

TEXTE

47/2025

Abschlussbericht

Erosionsgefährdung von Böden durch Wind

Aktualisierung der bundesweiten Betrachtung

von:

Michael Gebel, Mario Uhlig, Stephan Bürger, Stefan Halbfaß
VisDat geodatentechnologie GmbH, Dresden

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 47/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3723 NK 802 0
FB001575

Abschlussbericht

Erosionsgefährdung von Böden durch Wind

Aktualisierung der bundesweiten Betrachtung

von

Michael Gebel, Mario Uhlig, Stephan Bürger, Stefan
Halbfaß
VisDat geodatentechnologie GmbH, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

VisDat geodatentechnologie GmbH
Am Ende 14
01277 Dresden

Abschlussdatum:

September 2024

Redaktion:

Fachgebiet II 2.4 Binnengewässer
Antje Ullrich

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Erosionsgefährdung von Böden durch Wind

Auf Grundlage neu verfügbarer und räumlich hochaufgelöster Datengrundlagen wurde die bundesweite Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Ackerflächen unter Berücksichtigung der Bodenerodierbarkeit durch Wind, der Bodenerosivität des Windes, der Schutzwirkung von Windhindernissen und der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen aktualisiert. Hierfür wurden die bestehenden methodischen Ansätze (DIN 19706 2013, Bug et al. 2020) genutzt. Allerdings wurden methodische Anpassungen zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der Ergebnisse umgesetzt und diskutiert. Fokus lag auf einer Verbesserung der Aussagen zur Schutzwirkung von Windhindernissen und der Bewirtschaftung hinsichtlich der Fruchtartenverteilung. Ergänzend wurde der Einfluss der Bewirtschaftung in drei Szenarien (Fruchtarten mit sehr geringer, mittlerer und sehr guter Schutzwirkung) abgebildet.

Die Ergebnisse zeigen, wo in Deutschland ein hohes Risiko für Bodenerosion durch Wind zu erwarten ist und welche Faktoren bzw. Kriterien hierfür maßgeblich verantwortlich sind. Sie bilden damit die Grundlage für zukünftige Szenarienbetrachtungen zur Minimierung des Erosionsrisikos durch Wind mit Blick sowohl auf die Auswirkungen des Klimawandels und Maßnahmen im Rahmen des natürlichen Klimaschutzes sowie die Ableitung geeigneter Maßnahmen zum Erosionsschutz. Sie können in eine zukünftig mögliche Berichterstattung und die damit in Zusammenhang stehenden Modellierungen und Prognosen zu Veränderungen des Bodenzustands einfließen. Darüber hinaus sind sie ein wichtiger Baustein, wenn Handlungsempfehlungen zum Schutz des Bodens vor Degradation erarbeitet und konzipiert werden. Die Ergebnisse sind über ein bestehendes webbasiertes Auswertewerkzeug (MoRE-Toolbox; <https://stoffeintraege-more.de/>) öffentlich verfügbar.

Abstract: Risk of soil erosion due to wind

As part of this project, the risk of soil erosion due to wind is determined nationwide for arable land, taking into account the soil erodibility due to wind, the soil erosivity of wind (as an annual average wind speed), the protective effect of wind barriers and the protective effect of management measures. In addition, the influence of cultivation is mapped by analysing three individual years (2017, 2018, 2019) with their respective crop type distribution and by including three scenarios (crop types with very low, medium and very good protective effect). The existing methodological approaches (DIN 19706 2013, Bug et al. 2020) as well as newly available and high-resolution data bases are used for this purpose. Furthermore, methodological adjustments to improve the informative value of the results are proposed, implemented and discussed. The results are publicly available via an existing web-based evaluation tool (MoRE-Toolbox; <https://stoffeintraege-more.de/>).

