werden.

2.2 Verfahren und Modelle zur Abschätzung der Winderosionsgefährdung

Im Gegensatz zur Wassererosion, für die mit der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) für Deutschland eine bewertungspraxistaugliche und (wenn auch nur empirische) validierte Gleichung zur Berechnung des Bodenabtrags vorliegt (Schwertmann u. a. 1990), wird die Winderosionsgefährdung in Deutschland gegenwärtig über das matrixbasierte Expertensystem nach **DIN 19706:2013-02** (DIN 2013) eingestuft, welches nur Gefährdungsstufen jedoch keine Abtragsmengen ausweist. Die DIN 19706 verknüpft die Einflussgrößen „Bodenerodierbarkeit“, „Erosivität des Windes“, „Schutzwirkung von Windhindernissen“ und „Schutzwirkungsstufen von Bewirtschaftungsmaßnahmen“. Obwohl der Parametrisierungs- und Berechnungsaufwand auf Bundes- oder Länderebene, vor allem bei Einbin-

derung der Windhindernisse, sehr aufwendig ist, bietet das DIN-Verfahren die Möglichkeit, auf digital verfügbare Datengrundlagen zurückzugreifen. Im Ergebnis lässt sich ein qualitativer Horizontalvergleich der Erosionsgefährdung zwischen Raumeinheiten und Standorten vornehmen. Eine stoffliche und somit quantitative Bilanzierung ist hingegen nicht möglich. Aktuell wird das DIN-Verfahren für die Berechnung der Winderosionsgefährdung nach Cross-Compliance angewendet (Schäfer u.a. 2010; AK EROSION 2008) und ist somit in der Bundesrepublik Deutschland flächendeckend auf Länderebene im Einsatz. Schmidt (2014) erweiterte den DIN-Ansatz für die Modellregion Westsachsen unter Hinzunahme multidirektionaler Einflussparameter, wie Boden-, Klima-, Landschafts- und Feldblockdaten und konzipierte ein Screening-Modell, basierend auf Fuzzy-Logik. Hierbei fanden bereits Ansätze zur Betrachtung der klimabedingten Veränderung der Erosionsgefährdung Berücksichtigung.

Für die Bewertung der klimaabhängigen Entwicklung der Winderosionsgefährdung kann der DIN-Ansatz nur bedingt herangezogen werden, da er ausschließlich die Windgeschwindigkeit als Klimasignal ausweist. Zur Abschätzung der zukünftigen Erosionsgefährdung vor dem Hintergrund des Klimawandels sind hingegen weitere Parameter, wie die Veränderung der Starkwindhäufigkeit und der Oberbodenfeuchte sowie die Szenarieneignung eines Verfahrens bzw. Modells von Relevanz.

Im Rahmen einer Sachstandsdarstellung wurden verschiedene (semi-)dynamische Winderosionsmodelle und Bewertungsverfahren recherchiert und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeit im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung unter Berücksichtigung veränderter Klimaparameter bewertet. Ziel war es, einen Verfahrensansatz auszuwählen, der auf Basis der Ergebnisse einer bundesweiten Bewertung der Bodenerosion durch Wind mittels DIN 19706, geeignet ist, für repräsentative Landschaftseinheiten (Modellregionen) Aussagen für die zukünftige Erosionsgefährdung ableiten zu können.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick der erfassten Modellanwendungen:

Tabelle 2: Vorauswahl empirischer und (semi-)dynamischer Winderosionsmodelle und -verfahren

Modell	Typ	Quelle	Modellergebnis
EfpA	empirisch	Capelle & Lüders (1985)	Erosionsgefährdungsstufen ordinal
VERMOST	empirisch	Thiere u.a. (1991)	Erosionsgefährdungsstufen
RWEQ	semidynamisch	Fryrear et al. (2000)	mittlerer jährlicher Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]
WEQ	semidynamisch	Woodruff and Siddoway (1965)	mittlerer jährlicher Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]
IWEMS	dynamisch	Shao (2008)	Staubquellstärke, dimensionslos
TEAM	dynamisch	Gregory et al. (2008)	ereignisbezogener Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$] und langjähriger mittlerer Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]
WEAM	dynamisch	Lu & Shao (2000)	Staubquellstärke – dimensionslos
WEELS	dynamisch	Böhner et al. (2003)	Nettotransportbilanz [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$]
WEPS	dynamisch	Hagen (2004)	ereignisbezogener Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$] und langjähriger mittlerer Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]

Die größte Einschränkung in Hinblick auf großräumige Anwendungen besteht bei den meisten Modellen im erheblichen Daten- und Parametrisierungsbedarf. Hierfür sind zumeist Feldmessungen erforderlich, die eine Übertragbarkeit von der lokalen auf die mittel- und kleinmaßstäbige Ebene mangels fehlender Validierungsmöglichkeiten oftmals nicht zulassen. Außerdem wurden viele Modelle unter nordamerikanischen Boden- und Klimabedingungen entwickelt. Hierzu zählt vor allem die "Wind Erosion Equation" (**WEQ**), die die Grundlage für mehrere Modellweiterentwicklungen, wie RWEQ, WEPS

oder WEAM bildete. WEQ ist ein semidynamisches Modell, welches auf gemessenen jährlichen Bodenabträgen für ein Feld in Garden City/Kansas basiert. Es war das erste Modell zur quantitativen Abschätzung des Bodenverlustes durch Wind und ist das gegenwärtig weltweit am häufigsten genutzte Winderosionsmodell. Es verfolgt einen ähnlichen Ansatz wie die USLE bzw. ABAG zur Bewertung der Wassererosion. Wie bei allen Modellansätzen muss die Anwendung des Modells außerhalb der Randbedingungen, für welche es entwickelt wurde, validiert und getestet werden. Diese Anwendung wurde vorwiegend in den USA vorgenommen (Fryrear u.a. 2001). In Deutschland sowie im mitteleuropäischen Raum fand es bislang nur im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen Verbreitung und hier vorwiegend im groß- bis mittelmaßstäbigen Bereich. Die WEQ liefert – im Gegensatz zur DIN 19706 – einen mengenmäßigen Abtragswert je Flächeneinheit (NAM 2002), der nach Woodruff and Siddoway (1965) als Erosionsrate in $t \cdot ha^{-1} \cdot Jahr^{-1}$ angegeben wird. Eingangsparameter sind der Bodenerodierbarkeitsindex, der Rauigkeitsfaktor, ein Klimafaktor, die ungeschützte Feldlänge in Richtung des vorherrschenden Windes sowie ein Vegetationsdeckenfaktor. Die einzelnen Faktoren sind zum Teil Summenparameter für verschiedene Einflussgrößen der Winderosion. Da das WEQ-Modell Abtragsmengen ausweist, ist es für Zwecke der Maßnahmenplanung und Abschätzung von deren Auswirkung sehr gut geeignet. Darüber hinaus ist es möglich, den Modellansatz in eine GIS-gestützte Modellierung die Geländemorphologie einzubinden und somit die teilflächenspezifische Aussagekraft zu verbessern. Diese Anwendungen zielen allerdings auf die schlag- bzw. betriebsbezogene Maßstabsebene. Auf dieser ist es möglich, die sehr aufwendige Datenbereitstellung, vor allem für die Parameter Rauigkeit und Bodenbedeckung (u. a. Ernterückstände), zu realisieren. Für landes- oder bundesweite Anwendungen sind diese Vorarbeiten gegenwärtig nicht umsetzbar. Da eine Übertragung der für die USA vorliegenden Parameterkataloge auf deutsche Verhältnisse sowie ein großflächiger Test bis dato nicht erfolgt sind, kann, im Gegensatz zur ABAG, auch nicht auf standardisierte Werte zurückgegriffen werden.

Weitere Modellansätze, die für mitteleuropäische Verhältnisse entwickelt oder an diese angepasst wurden und somit als potenziell in Deutschland anwendbare Methoden infrage kommen, sind die **VERMOST-Methode** (Thiere u.a. 1991) sowie die Modelle **WEELS** (Böhner 2003) und **RWEQ** (Fryrear et al. 2000).

Die **VERMOST-Methode** (VERgleichsMethOdeSTandort - Thiere u.a. 1991) wurde zur Umsetzung der Ergebnisse der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) erarbeitet, die flächendeckend allerdings nur für das Gebiet der neuen Bundesländer vorliegt. Bei diesem Verfahren lassen sich auf der Grundlage definierter Kombinationen verschiedener Boden- und Standortmerkmale von bestimmten Flächenarealen (Kartierungseinheiten, Schläge, Teilschläge sowie weitere Areale, wie Betriebe, Gemeinden, Kreise usw.) eine Reihe von Beurteilungsparametern, so auch die Winderosionsgefährdung, ermitteln. Aktuell wird nach dieser Methode nur noch in den Ländern Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern sowie für Einzelaspekte in Sachsen-Anhalt gearbeitet. Hinsichtlich der Bewertung der potenziellen Erodierbarkeit der Böden durch Wind liegen Ergebnisse vor, die – bezogen auf den ostdeutschen Raum – als plausibel bewertet werden können (Thiere u.a. 1991, Deumlich u.a. 2002). Eine quantitative Abschätzung von Abtragsmengen wird nicht vorgenommen. Ebenso wird die Erosionsgefährdung unter Einbindung von Windhindernissen nicht betrachtet. Ein entscheidendes Defizit in Hinblick auf eine bundesweite Anwendung ist die Übertragung der Methode auf die aktuelle bodenkundliche Nomenklatur (KA5 der Ad-hoc-AG Boden 2005) und die flächendeckend vorliegenden bodenkundlichen Informationswerke (BÜK 200, BÜK 1000), welche die Nutzung der VERMOST-Methode im Rahmen dieses Vorhabens einschränkt.

Für die europäische und deutsche Anwendbarkeit eines prozessorientierten Modells entwickelten BÖHNER et al. (2003) das Modell **WEELS** (Wind Erosion on European Light Soils), das als hierarchisches Modell mit Einzelmodulen konzipiert wurde, um die Winderosion auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen zu modellieren. Das Modell simuliert rasterbasiert Abtrags- und Ablagerungsbilanzen in $t \cdot ha^{-1}$. Die Erprobung und Modellvalidierung erfolgte zuletzt anhand von langjährigen Felddaten, die in Barnham (Großbritannien) und Grönheim (Niedersachsen) erfasst wurden. Das Mo-

dell. Das Modell erfordert die umfangreiche Erfassung zahlreicher Eingangsdaten, insbesondere zur Landnutzung und Bodenschätzung.

Das Modell **RWEQ** basiert auf dem Modell WEQ sowie auf den durch Feld- und Laborstudien erhobenen Eingangsfaktoren von Woodruff and Siddoway (1965). RWEQ wurde durch (Fryrear et al. 2000) weiterentwickelt und kombiniert empirische und prozessbasierte (dynamische) Modellansätze. Die Modellerprobung erfolgte in den USA (Fryrear et al. 1999). Im Gegensatz zu anderen Winderosionsmodellen ist der Gleichungsansatz der RWEQ vergleichsweise einfach und erfordert eine begrenzte Anzahl an Eingangsdaten, was die Anwendbarkeit des Modells in der mittelmaßstäbigen Ebene ermöglicht (Youssef et al. 2012). RWEQ liefert Abtrags- und Transportwerte für einen Bereich bis 2 m Höhe in einem ausgewählten Zeitabschnitt. Dabei wird für ein definiertes Feld die erodierte Bodenmenge (SL) ermittelt, die bis zum Erreichen der Transportkapazität des Windes abgetragen wird. Entsprechend (Fryrear et al. 2000) schätzt RWEQ den Massentransport auf einer spezifischen, in Windrichtung liegenden Distanz nach folgenden Gleichungen ab:

$$Q_x = Q_{max} \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^2} \right] \quad (\text{Gl. 1})$$

Q_x ... Massentransport [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]; Q_{max} ... Max. Transportkapazität [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]; x ... Transportdistanz [m];
 s ... kritische Feldlänge ab der 63% der maximalen Transportkapazität erreicht werden) [m]

$$Q_{max} = 109,8 * (WF * EF * SCF * K' * COG) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$s = 150,71 * (WF * EF * SCF * K' * COG)^{-0,3711} \quad (\text{Gl. 3})$$

WF ... Wetterfaktor; EF ... Anteil erodierbarer Bodenfraktionen; SCF ... Oberbodenkrustenfaktor;
 K' ... Rauigkeitsfaktor; COG ... Managementfaktor

Der Wetterfaktor integriert Angaben zur Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe sowie zur Schwellenwindgeschwindigkeit [m/s]. Darüber hinaus werden mittlere Monatswerte der vorherrschenden Windrichtung, der Minimum- und Maximumtemperatur, der Globalstrahlung und des Niederschlages benötigt. Der durchschnittliche Bodenabtrag SL an einem bestimmten Punkt (s) innerhalb eines Feldes wird ausgedrückt mit:

$$SL = \frac{2x}{s^2} Q_{max} * e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^2} \quad (\text{Gl. 4})$$

SL ... Bodenabtrag [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]; s ... spezifischer Punkt innerhalb eines Feldes [m]

Der ursprüngliche Modellansatz nach Fryrear et al. (2000) bezieht sich auf den Bodenabtrag innerhalb eines Feldes, für das Größe, Gestalt, Vegetationsbedeckung sowie Boden- und Klimaeigenschaften vorwiegend aus Messdaten gewonnen werden. Die Praktikabilität des RWEQ-Modells mit einem vergleichsweise einfachen semidynamischen Modellansatz und einer begrenzten Datenerfordernis nutzen Funk und Voelker (1998) und Borelli et al. (2016), das Modell großräumig anzuwenden. Funk und Voelker (1998) setzten die RWEQ zur Bestimmung und Klassifizierung potenzieller Bodenabtragsmengen durch Winderosion in Mecklenburg-Vorpommern ein. Dabei wurde nur der Wetter- und Bodenfaktor betrachtet und der Bodenabtrag monatsweise berechnet und jährlich aggregiert. Die Ergebnisse zeigten eine plausible Ausweisung potenziell gefährdeter Landschaften. Borelli et al. (2016) ermittelten rasterbasiert den potenziellen Bodenabtrag ohne Berücksichtigung der Bodenbedeckung für 28 Staaten in Europa. Die auf Tageswertbasis ermittelten Bodenabträge wurden für die Periode 2001 bis 2010 aggregiert.

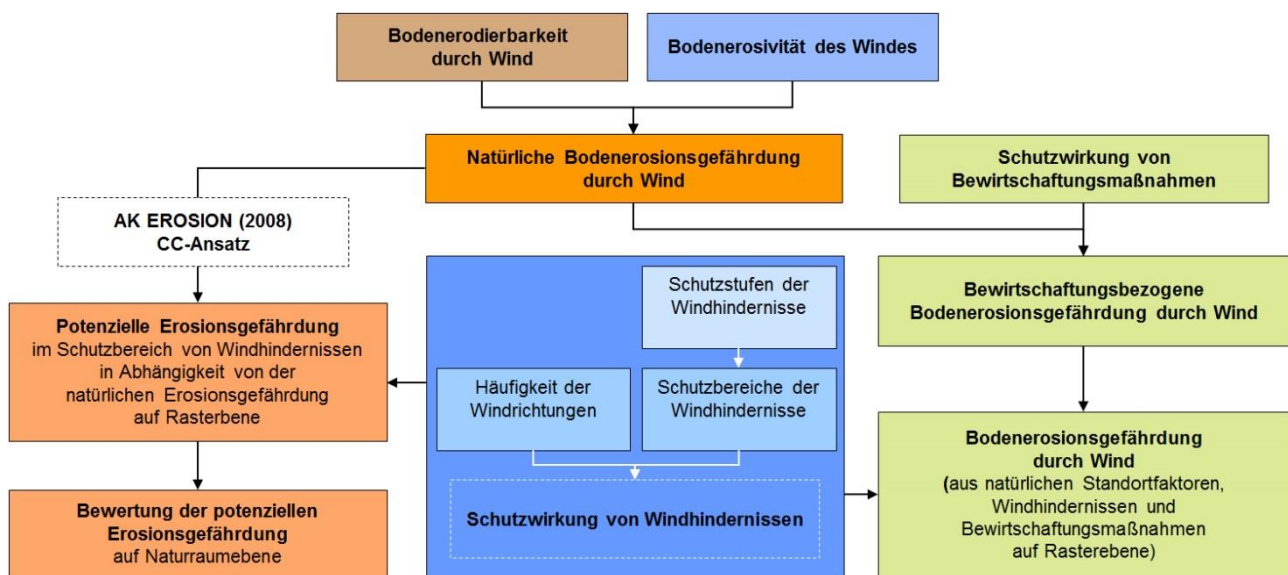
Beide Arbeiten zeigten, dass mit dem RWEQ-Modell ein effizientes Winderosionsmodell verfügbar ist, um sowohl potenzielle als auch bedeckungsabhängige Winderosionsgefährdungen großräumig quantifizieren und Risikogebiete ausweisen zu können. **Aufgrund der praktizierten Anwendung im mitteleuropäischen und norddeutschen Raum wurde weiterführend das RWEQ-Modell gewählt, um neben der Anwendung des DIN-Ansatzes Aussagen für die zukünftige Erosionsgefährdung ableiten zu können.**

3 Ermittlung der Gefährdungssituation für den Ist-Zeitraum

3.1 Modellansatz und Datengrundlagen

Als Modellansatz, mit dem die Winderosionsgefährdung deutschlandweit ermittelt werden kann, existiert gegenwärtig nur das Verfahren nach DIN 19706 (vgl. Kap. 2.2). Für die Berechnung der Winderosionsgefährdung nach Cross-Compliance kommt es unter Verwendung länderspezifischer Eingangsdaten auf Bundeslandebene zum Einsatz. Wesentliche Einschränkung ist der fehlende quantitative Ansatz. Jedoch kann die Gefährdung von Raumeinheiten relational erfolgen und eine Schwellenwertbetrachtung nach Vorgaben der CC-Ansätze durchgeführt werden. Hierin besteht gegenüber anderen Verfahren ein deutlicher Vorteil. Da das DIN-Verfahren in den Bundesländern bereits zur Anwendung gekommen ist, ist die Vergleichbarkeit mit den Bewertungsergebnissen der Länder grundsätzlich gegeben. Hinsichtlich der Terminologie ist anzumerken, dass der Parameter „Bodenerosionsgefährdung durch Wind“ natürliche Standortfaktoren, Windhindernisse und die Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen verknüpft. Der Begriff „Aktuelle Erosionsgefährdung durch Wind“ (vgl. Müller 2004) wird nachfolgend nicht genutzt. Variiert wurde der DIN-Ansatz zur Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung unter Einbeziehung der natürlichen Erosionsgefährdung und der Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen. Hierzu wurde auf die methodischen Vorgaben des Entwurfes des Arbeitskreises Erosionsgefährdungsabschätzung zur Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetzes (AK EROSION 2008) zurückgegriffen. Das Fließschema zur methodischen Vorgehensweise und den ermittelten Parametern zeigt Abb. 4.

Abbildung 4: Fließschema zur Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind nach DIN 19706 (DIN 2013) und Cross-Compliance-Vorgaben (AK EROSION 2008)



Für große Betrachtungsräume sind effiziente Modellansätze erforderlich, die neben einer automatisierten Berechnung von Windhindernisdistanzen auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vorherrschender Hauptwindrichtungen berücksichtigen. Neben GIS-Algorithmen wurde für die Berechnung der Schutzwirkung von Windhindernissen das Tool AeroFlux (Wagner et al. 2011) eingesetzt, welches die Rasterdaten der Hauptwindrichtungen dynamisch mit dem im Datensatz der Windhindernishöhen verknüpft. Das Modul berücksichtigt, dass bei hintereinanderliegenden Hindernissen der längere Schutzbereich höherer Windhindernisse verwendet wird.

Für die Schaffung der Modellgrundlagen wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Geo- und Klimadaten durch das Umweltbundesamt bereitgestellt und anschließend aufbereitet. Sämtliche Datengrundlagen

wurden in das *Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89)* mit der *"Universalen Transversalen Mercator (UTM)"-Abbildung* transformiert. Um eine einheitliche Datenbasis zu erhalten und die Schutzwirkung der Windhindernisse in einer geeigneten räumlichen Auflösung darstellen zu können, wurden sämtliche Datensätze in einen Rasterdatensatz mit einer Zellgröße von 10*10 m umgewandelt.

Tabelle 3: Datengrundlagen und -quellen

Datengrundlage	Datenquelle
Nutzungsabhängige Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1000N) mit Geometrien und Sachdaten	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) mit Geometrien und Sachdaten (verschiedene Blätter)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Naturräumliche Gliederung Deutschlands (Stand 2008)	Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Digitales Basis-Landschaftsmodell (ATKIS Basis-DLM)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
Daten der Agrarstrukturerhebung auf Gemeindebasis (Stand 2010)	Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder, bereitgestellt durch das Forschungsdatenzentrum (FDZ) Nord
Rasterkarte der mittleren Windgeschwindigkeit 10m über Grund im 200m-Raster (DWD) für die Klimaperiode 1981-2000	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Klimadaten für Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer auf Tageswertbasis für 13 Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Stärkewindrosen (8 Hauptwindrichtungen) für 85 verfügbare Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Rasterdatensatz (1x1 km) der mittleren Jahres- und Monatsniederschlagssummen 1981-2000	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Verwaltungsgrenzen von Deutschland 1:250.000 (Stand 1.12.2014)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Klimaszenariendaten des Regionalmodells COSMO-CLM (Emissionsszenarium A1B) 1971-2100	Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

3.2 Methodische Vorgehensweise

Neben der Ermittlung der Faktoren „Bodenerodierbarkeit“, „Erosivität des Windes“, „Schutzwirkung von Windhindernissen“ und „Schutzwirkungsstufen von Bewirtschaftungsmaßnahmen“ beinhaltet die Methodik auch eine **Evaluierung der Datengrundlagen für die bundesweite Ausweisung von Windhindernissen**, einen **Szenarienvergleich unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bodeneingangsdaten** sowie die **Ermittlung der derzeitigen Fruchtartenverteilung**. Die detaillierte Vorgehensweise wird in nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Die Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung unter Einbeziehung von Windhindernissen (Kap. 3.2.2) sowie die Betrachtung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung (Kap. 3.2.3) geht über die bisher vorliegenden Arbeiten auf bundesweiter Ebene hinaus. So berücksichtigt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in ihrer im Jahr 2014 veröffentlichten Karte der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind ausschließlich die Erodierbarkeit des Bodens und die Erosivität des Windes (BGR 2014).

3.2.1 Modellierung der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind

Erodierbarkeit des Bodens

Erodierbarkeit des Oberbodens wird nach DIN 19706 (DIN 2013) aus der Bodenart des Oberbodens und der Humusgehaltsstufe nach KA5 (Ad-Hoc-AG Boden 2005) abgeleitet. Grundlage bildete die nutzungsabhängige Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1000N). Durch die Verschneidung der BÜK1000N mit den im Basis-DLM ausgewiesenen landwirtschaftlichen Flächen konnten die Legendeneinheiten der BÜK1000N nutzungsdifferenziert den Bodenartengruppen und Gehaltsstufen organischer Substanz gemäß DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 1) zugeordnet werden. Nach Nutzungen getrennt betrachtet wurden die Moorböden (H-Böden), denen die Gehaltsklasse „h7“ zugeordnet wurde. Moorböden unter nicht ackerbaulich genutzten Flächen gelten als nicht erosionsgefährdet. Ihnen wurde die Gefährdungsstufe „0“ zugewiesen. Bei ackerbaulicher Nutzung sind Moorböden aufgrund ihres hohen Anteils organischer Substanz bei gleichzeitiger Entwässerung hingegen stark erosionsgefährdet (Stufe „5“). Aus der Verknüpfung der Oberbodenarten mit den (nutzungsabhängigen) Stufen der organischen Substanz wurden die Klassen der Bodenerodierbarkeit nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 3) abgeleitet und den Bodeneinheiten zugewiesen.

Für das Jahr 2017 ist die deutschlandweite Verfügbarkeit der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) einschließlich der Sachdaten vorgesehen. Aufgrund des gegenwärtig vorliegenden Datenbestandes (Kartensätze mit Legendeneinheiten jedoch ohne vollständige Flächendatenbank) ist die Ableitung der Bodenerodierbarkeit mittels BÜK200 derzeit nur manuell unter Auswertung der Bodengesellschaften aus der Legende möglich. Hierzu wurden unter Nutzung der KA5 die Flächenanteile der vorkommenden Bodenformen und die entsprechenden dominierenden Bodenartengruppen bestimmt. Aus diesen wurden die mittleren Stufen der Bodenerodierbarkeit für die jeweilige Legendeneinheit abgeleitet. Anhand von zwei ausgewählten Kartenblättern der BÜK 200 (Blatt 3934 Magdeburg, Blatt 4742 Riesa) wurde ein modellhafter Vergleich der Bewertung der Bodenerodierbarkeit, abgeleitet aus BÜK200 und BÜK1000N vorgenommen.

Bodenerosivität des Windes

Für die Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten lag die Rasterkarte der mittleren Windgeschwindigkeiten ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) im 200*200 m-Raster des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vor. Die Daten repräsentieren den Zeitraum 1981 bis 2000. Zur Einstufung nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 3) wurden die Raster der Windgeschwindigkeiten reklassifiziert. Im Anschluss erfolgte die Verknüpfung mit den Bodenerodierbarkeitsstufen nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 3) und die Zuordnung von Stufen der

natürlichen Erosionsgefährdung für landwirtschaftlich und ackerbaulich genutzte Flächen auf Rasterebene.

Als Ergebnisse der Untersuchung zur natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind wurden bundesweit auf Grundlage eines Rasterdatensatzes mit 10*10 m-Auflösung ausgewiesen:

- ▶ Karte der Gefährdungsstufen der Bodenerodierbarkeit (Landwirtschafts- und Ackerflächen)
- ▶ Karte der Klassen der Bodenerosivität des Windes
- ▶ Karte der Gefährdungsstufen der natürlichen Erosionsgefährdung (Landwirtschafts- und Ackerflächen)

3.2.2 Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind

Ergänzend zum DIN-Ansatz wurde entsprechend der Vorgaben der AK EROSION (2008) die potenzielle Erosionsgefährdung für ackerbaulich und landwirtschaftlich genutzte Flächen ausgewiesen, welche die natürliche Erosionsgefährdung und die Schutzwirkungsstufen an Windhindernissen verknüpft. Hierbei bleiben die Schutzwirkungen der Fruchtarten unberücksichtigt (vgl. Abb. 6). Die Ergebnisse der Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung bilden die Grundlage für die weiterführende Ausweisung von Schwerpunkträumen in ausgewählten Bundesländern bezüglich der Prognose der Gefährdungssituation bis zum Jahr 2100 (vgl. Kap. 3.5).

Evaluierung von Windhindernissen auf bundesweiter Ebene und Ermittlung der Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen

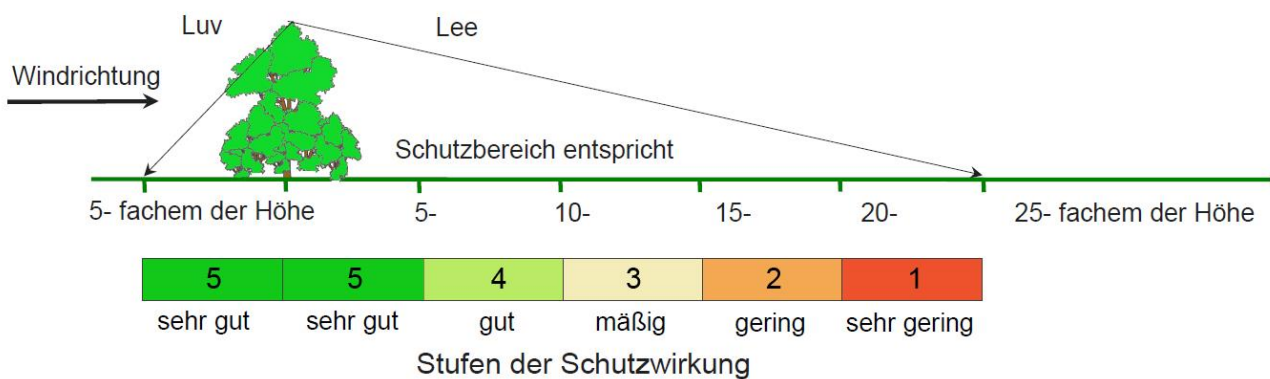
Für die Ausweisung und Einbindung von Windhindernissen liegen auf Länderebene häufig Ergebnisse von Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierungen vor, die sich für bundesweite Betrachtungen hingegen nicht generell vereinheitlichen lassen. Somit zielte die Evaluierung von Windhindernissen auf Datensätze, welche die bundesweite Vergleichbarkeit gewährleisten. Die digitalen Bodenbedeckungsdaten für Deutschland (corine land cover – CORINE; Keil u.a. (2011)) liefern eine für das Bezugsjahr 2012 zuletzt aktualisierte bundesweit einheitliche Datenbasis. CORINE stellt maßstabsbedingt aber vorrangig Flächenobjekte dar - linienhafte Windhindernisse, wie Hecken und Baumreihen, werden hingegen nicht hinreichend genau abgebildet. Als geeigneter Datensatz wurde das digitale Basis-Landschaftsmodell (ATKIS Basis-DLM) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) priorisiert, dessen Informationsumfang sich am Inhalt der Topographischen Karte 1:25.000 orientiert. Das Basis-DLM stellt die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat auf der Grundlage der Festlegungen des ATKIS-Objektartenkatalogs dar. Die nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 8) erforderliche Kategorisierung von Windhindernissen (u.a. Baumreihen, Hecken, Wald, Siedlungen u.a.) und die Zuordnung einer mittleren Hindernishöhe lässt sich aus dem DLM-Datenbestand umsetzen. Ergänzend wurde geprüft, inwiefern der Datensatz LUCAS (land use and land cover survey), der eine Flächenstichprobenerhebung zur Bodennutzung und Bodenbedeckung des statistischen Amtes der Europäischen Union darstellt, zusätzlich zur Evaluierung der Windhindernisdaten herangezogen werden kann. Die durchgeführten Untersuchungen haben hingegen gezeigt, dass die Datendichte von LUCAS nicht annähernd dem Bestand des Basis-DLM entspricht und somit für eine Evaluierung ungeeignet ist.

Die Ermittlung der Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen erfolgte in folgenden Arbeitsschritten:

- ▶ Auswahl von Linien- und Flächenobjekten aus dem Datenkatalog des Basis-DLM und Vereinheitlichung zu einem bundesweiten Datensatz
- ▶ Zuweisung einer mittleren Höhe nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 8))
- ▶ Ermittlung der maximalen Gesamtlänge des Schutzbereiches im Lee und Luv des Windhindernisses gemäß DIN 19706 für alle acht Hauptwindrichtungen

- ▶ Disaggregation des Schutzbereiches in sechs Teilbereiche und Zuordnung der fünf Stufen der Schutzwirkung gemäß Abb. 5
- ▶ Übernahme und Aufbereitung der für 85 DWD-Stationen vorliegenden Häufigkeiten je Hauptwindrichtung (Winde > 7m/s von Februar bis Mai)
- ▶ Räumliche Interpolation der Windhäufigkeiten für jede Windrichtung mittels Nearest-Neighbour-Methode
- ▶ Erzeugung von Rasterdatensätzen für jede Windrichtung (200 m-Rasterweite)
- ▶ Umwandlung des Datensatzes (Mosaikierung) und Anpassung an die Rasterweite der Schutzwirkungsstufen (10 m)
- ▶ Multiplikation der Schutzwirkungsraster jeder Hauptwindrichtung mit den Rasterdaten der Häufigkeit ihres Auftretens und Aufsummierung der Teilergebnisse
- ▶ Überführung der Dezimalwerte nach Entwurf AK EROSION (2008) in Ganzzahlen und Schutzwirkungsstufen
- ▶ Räumliche Verknüpfung der Schutzwirkungsstufen mit den eigentlichen Hindernissen

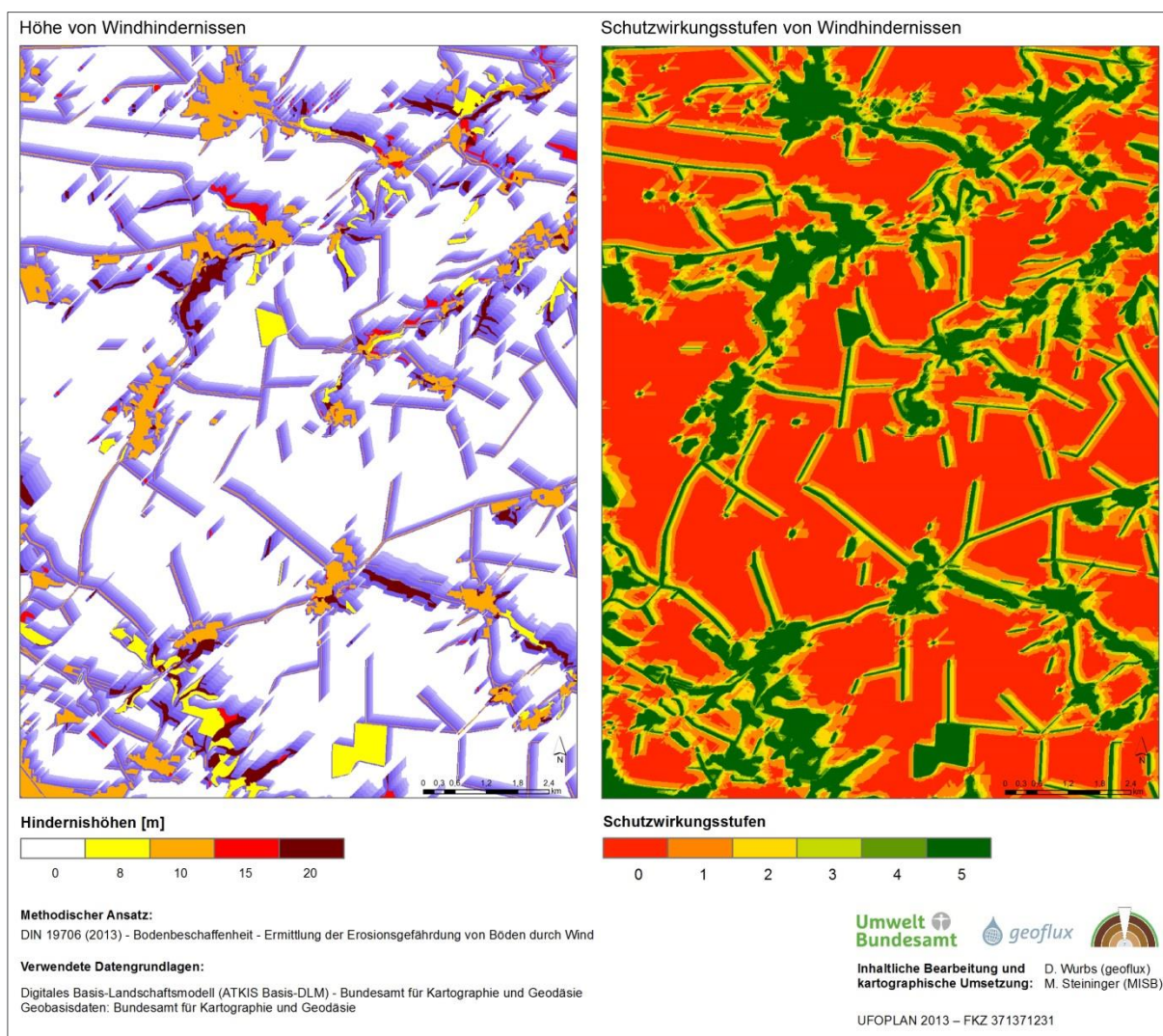
Abbildung 5: Schema zur Ermittlung der Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen



Quelle: DIN (2013) - verändert

Abbildung 6 zeigt exemplarisch für einen Gebietsausschnitt die ausgewiesenen Höhen und Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen.

Abbildung 6: Höhen und Schutzwirkungsstufen von Windhindernissen (Ausschnitt)



Bewertung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind

Die Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der natürlichen Erosionsgefährdung (Kap. 3.2.1) und der Schutzwirkung von Windhindernissen wurde nach Vorlage der AK EROSION (2008) entsprechend Tabelle 4 vorgenommen:

Tabelle 4: Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind nach AK EROSION (2008)

Stufen der natürlichen Erosionsgefährdung	Stufen der Schutzwirkung von Windhindernissen					
	0	1	2	3	4	5
0 (keine)	0	0	0	0	0	0
1 (sehr gering)	1	1	0	0	0	0
2 (gering)	2	2	1	0	0	0
3 (mittel)	3	3	2	1	0	0
4 (hoch)	4	4	3	2	1	0
5 (sehr hoch)	5	5	4	3	2	1

Für die Ausweisung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind wurden bundesweit ausgewiesen:

- ▶ Windrichtungshäufigkeiten für 8 Hauptwindrichtungen (Deutschland)
- ▶ Gewichtete Schutzwirkungsstufen der Windhindernisse (Landwirtschafts- und Ackerflächen)
- ▶ Gefährdungsstufen der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind (Landwirtschafts- und Ackerflächen)

3.2.3 Bewertung der Schutzwirkung von Fruchtarten und der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung

Ermittlung der Fruchtartenverteilung

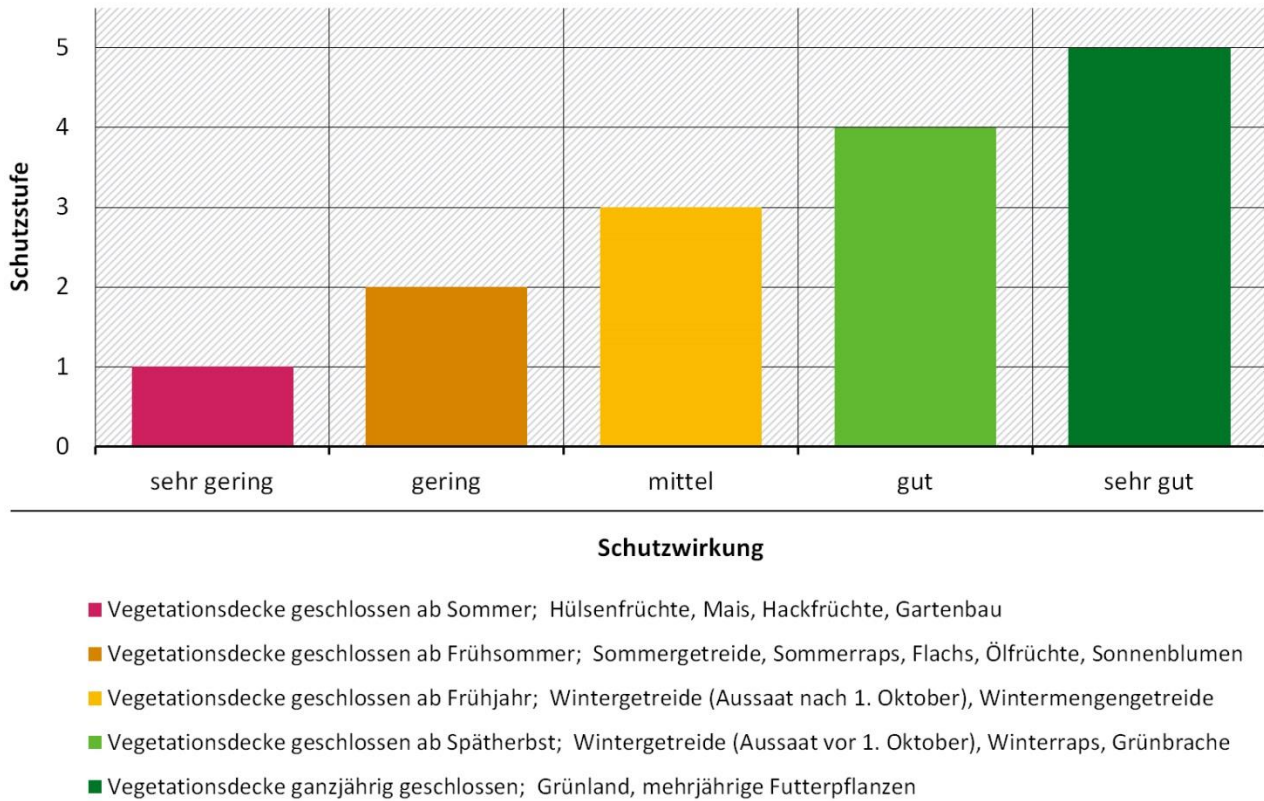
Die Vegetationsbedeckung des Bodens, insbesondere der innerjährliche Grad der Bodenbedeckung im Bezug zum Verlauf des Windintegrals, hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gefährdungspotenzial der Standorte hinsichtlich der Winderosion. Im methodischen Ansatz nach DIN 19706 wird dieser Einfluss durch die Stufen der Schutzwirkung von Fruchtarten (DIN 2013, Tabelle 4) bzw. Fruchtfolgen (DIN 2013, Tabelle 5) widerspiegelt. In Kombination der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen mit der natürlichen Winderosionsgefährdung wird die bewirtschaftungsbezogene Erosionsgefährdung durch Wind ausgewiesen.

Je nach innerjährlichem Grad der Bodenbedeckung der Fruchtarten liegt die Schutzstufe bei konventioneller Bodenbearbeitung, wie sie in Abb. 7 dargestellt sind, zwischen 1 (= sehr gering – Vegetationsdecke geschlossen ab Sommer) und 5 (= sehr gut – Vegetationsdecke ganzjährig geschlossen).

Abbildung 7: Einstufung der Schutzwirkung von Fruchtarten bei konventioneller Bodenbearbeitung

Einstufung der Schutzwirkung von Fruchtarten bei konventioneller Bodenbearbeitung

nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 4)



Quelle: DIN (2013), geändert

Für die ackerbaulich relevanten Fruchtfolgen liegt die Schutzstufe je nach Fruchtartenanteil im Bereich zwischen 4 (reine Wintergetreidefruchtfolgen mit Aussaat vor dem 1. Oktober) und 1 (Getreide-Hackfrucht-Fruchtfolge mit < 50 % Mais-/Hackfruchtanteil). Neben der fruchtartenspezifischen Bodenbedeckung haben die Anbausysteme (z. B. Zwischenfrucht oder Untersaat) sowie die Bodenbearbeitung (Pflug, konservierend, Direktsaat) erhebliche Auswirkungen auf die Schutzwirkung. Die Quantifizierung erfolgt nach DIN 19706 (DIN 2013, Tabelle 5). In dieser sind in Abhängigkeit der zusätzlichen Bodenbedeckung Zuschläge der Schutzwirkung ausgewiesen.

Statistisches Datenmaterial zur landwirtschaftlichen Bodennutzung liegt auf Ebene der Bundesländer frei verfügbar bei den jeweiligen statistischen Landesämtern vor und ist hier recherchierbar. Standortkundliche und agrarstrukturelle Differenzierungen, die innerhalb der Bundesländer zu veränderten Anbauspektren führen, lassen sich mit diesem Datenmaterial nicht umsetzen, sind jedoch für eine gebietskonkrete Ermittlung der bewirtschaftungsbezogenen Schutzwirkung unbedingt notwendig. Eine Untersetzung dieser Landesdaten bis hin zur Betriebsebene ist zumindest theoretisch durch Nutzung der Daten der Agrarstrukturhebung der Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder möglich. Aus datenschutzrechtlichen Gründen sind für Auswertungen, die auf diesem Datenbestand basieren, folgende Randbedingungen zur Anonymisierung und Nichtrückverfolgbarkeit zu beachten:

- ▶ jeder Aggregierungsraum muss mindestens zwei Gemeinden umfassen
- ▶ je Aggregierungsraum müssen mindestens drei Betriebe gemeldet haben

Da eine Auswertung auf Gemeindeebene aufgrund dieser Bestimmungen nicht umsetzbar ist, wurden als räumliche Bewertungsebene die Naturraumeinheiten des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) herangezogen (BfN 2008).

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 naturräumlichen 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 das Anbauspektrum in Form der angebauten Fruchtartengruppen und der Anbauflächen herangezogen wurden.

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.

Für die Ermittlung der in den Naturraumeinheiten angebauten Fruchtarten wurde auf den Datenbestand des Forschungsdatenzentrums Nord in Kiel (FDZ) zur Landwirtschaftszählung 2010 zurückgegriffen. Die Daten repräsentieren den Stand 2010 und stellen die zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung letztmalige Gesamterfassung der landwirtschaftlichen Struktur- und Betriebsdaten dar, d. h. sie repräsentieren innerhalb des Projektes die flächendeckend auf Bundesebene verfügbaren statistischen Daten zur Landwirtschaft. Für die Auswertung wurden zwei Datenbestände beantragt: Zur Ermittlung der Fruchtartenverteilung und den Aussagen zum Umfang des Zwischenfruchtanbaus werden die Daten der Agrarstrukturerhebung aus der Vollerhebung, d. h. Befragung aller Landwirtschaftsbetriebe, herangezogen. Das Merkmal „Bodenbearbeitungsverfahren“ wurde dagegen nicht bei allen befragten Betrieben, sondern lediglich im Rahmen einer Stichprobe erhoben.

Ermittlung der bewirtschaftungsbezogenen Schutzstufen und Erosionsgefährdung

Die Stufe der bewirtschaftungsbezogenen Schutzwirkungen stellt den Einfluss der Fruchtarten sowie der Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodenerosionsgefährdung durch Wind dar. Die bei der Ermittlung der Fruchtartenverteilung beschriebenen Verteilungsmuster (s. Kap. 3.3.3), insbesondere die Anbauanteile von Wintergetreide und Mais, bedingen letztendlich die jeweilige Schutzstufe auf Ebene des Naturraumes.

Zur Ermittlung der Fruchtartenanteile sowie der mittleren Schutzstufe für die Naturräume wurden die Daten zu den in den Naturraumeinheiten angebauten Fruchtarten und deren Anbaufläche in das System der DIN 19706 (DIN 2013) zur Ableitung der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (DIN 2013, Tabelle 5, Stufe der Schutzwirkung von Fruchtarten) überführt und aggregiert (vgl. Abb. 7). Anschließend erfolgte für die Naturräume die Ableitung der ‚mittleren‘ Schutzstufe als gewichtetes Mittel aus den einzelnen Flächenanteilen der bewirtschaftungsbezogenen Schutzstufen.

Der DIN-Ansatz zur Ausweisung der Winderosionsgefährdung ist für alle Gefährdungsstufen jeweils schlagbezogen, d. h., eine flächenkonkrete Kombination der Erodierbarkeits- und Schutzstufen führt zu einer schlagkonkreten Aussage. Dieser räumliche Bezug kann für die vom FDZ erfassten Daten nicht umgesetzt werden. Die geringste räumliche Auflösung ist die Gemeinde bzw., wie im vorliegenden Fall unter Beachtung der datenschutzrechtlichen Bestimmungen der Naturraum, sodass lediglich die Fruchtartenanteile sowie die mittleren Schutzstufen für die Naturräume ausgewiesen werden können. Eine flächenkonkrete Ableitung der Bodennutzung und Zuordnung der Schutzstufen innerhalb der Naturräume ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Es konnten somit keine schlagbezogenen Fruchtfolgen ausgewiesen werden, die für eine Ermittlung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung nötig gewesen wären. In Kap. 3.3.3 wird detailliert erläutert, dass die Ausweisung der be-

wirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung mit dem vorliegenden Datenmaterial zu einer fast flächendeckenden Nivellierung der Schutzwirkung in der Stufe „mittel“ führen würde.

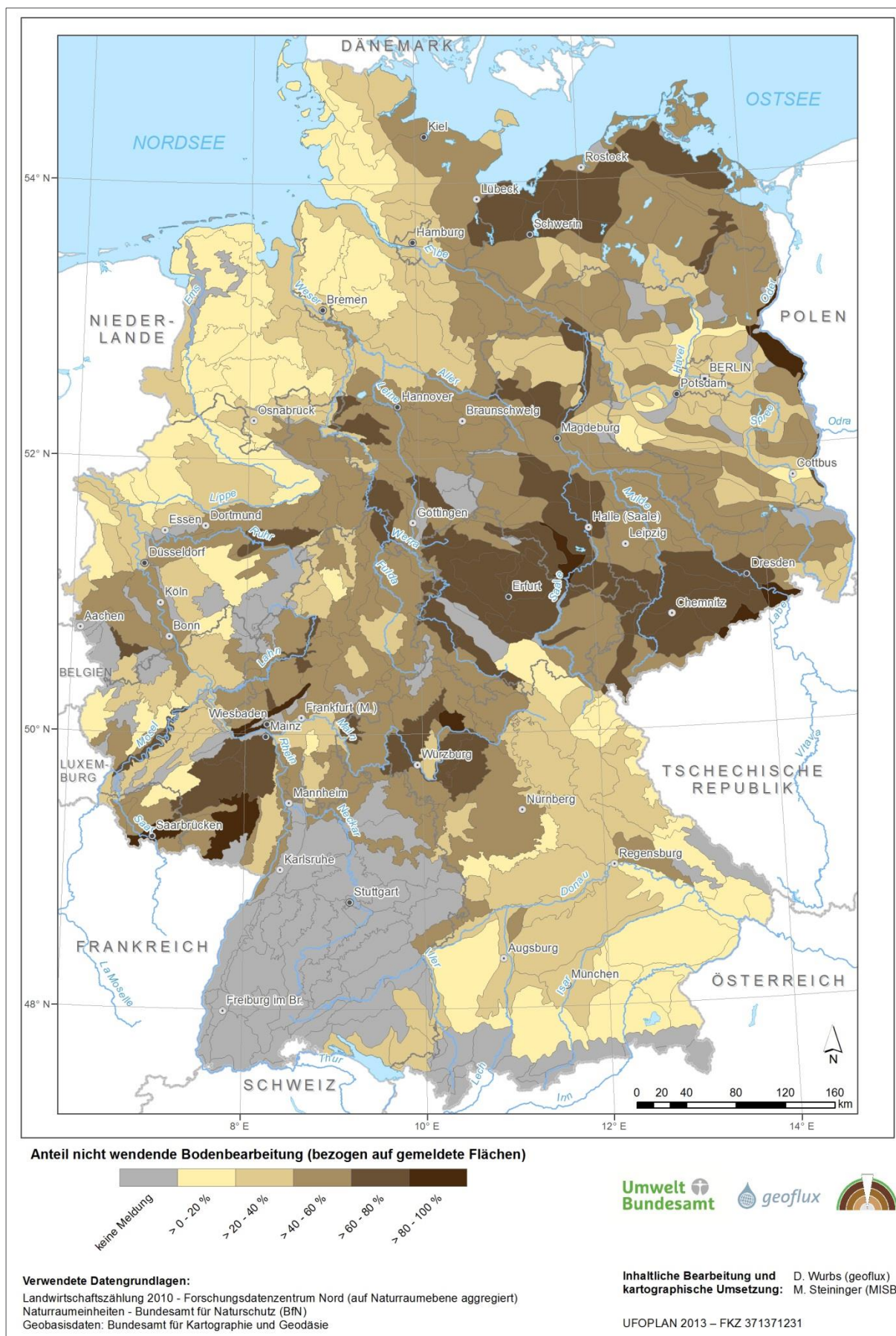
Aus diesem Grund wurde auf die Bewertung und Ausweisung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung und weiterführend auf die Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind unter Einbeziehung von natürlichen Standortfaktoren, Windhindernissen und der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen verzichtet.

Eine weitere Konkretisierung war über die Untersetzung der Schutzwirkung durch die Berücksichtigung nichtwendender Bodenbearbeitungssysteme, d. h. eine Erhöhung der Bodenbedeckung aus Mulch, geplant. Der aus der Erhebung des FDZ Nord zu den konservierenden Bodenbearbeitungssystemen vorliegende Datenbestand ist jedoch sehr heterogen. Das ursprünglich anvisierte Ziel, dass durch diese Erfassungsdaten regionale Trends zur absoluten Verbreitung der Verfahren sowie zum Verfahrenseinsatz zu bestimmten Fruchtarten abgebildet werden können, konnte nicht umgesetzt werden. Ursachen hierfür waren die nur stichprobenartige Erhebung, die Rückmeldungen durch die Landwirte und die teilweisen Meldesperrungen durch die statistischen Landesämter (siehe hierzu Abb. 8). Dadurch entstanden teilweise erhebliche Fehlstellen sowie andererseits nicht plausible niedrige Werte in vielen Regionen Deutschlands. Da keine einheitlichen, bundesweit verwertbaren Datensätze erstellt werden konnten, wurde auf eine weiterführende Auswertung verzichtet.

Als Ergebnisse der Untersuchung zu den bewirtschaftungsbezogenen Schutzwirkungen wurden, ausgenommen der gesperrten Naturräume, bundesweit ausgewiesen (Bewirtschaftungsstand 2010):

- ▶ Auswertetabellen und Karten zu den flächenmäßigen und relativen Fruchtartenzusammensetzungen in den Naturräumen
- ▶ Auswertetabellen und Karten zu den relativen Anteilen der Schutzstufen in den Naturräumen
- ▶ Datensatz und Karte ‚mittlere Schutzwirkungsstufe durch angebaute Fruchtarten in den Naturräumen‘

Abbildung 8: Anteil nichtwendender Bodenbearbeitungsverfahren laut Datenerhebung des FDZ Nord



3.3 Ergebnisse

3.3.1 Natürliche Erosionsgefährdung durch Wind

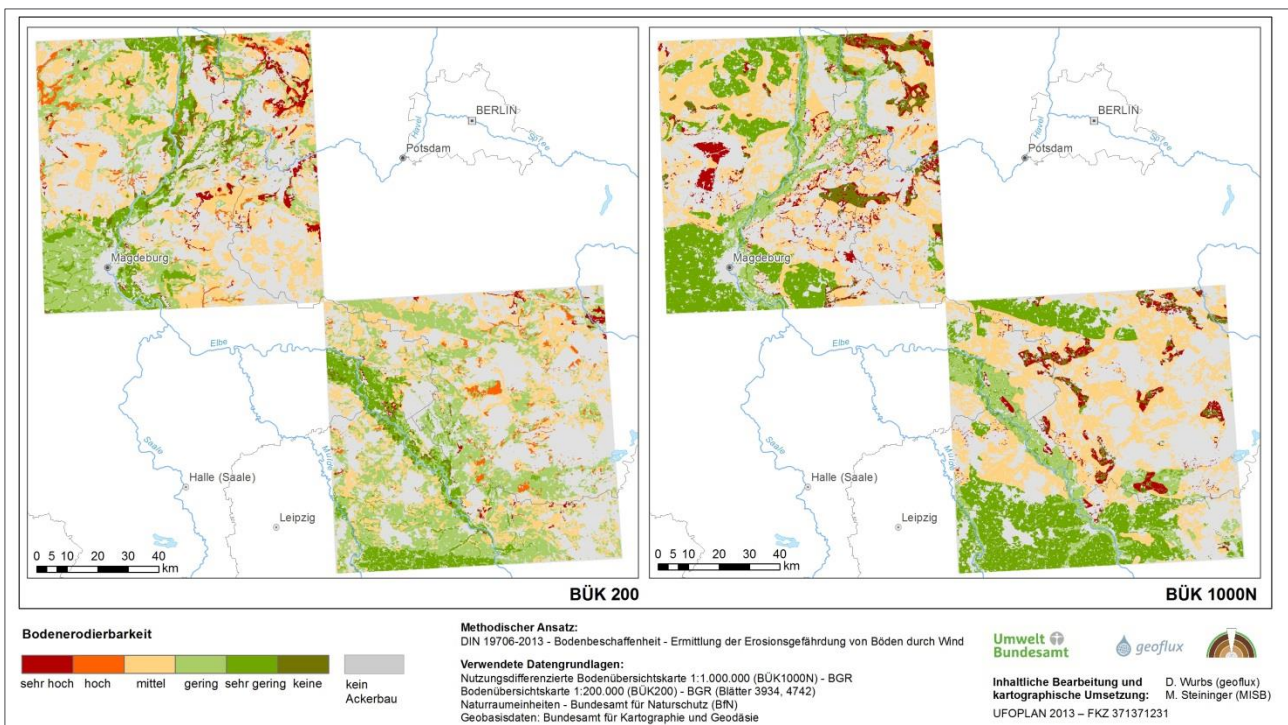
Variantenvergleich BÜK200 und BÜK1000N

Im Vorfeld der Ermittlung der deutschlandweiten Bodenerodierbarkeit wurde anhand von zwei ausgewählten Kartenblättern der BÜK 200 (Blatt 3934 Magdeburg, Blatt 4742 Riesa) ein modellhafter Vergleich der Bewertung der Bodenerodierbarkeit anhand der Kartenwerke der BÜK 200 und der BÜK 1000N vorgenommen. Aufgrund der sehr starken Vergesellschaftungen lässt sich unter Verwendung der BÜK 1000N nur eine vergleichsweise geringe räumliche Differenzierung der räumlichen Heterogenität der Bodenerodierbarkeit ermitteln (Abb. 9). Die Heterogenität der Bodenvergesellschaftung nimmt unter Verwendung der BÜK 200 gegenüber der BÜK 1000N zu, sodass auch regionalspezifische Gegebenheiten differenzierter wiedergeben werden.

Während für die Grundtendenzen in den Kategorien „hoch bis sehr hoch“, „mittel“ und „gering bis sehr gering“ für beide Ausschnitte zwischen den Datenbeständen eine vergleichsweise gute Übereinstimmung besteht, liegen im Detail deutliche Abstufungen vor. Diese umfassen jedoch in der Regel eine Abweichung um eine Stufe innerhalb der oben genannten Hauptkategorien.

Da für die Bewertung der Erosionsgefährdung das Eingangssignal Boden einen großen Einfluss hat, ist mit dem flächendeckenden Vorliegen des Datenbestandes der BÜK 200 perspektivisch eine Auswertung der Winderosionsgefährdung auf diesem Datenniveau vorzunehmen.

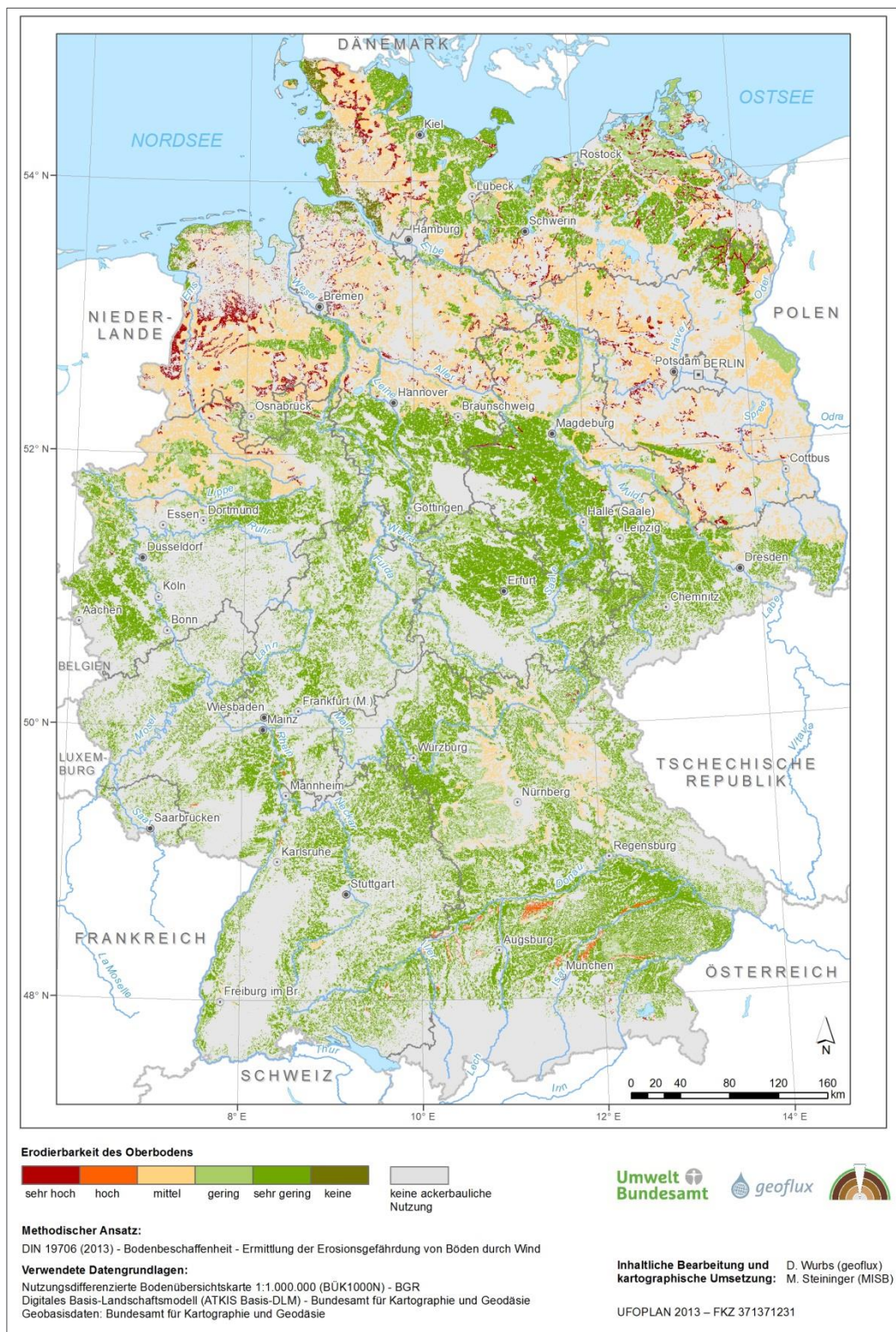
Abbildung 9: Erosionsgefährdung durch Wind – Vergleich BÜK 200 und BÜK 1000N



Erodierbarkeit des Bodens

Aufgrund der starken Vergesellschaftung in der BÜK1000N sind heterogene Raumstrukturen bei der Gefährdungsausweisung kaum erkennbar. Die sandigen Böden in Norddeutschland sowie Teile von Nordrhein-Westfalen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt weisen mittlere bis sehr hohe Gefährdungsstufen auf (Abb. 10).

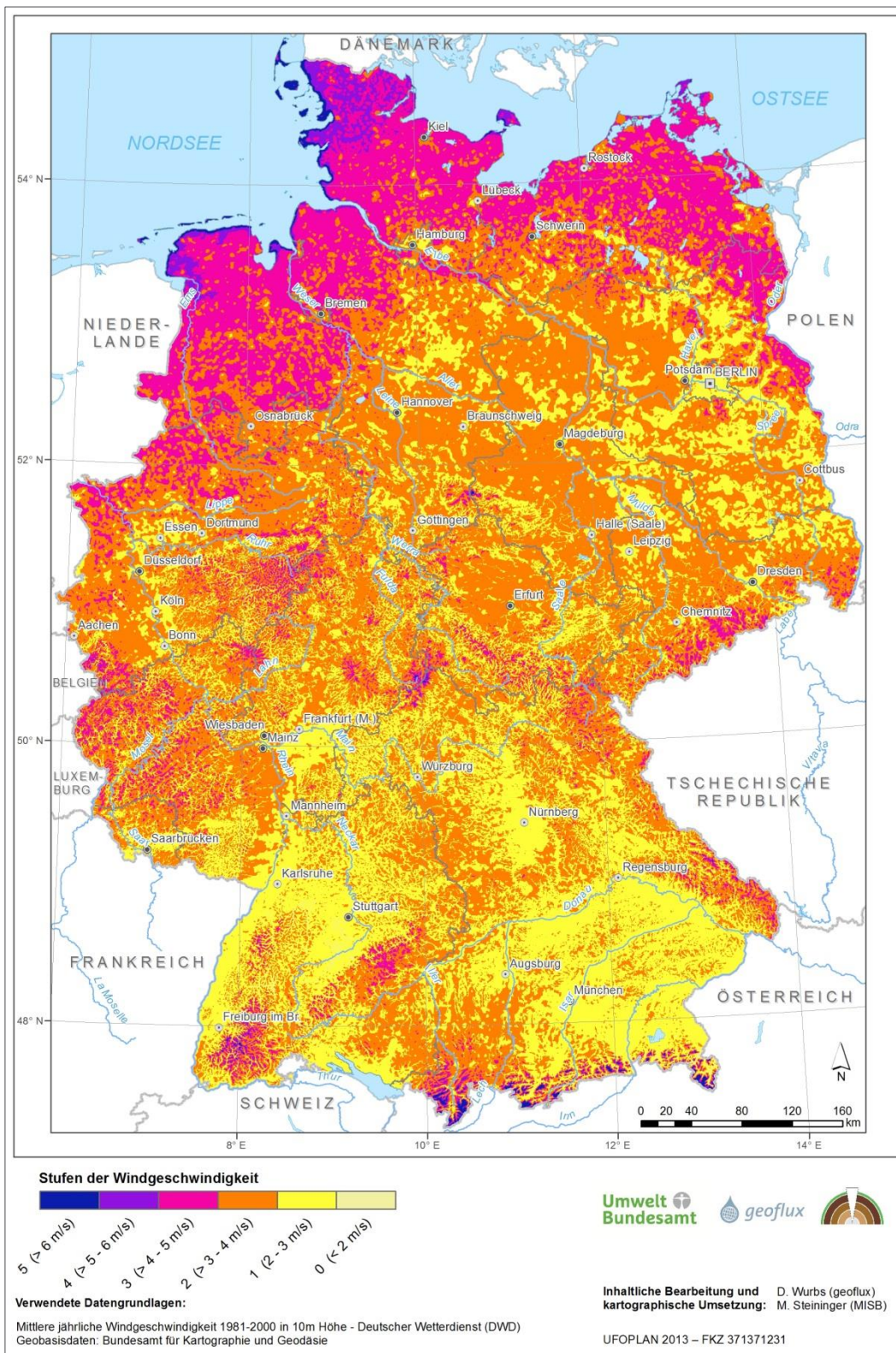
Abbildung 10: Erodierbarkeit ackerbaulich genutzter Böden in Deutschland



Erosivität des Windes

Klimatisch bedingt weisen die Küstenregionen an Nord- und Ostsee die größten Winderosivitäten auf. Zusätzlich ist eine erhöhte Erosivität im norddeutschen Binnenland mit durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 5 m*s⁻¹ gegeben (Abb. 11).

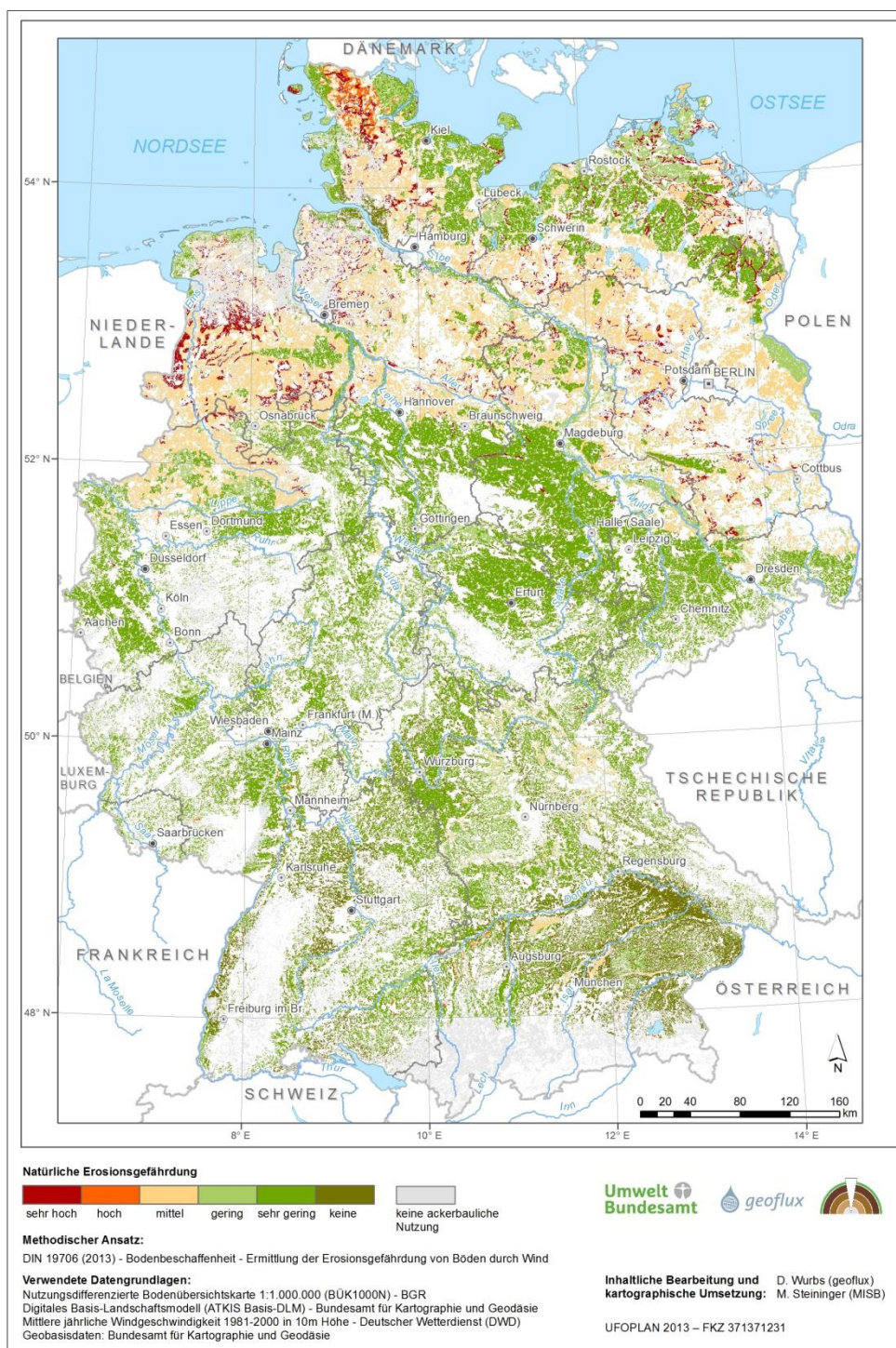
Abbildung 11: Erosivität des Windes in Deutschland



Natürliche Erosionsgefährdung durch Wind

Bedingt durch die hohen Windgeschwindigkeiten und die Erodibilität der vorwiegend sandigen Böden weisen die ackerbaulich genutzten Flächen im norddeutschen Binnenland, in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Nordrhein-Westfalen vorwiegend mittlere Gefährdungsstufen auf. Flächen mit hoher bis sehr hoher Gefährdung befinden sich in größeren Ausschnitten vor allem in Schleswig-Holstein und im westlichen Niedersachsen (Abb. 12). Inwiefern der DIN-Ansatz unter Nutzung der BÜK 1000N ausreichend geeignet für eine plausible landesweite Bewertung der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind ist, wird in Kapitel 3.4 diskutiert.

Abbildung 12: Natürliche Erosionsgefährdung durch Wind auf ackerbaulich genutzten Böden



3.3.2 Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind

Die Ermittlung der potenziellen Erosionsgefährdung, die ergänzend zum DIN-Ansatz entsprechend der Vorgaben der AK EROSION (2008) vorgenommen wurde, beinhaltet die bundesweite Ausweisung der Schutzwirkungsstufen an Windhindernissen, basierend auf den Häufigkeiten der acht Hauptwindrichtungen in den Monaten Februar bis Mai. Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Häufigkeitsverteilung für die Windrichtung ‚Südwest‘. In großen Teilen Deutschlands ist sie mit einem Anteil von über 30 % die dominante Hauptwindrichtung und somit bedeutsam hinsichtlich der Lage und Richtung von Windhindernissen. Im Westen und Südwesten Deutschlands nimmt der Anteil der Südwestrichtung auf über 50 % deutlich zu. Aufgrund der zumeist lokalen Schutzwirkung von Windhindernissen spiegelt sich diese gleichermaßen in der Bewertung der potenziellen Erosionsgefährdung wider. Unterschiede gegenüber der natürlichen Erosionsgefährdung treten dementsprechend vorwiegend lokal auf und sind im bundesweiten Maßstab kaum relevant (Abb. 14).

Abbildung 13: Häufigkeit der Windrichtung ‚Südwest‘ in den Monaten Februar bis Mai

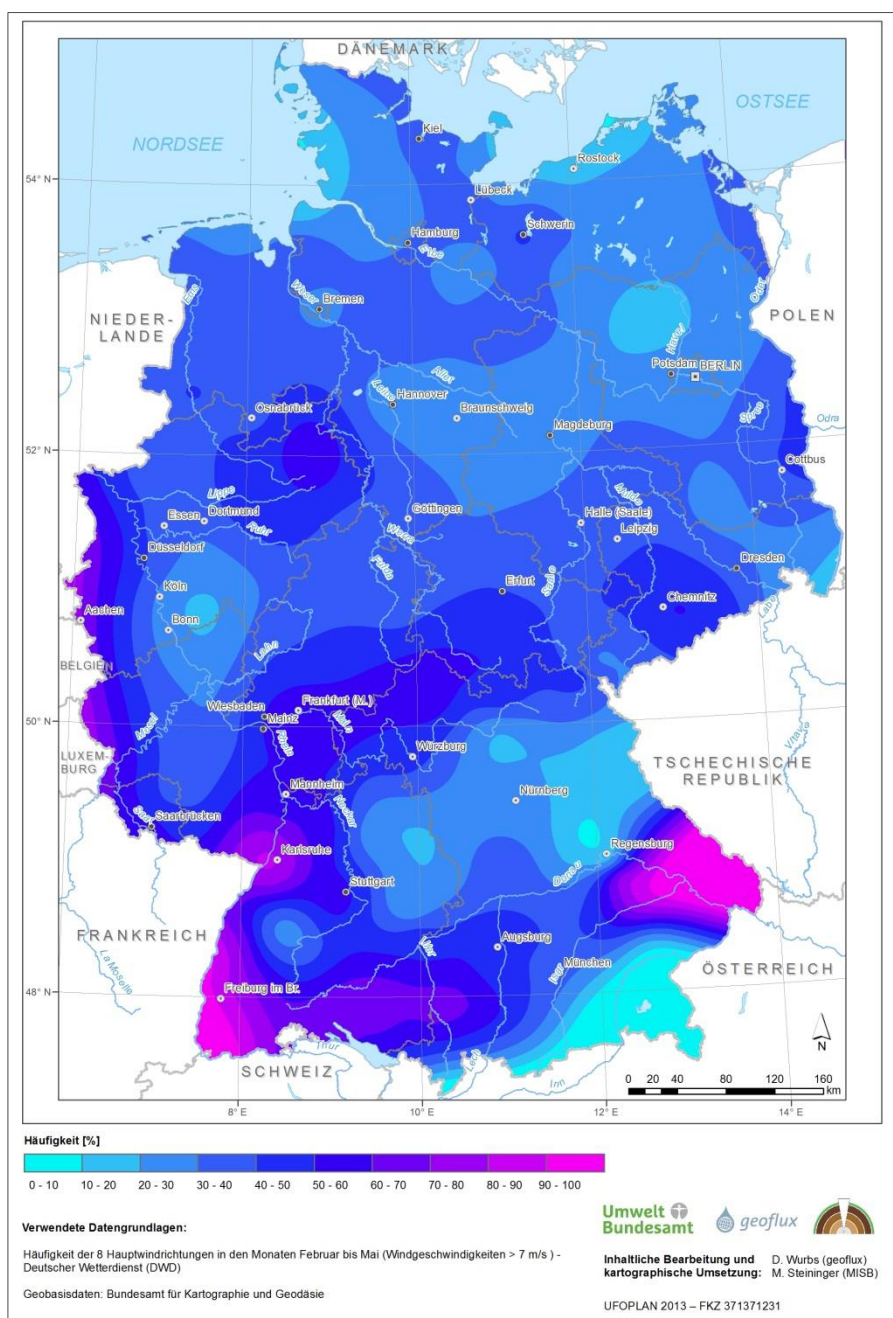
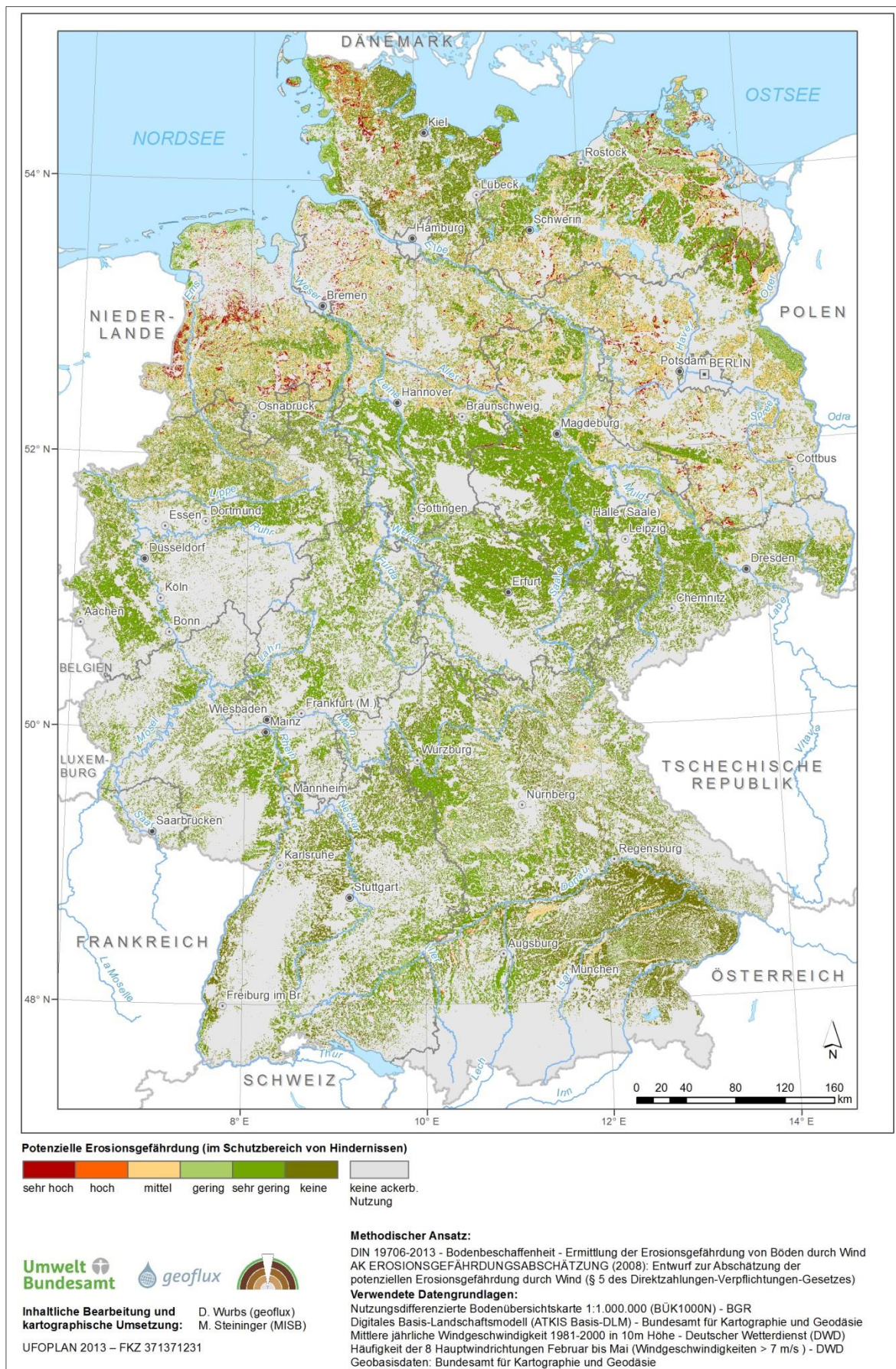


Abbildung 14: Potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind auf ackerbaulich genutzten Böden

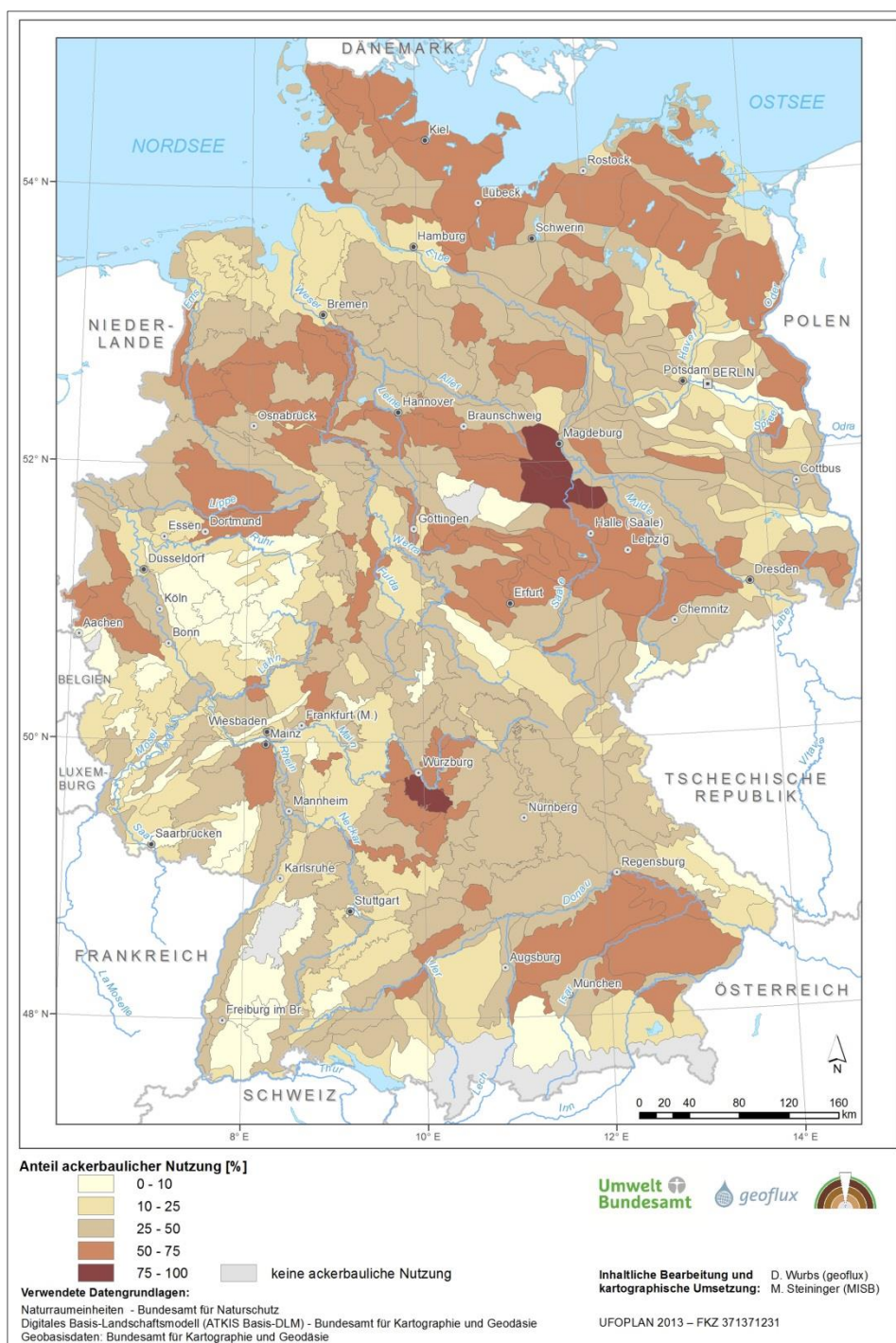


3.3.3 Schutzwirkung von Fruchtarten und Bewertung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung durch Wind

Fruchtartenverteilung in den Naturräumen

Aus der Auswertung der Daten des FDZ Nord ergeben sich zum Stand 2010 die in Abbildung 15 dargestellten Anteile von ackerbaulich genutzten Flächen in den Naturräumen Deutschlands. Dabei liegen die höchsten Anteile mit über 75 % im Bereich des nordöstlichen Harzvorlandes. Zusätzlich weisen vor allem die Lössregionen in Sachsen-Anhalt und Sachsen sowie große Bereiche in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen Ackeranteile von über 50 % auf.

Abbildung 15: Anteil ackerbaulich genutzter Flächen in den Naturräumen



Auf Ebene der wesentlichen Fruchtartengruppen lassen sich ohne Berücksichtigung der Sperrflächen die in Tabelle 5 aufgeführten Anbauflächen zusammenfassen. Zu beachten ist, dass bedingt durch die Sperrung von Daten in einzelnen Naturräumen die tatsächlichen Anbauflächen von denen in Tabelle 5 abweichen und in der Regel größer ausfallen dürften.

Tabelle 5: Bundesweite Anbauflächen der wesentlichen Fruchtartengruppen (ohne Berücksichtigung der Sperrflächen)

Fruchtartengruppe	Anbaufläche [ha]	Anteil an Ackerfläche gesamt [%]
Wintergetreide	5.543.262	49,4
Mais	2.289.853	20,4
Winterraps	1.452.460	12,9
Ackerfutter	629.842	5,6
Sommergetreide	561.031	5
Zuckerrübe	363.092	3,2
Kartoffel	250.379	2,2
Hülsenfrüchte	94.754	0,8

Erwartungsgemäß nimmt das Wintergetreide (siehe Abbildung 16) bundesweit mit 49,4 % die größte Anbaufläche ein. Davon entfallen 58 % der Anbaufläche auf Winterweizen, 23 % auf Wintergerste (siehe Abbildung 17) und 19 % auf die restlichen Wintergetreide. Mit Ausnahme von Bergländern, dem alpinen Raum sowie einigen Heideflächen wird in Deutschland flächendeckend Wintergetreide angebaut, welches aus Sicht der bewirtschaftungsbezogenen Schutzwirkung gegen Winderosion in Abhängigkeit vom Aussaattermin eine mittlere bis hohe Schutzwirkung aufweist. Winterweizen und Wintergerste mit ihren hohen Standortansprüchen konzentrieren sich auf die Gunstflächen der Löss- und Lehmregionen und haben hier einen Flächenanteil von > 50 %. Triticale und Winterroggen werden als Wintergetreide auf den ertragsschwächeren Standorten mit sandigen Substraten oder auf den Ackerstandorten der Bergländer angebaut. Die Flächenanteile betragen hier in der Regel zwischen 10 und < 50 %.

Abbildung 16: Anteil Wintergetreide an den Fruchtarten in den Naturräumen

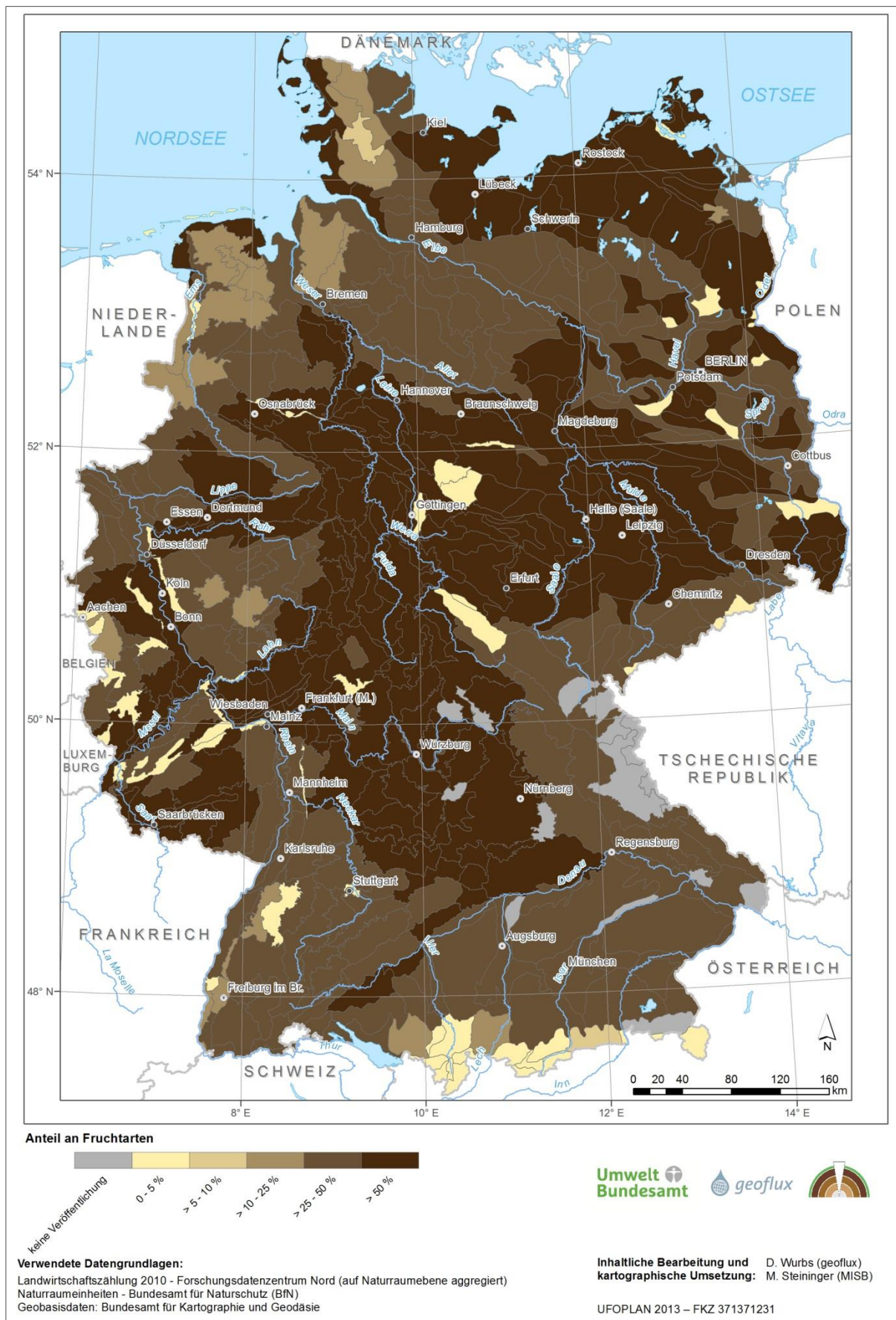
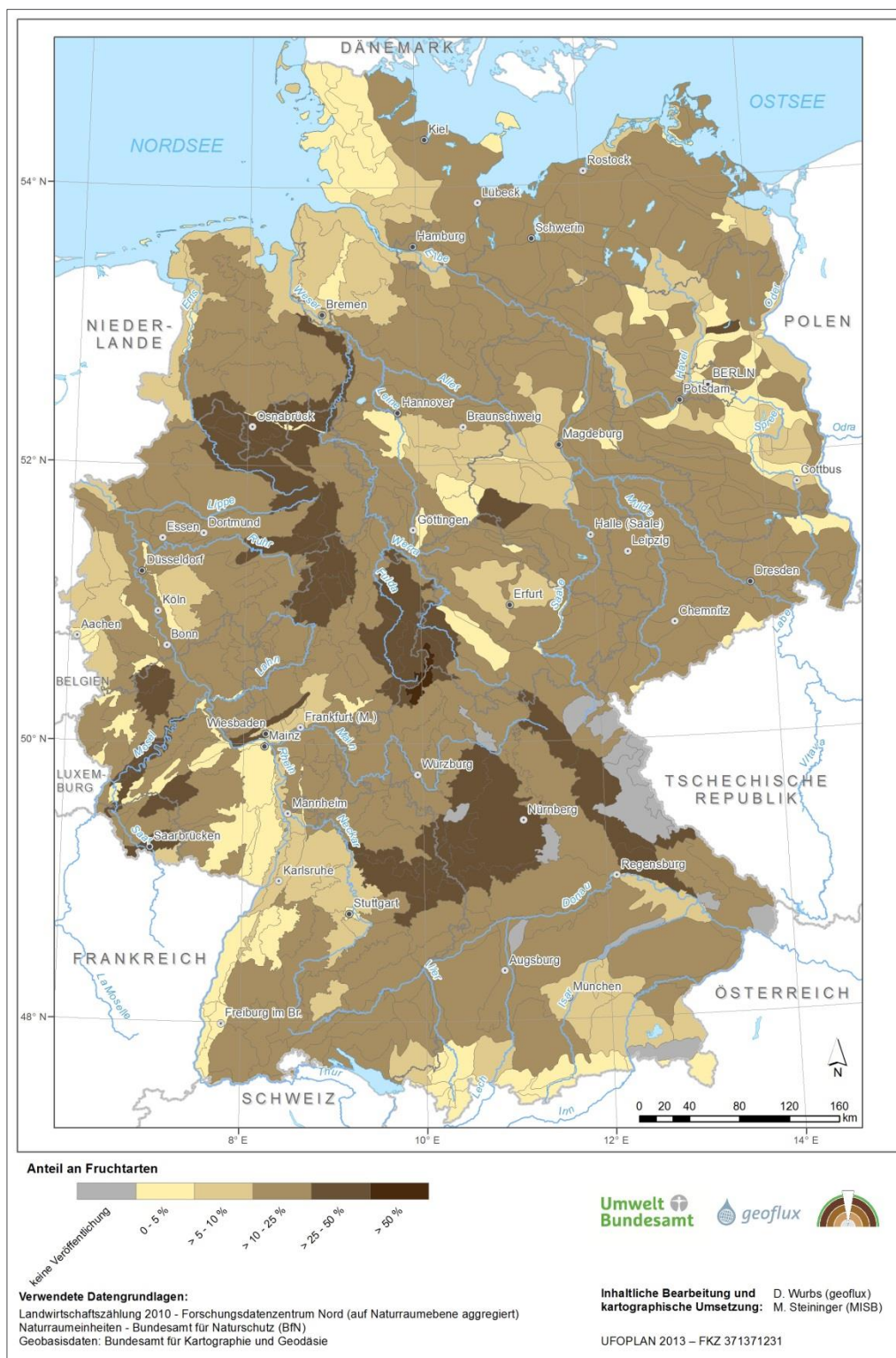


Abbildung 17: Anteil Wintergetreide (Schutzstufe 4) an den Fruchtarten in den Naturräumen

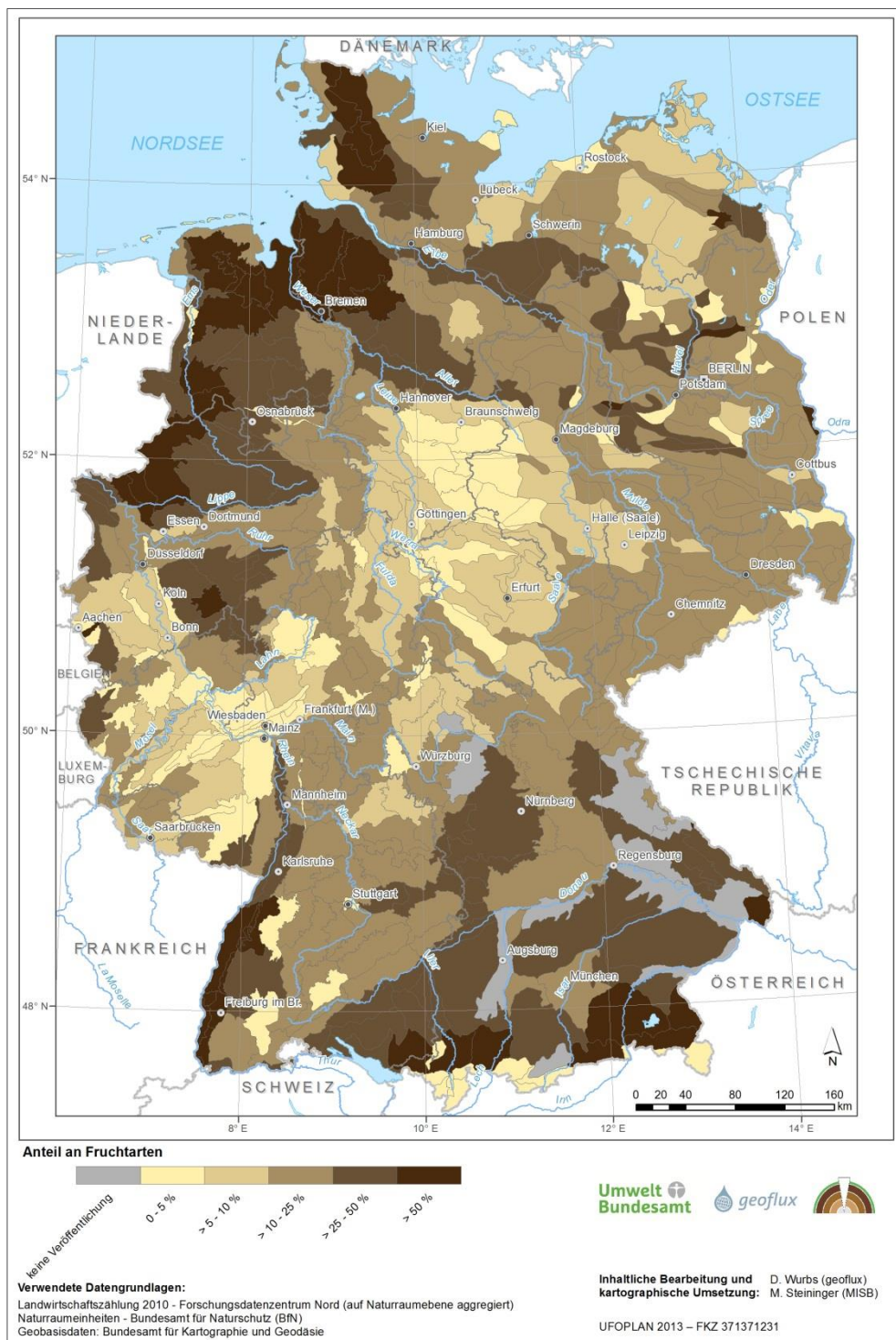


Der Mais als Futter- und/oder Bioenergiepflanze nimmt deutschlandweit mit 20,4 % die zweitgrößte Anbaufläche ein (Abb. 18). Der Anbau konzentriert sich auf die klassischen Tierproduktionsregionen im Norden und Westen der Bundesrepublik sowie auf Regionen in Bayern und Baden-Württemberg. Aber auch in Brandenburg und im östlichen Sachsen-Anhalt ist auf den leichten Standorten eine zunehmende Tendenz des Maisanbaus, insbesondere durch den Ausbau der Bioenergieerzeugung, zu beobachten. In diesen Regionen bewegt sich der Anteil der Maisflächen zwischen > 25 bis 50 %. In den reinen Marktfruchtregionen ohne intensive Tierhaltung und der Wertschöpfung aus Wintergetreide

und Winterraps liegt er dagegen bei < 25 %. Die übrigen Regionen mit einer Mischung aus Pflanzen- und Tierproduktion weisen einen Maisanteil von 10 bis 25 % auf.

Aus Sicht des vorsorgenden Erosionsschutzes (sowohl Wind- als auch Wassererosion) ist diese Entwicklung kritisch zu bewerten, da die Schutzwirkung von Sommerungen, insbesondere Reihenkulturen, ohne Zwischenfruchtanbau sehr gering ist. Die Winderosion betreffend kommt hinzu, dass ein Großteil des Maisanbaus auf den leichten, sandigen Standorten stattfindet. Diese Substrate weisen eine hohe Erodibilität gegenüber den Windkräften auf und sind somit bis zur vollständigen Bodenbedeckung sehr hoch winderosionsgefährdet.

Abbildung 18: Maisanteil an den angebauten Fruchtarten in den Naturräumen



Den drittgrößten Flächenanteil nimmt mit 12,9 % der Winterraps ein, liegt jedoch bereits deutlich hinter Wintergetreide und Mais. Hinsichtlich der Schutzwirkung gegen Winderosion ist diese Fruchtart sehr positiv einzuschätzen, da die Bodenbedeckung noch im Herbst des Aussaatjahres erfolgt. Darüber hinaus hat sich der Anbau von Winterraps auf vielen Standortlagen bis in die mittleren Bergländer etabliert.

Die drei in Deutschland am häufigsten angebauten Fruchtarten/-gruppen nehmen in Summe 82,7 % der Ackerfläche ein. Der verbleibende Flächenanteil wird vorwiegend durch Ackerfutter (5,6 %), Sommergetreide (5,0 %), Zuckerrübe (3,2 %), Kartoffel (2,2 %) und Hülsenfrüchte (0,8 %) belegt.

Ermittlung der bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung

Aufgrund der ermittelten Flächenanteile der angebauten Fruchtarten/-gruppen wird auf 67,9 % der Anbaufläche eine mittlere bis sehr gute bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung erreicht. Auf 31,6 % der Anbauflächen liegt jedoch nur eine geringe bis sehr geringe Schutzwirkung vor (Abb. 19). Kritisch ist hierbei, dass sich in der Regel diese Anbausysteme auf die Standorte mit einer hohen natürlichen Winderosionsgefährdung konzentrieren.

Der Bezug der Anbauverteilung auf die Naturräume brachte eine starke, fast flächendeckende Nivellierung der Schutzwirkung in die Stufe 'mittel' mit sich, wie in Abbildung 19 erkennbar ist. Da mit dem verwendeten Ansatz die Erosionsgefährdung somit nicht korrekt abbildbar ist und es zu Abweichungen gegenüber einer schlagbezogenen Auswertung, in der Regel einhergehend mit einer Verminderung der Erosionsgefährdung kommt, die sich deutlich von den CC_{Wind} -Einstufungen der Länder unterscheiden würden, **erfolgte keine Ausweisung der bewirtschaftungsbezogenen und somit weiterführend der Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Basis natürlicher Standortfaktoren, von Windhindernissen und der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen.**

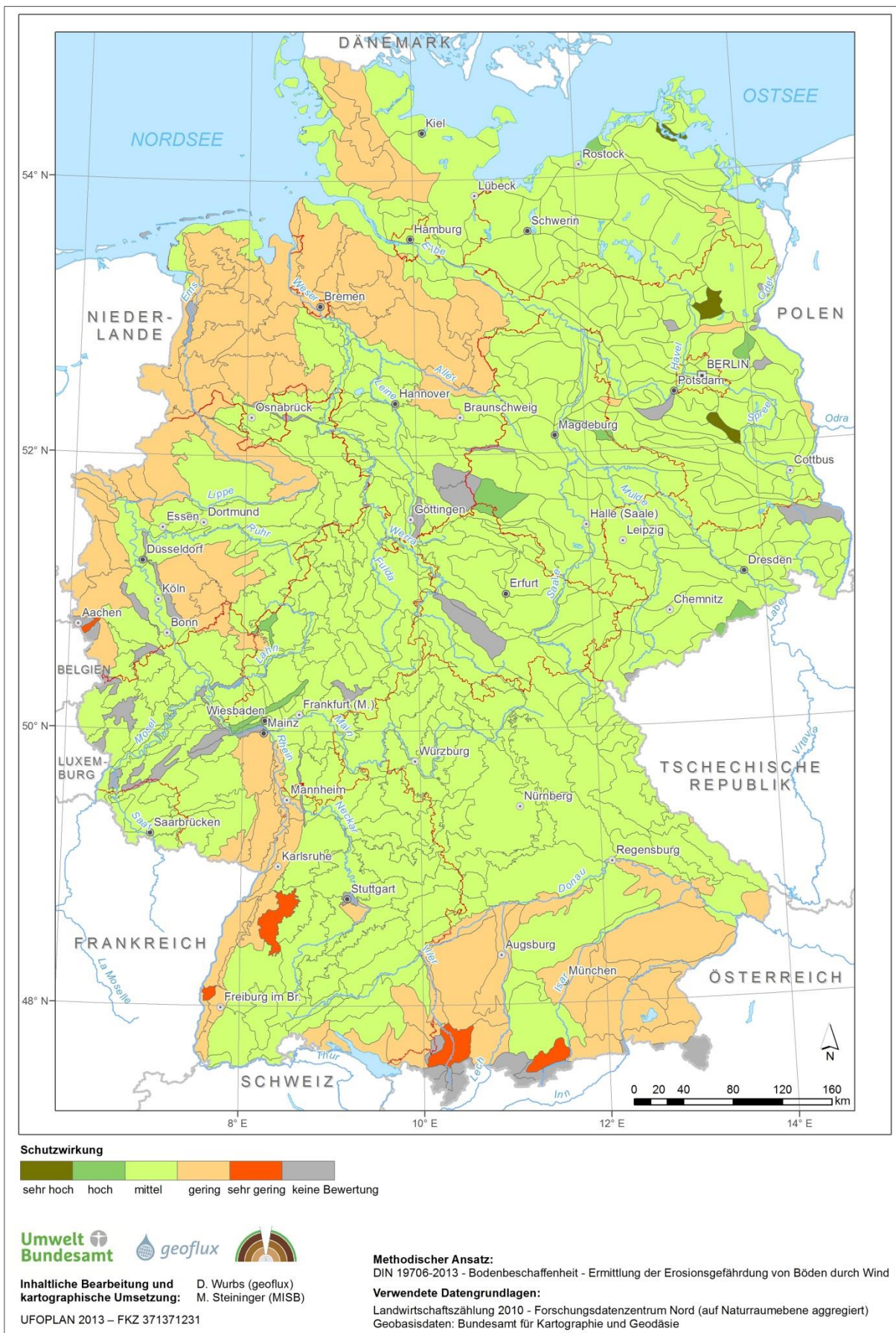
In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Auswertung aufgeführt. Obwohl sich innerhalb von Deutschland die Anbausysteme und -verhältnisse teils deutlich unterscheiden, erfolgt durch die Aggregation auf Basis der Naturräume eine sehr starke Nivellierung auf die Schutzstufe 3 (=mittel; 76 % der Naturräume).

Tabelle 6: Bewirtschaftungsbezogene Schutzstufen in den Naturräumen

Naturräume (ohne Sperrung)	Anzahl Naturräume in der bewirtschaftungsbezogenen Schutzstufe				
	1	2	3	4	5
Anzahl	5	91	344	8	3
Anteil [%]	1	20	76	2	1

Ursache hierfür ist der deutschlandweit sehr hohe Anteil von Wintergetreide, insbesondere Winterweizen. Dieser ist der Schutzstufe 3 (mittel) zuzuordnen. Eine Eingruppierung des Naturraumes in eine höhere Schutzstufe erfolgt nur in Fällen, in denen der Anteil des Wintergetreides durch den Anbau von Wintergerste dominiert wird bzw. die Anbauverhältnisse durch Feldfutter geprägt werden. Dies ist nur in 3 % der Naturräume der Fall. Die Schutzstufe 2 wird in Naturräumen mit einem hohen Maisanteil erreicht. Dies trifft für 20 % der Naturräume zu und konzentriert sich auf die Regionen mit hohem Tierbesatz. Naturräume mit der Schutzstufe 1 stellen 'Ausreißer' dar. Hierbei handelt es sich um Regionen mit sehr geringer Ackerfläche, auf denen 2010 nur eine Fruchtart angebaut wurde.

Abbildung 19: Bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung auf Naturraumebene



3.4 Einschränkungen und Grenzen des DIN-Ansatzes

Der Stand des Projektes und insbesondere die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 und 3 wurden im Rahmen eines Fachgespräches am 02. Juni 2015 in Berlin insgesamt 16 Vertreterinnen und Vertretern von Landesbehörden und Forschungseinrichtungen vorgestellt. Aus den eigenen Erkenntnissen zum Projekt sowie der Diskussion im Fachgespräch lassen sich folgende Defizite aufzählen, welche insbesondere die Verfügbarkeit erforderlicher Datengrundlagen und den zu wählenden Modelleinsatz für die Abschätzung der Winderosionsgefährdung auf bundesdeutscher Maßstabsebene betreffen:

- ▶ Vergesellschaftung in den Bodeneinheiten der BÜK 1000N führt zu räumlicher Nivellierung bei der Abschätzung des Bodenerosionsrisikos (vgl. Kap. 3.3.1).
- ▶ Aus Datenschutzgründen erforderliche Aggregation von Fruchtartenanteilen auf die Naturraumebene bewirkt eine geringe räumliche Differenzierung bei der Bewertung der Schutzwirkung durch angebaute Fruchtarten.
- ▶ Einstufung der Schluffböden im DIN-Schema führt zu Unterschätzung des natürlichen Erosionsrisikos, insbesondere auf den Lössböden Ostdeutschlands.
- ▶ Oben genannte Einschränkungen bedingen in Summe eine mögliche Unterschätzung des potenziellen und des bewirtschaftungsbezogenen Erosionsrisikos in einzelnen Bundesländern.
- ▶ Fehlende Betrachtung der Bodenbearbeitung und Bodenfeuchte in der DIN 19706
- ▶ Fehlende innerjährliche Differenzierung der Starkwindhäufigkeit und Bodenbedeckung in der DIN 19706.
- ▶ Aussagekräftige Prognosen zur Entwicklung der Winderosionsgefährdung vor dem Hintergrund des Klimawandels sind nur sehr bedingt möglich (vgl. Kap. 4.3).
- ▶ Mögliche alternative Modellansätze zur DIN 19706 sind im kleinmaßstäbigen (bundesdeutschen) Bereich nicht existent.

Hinsichtlich der einzelnen Bewertungsschritte nach DIN 19706 (DIN 2013) sowie AK EROSION (2008) lassen sich folgende Hauptpunkte zur Diskussion stellen und Empfehlungen geben:

- a) **Verbesserung der Datenbereitstellung auf Bundesebene**
Die Verbesserung bezieht sich vorwiegend auf die Fertigstellung der BÜK 200, einschließlich der Sachdatenbank und die flächendeckende Bereitstellung von Anbaudaten auf Gemeindeebene.
- b) **Einstufung der Schluffböden in das Schema der Bodenerodierbarkeit**
Die bisherige Einstufung der Schluffböden in das bisherige Bewertungsschema erfordert eine Überarbeitung. Insbesondere die Erodierbarkeit der Lössböden wird nach dem jetzigen Ansatz in einzelnen Bundesländern unterschätzt. Hierzu sollte eine Orientierung am VERMOST-Ansatz (Kap. 2.2) erfolgen.
- c) **Bewertung der bewirtschaftungsabhängigen Erosionsgefährdung auf Naturraumebene**
Die Schutzwirkungsstufe durch angebaute Fruchtarten überprägt – insbesondere aggregiert auf Naturraumebene - in starkem Maße die natürliche Erosionsgefährdung (vgl. Abb. 19). Insofern sind plausible Bewertungen der aktuellen Erosionsgefährdung auf dieser Raumebene nicht möglich. Für die Betrachtung der Klimaveränderungen und ihrer Folgen für die Winderosionsgefährdung können ausschließlich Szenarienannahmen zu möglichen Fruchtartenzusammensetzungen herangezogen werden.
- d) **Spiegelt der gegenwärtige Ansatz nach DIN 19706 und AK EROSION (2008) tatsächlich die mittlere jährliche Gefährdung wider?**
Der jetzige Ansatz zur Bewertung der Schutzwirkung von Windhindernissen bezieht nach AK EROSION (2008) nur Starkwindhäufigkeiten der Monate Februar bis Mai ein. Insbesondere ab September ist aufgrund fehlender Bodenbedeckung nach der Ernte und einer zunehmenden Starkwindhäufigkeit in Richtung Winter von einer ebenfalls erhöhten potenziellen Gefährdung auszugehen.

Gleichfalls ist zu diskutieren, ob grundsätzlich die Situation im Spätsommer/Herbst unterschätzt wird. Insbesondere die Einstufung einer mittleren jährlichen Schutzwirkung von Fruchtarten scheint in nicht ausreichendem Maße den innerjährlichen Verlauf von Windrichtung, Starkwindhäufigkeit, Bodenbedeckungsgrad durch Fruchtarten und Bodenkrumenfeuchte zu berücksichtigen.

3.5 Bewertung der natürlichen und potenziellen Erosionsgefährdung auf Länderbasis - Festlegung von repräsentativen Landschaftsausschnitten

3.5.1 Vergleich der ermittelten Erosionsgefährdung auf Bundes- und Länderebene

Datenabfrage in den Bundesländern

In Zusammenhang mit der Ermittlung der natürlichen und bewirtschaftungsbezogenen Erosionsgefährdung (vgl. Kap. 3.3) wurde deutlich, dass – bedingt durch die starke Aggregation von Bodeneigenschaften in der BÜK 1000N sowie der Fruchtartenspektren auf Naturraumbene – große Abweichungen zu den CC_{Wind} -Einstufungen der Bundesländer auftreten können. Um eine mögliche Veränderung der Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 unter Berücksichtigung veränderter klimatischer Verhältnisse und Anbauspektren plausibel bewerten zu können, erfolgten die Einbindung länderbezogener Daten zur Ermittlung der natürlichen Erosionsgefährdung und die Ausweisung **repräsentativer Landschaftsausschnitte bzw. Modellgebiete** in den von Winderosion besonders betroffenen Bundesländern. Ziel der Ausweisung von Modellgebieten ist es, in diesen die semiquantitative Modellierung vorzunehmen, um mithilfe eines genesteten Modellansatzes aus den Modellergebnissen Aussagen zu möglichen klimabedingten Tendenzen der zukünftigen Winderosionsgefährdung abzuleiten und diese auf größere Landschaftsräume zu übertragen.

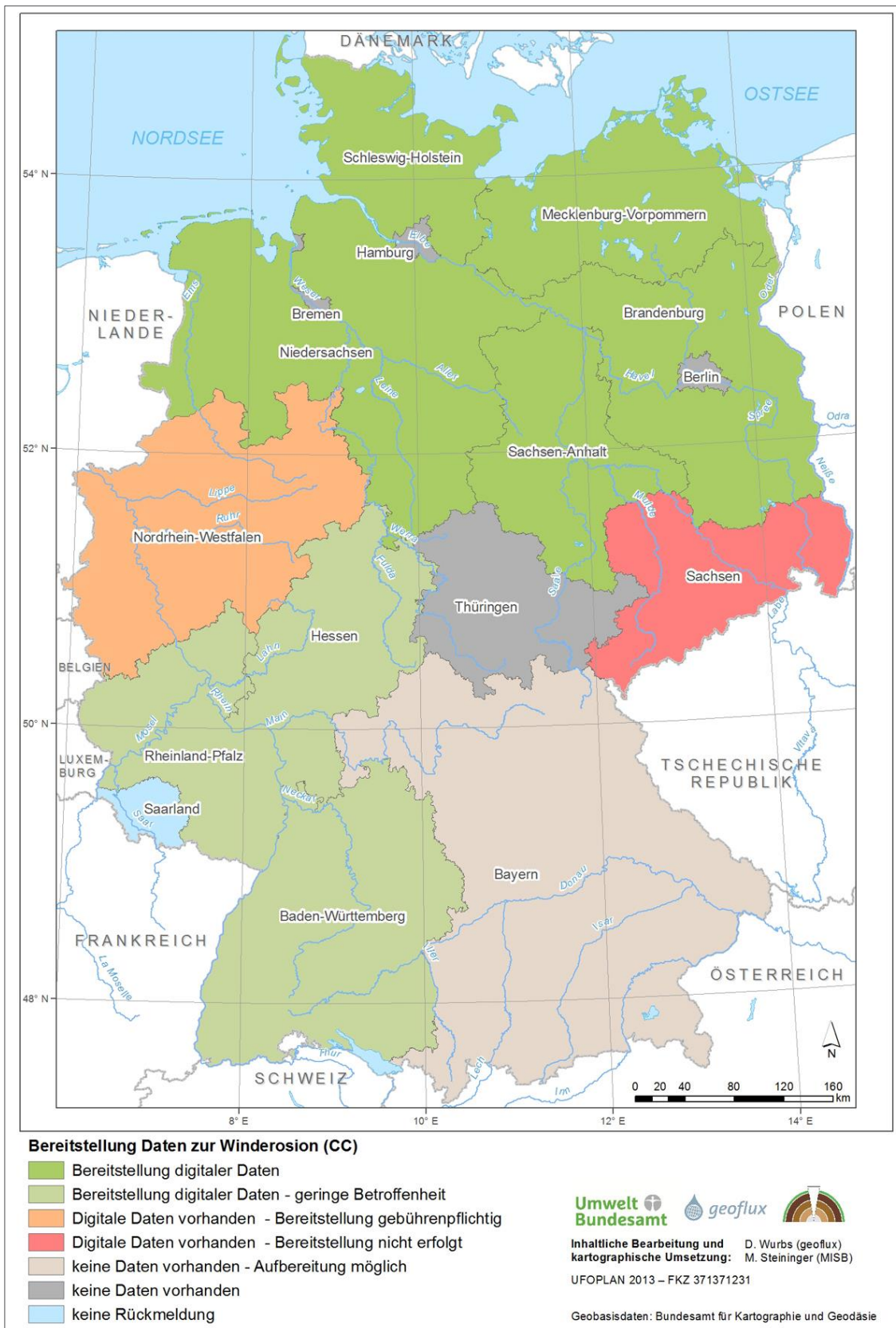
Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte umgesetzt:

- ▶ Abfrage der Grundlagendaten bei den zuständigen Fachbehörden der Bundesländer, die zur Einstufung der Winderosionsgefährdung gemäß cross compliance auf Landesebene erarbeitet wurden. Hierzu zählen:
 1. Einstufung der Erodierbarkeit des Bodens
 2. Einstufung der standortabhängigen Erosionsgefährdung aus Bodenerodierbarkeit und Windgeschwindigkeit
 3. Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung – abgeleitet aus standortabhängiger Erosionsgefährdung und Schutzwirkung der Windhindernisse
- ▶ Aufbereitung der Daten; Vereinheitlichung von Koordinatensystem und Rasterweite sowie räumliche Zusammenführung
- ▶ Vergleich der Ergebnisse mit den vorliegenden eigenen Projektergebnissen
- ▶ Einbeziehung der im Projekt bereits erarbeiteten Schutzwirkung von Windhindernissen und (Neu-)Berechnung der potenziellen Erosionsgefährdung auf Grundlage der Länderdaten

Als Ergebnis der Datenabfrage konnte festgestellt werden, dass die durch Winderosionsgefährdung besonders oder zum Teil betroffenen Bundesländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt Daten in digitaler Form zur Verfügung stellen konnten. Zusätzlich liegen auch Daten der nur gering von Winderosion betroffenen Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg vor. Dabei konnten von allen Ländern die Daten zur Bodenerodierbarkeit bereitgestellt werden. In den anderen Bundesländern liegen keine Daten vor, hätten aufbereitet werden müssen oder wurden nicht bzw. nur gebührenpflichtig bereitgestellt. Einen Überblick über die Datenverfügbarkeit und –bereitstellung gibt Abb. 20. Für die Festlegung repräsentativer Landschaftsausschnitte wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit und ihrer Betroffenheit durch Win-

derosion die Bundesländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt ausgewählt.

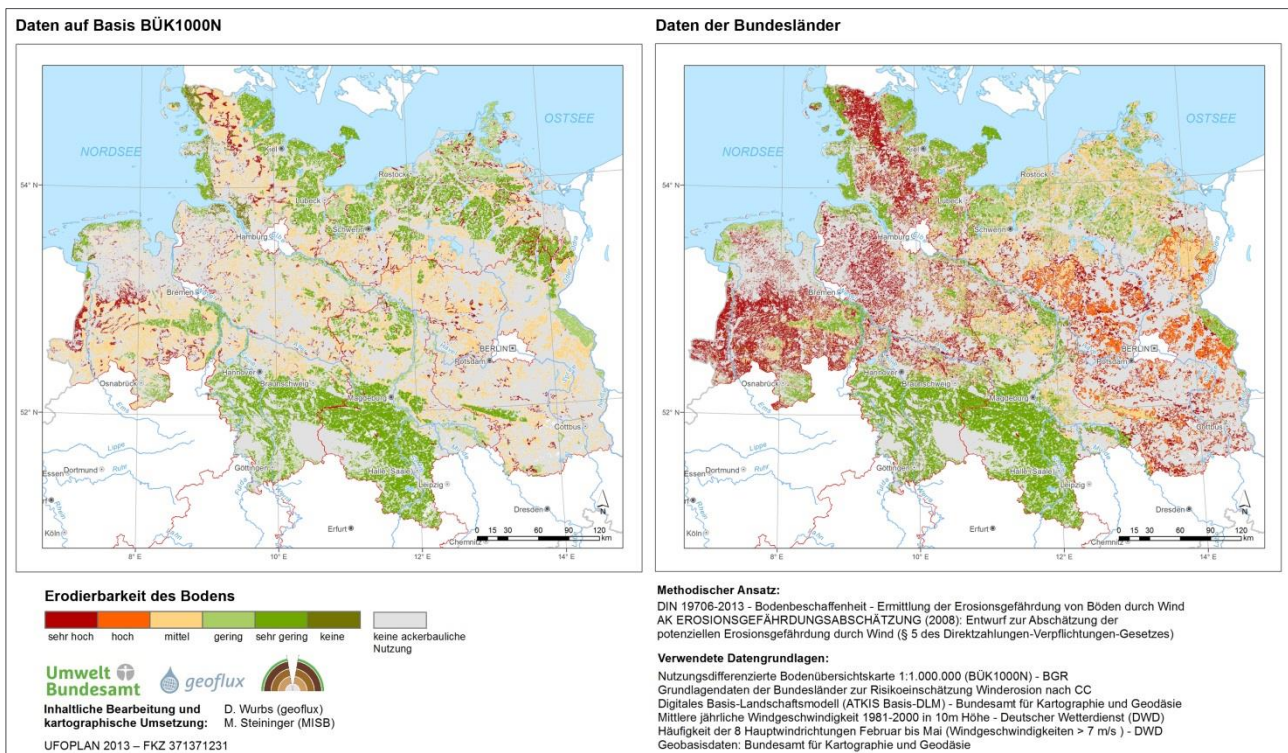
Abbildung 20: Verfügbarkeit von Daten der Bundesländer CC_{Wind}-Einstufungen



Vergleich der natürlichen und potenziellen Erosionsgefährdung

Bezogen auf die ackerbaulich genutzten Flächen weist die auf Länderebene ausgewiesene Erodierbarkeit des Oberbodens in den ausgewählten fünf Bundesländern eine deutlich höhere Differenzierung auf. Ursache ist zum einen die Vergesellschaftung in den Bodeneinheiten der in diesem Vorhaben verwendeten BÜK 1000N, die zu einer räumlichen Nivellierung bei der Abschätzung des Bodenerosionsrisikos, verbunden mit der Einstufung in die zumeist mittlere Stufe der Erodierbarkeit, führt. Darüber hinaus weisen die Datengrundlagen der Bundesländer eine höhere räumliche Auflösung auf. Insbesondere in großen Teilen Niedersachsens, Schleswig-Holsteins und Brandenburgs ist die Erodierbarkeit des Oberbodens um bis zu zwei Gefährdungsstufen höher einzuschätzen (vgl. Abb. 21).

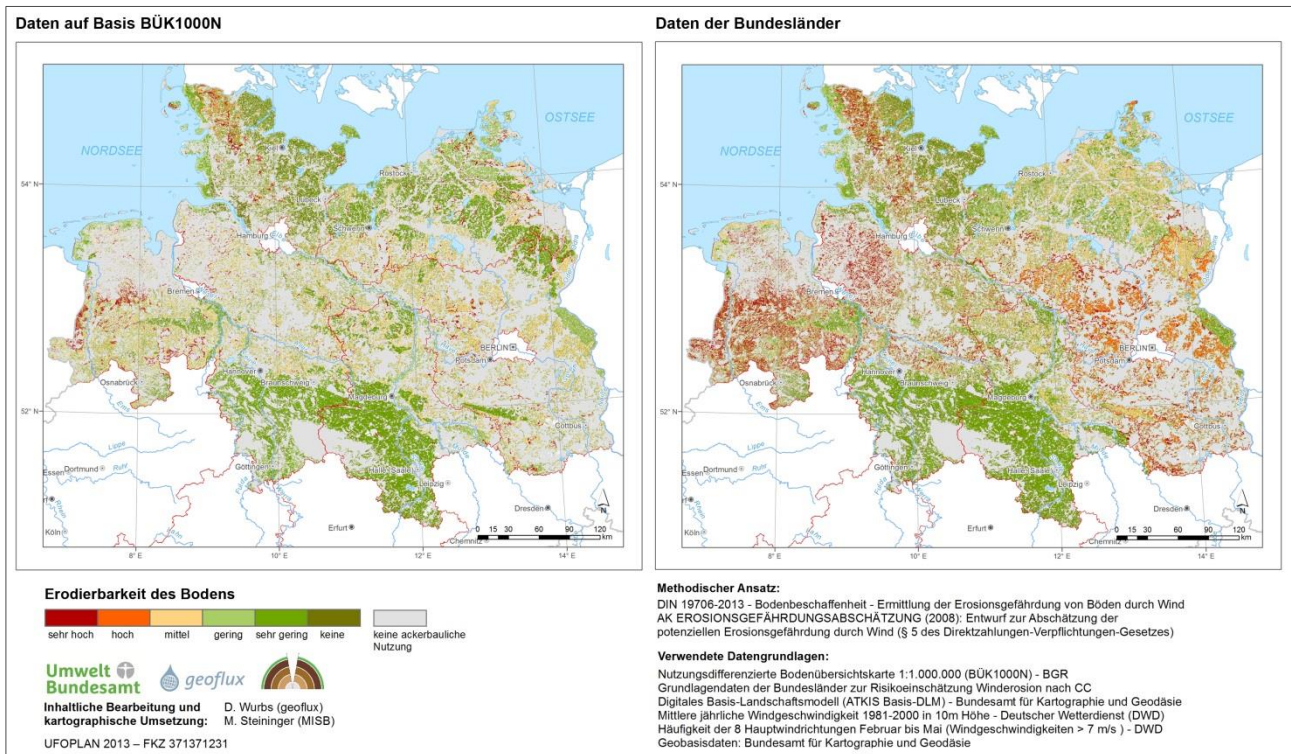
Abbildung 21: Bodenerodierbarkeit ackerbaulich genutzter Flächen – Vergleich BÜK 1000N mit Länderdaten



Neben den Daten zur Erodierbarkeit des Oberbodens wurden von den meisten Bundesländern auch die Daten zur potenziellen Erosionsgefährdung bereitgestellt. Da diese aber nicht flächendeckend vorlagen sowie auf Grundlage unterschiedlicher Eingangsdaten erstellt wurden, erfolgte die Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung unter Verwendung der im Projekt bereits erarbeiteten einheitlichen Datenbasis zur Windgeschwindigkeit und zur Schutzwirkung von Windhindernissen. Auch bei der potenziellen Erosionsgefährdung prägen sich die höheren Gefährdungsstufen der Länderdaten durch (Abb. 22). Allerdings ist die alleinige Nutzung der Länderdaten für eine bundesweit einheitliche Bewertung der Bodenerodierbarkeit aus folgenden Gründen nur eingeschränkt möglich:

- ▶ Keine bundesweite Datenverfügbarkeit
- ▶ Unterschiedliche Daten-, Maßstabs- und Bewertungsgrundlagen in den Bundesländern, woraus heterogene Übergänge („Sprünge“) an den Ländergrenzen resultieren können.

Abbildung 22: Potenzielle Erosionsgefährdung ackerbaulich genutzter Flächen – Vergleich BÜK1000N mit Länderdaten



3.5.2 Festlegung repräsentativer Landschaftsausschnitte (Modellgebiete) und Klimastationen

Auf Grundlage der auf Basis der Länderdaten erarbeiteten Karten zur potenziellen Erosionsgefährdung erfolgte die Festlegung von Landschaftsausschnitten in den ausgewählten Bundesländern, welche als Modellgebiete für die semiquantitative Modellierung unter Berücksichtigung klimabedingter Änderungen dienen sollten. Die Auswahl der Gebiete erfolgte nach folgenden Kriterien:

- ▶ **Anteil Ackerland:** > 50 % innerhalb des Landschaftsausschnittes
- ▶ **Gesamtfläche landwirtschaftlicher Nutzung:** ca. 400 bis 3.000 ha
- ▶ **Dominierende Gefährdungsstufe:** sehr hoch, hoch oder mittel
- ▶ **Heterogenität:** Innerhalb der Modellgebiete treten neben der dominierenden Gefährdungsstufe weitere Gefährdungsstufen mit geringeren Anteilen auf.
- ▶ **Häufigkeit der mittleren Gefährdungsstufe:** je Bundesland mindestens zwei verschiedene Gefährdungsstufen
- ▶ **Verfügbarkeit von Klimadaten:** Für die semiquantitative Modellierung ist die Verfügbarkeit von Klimadaten, insbesondere zum Wind, an repräsentativen Klimastationen erforderlich.

Abbildung 23 und Tabelle 7 geben einen Überblick über die Lage der Modellgebiete sowie deren Gesamtfläche, dominante Gefährdungsstufe und Anteile weiterer Stufen der potenziellen Erosionsgefährdung. Auf die Zuordnung der Klimastationen wird in Kapitel 4.2 eingegangen.

Abbildung 23: Lage und Gefährdungseinstufung der Modellgebiete



Tabelle 7: Charakterisierung der festgelegten Landschaftsausschnitte

Gebiet/ Bundesland	Naturraum	Fläche [ha]	Potenzielle Gefährdung	Flächenanteil der Stufen der potenziellen Erosionsgefährdung [%]					
				0	1	2	3	4	5
Schleswig-Holstein (1)	Bredstedt-Husumer Geest	587	Sehr hoch	1,5	12,4	6,6	11,7	19,5	48,3
Schleswig-Holstein (2)	Dithmarscher Marsch	887	Mittel	2,4	1,8	37,2	48,8	0,5	9,3
Schleswig-Holstein (3)	Angeln	367	Mittel	22,4	13,1	16,5	26,2	16,6	5,2
Niedersachsen (1)	Ostfriesische Seemarschen	766	Mittel	2,8	2,6	25,5	67,4	0,8	1,0
Niedersachsen (2)	Burgdorf-Peiner Geestplatten	1.516	Sehr hoch	7,4	9,5	16,4	25,7	7,6	33,5
Niedersachsen (3)	Wesermündung/Geest	1.740	Sehr hoch	0,0	8,5	7,4	7,4	14,6	62,0
Mecklenburg-Vorpommern (1)	Nordmecklenburgische Lehmplatten	936	Sehr hoch	7,6	11,2	18,7	16,9	8,2	37,4
Mecklenburg-Vorpommern (2)	Höhen und Binnenboden von Nordrügen	1.109	Hoch	4,4	3,4	6,8	6,0	55,8	23,6
Mecklenburg-Vorpommern (3)	Rostock-Gelbensander Heide/ Unteres Warnowgebiet	2.824	Mittel	10,0	7,9	15,1	50,9	3,7	12,5
Brandenburg (1)	Elbe-Elster-Tiefland	925	Sehr hoch	7,4	5,9	4,8	8,4	14,7	58,8
Brandenburg (2)	Uckermärkisches Hügelland mit Uecker- und Randowtiefland	1.098	Mittel	13,7	7,5	11,3	51,2	14,3	2,1
Brandenburg (3)	Beeskower Platte	1.750	Hoch	17,6	10,9	13,9	14,4	38,6	4,5
Sachsen-Anhalt (1)	Elbe-Elster-Tiefland	900	Sehr hoch	4,4	11,1	6,8	16,2	16,7	44,8
Sachsen-Anhalt (2)	Drömling	787	Sehr hoch	6,7	8,8	8,3	16,7	8,0	51,5
Sachsen-Anhalt (3)	Zerbster Land mit Leitzkauer Höhen	1.254	Mittel	7,6	22,2	12,6	56,4	0,5	0,7

4 Prognose der Gefährdungssituation bis zum Jahr 2100

4.1 Modellansatz

Für die Bewertung der zukünftigen Erosionsgefährdung durch Wind unter Einbeziehung regionaler Klimaszenarien sind neben Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeit auch die Entwicklung der zukünftigen Starkwindhäufigkeit und der Oberbodenfeuchte zu berücksichtigen. Da der Ansatz nach DIN 19706 (DIN 2013) ausschließlich die Windgeschwindigkeit als Klimasignal ausweist, können mit dem DIN-Verfahren nur sehr bedingt Prognosen der Gefährdungssituation getroffen werden. Um dennoch großräumige Tendenzen zu erkennen, die Aussagen zur möglichen Entwicklung der Erosionsgefährdung ermöglichen, wurde ein **genesteter Modellansatz** gewählt. Gemäß der in Kapitel 3.5 beschriebenen Vorgehensweise wurden auf Grundlage der Ergebnisse der DIN-Modellierung unter Verwendung kleinmaßstäbig vorliegender länderbezogener Daten zur Winderosionsgefährdung 15 repräsentative Landschaftsausschnitte als Modellgebiete festgelegt. Innerhalb dieser erfolgte für den groß- bis mittelmaßstäbigen Bereich die Bewertung der natürlichen und, unter Einbeziehung von Szenarienannahmen (vgl. Kap. 4.5), der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung. Die Modellierungen wurden unter Verwendung des semiquantitativen Modellansatzes der RWEQ sowohl für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 als auch für drei Szenarienzeiträume bis 2100 durchgeführt (Kap. 4.4). Die in Kapitel 2.2 vorgenommene Sachstandsanalyse zu Winderosionsmodellen hat ergeben, dass das RWEQ-Modell geeignet ist, um natürliche und bedeckungsabhängige Winderosionsgefährdungen quantifizieren und Aussagen für die zukünftige Erosionsgefährdung ableiten zu können.

Grundgedanke des genesteten Modellansatzes ist, aus den Ergebnissen für repräsentative Modellgebiete Aussagen zu möglichen klimabedingten Tendenzen der zukünftigen Winderosionsgefährdung abzuleiten, um diese auf größere Landschaftsräume übertragen zu können.

4.2 Auswahl von Klima- und Emissionsszenarien und Klimadatenaufbereitung

Die Auswahl eines oder mehrerer regionaler Klimamodelle orientiert sich vorwiegend an deren Eignung für die Modellierung mit dem RWEQ-Modell. Die räumliche Auflösung der Modelle muss der Maßstabebene der Modellgebiete entsprechen und die verfügbaren Klimaparameter modellgestützte Aussagen zur zukünftigen Winderosionsgefährdung zulassen.

Die Recherche geeigneter Klimamodelle fokussierte zunächst auf die Ensembleberechnungen, welche durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) im Deutschen Klimaatlas publiziert wurden (DWD 2011). Für die Zukunftssimulationen verschiedener Zeiträume bis 2100 liegen die Ergebnisse für mehrere Emissionsszenarien (SRES A1B, RCP4.5, RCP6, RCP8.5) vor. Diese sind als Ensemble aus bis zu 21 regionalen Klimamodellen verfügbar. Da diese Vielzahl von Modellergebnissen nur statistisch wiedergegeben werden kann, liegen Karten des 85., 50. und des 15. Perzentils der Ensembleergebnisse vor. Für die Modellierung mit RWEQ sind nicht nur Mittelwerte, sondern auch der innerjährliche Verlauf der Klimaparameter relevant, sodass zeitliche Auflösungen von mindestens einem Tag bis höchstens einen Monat erforderlich sind. Die im Klimaatlas veröffentlichten Ensemblemodellergebnisse liegen nicht für alle erosionsrelevanten Klimaparameter in der entsprechenden Zeitschrittweite vor. Aus diesem Grund konnten die Ensembledaten, welche zweifelsohne den Schwankungsbereich zukünftiger klimatischer Entwicklungen gut abbilden würden, keine Verwendung finden.

Für die Modellierung wurden die Ergebnisse der Modellläufe des regionalen Klimamodells COSMO-CLM genutzt (Hollweg u.a. 2008). Zur Abschätzung des Einflusses der internen Variabilität des Modellsystems auf die simulierten Klimaänderungen wurde die Klimaentwicklung für einen vorgegebenen Verlauf der Treibhausgasemissionen bei diesem Regionalmodell mehrfach gerechnet. Die Modellergebnisse sind Teil des Regionalen bzw. des Norddeutschen Klimaatlas (Meinke und Gerstner 2009; Norddeutsches Klimabüro 2009) und derzeit gültige Entscheidungsgrundlage für Handlungsempfehlungen hinsichtlich Anpassung und Vulnerabilität. In Hinblick auf den vorgegebenen Prognosezeit-

raum (bis 2100), die erforderliche Zeitschrittweite (mindestens 1 Tag) sowie Parameterbedarf und räumliche Auflösung entspricht das Regionalmodell COSMO-CLM (CCLM) den Anforderungen des RWEQ-Modells.

Die Daten der neuesten RCP-Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways) lagen im Verlauf der Projektbearbeitung noch nicht vollständig vor. Allerdings zeigen vorliegende Vergleichsberechnungen zwischen Klimamodellläufen der RCP- und der SRES A1B-Emissionsszenarien eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der Trends für Wind, Temperatur und Niederschlag (vgl. Jacob et al. 2014). Insofern lassen sich unter Verwendung der A1B-Szenariendaten vergleichbare Ergebnisse für erosionsrelevante Fragestellungen erwarten.

Basierend auf den Emissionsszenarien SRES A1B erfolgt der Antrieb mit dem Globalmodell ECHAM5. Das Szenarium beinhaltet globale Annahmen für ein sehr schnelles Wirtschaftswachstum, eine ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen sowie den Einsatz neuer und effizienter Technologien. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird von einer Zunahme der Weltbevölkerung ausgegangen, deren Zahl bis zum Jahr 2100 wieder rückläufig sein wird. In Bezug auf die SRES-Szenarien wurde das A1B-Emissionsszenarium in der Vergangenheit aufgrund der am realistischsten angesehenen Wiedergabe der zukünftigen Entwicklungen häufig eingesetzt.

Die vorliegenden Klimamodelldaten sind über die Datenbank CERA (Climate and Environmental Retrieval and Archive) des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) verfügbar. Die Daten wurden in das verwendete Koordinatensystem überführt und entsprechend der Modellanforderungen aufbereitet. Folgende Kennwerte beschreiben zusammenfassend die verwendeten Klimaszenariendaten:

- ▶ Verwendetes Emissionsszenarium: A1B (Lauf 1 und 2)
- ▶ Klimaparameter (je Tag): Mittlere Windgeschwindigkeit Tag [m/s]; Mittelwert der maximalen Stundenwerte der Windgeschwindigkeit [m/s]; Niederschlag [mm]; Lufttemperatur [K]; Sonnenscheindauer (Stunden)
- ▶ Zeitperioden: 1971-2000 (Kontrolllauf); 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (Szenarienzeiträume)
- ▶ Zeitschrittweite: 1 Tag
- ▶ Raumauflösung: $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ Rasterdatensatz

Im Vorfeld der Aufbereitung der Klimaszenariendaten erfolgte die Recherche und Aufbereitung von **aktuellen Klimadaten** repräsentativer Stationen im Bereich der festgelegten Modellgebiete (vgl. Kap. 3.5.2). Unter Verwendung der aktuellen Klimadaten erfolgte die Anwendung eines Testlaufes des RWEQ-Modells. Zusätzlich dienten die Stationswerte einer ersten Bewertung zukünftiger Änderungen der Erosionsgefährdung nach dem Ansatz der DIN 19706 (siehe Kap. 4.3).

Insgesamt wurden aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) 13 Stationen für die 15 Modellgebiete ausgewählt und die Klimaparameter Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], Lufttemperatur [$^\circ\text{C}$], Sonnenscheindauer [h] und Niederschlag auf Tageswertbasis für die Periode 1971-2000 aufbereitet. Einen Überblick über die räumliche Lage der Stationen und ihre Zuordnung zu den Modellgebieten gibt Abbildung 24. Einzelne Stationen weisen Datenlücken auf oder einen späteren Beginn der Aufzeichnungen als 1971 auf. Hierzu gibt Tabelle 8 einen Überblick. Für die Szenarienanalyse wurden aus dem Datensatz der COSMO-CLM-Daten die den Klimastationen am nächsten gelegenen vier Rasterzellen ausgewählt (siehe Abbildung 24). Für diese Rasterzellen erfolgte die Aufbereitung der oben aufgeführten Klimaszenariendaten. Die Prognose der zukünftigen Gefährdungssituation erfolgte durch den Vergleich der Modellergebnisse unter Einbeziehung der Klimaszenariendaten für den Zeitraum 2011 bis 2100 mit den Ergebnissen des Klimakontrolllaufes.

Abbildung 24: Ausgewählte Klimastationen und CCLM-Rasterzellen

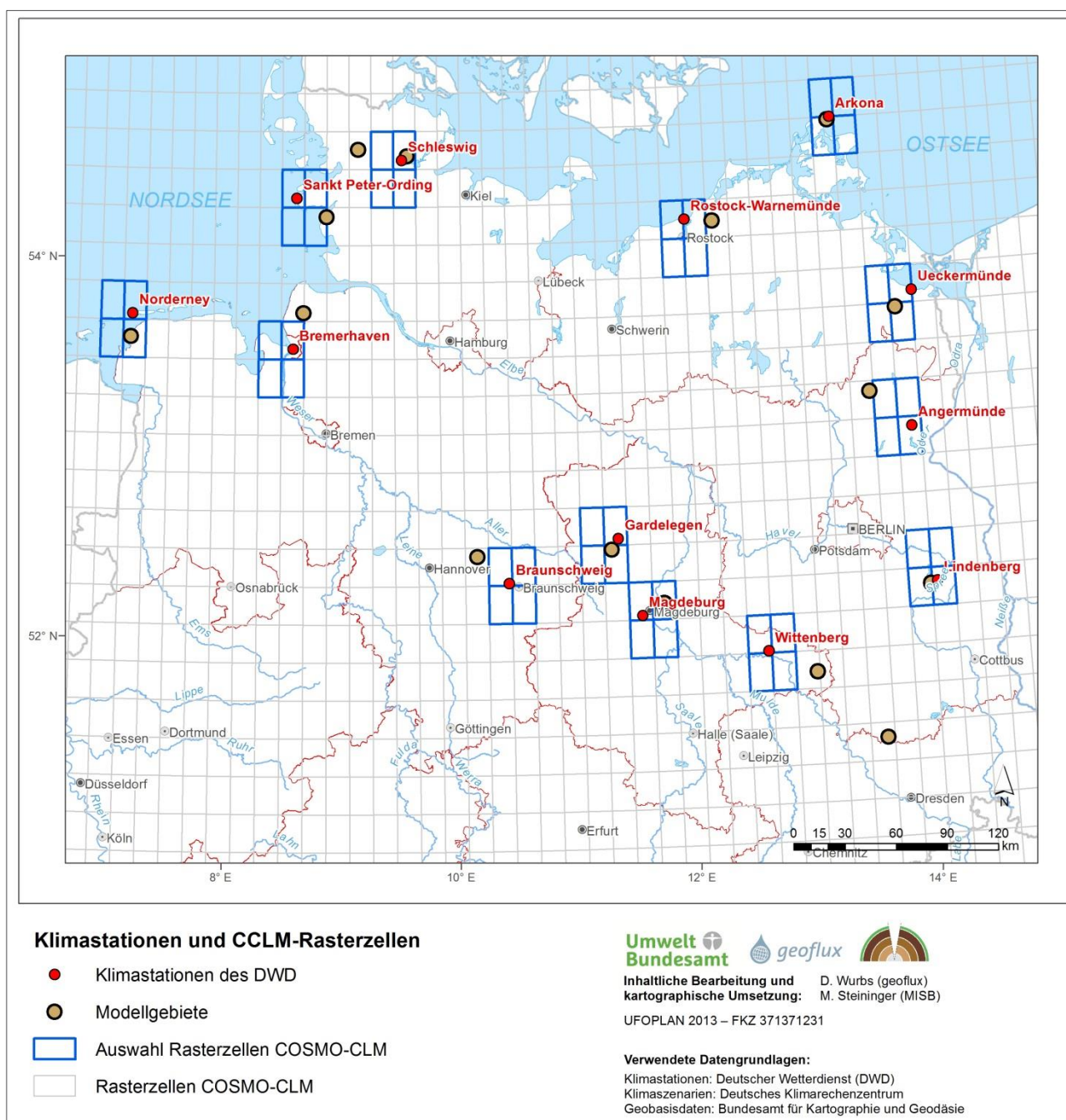


Tabelle 8 zeigt den Vergleich statistischer Kennwerte der mittleren Windgeschwindigkeit für die Klimastationen und die zugehörigen CCLM-Rasterzellen für die Zeitreihe 1971 bis 2000. Eine Auswertung von Starkwindparametern erfolgte nicht, da diese nicht im DWD-Datensatz enthalten sind. Der Datenvergleich verdeutlicht, dass die statistischen Kennwerte der Messdaten in ihrer Größenordnung durch die Werte der zugeordneten Rasterzellen des Klimamodells wiedergegeben werden. Abweichungen lassen sich vor allem durch den unterschiedlichen Raumbezug erklären. Während die Rasterzellen stärker die räumliche Heterogenität innerhalb ihres Gültigkeitsbereiches abdecken, sind die Messwerte punktuelle Datenaufnahmen mit entsprechend geringerer räumlicher Repräsentativität. Abbildung 25 zeigt, dass die Daten des CCLM-Kontrolllaufes im Mittel über den gemessenen Stationswerten liegen.

Tabelle 8: Statistische Kennwerte zur mittleren Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] für die Messstationen und die zugehörigen CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)

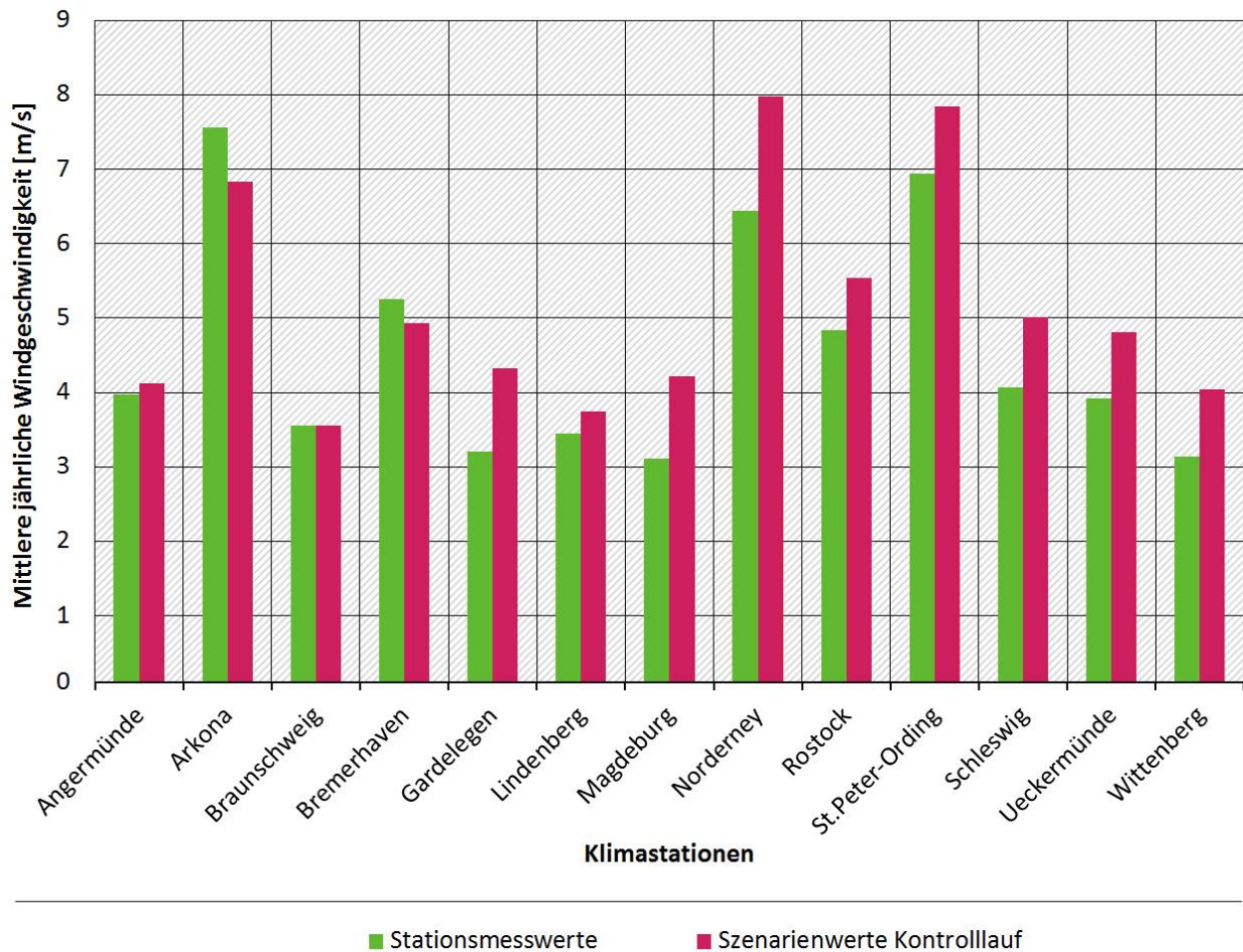
Bezugsstation/ CCLM-Rasterzelle	Stationswerte 1971-2000				Szenarienwerte Kontrolllauf 1971-2000				R
	MIT	MIN	MAX	STABW	MIT	MIN	MAX	STABW	
Schleswig-Holstein									
St. Peter-Ording ⁽¹⁾	6,9	6,1	7,8	0,5	7,8	6,0	9,8	1,3	0,87
Schleswig	4,1	3,5	4,6	0,4	5,0	4,7	5,6	0,3	0,73
Niedersachsen									
Braunschweig	3,6	2,9	4,2	0,5	3,6	4,0	4,9	0,3	0,69
Bremerhaven	5,3	4,7	5,9	0,4	4,9	4,5	5,5	0,3	0,74
Norderney	6,4	6,0	7,0	0,4	8,0	6,1	9,7	1,2	0,82
Mecklenburg-Vorpommern									
Arkona ⁽²⁾	7,6	6,2	9,0	1,0	6,8	5,7	8,1	0,8	0,78
Rostock-Warnemünde	4,8	4,1	5,5	0,4	5,5	4,6	6,4	0,6	0,76
Ueckermünde ⁽³⁾	3,9	3,2	4,8	0,5	4,8	4,2	5,5	0,4	0,71
Brandenburg									
Angermünde ⁽⁴⁾	4,0	3,3	4,7	0,5	4,1	3,9	4,5	0,2	0,73
Lindenberg	3,4	2,9	4,1	0,5	3,8	3,5	4,1	0,2	0,81
Sachsen-Anhalt									
Gardelegen ⁽⁵⁾	3,2	2,5	3,9	0,5	4,3	3,9	4,7	0,2	0,66
Magdeburg	3,1	2,6	3,7	0,4	0,0	1,3	9,8	2,5	0,50
Wittenberg ⁽⁶⁾	3,1	2,5	3,7	0,4	4,0	3,8	4,4	0,2	0,63

Erläuterung: MIT ... Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; MIN ... Minimale monatliche Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; MAX ... Maximale monatliche Windgeschwindigkeit [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; STABW ... Standardabweichung der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; R ... Korrelationskoeffizient zwischen mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten der gemessenen Stationswerte und der Szenarienwerte des Kontrolllaufes 1971-2000

1) Lücken in der Aufzeichnung 1981-1984; 2) Messreihe 1973-2000; 3) ... Messreihe 1982-2000; 4) Messreihe 1978-2000; 5) Lücken in der Aufzeichnung 1978-1980; 6) Lücken in der Aufzeichnung 1974-1976

Abbildung 25: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Klimamessstationen und zugehörige CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)

Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Klimamessstationen und zugehörige CCLM-Rasterzellen (Reihe 1971 bis 2000)



Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD); Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

4.3 Bewertung zukünftiger Änderungen nach Ansatz der DIN 19706

Der methodische Ansatz der DIN 19706 (DIN 2013) berücksichtigt ausschließlich die Windgeschwindigkeit als klimabedingten Parameter. Um mögliche Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit und deren Auswirkung auf die Klassifizierung der Winderosionsgefährdung analysieren zu können, wurde für die drei Szenarienzeiträume und den Modellkontrolllauf die mittlere Windgeschwindigkeit ermittelt und entsprechend DIN-Klassifizierung die Winderosität bestimmt. Die Auswertung erfolgte ausschließlich für die den Modellgebieten zugeordneten Rasterzellen des CCLM-Modells. Tabelle 9 zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit an den Bezugsstationen bzw. CCLM-Rasterzellen für den Referenzzeitraum 1971-2000 sowie die abgeleiteten Veränderungen in den Szenarienzeiträumen. Es wird deutlich, dass es durchweg zu einem nur geringen Anstieg der Windgeschwindigkeit kommt. Dieser hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Stufen der Winderosität und somit die Einstufung der natürlichen Erosionsgefährdung. Nur an Stationen, deren mittlere Windgeschwindigkeit den Übergangsbereich zwischen zwei Erosivitätsstufen charakterisiert, kann es zu einer veränderten Ein-

stufung der Winderosivität gegenüber dem Referenzzeitraum kommen. Vielmehr wird deutlich, dass für eine Prognose der Winderosionsgefährdung erweiterte Modellansätze unter Einbeziehung zusätzlicher Klimakennwerte erforderlich sind (Kap. 4.5).

Tabelle 9: Windgeschwindigkeiten und Stufen der Winderosivität für die Klimaszenarien an den Bezugsstationen/CCLM-Rasterzellen

Bezugsstation/ CCLM-Rasterzelle	Mittlere jährliche Windgeschwin- digkeit 1971-2000 [m*s ⁻¹]	Veränderung gegen- über 1971-2000 [%]			Stufe der Winderosivität			
		2011 2040	2041 2070	2071 2100	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein								
St. Peter-Ording	7,9	+ 0,2	+ 0,9	+ 1,4	5	5	5	5
Schleswig	5,0	+ 0,0	+ 0,5	+ 1,4	3	3	3	4
Niedersachsen								
Braunschweig	4,5	+ 1,4	+ 0,9	+ 1,4	3	3	3	3
Bremerhaven	4,9	+ 0,7	+ 0,9	+ 1,3	3	3	3	3
Norderney	8,0	+ 0,7	+ 0,9	+ 0,9	5	5	5	5
Mecklenburg-Vorpommern								
Arkona	6,8	+ 0,2	+ 0,9	+ 2,4	5	5	5	5
Rostock-Warnemünde	5,5	+ 0,1	+ 0,9	+ 2,1	4	4	4	4
Ueckermünde	4,8	+ 0,2	+ 0,7	+ 2,0	3	3	3	3
Brandenburg								
Angermünde	4,1	+ 0,5	+ 0,5	+ 1,5	3	3	3	3
Lindenberg	3,8	+ 0,6	+ 0,2	+ 1,0	2	2	2	2
Sachsen-Anhalt								
Gardelegen	4,3	+ 0,8	+ 0,6	+ 1,5	3	3	3	3
Magdeburg	4,2	+ 0,7	+ 0,4	+ 1,2	3	3	3	3
Wittenberg	4,0	+ 0,8	+ 0,2	+ 0,8	2	3	2	3

Quelle: Regionales Klimamodell COSMO-CLM (Emissionsszenarium A1B); Rot markierte Felder kennzeichnen Erhöhung der Stufe der Winderosivität.

4.4 Semidynamische Modellierung und Prognose der natürlichen Erosionsgefährdung bis 2100

Modellparametrisierung und Datenausgabe

Für jedes der 15 Modellgebiete erfolgte die Datenaufbereitung und Modellparametrisierung für das RWEQ-Modell entsprechend des in Kapitel 2.2 beschriebenen Datenbedarfs. Die **bodenkundlichen Standortparameter** (Bodenart, Kalkgehalt, Humusgehalt) wurden aus den Kartenblättern der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) und der Beschreibung der Legendeneinheiten expertenbasiert bestimmt und daraus die entsprechenden Parameter ‚Anteil erodierbarer Bodenfraktionen‘, ‚Oberbodenkrustenfaktor‘ und ‚Rauigkeitsfaktor‘ abgeleitet.

Der **Wetterfaktor** der RWEQ erfordert die Bereitstellung von Daten zur mittleren Windgeschwindigkeit und zur Windgeschwindigkeit oberhalb eines definierten Schwellenwertes [jeweils in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Diese Werte sind als Tageswerte eines mittleren Jahres (Durchschnittsjahr), abgeleitet aus allen Tageswerten der zu betrachtenden Zeitreihe, bereitzustellen. Die Datenbereitstellung und -aufbereitung erfolgte aus den Klimaszenariendaten der mittleren Windgeschwindigkeit/Tag [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] und des Mittelwertes der maximalen Stundenwerte der Windgeschwindigkeit/Tag [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] für den Kontrolllauf (1971-2000) sowie die drei Szenarienzeiträume (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Weiterhin wurden die Minimum- und Maximumtemperatur, die Globalstrahlung (abgeleitet aus der täglichen Sonnenscheindauer) und der Niederschlag ermittelt. Für die modellinterne Berechnung wurde die Aggregierung der Tageswerte auf Monatswerte vorgenommen.

Der **Management- bzw. Bodenbedeckungsfaktor** (COG-Faktor) wurde aus den im Rahmen der Szenarienanalysen festgelegten Fruchtartenzusammensetzungen abgeleitet (Kap. 4.5).

Die Erosionsmodellierung wurde schlag- bzw. feldblockbezogen vorgenommen. Über eine flächengewichtete Aggregierung der Ergebnisse erfolgte die Ausgabe der Ergebnisdaten für jeden Landschaftsausschnitt bzw. jedes Modellgebiet. Berechnet wurde die langjährige **natürliche Erosionsgefährdung** auf Grundlage der Boden- und Klimaeigenschaften und die **fruchtartenabhängige Erosionsgefährdung** unter Verwendung definierter Fruchtartenverteilungen (vgl. Kap. 4.5) in [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$] für die Referenzperiode 1971-2000 und die drei Szenarienzeiträume.

Prognose der natürlichen Erosionsgefährdung bis 2100

Auf Grundlage der Ergebnisse der Winderosionsmodellierung mit dem Modell RWEQ für die Klimaszenarienzeiträume zeigen sich für die Modellgebiete Tendenzen der zukünftigen Entwicklung der natürlichen Winderosionsgefährdung. Diese beruhen auf einem veränderten Verhalten der Starkwindentwicklung sowie der Oberbodenfeuchte (abgeleitet aus dem zeitlichen Verlauf von Niederschlag, Strahlung und Temperatur).

Gegenüber der Referenzperiode kann für die Periode 2011 bis 2040 in allen Landschaftsräumen ein Anstieg der natürlichen Erosionsgefährdung prognostiziert werden (Abbildung 26). Überdurchschnittlich fallen dabei die Zunahmen in den küstennahen Gebieten mit einem Anstieg zwischen 20 und 40 % aus. Im Binnenland Brandenburgs und Sachsen-Anhalts beträgt der Anstieg durchgehend 10 bis 20 %. In der Folgeperiode 2041 bis 2070 zeigt sich ein abnehmender Trend der natürlichen Erosionsgefährdung gegenüber dem Zeitraum 2011 bis 2040. Dennoch können gegenüber dem Referenzzeitraum weiterhin um 10 bis 20 % erhöhte Werte festgestellt werden. Ein deutlicher Anstieg der natürlichen Erosionsgefährdung tritt in der in der letzten Betrachtungsperiode von 2071 bis 2100 ein. Hier ist eine größere Heterogenität der räumlichen Verteilung festzustellen. Sowohl in den küstennahen Gebieten als auch im Binnenland zeigen Modellgebiete eine Zunahme der Gefährdung von über 20 %, teilweise von über 40 % auf.

Zu berücksichtigen ist, dass mit zunehmender zeitlicher Entfernung der Szenarienzeiträume vom Referenzzeitraum die Unsicherheit der Aussagefähigkeit der Klimamodellergebnisse zunimmt. Die Auswertung der Entwicklung der natürlichen Erosionsgefährdung lässt zunächst nur eine Bewertung mittlerer jährlicher Veränderungen zu. Die Klimaentwicklung kann hingegen innerjährliche Differenzierungen aufweisen, einhergehend mit Monaten gleichbleibender oder abnehmender Erosionsgefährdung und Zeitabschnitten mit weit überdurchschnittlichem Anstieg der Winderosionsgefahr.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zwingend zu beachten, dass die für die Klimaszenarienzeiträume erarbeiteten Prognosen nur zukünftige, klimaabhängige Tendenzen der Entwicklung der Winderosionsgefährdung in Größenordnungen darstellen. Eine detaillierte quantitative Auswertung ist

aufgrund des vereinfachten Modellansatzes und der Aussagefähigkeit der Klimaszenarienmodelle mit Unsicherheiten verbunden.

Abbildung 26: Tendenzen der zukünftigen natürlichen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten

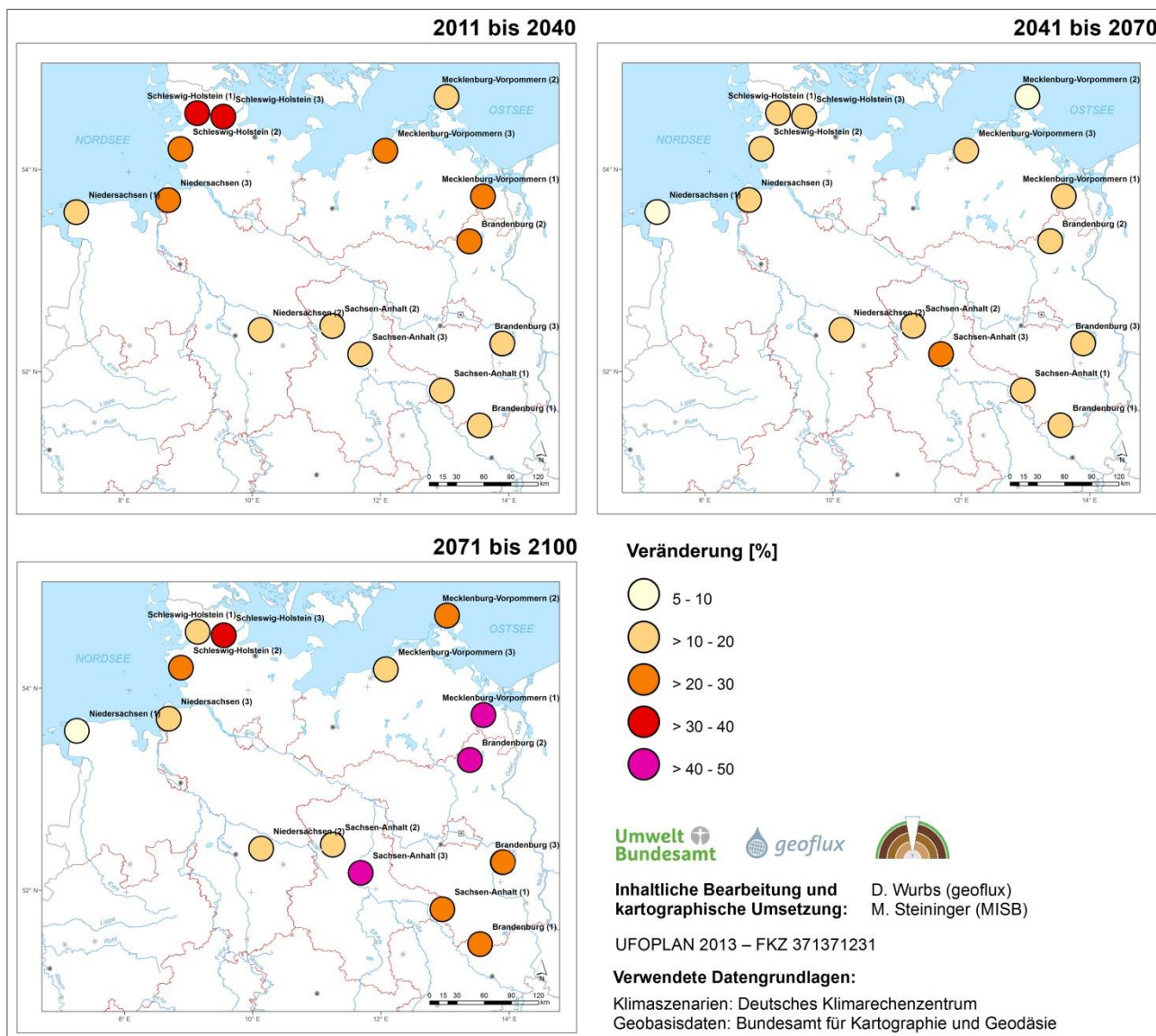


Tabelle 10 fasst die Modellergebnisse für den mittleren natürlichen Bodenabtrag in den Modellgebieten im Referenzzeitraum 1971 bis 2000 sowie die Veränderung in den Szenarienzeiträumen zusammen.

Tabelle 10: Mittlerer natürlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf

Landschaftsausschnitt/ Modellgebiet	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag [t*ha ⁻¹ *a ⁻¹]				Veränderung gegenüber 1971-2000 [%]		
	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein (1)	209	276	245	297	+32	+17	+42
Schleswig-Holstein (2)	26	33	29	34	+27	+11	+31
Schleswig-Holstein (3)	155	205	181	220	+32	+17	+42
Niedersachsen (1)	73	85	79	86	+16	+8	+18
Niedersachsen (2)	138	161	164	173	+17	+19	+25
Niedersachsen (3)	267	327	307	366	+22	+15	+37
Mecklenburg-Vorpommern (1)	392	483	449	515	+23	+14	+31
Mecklenburg-Vorpommern (2)	71	82	77	88	+17	+10	+25
Mecklenburg-Vorpommern (3)	394	480	467	536	+22	+19	+36
Brandenburg (1)	155	179	175	182	+16	+13	+18
Brandenburg (2)	71	88	82	93	+24	+16	+31
Brandenburg (3)	193	218	213	241	+13	+10	+25
Sachsen-Anhalt (1)	165	191	186	195	+16	+13	+18
Sachsen-Anhalt (2)	134	160	160	170	+19	+20	+27
Sachsen-Anhalt (3)	144	173	174	181	+20	+20	+25

4.5 Szenarienanalysen für Fruchtartenzusammensetzungen und Modellierung der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung

Treffen innerjährliche Abschnitte zunehmender natürlicher Gefährdung auf Anbauperioden geringer Bodenbedeckung ist von einer überdurchschnittlichen Zunahme der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung auszugehen. Um derartige Szenarien zu untersuchen, wurden aufbauend auf den Ergebnissen der Modellierung des natürlichen Bodenabtrages Szenarien für Fruchtartenzusammensetzungen aufgestellt und die Modellierung der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung vorgenommen. Analog der Vorgehensweise bei der Ausweisung des C-Faktors innerhalb der ABAG wurde für die Berechnung des COG-Faktors (combined crop factor) eine **Fruchtfolge** betrachtet und für diese der mittlere Wert ermittelt. Als Ausgangsdaten für die gegenwärtige Anbaustruktur wurden auf die FDZ-Daten zurückgegriffen und aus diesen für die Landschaftsausschnitte Fruchtfolgen abgeleitet (vgl. Kap. 3.3.3). Diese Fruchtfolgen wurden für die Prognosezeiträume übernommen.

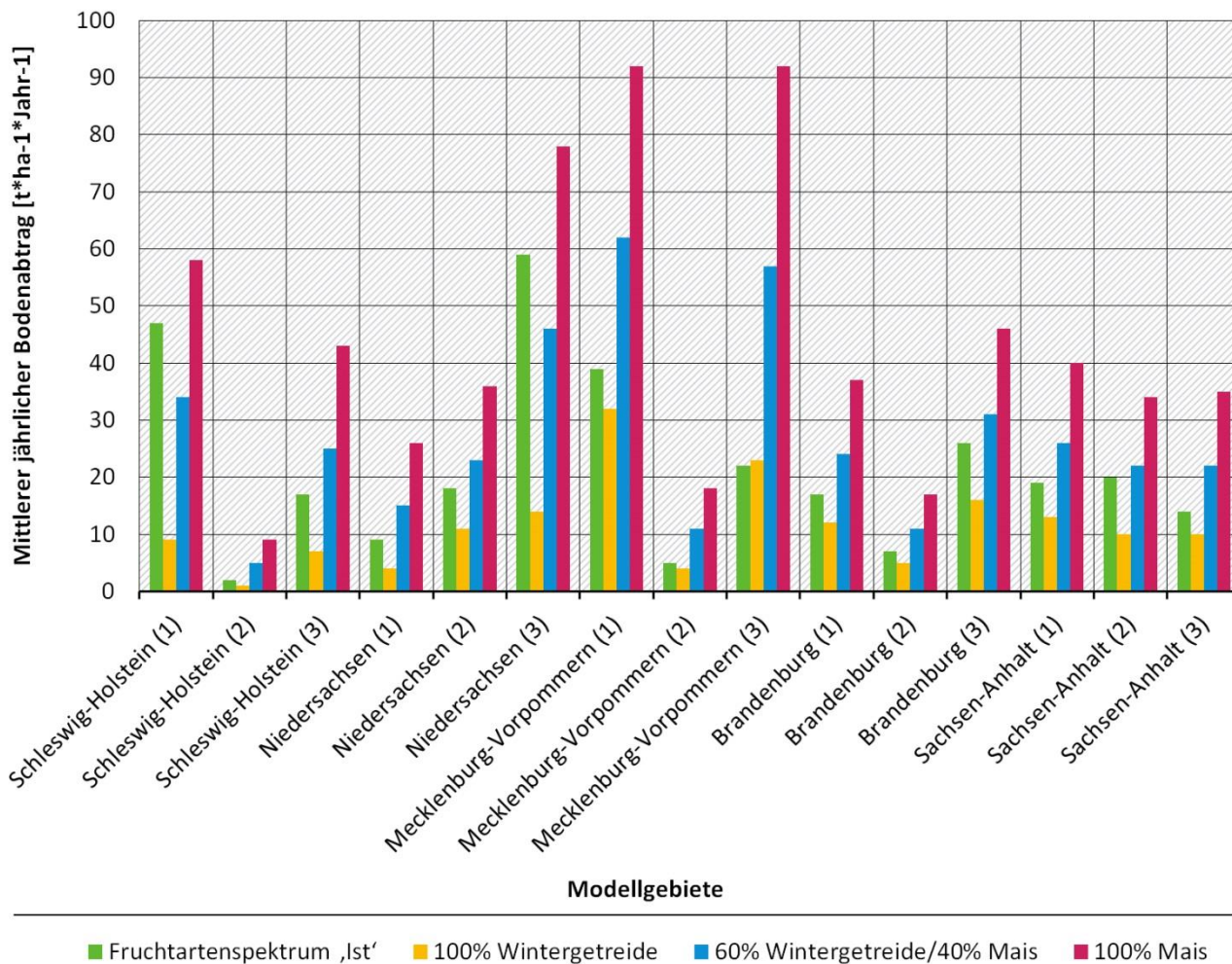
Um die Auswirkung der Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag in ihren Randbedingungen und für mittlere Verhältnisse abzubilden, wurden zusätzlich zu den „realen Fruchtfolgen“ drei Szenarien zur Abbildung möglicher Anbautrends erstellt:

1. **Möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (100% Wintergetreide):** Diese Annahme entspricht einer reinen Wintergetreide-Fruchtfolge mit einer Bodenbearbeitung unmittelbar vor der Aussaat oder die Einbindung von Zwischenfrüchten und Untersaaten in die Anbausysteme. Dieses Szenarium stellt das Optimum dar.
2. **Maisanbau (100%):** Das Szenarium ist ein fiktiver Ansatz, der nicht zur Anwendung kommt, aber die Auswirkung einer dauerhaft langen Phase ohne Bodenbedeckung abbildet. Unter Nutzungsbedingungen stellt dieses Szenarium den ungünstigsten anzunehmenden Fall (worst case) dar.
3. **Mittlere Anbauverhältnisse (60% Wintergetreide/40% Mais):** Dieses Szenarium wird abgebildet durch einen Anteil an Wintergetreide in Höhe von 60 % und einen Maisanteil von 40 %.

Die Abbildungen 27 und 28 verdeutlichen die unterschiedliche Erosionsgefährdung in den Modellgebieten in Abhängigkeit von den gewählten Szenarien für die Fruchtartenzusammensetzungen. Bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000 würde ein (fiktiver) flächendeckender Maisanbau zu maximalen Abtragsraten in allen Gebieten führen. Dieser würde aufgrund der Schutzwirkung der Bodenbedeckung zwar deutlich unterhalb der Werte für den natürlichen Bodenabtrag liegen (vgl. Tab. 10), aber dennoch ein Vielfaches der Abtragsraten des Szenariums einer möglichst ganzjährigen Bodenbedeckung mit 100 % Wintergetreide betragen. Die Differenz zwischen den Bodenabträgen des Szenariums „100 % Maisanbau“ und der derzeitigen Fruchtartenzusammensetzung (vgl. Kap. 3.3.3) ist in den Modellgebieten, die sich in Naturräumen mit einem heute hohen Maisanteil befinden (Abbildung 16), am geringsten. Dazu zählen vor allem die Regionen in Schleswig-Holstein und Niedersachsen.

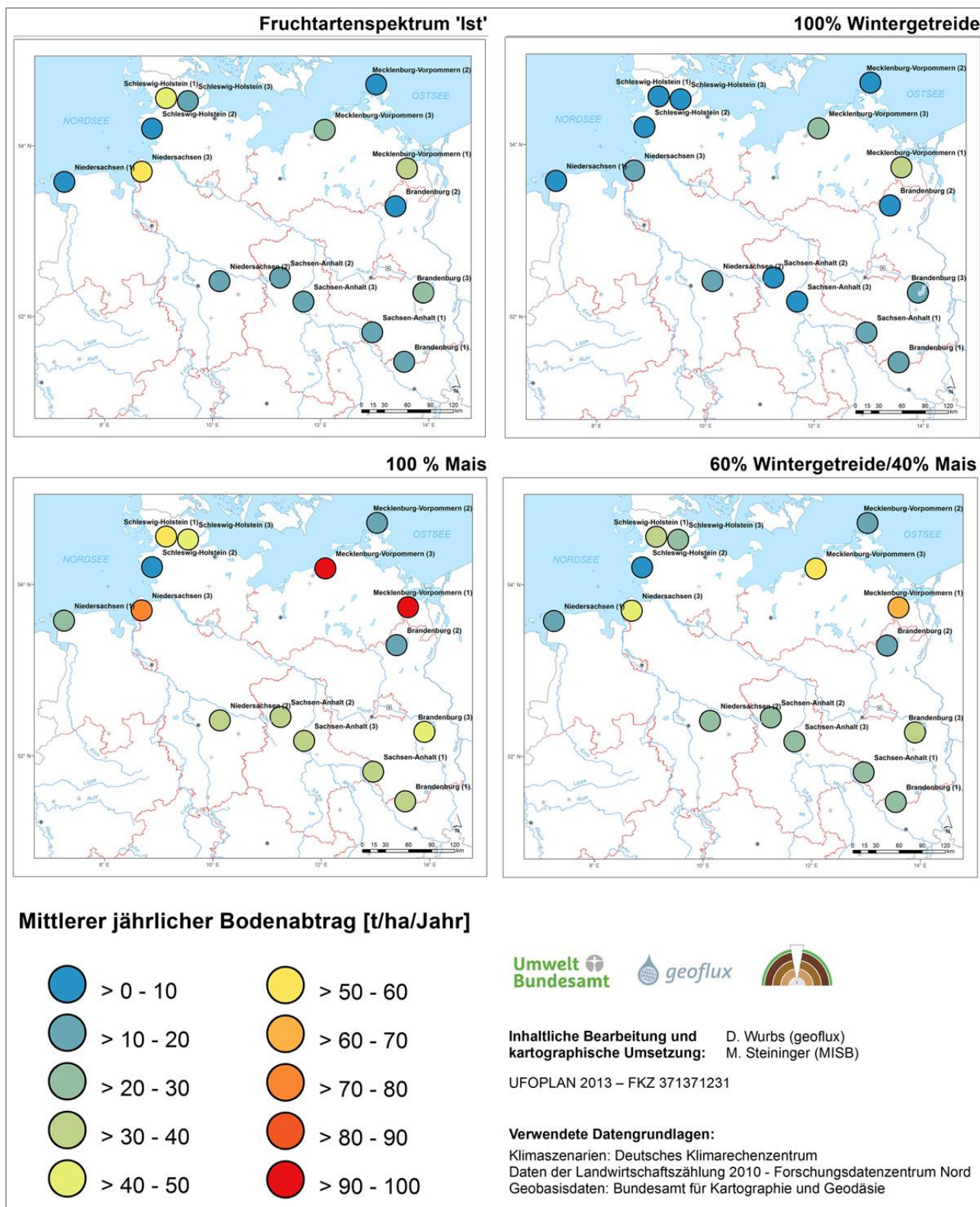
Abbildung 27: Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000

Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000



Datenquelle: Landwirtschaftszählung 2010 (FDZ Nord)

Abbildung 28: Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in den Modellgebieten (RWEQ-Ansatz) für verschiedene Fruchtartenszenarien – Referenzperiode 1971 - 2000



Die nachfolgenden Abbildungen und Tabellen zeigen die relativen Veränderungen (Tendenzen) der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten für die verschiedenen Fruchtartenzusammensetzungen bzw. -szenarien. Bezugsgröße ist jeweils der Bodenabtrag, der durch Anwendung des RWEQ-Modells für die Referenzperiode 1971 bis 2000 feldblockbezogen berechnet und für jedes Modellgebiet flächengewichtet gemittelt wurde. Zu beachten ist, dass aus großen relativen Veränderungen nicht in gleichem Maße auf den Anstieg der absoluten Erosionsgefährdung geschlossen werden kann. Hierbei ist das unterschiedliche Ausgangsniveau der Bodenabträge bei den einzelnen Fruchtarten zu berücksichtigen.

Abbildung 29 verdeutlicht, dass – je nach Anbauspektrum – die Entwicklung der fruchtartenabhängigen Winderosionsgefährdung deutlich differenzierter zu bewerten ist als die der natürlichen. Im Zeitraum 2011 bis 2040 zeigen nahezu alle Modellgebiete, sowohl im Binnenland als auch in den küstennahen Regionen, einen Anstieg von 20 bis 40 %. Dagegen sind, im Gegensatz zur natürlichen Erosionsgefährdung (vgl. Abb. 26) bis 2070 gegenüber der heutigen Periode teils rückläufige Tendenzen erkennbar. Davon betroffen sind vor allem die durch hohen Maisanteil geprägten Regionen Norddeutschlands (Abb. 32). Hier lässt sich interpretieren, dass die Zunahme der natürlichen Gefährdung vorwiegend in Monaten hoher Bedeckung erfolgt und somit kaum wirksam ist. Dagegen ist in Zeiträumen geringer Bodenbedeckung von einem leichten Rückgang der natürlichen Gefährdung auszugehen. Diese Tendenz kehrt sich in der Klimaperiode 2071-2100 weitestgehend wieder um. Abgesehen von Ausschnitten in Nordwestdeutschland nimmt in großen Teilen der betrachteten Bundesländer die fruchtartenabhängige Erosionsgefährdung erneut zu.

Abbildung 29: Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Fruchtartenzusammensetzung - Ist“

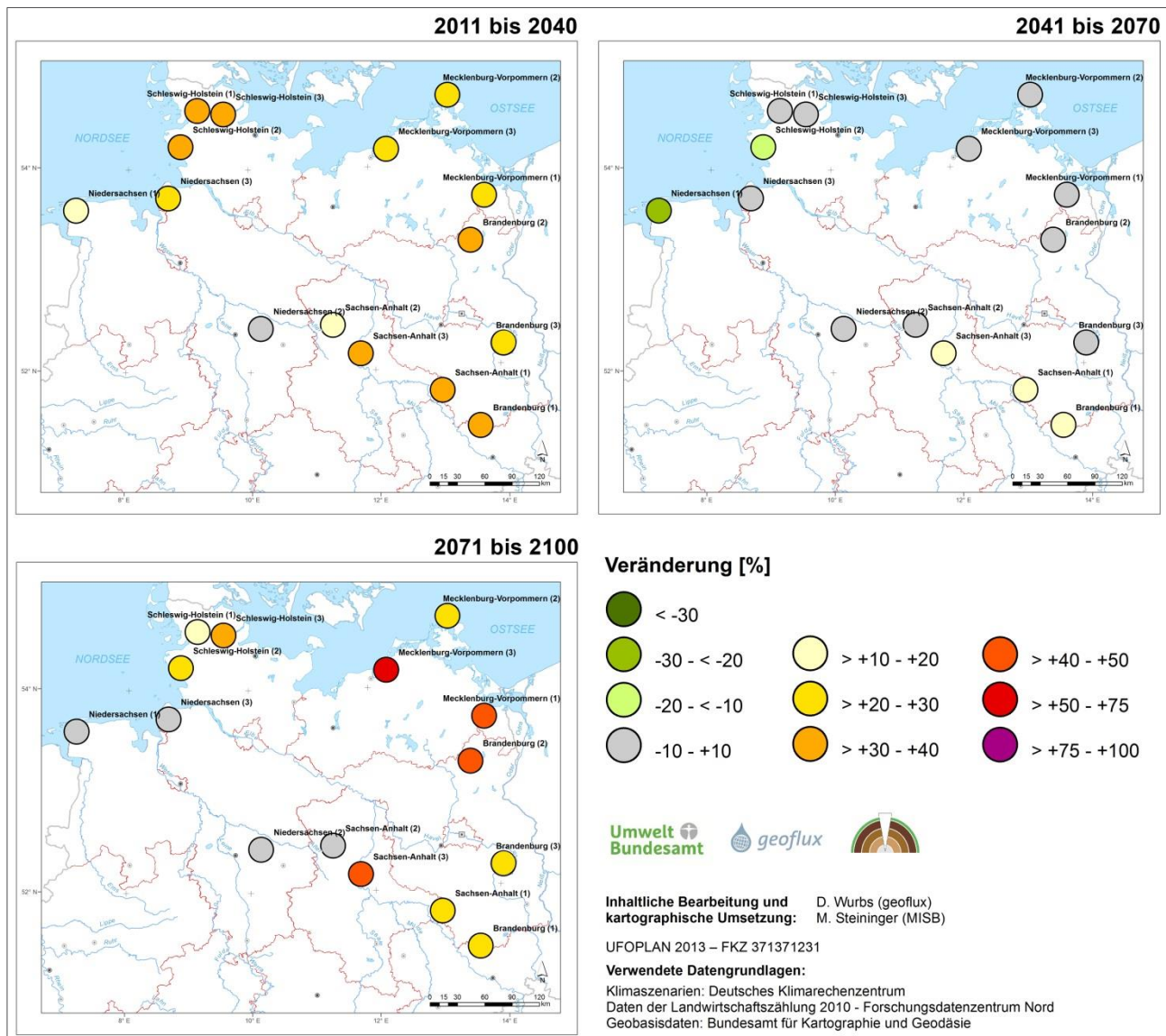


Tabelle 11: Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Fruchtartenzusammensetzung - Ist“

Landschaftsausschnitt/ Modellgebiet	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag [t*ha ⁻¹ *a ⁻¹]				Veränderung gegenüber 1971-2000 [%]		
	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein (1)	47	63	47	52	+34	-1	+10
Schleswig-Holstein (2)	2	3	2	3	+33	-16	+22
Schleswig-Holstein (3)	17	23	17	23	+37	-2	+34
Niedersachsen (1)	9	10	7	8	+13	-22	-3
Niedersachsen (2)	18	20	18	18	+9	+1	-0
Niedersachsen (3)	59	72	54	58	+21	-9	-3
Mecklenburg-Vorpommern (1)	39	49	42	56	+27	+7	+43
Mecklenburg-Vorpommern (2)	5	6	4	6	+29	-9	+27
Mecklenburg-Vorpommern (3)	22	27	22	37	+21	-3	+64
Brandenburg (1)	17	23	20	22	+32	+14	+27
Brandenburg (2)	7	10	7	10	+39	+4	+43
Brandenburg (3)	26	31	25	32	+21	-1	+24
Sachsen-Anhalt (1)	19	25	21	24	+32	+14	+27
Sachsen-Anhalt (2)	20	23	21	21	+16	+6	+6
Sachsen-Anhalt (3)	14	18	16	20	+33	+19	+44

Die Szenarienannahmen für eine 100%-ige Bodenbedeckung mit Wintergetreide bzw. Mais belegen nachfolgend den wechselseitigen Einfluss der innerjährlichen Veränderung der natürlichen Erosionsgefährdung, wiedergegeben durch den Wetterfaktor des RWEQ-Modells und der fruchtartenabhängigen Bodenbedeckung. Für beide Fruchtartenszenarien kann die bereits erwähnte Zunahme der Erosionsgefährdung in der Periode 2011 bis 2040 sowie die darauffolgende weitestgehend abnehmende bzw. gleichbleibende Tendenz im Zeitraum 2041 bis 2070 festgestellt werden (Abb. 31 und 32; Tabellen 12 und 13). In der Periode 2071 bis 2100 bleibt die Erosionsgefährdung beim Maisszenarium in den meisten Modellgebieten weiterhin unverändert. In Mecklenburg-Vorpommern sind Zunahmen, im Binnenland zum Teil Rückgänge zu verzeichnen. Dagegen nehmen die Bodenabträge bei 100%-iger Wintergetreidebedeckung im gleichen Zeitraum flächendeckend deutlich zu (Abb. 31). Ursache ist die innerjährliche Verschiebung des Wetterfaktors, der den klimabedingten Einfluss von Windgeschwindigkeit und Bodenfeuchte auf die Erosionsgefährdung im RWEQ-Modell beschreibt (vgl. Kap. 2.2).

Abbildung 30 zeigt exemplarisch für die drei Modellgebiete in Schleswig-Holstein den Anteil des gemittelten monatlichen Wetterfaktors am Jahreswetterfaktor für die Referenzperiode 1971 bis 2000 und den Szenarienzeitraum 2071 bis 2100. Der Anteil nimmt insbesondere in den Monaten März bis Mai, mit Schwerpunkt im Monat April, ab. Dagegen nimmt die relative Bedeutung des klimatischen Einflusses im August und vor allem im September deutlich zu. Kulturpflanzen, wie Mais, die in den Monaten März und April eine geringe und im Spätsommer vor der Ernte eine hohe Bodenbedeckung aufweisen, erreichen durch die innerjährliche Verschiebung eine bessere Schutzwirkung.

Anders ist die Situation bei den Wintergetreidearten (Winterweizen, Wintergerste). Diese Fruchtarten weisen im Frühjahr bereits eine geschlossene Bodenbedeckung auf. Dagegen lässt die Schutzwirkung nach der Ernte im Sommer nach, sodass die innerjährliche Verschiebung der Klimafaktoren in Richtung September zu einem Anstieg der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung führt. Dennoch weist der Mais weiterhin das gegenüber Wintergetreide deutlich höhere Gefährdungsrisiko auf. Bei einem weiteren Anstieg der Maisanbauflächen ist auf diesen Standorten von einer entsprechenden Erhöhung des Erosionsrisikos auszugehen.

Abbildung 30: Anteil des monatlichen Wetterfaktors am Jahreswetterfaktor – Referenzperiode 1971 – 2000 und 2071 – 2100 (Beispiel Schleswig-Holstein)

Anteil des monatlichen Wetterfaktors am Jahreswetterfaktor für Referenzzeitraum und Periode 2071-2100

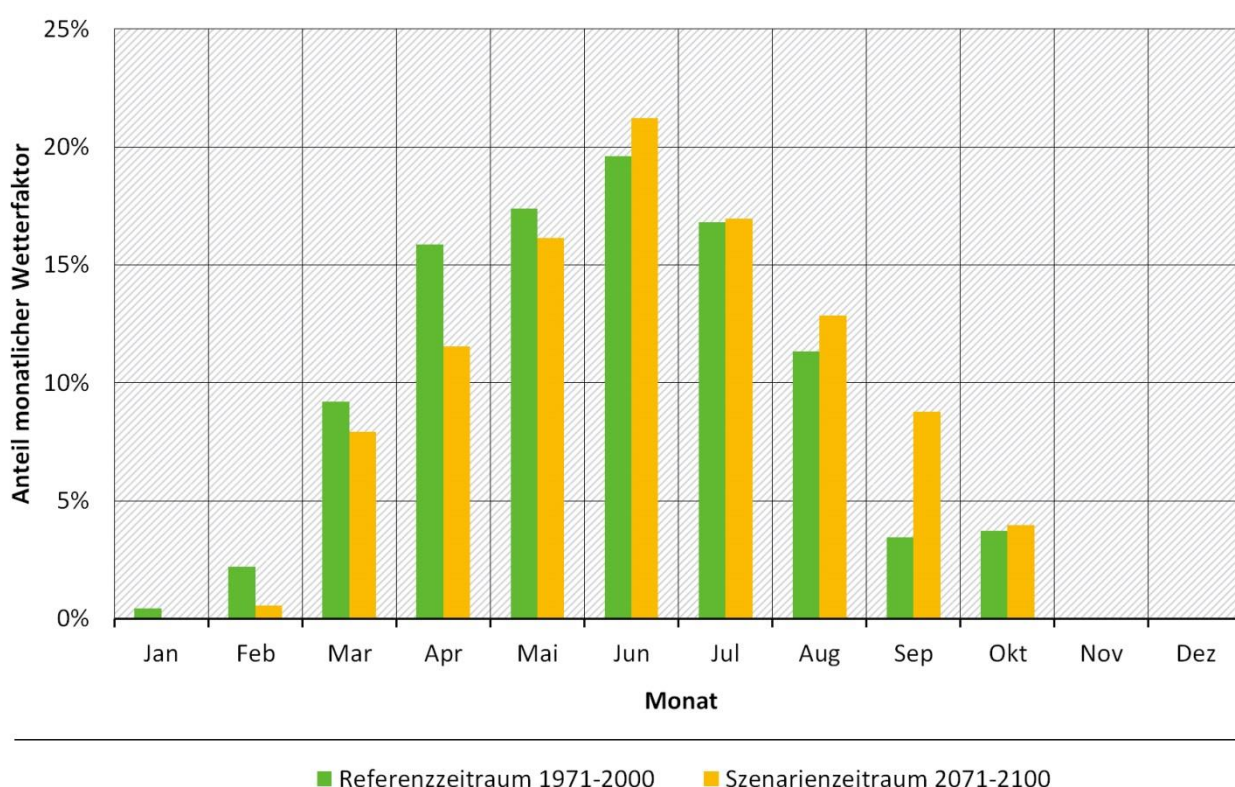


Abbildung 31: Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Ganzjährige Bodenbedeckung - Wintergetreide“

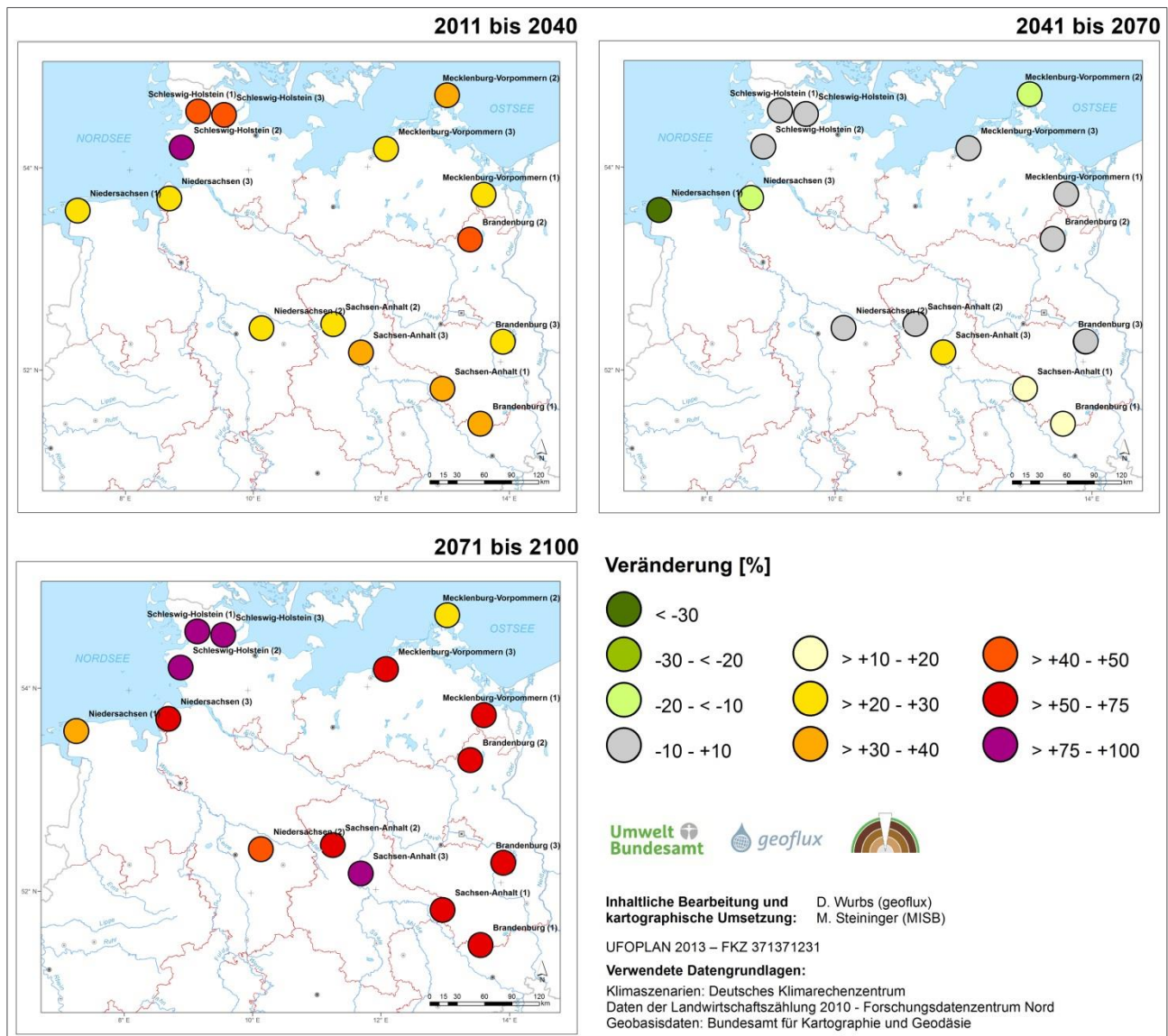


Tabelle 12: Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Ganzjährige Bodenbedeckung - Wintergetreide“

Landschaftsausschnitt/ Modellgebiet	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag [t*ha ⁻¹ *a ⁻¹]				Veränderung gegenüber 1971-2000 [%]		
	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein (1)	9	14	9	19	+48	-4	+106
Schleswig-Holstein (2)	1	2	1	2	+77	-4	+87
Schleswig-Holstein (3)	7	10	7	14	+48	-3	+106
Niedersachsen (1)	4	4	2	5	+23	-36	+35
Niedersachsen (2)	11	13	11	16	+21	+2	+48
Niedersachsen (3)	14	17	12	23	+21	-12	+66
Mecklenburg-Vorpommern (1)	32	38	32	49	+21	+3	+54
Mecklenburg-Vorpommern (2)	4	5	3	5	+32	-12	+30
Mecklenburg-Vorpommern (3)	23	28	22	37	+21	-3	+63
Brandenburg (1)	12	16	14	19	+39	+15	+59
Brandenburg (2)	5	8	6	9	+46	+4	+66
Brandenburg (3)	16	20	17	25	+26	+6	+60
Sachsen-Anhalt (1)	13	18	15	20	+40	+15	+59
Sachsen-Anhalt (2)	10	13	10	16	+24	+1	+57
Sachsen-Anhalt (3)	10	14	12	18	+40	+23	+80

Abbildung 32: Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „worst case – 100 % Maisanbau“

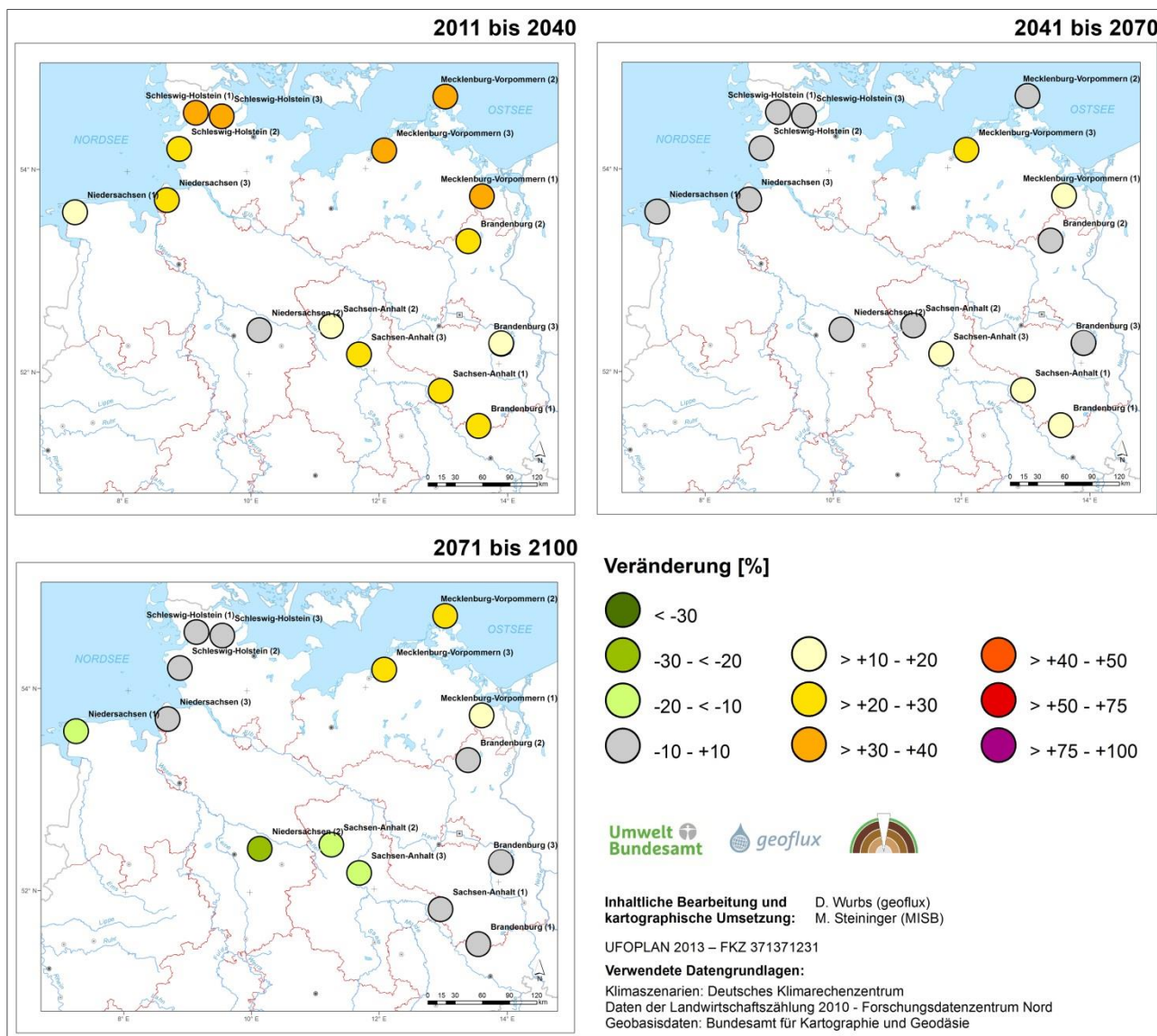


Tabelle 13: Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „worst case – 100 % Maisanbau“

Landschaftsausschnitt/ Modellgebiet	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag [t*ha ⁻¹ *a ⁻¹]				Veränderung gegenüber 1971-2000 [%]		
	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein (1)	58	78	58	61	+34	-1	+6
Schleswig-Holstein (2)	9	11	8	8	+21	-9	-3
Schleswig-Holstein (3)	43	58	43	45	+34	-1	+6
Niedersachsen (1)	26	30	24	21	+15	-7	-17
Niedersachsen (2)	36	37	37	27	+3	+4	-24
Niedersachsen (3)	78	95	72	72	+22	-8	-7
Mecklenburg-Vorpommern (1)	92	127	107	110	+37	+16	+19
Mecklenburg-Vorpommern (2)	18	23	19	23	+31	+9	+29
Mecklenburg-Vorpommern (3)	92	127	112	119	+38	+21	+29
Brandenburg (1)	37	45	42	34	+22	+13	-8
Brandenburg (2)	17	21	18	17	+23	+6	-1
Brandenburg (3)	46	53	44	44	+15	-4	-4
Sachsen-Anhalt (1)	40	49	45	36	+22	+13	-8
Sachsen-Anhalt (2)	34	38	37	27	+12	+10	-19
Sachsen-Anhalt (3)	35	42	41	30	+21	+18	-14

Abbildung 33: Tendenzen der fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung in den Modellgebieten - Szenarium „Mittlere Anbauverhältnisse – 60 % Wintergetreide, 40 % Maisanbau“

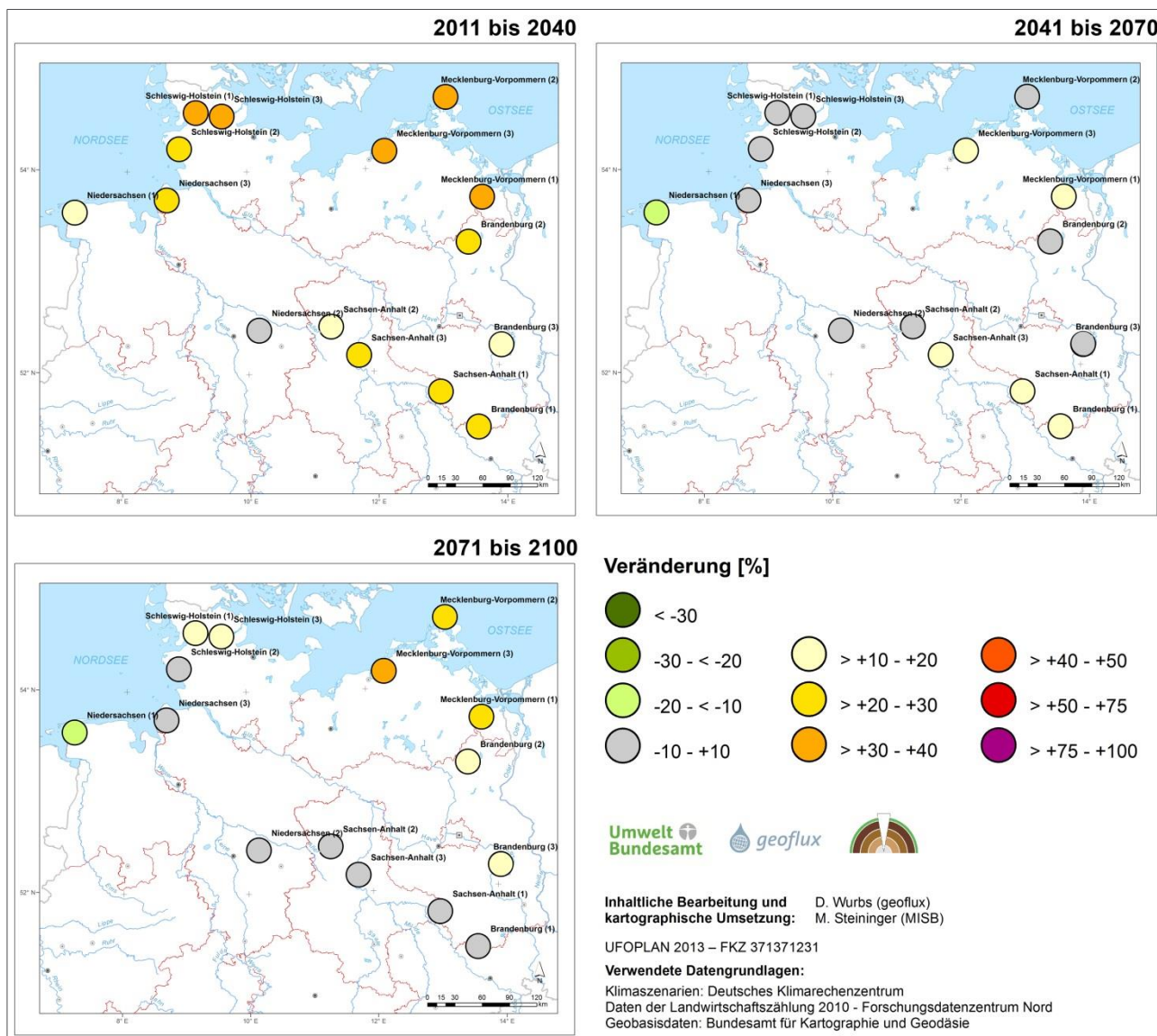


Tabelle 14: Mittlerer fruchtartenabhängiger Bodenabtrag in den Modellgebieten in den Szenarienzeiträumen und Veränderung gegenüber dem Kontrolllauf – Szenarium „Mittlere Anbauverhältnisse – 60 % Wintergetreide, 40 % Maisanbau“

Landschaftsausschnitt/ Modellgebiet	Mittlerer natürlicher Bodenabtrag [t*ha ⁻¹ *a ⁻¹]				Veränderung gegenüber 1971-2000 [%]		
	1971 2000	2011 2040	2041 2070	2071 2100	2011 2040	2041 2070	2071 2100
Schleswig-Holstein (1)	34	46	33	40	+36	-1	+19
Schleswig-Holstein (2)	5	6	4	5	+27	-9	+6
Schleswig-Holstein (3)	25	34	25	30	+36	-1	+19
Niedersachsen (1)	15	17	13	13	+16	-10	-11
Niedersachsen (2)	23	25	24	22	+7	+4	-7
Niedersachsen (3)	46	56	42	48	+22	-9	+4
Mecklenburg-Vorpommern (1)	62	82	70	79	+33	+13	+28
Mecklenburg-Vorpommern (2)	11	14	11	14	+31	+6	+29
Mecklenburg-Vorpommern (3)	57	77	67	78	+34	+16	+36
Brandenburg (1)	24	31	28	26	+26	+14	+8
Brandenburg (2)	11	14	12	13	+28	+6	+15
Brandenburg (3)	31	36	30	34	+18	-1	+12
Sachsen-Anhalt (1)	26	33	30	28	+26	+13	+8
Sachsen-Anhalt (2)	22	25	24	22	+15	+8	-1
Sachsen-Anhalt (3)	22	28	27	24	+25	+19	+6

Die Auswertungen belegen, dass bei der Betrachtung der zukünftigen Erosionsgefährdung durch Wind eine alleinige Berücksichtigung der natürlichen Gefährdung nicht ausreichend ist. Vielmehr ist es erforderlich, diese im Kontext zu derzeitigen oder zukünftig möglichen Fruchtartenzusammensetzungen und Anbauspektren zu bewerten. Die durchgeführten Szenarienanalysen zur fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung durch Wind liefern für die ausgewählten Modellgebiete mögliche Prognosen, um die Auswirkung der Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag in ihren Randbedingungen abzubilden.

5 Kennzeichnung des Beitrages der Bodenerosion durch Wind zur Feinstaubbelastung

Wissenschaftliche Untersuchungen zum Anteil der Feinstaubbelastung aus der Landwirtschaft, insbesondere durch Bodenmaterial aus Winderosionsereignissen, liegen gegenwärtig nur in geringer Anzahl vor. Grundsätzlich muss bei der Thematik Feinstaub aus der Landwirtschaft nach den Herkunftsquellen unterschieden werden. Diese sind:

- ▶ Feinstaub aus der Tierproduktion (nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung, in den recherchierten Unterlagen jedoch häufig untersucht)
- ▶ Feinstaub von landwirtschaftlichen Maschinensystemen und aus landwirtschaftlichen Produktionsprozessen (Dieselmotoren, Düngung, Mähdrusch usw.)
- ▶ Feinstaub aus Winderosionsmaterial von ackerbaulich genutzten Flächen (Agrarstaub)

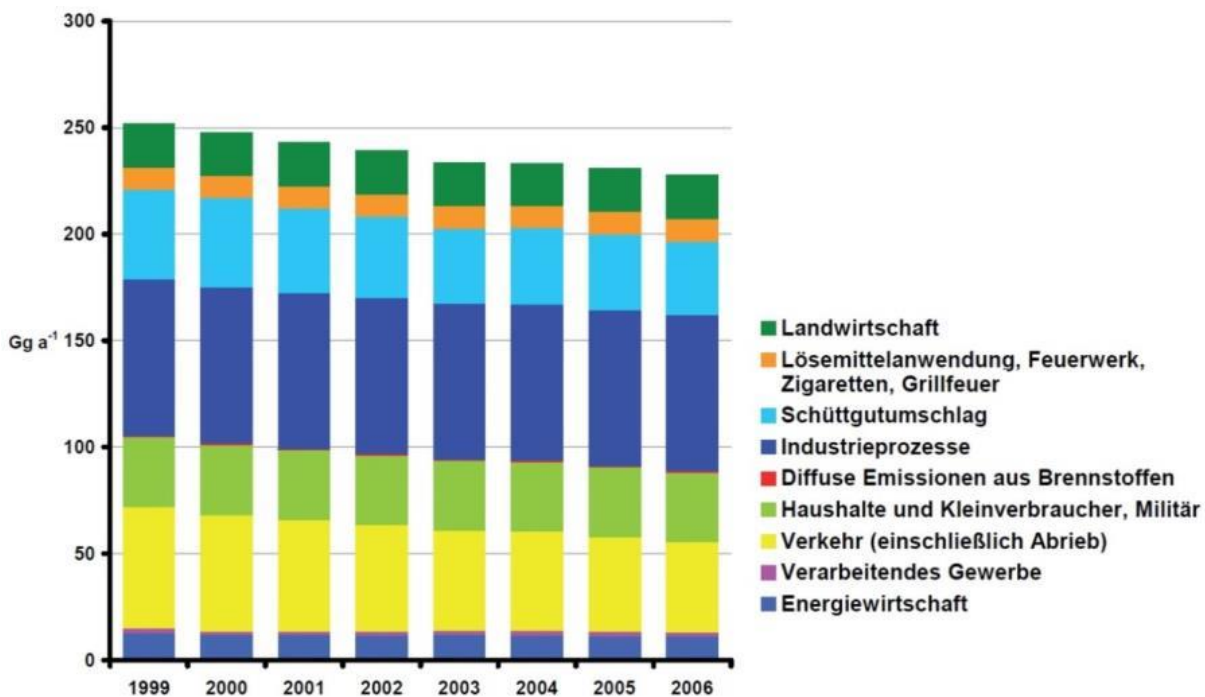
Für deutsche Ballungsräume liegen Auswertungen zur Quelle Landwirtschaft für ausgewählte Luftgütemessstellen vor. Diese sind nicht flächendeckend repräsentativ, widerspiegeln jedoch die Grundtendenz. Die aus der Landwirtschaft freigesetzte Staubemissionen umfassen Grob- und Feinstäube. Während Feinstäube in Abhängigkeit von den Windlagen über große Entfernungen verlagert werden können, haben Grobstäube, da diese nur über kürzere Strecken verlagert werden, nur örtliche Relevanz. Generell muss für die gegenwärtige Datenlage konstatiert werden, dass sich die Aussagen zur Quelle Landwirtschaft ausschließlich auf die Herkunft „Tierproduktion“ und „landwirtschaftlicher Verkehr“ beziehen. Für Agrarstaub aber auch den Feinstaub, der durch die landwirtschaftlichen Produktionsprozesse außerhalb der Tierproduktion und des landwirtschaftlichen Verkehrs hervorgerufen wird, gibt es bis dato keine flächendeckenden Aussagen. Punktuell wurden hierzu erste Forschungsansätze durch das ZALF in Müncheberg erarbeitet (Funk und Engel 2015, Hoffmann und Funk 2015, Hoffmann u. a. 2012, Hoffmann und Funk 2011, Funk und Hoffmann 2010).

In den Medien ist das Thema Winderosion immer dann präsent, wenn es zu Sandstürmen mit Auswirkungen für die Menschen in Form von massiven Staubablagerungen oder Verkehrskatastrophen wie am 8. April 2011 auf der Autobahn A 19 bei Rostock kommt. Diese Staubwolken können sowohl regionalen als auch überregionalen Ursprung haben. Eine Staubwolke mit überregionalem Ursprung dokumentierten Wissenschaftler mehrerer deutscher Forschungseinrichtungen, darunter das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle (UFZ) am 24. März 2007 (Birmili u. a. 2008). Diese hatte sich im Süden der Ukraine über ausgetrockneten Ackerflächen gebildet und zu extremen Feinstaubkonzentrationen in Mitteleuropa geführt. Dabei kam es kurzzeitig zu Spitzenkonzentrationen von PM_{10} -Feinstaub zwischen 200 und $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Wetterlagen treten gegenwärtig noch selten auf, galt doch bisher die Sahara als Hauptquelle für Staub, der über Ferntransport nach Mitteleuropa gelangt.

Obwohl Deutschland über ein vergleichsweise dichtes Netz von Luftgütemessstellen verfügt, kann der Anteil der Landwirtschaft, insbesondere der Anteil der mineralischen Komponente aus Feinstaub von Ackerflächen an der PM_{10} -Feinstaubemission nur in wenigen Ausnahmefällen, wie z. B. im vorgenannten Fall, konkret quantifiziert werden.

Das UBA-Hintergrundpapier „Feinstaubbelastung in Deutschland“ (UBA 2009) gibt einen generellen Überblick zur Entwicklung der PM_{10} -Feinstaubemission nach Quellengruppen von 1999 bis 2006 unter Einbeziehung von Quellen aus der Landwirtschaft (siehe Abb. 34), wobei in dieser Übersicht nur der Feinstaub aus der Tierproduktion und der landwirtschaftlichen Produktion berücksichtigt wurde.

Abbildung 34: Entwicklung der PM₁₀-Feinstaubemission nach Quellengruppen von 1999 bis 2006 in Gigagramm (1000 Tonnen) pro Jahr



Quelle: UBA (2009)

Aus Abbildung 34 wird ersichtlich, dass bei einer leicht abnehmenden Gesamttendenz der Anteil aus der Landwirtschaft nahezu unverändert bleibt.

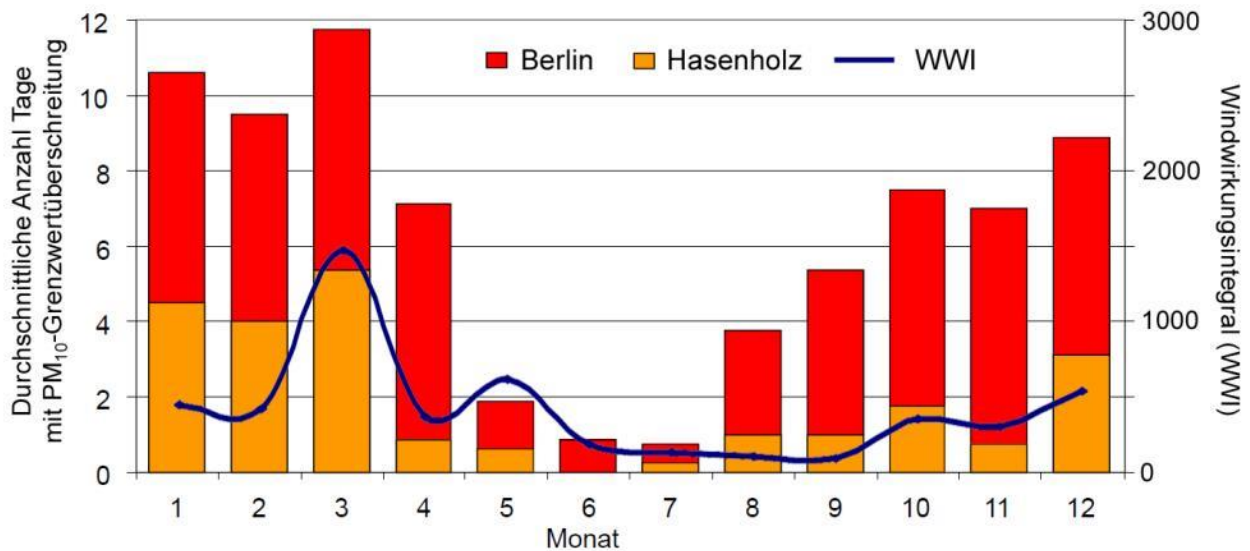
Gleichfalls nur auf die Feinstäube aus der Tierproduktion und der landwirtschaftlichen Produktion beziehen sich die UBA-Forschungsberichte 09/2012 (Bultjes u. a. 2012) und 22/2007 (Diegmann u. a. 2007). Aussagen bzw. Strategien bezüglich der Feinstaubquelle „Agrarstaub“ und des Materials aus Winderosion waren in beiden Forschungsprojekten nicht Inhalt der Untersuchungen. Die Quelle Landwirtschaft umfasst jeweils nur den Bereich Tierproduktion.

Daten aus Österreich (Heimbürger u. a. 2008) beziffern die jährliche Feinstaubemission aus der Landwirtschaft zwischen 8 und 10 kt PM₁₀/Jahr. Auch hier wird nicht der Anteil des Winderosionsmaterials von Ackerflächen explizit ausgewiesen und lediglich die Quelle „landwirtschaftlicher Verkehr“ in die Auswertung einbezogen.

Konkrete Untersuchungen zum Feinstaubfreisetzungspotential von Ackerflächen durch Winderosionsprozesse wurden im Rahmen des INKA-BB-Vorhabens durch das ZALF Müncheberg, Institut für Bodenlandschaftsforschung anhand von Windkanal- und Freilandmessungen sowie der Analyse von Luftgütemessstellen in Berlin und dem nördlichen Umland durchgeführt. Auch diese Untersuchungen sind nicht repräsentativ, belegen jedoch das Feinstaubfreisetzungspotenzial unterschiedlicher Bodensubstrate durch Winderosion, insbesondere aber im Zuge der Bodenbearbeitung (Funk und Engel 2015, Hoffmann und Funk 2015, Hoffmann u. a. 2012, Hoffmann und Funk 2011, Funk und Hoffmann 2010). Verglichen wurden hierbei zwei Luftgütemessstellen bezüglich eines Zusammenhanges zwischen PM₁₀-Überschreitungsphasen und des Windwirkungsintegrals. Eine Station in Berlin repräsentiert den urbanen Raum, eine Zweite in Hasenholz den ländlichen Raum nördlich von Berlin. Das Windwirkungsintegral beschreibt dabei das Abtragungspotenzial des Windes über einer trockenen Bodenoberfläche und somit das Winderosionsgefährdungspotenzial. Sowohl für die urbane Station in Berlin als auch die ländlich geprägte Station konnte ein Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Anzahl der Tage mit einer PM₁₀-Grenzwertüberschreitung und dem Windwirkungsintegral

nachgewiesen werden (siehe Abb. 35), was auf eine mineralische Komponente aus Abträgen von Ackerflächen durch Winderosion an der Feinstaubemission schließen lässt.

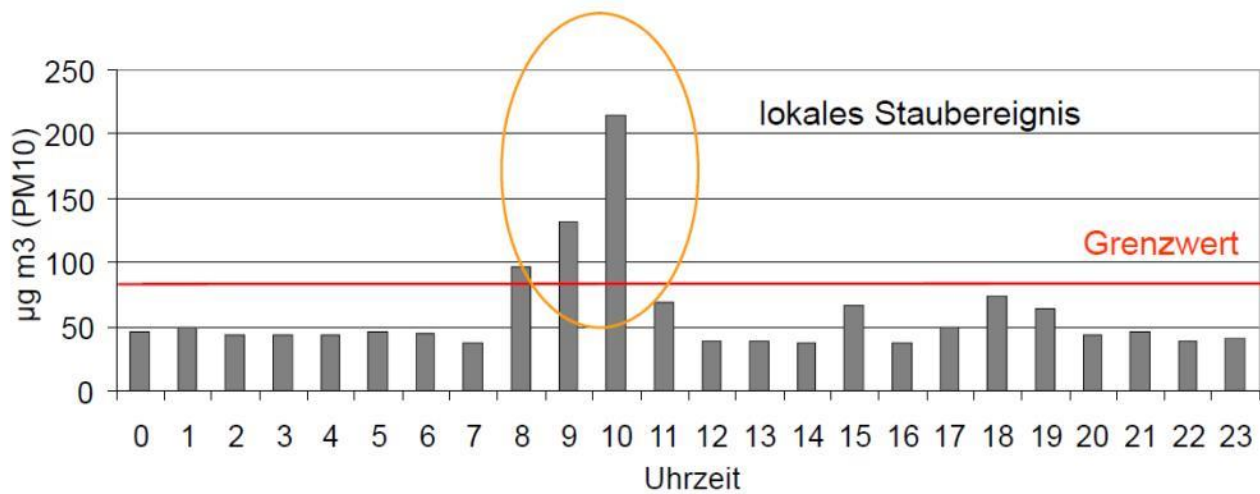
Abbildung 35: PM₁₀-Überschreitungsphasen und Windwirkungsintegral (WWI) für die Luftgütemessstellen Berlin (urban) und Hasenholz (ländlich)



Quelle: Hoffmann und Funk 2011; Hoffmann u.a. 2012

Noch eindeutiger konnte dieser Sachverhalt anhand von PM₁₀-Messungen auf Stundenbasis für die Messstelle Hasenholz und nachgewiesenen lokalen Staubereignissen identifiziert werden (Abb. 36). Des Weiteren wurden die in der Umgebung von Berlin hauptsächlich vorkommenden Oberbodensubstrate auf ihr PM₁₀-Feinstaubaustragspotenzial durch Messungen im Windkanal untersucht. Anhand dieser Untersuchungen wurde eine regional gültige Gleichung zur Abschätzung des winderosionsbedingten PM₁₀-Austragspotenzials aus den Parametern Mittelschluff (zeigte die höchste Korrelation der untersuchten Fraktionen), organischer Kohlenstoff und Bodenfeuchte aufgestellt. Nach Substrattypen differenziert, weisen nach Hoffmann u. a. (2012) sowie Hoffmann und Funk (2011) anhydromorphe Böden und hierbei insbesondere die Sandlöss, sandigen Lehme, Lehme sowie Löß-Substrate ein hohes Feinstaubfreisetzungspotenzial auf.

Aus der Übertragung der Ergebnisse in die Fläche wurden unter Hinzuziehung der Verteilung der Windrichtung und der Windstärken Areale mit einem hohen PM₁₀-Emmissionsrisiko für das Stadtgebiet Berlins identifiziert und Verminderungsstrategien vorgeschlagen. Die Autoren verweisen jedoch darauf, dass es sich hierbei um regionale Erkenntnisse handelt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete in Deutschland ist somit nicht ohne Weiteres möglich.

Abbildung 36: PM₁₀-Messungen - Stundenwerte im Tagesgang am 14.09.2006 an der Messstelle Hasenholz

Quelle: Hoffmann und Funk 2011; Hoffmann u.a. 2012

Weiterführende Felduntersuchungen durch Hoffmann und Funk (2011) sowie Hoffmann u. a. (2012) belegen darüber hinaus, dass Bodenbearbeitung in Trockenphasen zu Staubeentwicklungen führen kann, die neben Grobstaub auch eine maßgebliche Quelle der regionalen und überregionalen Feinstaubemission sind. In trockenen Witterungsabschnitten sollte deshalb, bedingt durch die in der Nacht erfolgte Befeuchtung der Bodenoberfläche durch Tau, die Bodenbearbeitung in die Morgenstunden verlegt werden. Hochrechnungen zeigen, dass analog der Wassererosion auch bei der Winderosion in natürlichen Bodenabtrag und Bearbeitungsabtrag differenziert werden muss. So wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil des Bearbeitungsabtrages am Berliner Gesamt-PM₁₀-Eintrag auf 3 bis 4 % beziffert, während der Anteil des natürlichen Abtrages durch Winderosion bei < 1 % liegt.

Bedingt durch die Schwierigkeiten, PM₁₀-Messungen hinsichtlich der Quelle „Emission aus Agrarstaub“ zu separieren, werden insbesondere in den USA Modelle zur Simulation des PM₁₀-Anteils an der durch Winderosion ausgelösten Staubmenge entwickelt (Singh u. a. 2012). Diesbezügliche Forschungsansätze konnten für Deutschland bis dato nicht recherchiert werden.

6 Aufstellen von Kriterien und Empfehlungen nach BBodSchG (§ 8 – Ermächtigung) bzw. BBodSchV

Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) bildet die gesetzliche Grundlage für den Schutz des Bodens in Deutschland. In Bezug auf die landwirtschaftliche Nutzung sind die Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung nach § 17 des BBodSchG maßgeblich. Zusätzlich regeln auf Bundesebene die Cross-Compliance-Vorgaben zur Erosionsminderung gemäß der 2. Verordnung zur Änderung der Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung (DirektZahlVerpflV), dass Pflanzenbaumaßnahmen auf den Erosionsgefährdungsgrad der Böden ausgerichtet sein müssen (BMELV 2009). Die hierfür erforderliche Ausweisung winderosionsgefährdeter Flächen wurde auf der Ebene der Bundesländer umgesetzt. Für die bundesdeutsche Ebene liegen folgende Bewertungsgrundlagen zur Abschätzung der Erosionsgefährdung vor:

- ▶ Entwurf zur Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetzes vom 21.07.2008 (AK EROSION 2008)
- ▶ DIN 19706:2013-02 - Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind (DIN 2013).
- ▶ Einrichtung einer Arbeitsgruppe „Kartieranleitung Winderosion“ des ständigen Ausschusses „Vorsorgender Bodenschutz (BOVA)“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) im November 2012

Regelungsdefizite und Handlungsbedarf bestehen hingegen in der Bereitstellung bundesweit einheitlicher Empfehlungen an die Vorsorge und Gefahrenabwehr und in der Erarbeitung von Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen, um langfristig die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten.

Die Veröffentlichung „**Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz**“ (AID 2015), erarbeitet von Experten aus Forschungseinrichtungen und Fachbehörden, befasst sich in seiner 2. Auflage länderübergreifend mit der Vorsorge gegen Bodenverdichtung und Bodenerosion sowie zur Erhaltung des Humusgehaltes. Neben einer Sachstandsdarstellung zu Bedeutung, Verlauf und Einflussfaktoren der Winderosion werden mögliche Schäden durch Winderosionsereignisse, kategorisiert nach on-site- und off-site-Schäden benannt. Umfassender gehen die Autoren auf Vorsorgemaßnahmen ein. Hier wird zwischen pflanzenbaulichen, boden- und landschaftsstrukturellen Maßnahmen und ihre Wirksamkeit hinsichtlich Kurz-, Mittel oder Langfristigkeit unterschieden. Die Erkenntnisse und Veröffentlichungen, die in einzelnen Bundesländern bereits vorliegen, zusammen.

Auf **Länderebene** wurden vereinzelt Handlungsempfehlungen publiziert, die aus den Ergebnissen zur Einstufung der Bodenerosionsgefährdung gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetzes (AK EROSION 2008) erarbeitet wurden. Ziel war auch hier, die Prinzipien der „Guten fachlichen Praxis“ der Landwirtschaft in Bezug auf Winderosion zu qualifizieren. Zusammenfassend lassen sich folgende Arbeiten benennen:

- ▶ **Schleswig-Holstein:** Duttmann, R., Hassenpflug, W., Bach, M., Lungershausen, U. und J.-H. Frank (2012): Winderosion in Schleswig-Holstein - Kenntnisse und Erfahrungen über Bodenverwehungen und Windschutz. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) [Hrsg.].
- ▶ **Brandenburg:** Frielinghaus, M., Winnige, B., Deumlich, D., Funk, R., Schmidt, W., Thiere, J. und L. Völker (2002): Informationsheft zum landwirtschaftlichen Bodenschutz im Land Brandenburg – Teil Bodenerosion. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Raumordnung Brandenburg (MLUR) und Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) [Hrsg.].
- ▶ **Mecklenburg-Vorpommern:** Frielinghaus, M., Deumlich, D., Funk, R., Helming, K., Thiere, J., Völker, L. und B. Winnige (2002): Bodenerosion - Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-

Vorpommern. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) [Hrsg.], 2. Auflage.

- **Sachsen-Anhalt:** Deumelandt, P., Kasimir, M., Steininger, M. und D. Wurbs (2014): Beratungsfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) [Hrsg.].
- **Niedersachsen:** Bartelt, R., Brunotte, J., Dahlmann, I., Gunreben, M., Mosimann, T., Schäfer, W., Severin, K., Tharsen, J. und A. Thiermann (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung. - Nachhaltiges Niedersachsen, 23. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLO) [Hrsg.].

Die für **Sachsen-Anhalt** und **Niedersachsen** vorliegenden Grundlagen beinhalten schwerpunktmäßig das Thema „Erosion durch Wasser“ und betrachten nur am Rande die Winderosion, vorwiegend die aktuelle Gefährdungssituation. Detaillierte Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen lassen sich aus den Arbeiten hingegen nicht ableiten.

Umfänglicher sind die Veröffentlichungen für Schleswig-Holstein, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Ein Autorenkollektiv (Duttman u.a. 2012) Geschichte, Ursachen, Verlauf und Folgen der Winderosion in **Schleswig-Holstein**. Weiterhin werden Gefährdungsgebiete ausgewiesen und erfasste Winderosionsereignisse dokumentiert. Inhaltlicher Schwerpunkt ist die Beschreibung von Wirkungen und ökologischen Funktionen durch Windschutzpflanzungen und Knicks. Vergleichbar mit der Veröffentlichung „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) werden Maßnahmenvorschläge, unterteilt nach Pflanzenbau, Bodenbearbeitung und Flurgestaltung, erläutert.

Unter fachlicher Federführung des ZALF Müncheberg (Frielinghaus u.a. 2002a, b) wurden die Beiträge zur Erosion durch Wasser und Wind für **Mecklenburg-Vorpommern** und **Brandenburg** erarbeitet. Neben der allgemeinen Sachstandsbeschreibung zu Ursachen, Einflussfaktoren, Folgen und räumlicher Bewertung der Winderosionsgefährdung werden allgemeingültige Aussagen zur Schutzwirkung von Einzelmaßnahmen getroffen.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die in den Arbeiten der Bundesländer dokumentierten Empfehlungen zu Schutzmaßnahmen gegenüber Winderosion in die Veröffentlichung „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) teilweise übernommen wurden.

Aus den vorliegenden Arbeiten wurde ein **Maßnahmenkatalog** erstellt. In Tabelle 15 sind Maßnahmen zur Verminderung der Erosionsgefährdung durch Wind aus den recherchierten Sachstandsberichten aufgeführt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beschrieben. In Anlehnung an die Broschüre „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (AID 2015) wurde die Kategorisierung nach den Maßnahmenkomplexen Pflanzenbau, Landeskultur und Agrarstruktur vorgenommen.

Tabelle 15: Übersicht zu Maßnahmen zur Verminderung der Erosionsgefährdung durch Wind

Kategorie	Maßnahme	Beschreibung und Wirkung
Pflanzenbau (kurzfristig wirkend)		
Bodenbearbeitung	Einsatz nichtwendender Bodenbearbeitungssysteme und Direktsaatverfahren	Stoppeln sind so lange wie möglich zu belassen. Deren Windschutzwirkung ist um ein Vielfaches höher als bei liegenden Ernteresten. Generell sind eine Verringerung des Pflugeinsatzes und dessen Ersatz durch konservierende Bodenbearbeitung, optimal in der gesamten Fruchtfolge, jedoch mindestens beim Anbau erosionsgefährdeter Fruchtarten anzustreben. Für diese ist der Einsatz von Direktsaatverfahren zu empfehlen. Die Mulchbedeckung sollte mindestens 25 % betragen. Auf erosionsgefährdeten Standorten ist auf ein feinkrümeliges Saatbett zu verzichten, die Bodenoberfläche sollte nach der Bodenbearbeitung so rau wie möglich sein.
	Änderung Bearbeitungsrichtung	Anpassung der Bearbeitungsrichtung bzw. bei Dammkulturen Anlage der Dämme quer zur Hauptwindrichtung führt zu einer deutlichen Erhöhung der Rauigkeit der Oberfläche.
Anbausysteme	Anpassung Fruchtfolge	Ein hoher Reihenabstand auf winderosionsgefährdeten Standorten ist zu vermeiden, falls keine konservierende Bodenbearbeitung oder Direktsaat möglich ist. Auf Sommerungen ist zu verzichten und verstärkt Winterungen oder mehrjähriges Futter in die Fruchtfolge einzubauen. Ziel ist ein möglichst ganzjährig hoher Bedeckungsgrad der Fläche. Möglichst sollte Herbstfurche zu Sommerungen durchgeführt werden oder eine Bodenbedeckung durch Mulch über den Winter ermöglicht werden.
	Anbau Zwischenfrucht	Durch den Anbau von Futter- oder Gründungspflanzen als Zwischenfrucht zwischen den Vegetationszeiten der Hauptkulturen, über Winter als abfrierende Fruchtarten, wird eine geschlossene Bodenbedeckung bereits im Spätsommer/Herbst und im Winterhalbjahr erreicht. Hierzu ist die Aussaat direkt nach Ernte der Hauptfrucht des Vorjahres unter Einsatz wassersparender Bestelltechnologien notwendig. Die Wirkung kann durch nichtwendende Bodenbearbeitung oder Direktsaatverfahren vor der Hauptfrucht noch erhöht werden.
	Einsaat Untersaat	Aussaat einer zusätzlichen 2. Frucht zur Hauptkultur. Die Untersaat kann als Gründüngung oder einige Zeit nach der Hauptfruchternte als Tierfutter genutzt werden. Sie dient ebenso wie der Zwischenfruchtanbau zur Verkürzung der Zeitspannen ohne Bodenbedeckung.

Kategorie	Maßnahme	Beschreibung und Wirkung
		Der Vorteil dieser Methode ist die erhöhte Bodenbedeckung bei großen Reihenabständen in der Phase bis zur vollständigen Bodenbedeckung durch die Hauptfrucht.
	Verbesserung Humusversorgung	Die Erhaltung und Verbesserung der Humusversorgung der Böden ist ein Ziel der „Guten fachlichen Praxis“. Gut mit Humus versorgte Standorte weisen ein gutes Bodengefüge auf und vermindern die Erosionsgefährdung. Die Humusversorgung kann durch vielfältige Maßnahmen gesichert und verbessert werden, so z.B. durch den Verbleib der Koppelprodukte auf dem Acker, dem Anbau von Zwischenfrüchten und von Untersaaten, die Einbindung von Ackergras und mehrjährigen Futterpflanzen in die Fruchtfolge, organische Dünger und durch konservierende Bodenbearbeitungssysteme.
	Anlage Erosionsschutzstreifen	Quer zur Hauptwindrichtung angelegte, parallel verlaufende Streifen mit einer jeweiligen Breite von ca. 30 bis 50 m. Angebaut werden im Wechsel erosionsmindernde und erosionsgefährdete Fruchtarten. Ziel ist die Schaffung einer Flächenheterogenität zur Minderung der Windgeschwindigkeiten an der Bodenoberfläche. Obwohl sich das System in anderen Ländern bewährt hat, wird es in Deutschland nur regional und in kleinem Umfang praktiziert.
Landeskultur (mittelfristig wirkend)		
Schutzpflanzung	Anlage Windschutzpflanzungen	Die Anlage erfolgt durch ein- bis dreireihige Windschutzpflanzungen quer zur Hauptwindrichtung. Zur Vermeidung von Düseneffekten sind Schlagauffahrten mit Gehölzstreifen zu versehen. Bei der Gehölzwahl ist darauf zu achten, dass die Durchströmbarkeit von unten nach oben zunimmt. Bewährt haben sich Pflanzungen aus Haupt- und Füllbaumarten sowie Sträuchern. Die Winddurchströmbarkeit muss 40 bis 50 % betragen. Optimal angelegte Windschutzpflanzungen bewirken eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit im Luv um das 5-fache der Endhöhe [m] und im Lee um das etwa 25-fache der Endhöhe [m]. Die Umsetzung bedarf der Flächenverfügbarkeit. Pflanzungen können durch Landwirte innerbetrieblich erfolgen, werden jedoch in der Regel überbetrieblich im Zuge von Flurneuordnungsverfahren angelegt.
	Anlage Agro-Forst-Systeme	Agro-Forst-Systeme stellen eine spezielle Form von Erosionsschutzstreifen dar. Es erfolgt ein Wechsel von Ackernutzung und Streifen mit Kurzumtriebsgehölzen. Die Breite der Ackernutzung

Kategorie	Maßnahme	Beschreibung und Wirkung
		richtet sich nach der Endhöhe der Gehölze (25-fache Endhöhe [m]). Die Gehölzstreifen sind so zu konzipieren, dass eine Staffelung der jährlichen Ernten bei Erhalt der Windschutzwirkung erfolgen kann.
Bodenmelioration	Kalkung	Humus und Kalk haben durch ihre Stabilisierungswirkung einen positiven Effekt auf das Bodengefüge. Bodenerosion, aber auch -verdichtungen, treten auf gut mit Kalk versorgten Flächen seltener auf. Durch den Landwirt ist eine optimale Kalkversorgung der Böden zu gewährleisten. Im Bedarfsfall sind Meliorationskalkungen durchzuführen.
Agrarstruktur (langfristig wirkend)		
Entwicklung ländlicher Raum	Flurneuordnung	In Regionen mit einer hohen Winderosionsgefährdung ist Erosionsschutz in der Regel nur überbetrieblich über eine Flurneuordnung umsetzbar. Durch Einsatz dieses Instrumentes ist sowohl die Anpassung der Schlaggestaltung und des landwirtschaftlichen Wegenetzes, die Konzipierung und Anlage eines Systems von Aufforstungen und Windschutzpflanzungen sowie die Umwidmung besonders winderosionsdisponierter Flächen aus der Ackernutzung möglich. Die Anwendung der Maßnahmen kann je nach Gefährdungssituation einzeln oder im Komplex erfolgen. Flurneuordnungsverfahren sind jedoch in der Regel sehr langwierig und bedürfen für den Fall, dass Erosionsschutzmaßnahmen umgesetzt werden sollen, einen planerischen Vorlauf einschließlich der Koordinierung mit den Landwirten. Zudem müssen zur Verbesserung der Wirksamkeit die Maßnahmen der Flurneuordnung dauerhaft durch pflanzenbauliche Schutzmaßnahmen untersetzt bzw. begleitet werden.
Flächennutzung	Nutzungsumwidmung	Standorte mit einer sehr hohen bis extremen Erosionsgefährdung sollten aus der ackerbaulichen Nutzung in Dauergrünland oder Aufforstung umgewidmet werden, um so eine dauerhafte Bodenbedeckung zu gewährleisten. Da dies auch auf innerbetrieblicher Ebene erfahrungsgemäß schwer umsetzbar ist, wird diese Schutzmaßnahme in der Regel nicht singulär, sondern meist als Bestandteil eines Flurneuordnungsverfahrens Umsetzung finden.
	Schaffung von Biotopen	Umfasst die Anlage von begrasten Feldrainen, Ackerrandstreifen, Blühstreifen oder im Komplex die Schaffung eines Biotopverbundes mit dem Ziel, die Windschutzwirkung in den betroffenen Flächen zu verbessern. Die Umsetzung erfolgt meist über

Kategorie	Maßnahme	Beschreibung und Wirkung
		spezielle Förderprogramme bzw. im Zuge von Flurneuordnungsverfahren.

Quellen: AID (2015), Duttmann u.a. (2012), Frielinghaus u.a. (2002a, b) - verändert

Um schädliche Bodenveränderungen zu vermindern und zukünftig zu vermeiden sind aus den Maßnahmenempfehlungen **Handlungsempfehlungen** abzuleiten, welche der Gefahrenabwehr aufgrund von Bodenerosion durch Wind dienen. Derartige Handlungsempfehlungen für die Praxis existieren bisher nicht. Ein Ziel könnte es sein, sich an der in **Sachsen-Anhalt** und **Mecklenburg-Vorpommern** praktizierten Vorgehensweise für die Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser zu orientieren.

In **Sachsen-Anhalt** verfasste das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (MLU) 2012 einen Runderlass „Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen“ (MLU 2012). Darin ist festgelegt, dass bei Bestehen von Anhaltspunkten für schädliche Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser diese sowie weitere erforderliche Informationen im Rahmen einer orientierenden Untersuchung zu erfassen sind. Im weiteren Vorgehen können Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zur Anwendung kommen. Des Weiteren werden im Vorfeld von Flurbereinigungsverfahren Voruntersuchungen zur Erarbeitung eines Entwicklungskonzeptes für die Anpassung der Bodennutzung, Bodenbearbeitung, Schlaggestaltung und der Landeskultur als Vorplanung zur Problemanalyse und zur Definition von Handlungsfeldern durchgeführt.

Die Adaption dieser Vorgehensweise auf das Problemfeld „Bodenerosion durch Wind“ wäre eine wirksame Handlungsoption, Schutzmaßnahmen zur Gefahrenabwehr bei Winderosion auf landwirtschaftlichen Flächen auch planungsseitig zu begleiten.

7 Konzeption und Erarbeitung eines Merkblattes „Bodenerosion durch Wind – Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr“

Wesentliche Erkenntnisse aus dem vorliegenden Bericht wurden in einem Merkblatt **„Bodenerosion durch Wind – Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr“** zusammengefasst, mit dem Ziel, Kriterien und Empfehlungen nach BBodSchG und BBodSchV einer Zielgruppe aus Vollzug, Beratung und Praxis öffentlich verfügbar zu machen. Inhaltlicher Schwerpunkt des Merkblattes ist neben einer Sachstandsdarstellung zum Thema Winderosion und der Beschreibung der gegenwärtigen und bis zum Jahr 2100 prognostizierten bundesweiten Winderosionsgefährdung die Zusammenfassung und Beschreibung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zur Vorsorge und Gefahrenabwehr gegen Erosion durch Wind. Das Merkblatt enthält folgende inhaltliche Gliederung:

- ▶ Einleitung
 1. Anlass und Zielsetzung des Merkblattes
 2. Allgemeine Beschreibung der Themen Klimawandel und Boden
- ▶ Sachstand Winderosion
 1. Definition Winderosion
 2. Ursachen, Einflussfaktoren und Verlauf der Winderosion
 3. Folgen und Schäden durch Winderosion
 4. Vorliegende rechtliche und fachliche Grundlagen (BBodSchG/BBodSchV, DIN19706, ‚gute fachliche Praxis‘, cross compliance-Regelungen)
 5. Vorliegende Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen auf Bundes- und Länderebene
 6. Sachstand in den Bundesländern
 7. Verfahren und Modelle zur Abschätzung der Winderosionsgefährdung
- ▶ Darstellung der gegenwärtigen Winderosionsgefährdung in Deutschland
 1. Natürliche und potenzielle Winderosionsgefährdung nach DIN
 2. Bewertung der nutzungsabhängigen Winderosionsgefährdung
- ▶ Winderosionsgefährdung im Zuge des Klimawandels
 1. Bewertung der Klimaentwicklung bis 2100
 2. Mögliche Entwicklung der Winderosionsgefährdung
 3. Schlussfolgerungen
- ▶ Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zur Vorsorge und Gefahrenabwehr gegen Erosion durch Wind
 1. Maßnahmenkatalog unter Berücksichtigung pflanzenbaulicher, boden- und landschaftsstruktureller Maßnahmen
 2. Priorisierung von Maßnahmen
 3. Handlungsempfehlungen zur Vermeidung und Verminderung der Winderosion
- ▶ Literatur

Zu Beginn des Projektes war geplant, wesentliche Inhalte und Ergebnisse der „Kartieranleitung Winderosion“, welche sich durch eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe in Bearbeitung befindet, in das Merkblatt zu integrieren und ein ganzheitliches Konzept für das Merkblatt zu erarbeiten. Die „Kartieranleitung Winderosion“ bildet eine wesentliche Grundlage, um Erscheinungen der Winderosion vor Ort aufnehmen und bewerten zu können. Aufgrund des bisher nicht erfolgten Abschlusses der Arbeiten an der Kartieranleitung konnte deren geplante Einbindung in das Merkblatt nicht erfolgen.

Die Gestaltung und der Druck des Merkblattes erfolgten entsprechend der Vorlagen für das Corporate Design, welches das Umweltbundesamt für Fach- und Wissensbroschüren bereitstellt. Der Druck er-

folgte als Broschüre in einer Auflage von 1.000 Stück durch die Druckzuck GmbH in Halle. Abbildung 37 stellt das Deckblatt des Merkblattes dar.

Abbildung 37: Entwurf Deckblatt für Merkblatt



Foto: Tobias Nordhausen (2016), aufgenommen im Kyffhäuserkreis (Thüringen)

8 Fazit und Ausblick

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen lassen sich Empfehlungen für weiterführende Arbeiten und Handlungsfelder ableiten, die nicht nur unter dem Blickwinkel des Klimawandels bedeutsam sind, sondern auch Auswirkungen auf die aktuelle Bewertung von Ursachen, Ausmaß und Folgen der Bodenerosion durch Wind haben. Da für Deutschland keine praxiserprobten Verfahren vorliegen, die eine quantitative Ausweisung der Winderosionsgefährdung und somit den direkten Vergleich zum ABAG-Ansatz zur Ausweisung der Wassererosionsgefährdung ermöglichen, wurde der Ansatz nach DIN 19706 (DIN 2013) genutzt. Auf die Einschränkungen, die dieser Ansatz mit sich bringt, wurde in den bisherigen Ausführungen bereits detailliert eingegangen. Im Folgenden werden aus Sicht der Bearbeiter notwendige Anpassungen bzw. Hinweise zur Nutzung von Standortinformationen dargestellt, die zu einer Verbesserung der Bewertungen führen könnten.

Für die Modellierung der IST-Situation der Winderosionsgefährdung in Deutschland wurde zur Ausweisung der Bodenerodierbarkeit auf die **BÜK 1000N** zurückgegriffen. Welche Auswirkung die Nutzung höher auflösender Bodendaten auf die Ausweisung der Bodenerodierbarkeit hat, zeigt sowohl der im Projektverlauf durchgeführte Vergleich anhand von zwei ausgewählten Kartenblättern der BÜK 200 als auch die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der CC-Winderosionsbewertung auf Bundeslandebene. Für diese wurden in der Regel Bodeninformationen im Maßstab 1:50.000 oder größer genutzt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Vergesellschaftung eine Nivellierung der Bodenerodierbarkeit auftritt, das heißt, dass sich unter Verwendung der BÜK 1000N nur eine vergleichsweise geringe Differenzierung der räumlichen Heterogenität der Bodenerodierbarkeit ausweisen lässt. Die Heterogenität der Bodenvergesellschaftung nimmt unter Verwendung der BÜK 200 gegenüber der BÜK 1000N zu, sodass auch regionalspezifische Gegebenheiten differenzierter wiedergegeben werden. Zu gleichem Ergebnis führt eine Auswertung der länderspezifischen Bewertung der CC-Winderosionsgefährdung. Durch Nutzung der auf Länderebene vorliegenden höherauflösenden Bodeninformationen konnte eine deutlich stärkere Differenzierung der Bodenerodierbarkeit in allen Erodierbarkeitsstufen belegt werden. Da für die Bewertung der Erosionsgefährdung das Eingangssignal Boden einen großen, in vielen Teilen Deutschlands den entscheidenden Einfluss hat, ist mit dem flächendeckenden, blattschnittfreien Vorliegen des Datenbestandes der BÜK 200 perspektivisch eine Auswertung der Winderosionsgefährdung auf diesem Datenniveau vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang muss die **Einstufung der Erodibilität der Böden nach DIN 19706** für die ostdeutschen Lössböden angepasst werden. Diese Substrate werden durch die bisherige Einstufung unterschätzt. Die ostdeutschen Erfahrungen (vgl. auch Modellansatz nach VERMOST) belegen aufgrund der geringeren Aggregatstabilität eine deutlich höhere Erodibilität dieser Substrate. Eine diesbezügliche Anpassung ist vor dem Hintergrund verschiedener Fördermaßnahmen zur Verbesserung des Windschutzes im ländlichen Raum zwingend notwendig.

Des Weiteren sind für die Ausweisung der **Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen** perspektivisch Ansätze erforderlich, die es erlauben, die Bodenbedeckung und -bewirtschaftung (bewirtschaftungsabhängiger Faktor) weniger als „globale Variable“, sondern in ihrem zeitlichen Verlauf über das Jahr bzw. eine Vegetationsperiode zu betrachten. Dadurch ließen sich Zeiträume/Monate mit unterschiedlicher Winderosivität mit Phasen unterschiedlicher Bodenbedeckung verknüpfen. Eine „mittlere“ Bewertung der Schutzwirkung von Fruchtarten/Fruchtfolgen kann zur Unterschätzung der Gefährdung in Spätsommer/Herbst führen. Eine Orientierung könnte am DIN-Ansatz zur Abschätzung der Erosionsgefährdung durch Wasser erfolgen – analog dem C-Faktor und dessen Verknüpfung mit Phasen der Regenerosivität.

Gleichzeitig ist die Eingrenzung des **Windintegrals** auf die Monate Februar bis Mai zu hinterfragen. Da nachweislich auch in weiteren Monaten ohne Bedeckung bzw. mit Bodenbearbeitung, insbesondere im

Spätsommer, eine Winderosionsdisposition auftritt, ist das Windintegral auf diese Monate auszudehnen und die mittlere Erodierbarkeit durch Wind entsprechend anzupassen.

Für die Ausweisung der Winderosionsgefährdung in den Prognosezeiträumen bis 2100 wurde zusätzlich zur DIN 19706 (DIN 2013) der **RWEQ-Ansatz** genutzt. Obwohl dieser für die Anwendung in Deutschland noch nicht abschließend verifiziert ist, erwies er sich als durchaus geeignete und effektive Methode. So konnten weitere winderosionsrelevante Parameter einbezogen werden, die es erlauben, gegenüber dem Ansatz der DIN eine Gefährdungsabschätzung räumlich und zeitlich höher auflösend vorzunehmen. Um den RWEQ-Ansatz in der Bodenschutzpraxis zu etablieren, ist eine Erprobung und Anpassung für mitteleuropäische Verhältnisse im Rahmen von Forschungsarbeiten notwendig.

Mithilfe des RWEQ-Modellansatzes wurde für repräsentative Modellregionen in fünf deutschen Bundesländern die **zukünftige Entwicklung der potenziellen Erosionsgefährdung und der Gefährdung unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien für Fruchtartenzusammensetzungen** abgeschätzt und bewertet. Dabei lassen die veränderten klimatischen Rahmenbedingungen eine Zunahme des Erosionsrisikos erwarten, mit unterschiedlichem Ausmaß in den betrachteten Landschaftsräumen und in den 30-jährigen CLINO-Perioden zwischen 2011 und 2100. Deutlich differenzierter ist die Entwicklung der fruchtartenabhängigen Winderosionsgefährdung zu bewerten. Ursache hierfür ist die innerjährliche Verschiebung des Wetterfaktors, der den klimabedingten Einfluss von Windgeschwindigkeit und Bodenfeuchte auf die Erosionsgefährdung innerhalb des RWEQ-Modells beschreibt. Generell geht auch hier die Tendenz in Richtung Risikozunahme. Jedoch zeigen Ausmaß und innerjährliche Verteilung des Erosionsrisikos, zum Beispiel im Vergleich zwischen den Fruchtartenszenarien für Mais- und Wintergetreide, unterschiedliche Entwicklungen. Grundsätzlich belegen die Auswertungen aber, dass bei der Betrachtung der zukünftigen Erosionsgefährdung durch Wind eine alleinige Berücksichtigung der potenziellen Gefährdung nicht ausreichend ist. Vielmehr ist es erforderlich, diese im Kontext zu derzeitigen oder zukünftig möglichen Fruchtartenzusammensetzungen und Anbauspektren zu bewerten. Die durchgeführten Szenarienanalysen zur fruchtartenabhängigen Erosionsgefährdung durch Wind liefern für die ausgewählten Modellgebiete mögliche Prognosen, um die Auswirkung der Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag in ihren Randbedingungen abzubilden.

Die Betrachtung der zukünftigen Erosionsgefährdung erfolgte unter Verwendung der Ergebnisse der **Modellläufe des regionalen Klimamodells COSMO-CLM** auf Basis des Emissionsszenariums SRES A1B. Die Daten der neuesten RCP-Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways) lagen im Verlauf der Projektbearbeitung noch nicht flächendeckend und für alle erforderlichen Klimaparameter vor. Eine Fortschreibung der Ergebnisse unter Anwendung eines breiteren Spektrums der RCP-Emissionsszenarien ist daher zu empfehlen.

9 Quellenverzeichnis

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 5).- 5. Auflage, Hannover.

AID – Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V. (2015): Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz, 2.Auflage. Bonn.

AK Erosion – AK Erosionsgefährdungsabschätzung (2008): Entwurf zur Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 5 des Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetzes. 21.07.2008 (unveröff.).

Bartelt, R., Brunotte, J., Dahlmann, I., Gunreben, M., Mosimann, T., Schäfer, W., Severin, K., Tharsen, J. und A. Thiermann (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung. - Nachhaltiges Niedersachsen, 23. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLO), Hannover.

BfN - Bundesamt für Naturschutz [Hrsg.] (2008): Daten zur Natur 2008.- Landwirtschaftsverlag, 10-11, Münster.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): Karte der potentiellen Winderosionsgefährdung.
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung-management/Bodenerosion/Wind/PEG_wind_node.html.

Birmili, W., Schepanski, K., Ansmann, A., Spindler, G., Tegen, I., Nowak, A., Reimer, E., Mattis, I., Müller, K., Brüggemann, E., Herrmann, H., Wiedensohler, A., Schladitz, A., Tuch, T. und G. Löschau (2008): An episode of extremely high PM concentration over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine. - Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 997-1016.

Böhner, J., Schäfer, W., Conrad, O., Groß, J. und A. Ringeler (2003): The WEELS Model: methods, results, and limits of wind erosion modelling. - Catena (52), 3-4.

Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L. and P. Panagos (2016): A new assessment of soil loss due to wind erosion in european agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. - Land degradation & development, 2588.

Builtjes, P., Jörß, W., Stern, R. und J. Theloke (2012): Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - Zusammenfassender Abschlussbericht. - UBA-Texte, 09/2012. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

BMELV (2009): Änderung der Direktzahlungen-Verpflichtungsverordnung vom 27. Februar 2009. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.

Capelle, A. und R. Lüders (1985): Die potentielle Erosionsgefährdung der Böden in Niedersachsen. - Göttinger Bodenkundl. Ber. 83, 107–127, Göttingen.

Deumelandt, P., Kasimir, M., Steininger, M. und D. Wurbs (2014): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) [Hrsg.], Magdeburg.

Deumlich, D. (2010): Mündliche Mitteilung anlässlich des UBA-Fachgespräches "Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser" am 4. Mai 2010, Berlin.

Deumlich, D., Funk, R., Völker, L. und R. Wieland (2002): Nutzung von Bodendaten für Programme der nachhaltigen Landentwicklung am Beispiel der Erosion. - Niebuhr, B. [Hrsg.]: GEO 2002 - Planet Erde: Vergangenheit, Entwicklung, Zukunft. - Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 21, 97-98.

Diegmann, V., Pfäfflin, F., Wiegand, G., Wursthorn, H., Dünnebeil, F., Helms, H. und U. Lambrecht (2007): Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. - UBA-Texte, 22/2007. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

DIN - Deutsches Institut für Normung (2013): DIN 19706:2013-02 - Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind. Beuth Verlag, Berlin.

Duttmann, R., Hassenpflug, W., Bach, M., Lungershausen, U. und J.-H. Frank (2012): Winderosion in Schleswig-Holstein - Kenntnisse und Erfahrungen über Bodenverwehungen und Windschutz. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) [Hrsg.], Flintbek.

DWD – Deutscher Wetterdienst (2011): Deutscher Klimaatlas. http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html.

Frielinghaus, M., Winnige, B., Deumlich, D., Funk, R., Schmidt, W., Thiere, J. und L. Völker (2002a): Informationsheft zum landwirtschaftlichen Bodenschutz im Land Brandenburg – Teil Bodenerosion. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Raumordnung Brandenburg (MLUR) und Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) [Hrsg.], Potsdam.

- Frielinghaus, M., Deumlich, D., Funk, R., Helming, K., Thiere, J., Völker, L. und B. Winnige (2002b): Bodenerosion - Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) [Hrsg.], 2.Auflage, Schwerin.
- Fryrear, D. W., Sutherland, P. L., Davis, G., Hardee, G. and M. Dollar (2001): Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. - Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 1999.
- Fryrear D.W., Bilbro J.D., Saleh A., Schomberg H., Stout J.E. and Zobeck T.M. (2000): RWEQ: improved wind erosion technology. - Journal of Soil and Water Conservation, 55, 183–189.
- Fryrear D.W., Sutherland P.L., Davis G., Hardee, G. and M. Dollar (1999): Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. - Proceedings of conference sustaining the global farm. - Stott D.E, Mohtar R.H and Steinhart G.C [eds]: The 10th International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University, 760–765.
- Funk, R. und Engel, W. (2015): Investigations with a field wind tunnel to estimate the wind erosion risk of row crops. - Soil & Tillage Research, 145, 224-232.
- Funk, R. (2015): Winderosion in Brandenburg - Bodendegradierung und Bodenschutz. – Bodenschutztag am 04.06.2015, Paulinen-aue.
- Funk, R und C. Hoffmann (2010): Boden in der Luft: Brandenburger Äcker – eine Quelle für Feinstaub in Berlin?. – Berliner Geographische Arbeiten, 117, 106-110.
- Funk, R. & L. Voelker (1998): Einschätzung der potentiellen Winderosionsgefährdung in Mecklenburg-Vorpommern im Landesmaßstab mit der Revised Wind Erosion Equation. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 88, 557-560.
- Gregory, J.M., Wilson, G.R., Singh, U.B. and Darwish, M. (2008): TEAM: Integrated, process-based wind-erosion model. - Environmental Modelling and Software, 19(2), 205-215.
- Hagen L.J. (2004): Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields. – Environmental Modelling & Software, 19, 171–176.
- Heimburger, G., Hutter, H.-P., Kundi, M., Moshhammer, H., Schneider, J. und P. Wallner (2008): Feinstaub und Gesundheit. – Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt.
- Hoffmann, C. und Funk, R. (2015): Diurnal changes of PM10-emission from arable soils in NE-Germany. - Aeolian Research, 17, 117-127.
- Hoffmann, C. und R. Funk (2011): Bewertung landnutzungsabhängiger Feinstaubemissionen (TP10). – ZALF e. V. Müncheberg, Präsentation im Rahmen INKA BB Vorhaben.
- Hoffmann, C., Funk, R. und E. Reimer (2012): Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (INKA-BB): Bestimmung der Feinstaubemissionen von Ackerflächen. - ZALF e. V. Müncheberg, Präsentation im Rahmen INKA BB Vorhaben.
- Hollweg, H.D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M. and C. Wunram (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. M & D Technical Report 3.
- Jakob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014): EU-ROCORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. - Reg. Environ. Change, 14:563–578.
- Keil, M., Bock, M., Esch, T., Metz, A., Nieland, S. und A. Pfitzner (2011): CORINE Land Cover 2006 - Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landbedeckungsdaten für Deutschland. - UBA-Texte, 13/2011. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Lu, H. and Shao, Y. (2000): Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications. - Environmental Modelling & Software, 16, 233–249.
- Meinke, I. und E.-M. Gerstner (2009): Digitaler Norddeutscher Klimaatlas informiert über möglichen künftigen Klimawandel. - DMG Mitteilungen, 3-2009, 17.

- Meynen, E. [Hrsg.] (1953-1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde. Remagen.
- Müller, U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) [Hrsg.]. – Arbeitshefte Boden, 2004/02. 7. Auflage.
- MLU - Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2012): Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. - RdErl. des MLU vom 9.8.2012 – 24.6/67131. Magdeburg.
- NAM - National Agronomy Manual (2002): United States Department of Agriculture.
- Norddeutsches Klimabüro (2009): Norddeutscher Klimaatlas. <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de>.
- Schäfer, W., Sbresny, J. und A. Thiermann (2010): Methodik zur Einteilung von landwirtschaftlichen Flächen nach dem Grad ihrer Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 2 Abs. 1 der Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung in Niedersachsen. - Schriftenreihe des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover.
- Schmidt, S. (2014): Entwicklung eines Winderosionsmodells zur potentiellen Gefährdungsabschätzung des Bodenabtrags auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Westsachsen. – Masterarbeit (unveröff.), Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften - Institut für Geographie, Leipzig.
- Schwertmann, U., Vogl, W. und M.Kainz (1990): Bodenerosion durch Wasser. - 2. Aufl., Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Shao, Y. (2008): Physics and modelling of wind erosion. Springer, Cologne.
- Singh, P., Sharratt, B. and W. Schillinger (2012): Wind erosion and PM10 emission affected by tillage systems in the world's driest rainfed wheat region. - Soil & Tillage Research, 124 (2012), 219-225.
- Thiere, J., Altermann, M., Lieberoth, I. und D. Rau (1991): Zur Beurteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach technologisch wirksamen Standortbedingungen. - Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkunde, 35 (1991), 3, 171-183, Berlin.
- UBA (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel – Boden. Umweltbundesamt/Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, Dessau-Roßlau.
- UBA (2009): Feinstaubbelastung in Deutschland. - Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Wagner, B., Steininger, M., Deumelandt, P. und O. Christen (2011): Entwicklung eines Nachhaltigkeitsindikators zur standortspezifischen Bewertung landwirtschaftlicher Anbausysteme in Bezug auf die Abschätzung der Winderosionsgefährdung. - Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 23 - Stickstoff in Pflanze, Boden und Umwelt, Gemeinsame Tagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenzüchtung e. V. und der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.
- Woodruff, N. P. and F. H. Siddoway (1965): A wind erosion equation. - Soil Sci. Soc. Am. porc., 29, 602-608.
- Youssef, F., Visser, S., Karssenbergh, D., Bruggeman, A. and G.Erpul (2012): Calibration of RWEQ in a patchy landscape; a first step towards a regional scale wind erosion model. - Aeolian Research 3, 467–476.