The results form the basis for future scenario analyses to minimise the risk of erosion due to wind with regard to both the effects of climate change and measures in the context of natural climate protection as well as the derivation of suitable measures for erosion protection. They can be incorporated into possible future reporting and the associated modelling and forecasts of changes in soil conditions. In addition, they are an important building block when recommendations for action to protect the soil from degradation are developed and conceptualised.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	20
1 Einleitung	29
1.1 Hintergrund.....	29
1.2 Zielstellung.....	30
2 Methoden und Ergebnisse	31
2.1 Vorbemerkungen	31
2.2 Datengrundlagen	32
2.3 Bodenerodierbarkeit durch Wind	33
2.4 Bodenerosivität des Windes als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit.....	34
2.5 Natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind.....	35
2.6 Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen.....	37
2.6.1 Ausweisung von Windhindernissen	37
2.6.2 Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen.....	40
2.7 Ausweisung der Schutzwirkung in Bezug auf Fruchtarten und der Art der Bewirtschaftung (Bodenbedeckung)	49
2.7.1 Zuordnung der Schutzwirkungsstufen für Fruchtarten und Bodenbedeckung	49
2.7.2 Schutzwirkung von Fruchtarten	53
2.7.3 Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind	55
2.8 Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen	63
2.8.1 Einstufung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind	63
2.8.2 Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen für die sechs Modellläufe	64
3 Überführung der Ergebnisse in das bestehende webbasierte Auswertungswerkzeug.....	70
4 Diskussion der Ergebnisse	71
5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	75
6 Quellenverzeichnis	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fließschema zur Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind für Ackerflächen nach DIN 19706 (2013).....	31
Abbildung 2:	Bodenerodierbarkeit vegetationsfreier und trockener mineralischer Oberböden durch Wind gemäß DIN 19706 (2013)	34
Abbildung 3:	Bodenerosivität des Windes als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit gemäß DIN 19706 (2013); Basis: Daten des Deutschen Wetterdienst (DWD Climate Data Center, 200 m x 200 m, Periode 1981-2000)	35
Abbildung 4:	Natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind gemäß DIN 19706 (2013).....	37
Abbildung 5:	Ermittelte Windhindernisse im Vergleich unterschiedlicher Ausweisungsmethoden.....	39
Abbildung 6:	Stufen der Schutzwirkung und Einteilung von Schutzbereichen vor und hinter Windhindernissen	41
Abbildung 7:	Prozentuale Aufteilung der Anteilklassen je Hauptwindrichtung für den Zeitraum 1995 bis 2012, bezogen auf alle Rasterzellen (Krähenmann et al. 2016)	43
Abbildung 8:	Rasterbasierte vorherrschende Hauptwindrichtung im Bundesgebiet für den Zeitraum 1995 bis 2012 (Krähenmann et al. 2016)	44
Abbildung 9:	Prozentuale Anteile der Schutzwirkungsstufen je vorherrschender Hauptwindrichtung auf Ackerflächen.....	45
Abbildung 10:	Rasterbasierte Ermittlung der Schutzwirkungsbereiche für Windhindernisse auf Ackerflächen je Hauptwindrichtung (Detailausschnitt).....	46
Abbildung 11:	Beispielhafte Erläuterung der flächengewichteten Mittelung der Schutzwirkungsbereiche, reduziert auf zwei (oben) bzw. drei (unten) Windrichtungen	47
Abbildung 12:	Rasterbasierte bundesweite Ausweisung der Schutzwirkungsstufen für Windhindernisse unter Einbeziehung der anteilig gemittelten Hauptwindrichtungen auf Ackerflächen (Detailausschnitt).....	49
Abbildung 13:	Fruchtartenverteilung auf Ackerflächen im Bundesgebiet für die Jahre 2017, 2018 und 2019 auf Basis der Auswertung von Sentinel-Daten (Blickensdörfer et al. 2021)	50
Abbildung 14:	Wechsel der Fruchtartenverteilung von 2017 bis 2019 für ein Beispielgebiet (Blickensdörfer et al. 2021).....	51
Abbildung 15:	Bewertung der Schutzwirkung von Fruchtarten auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung der Jahre 2017, 2018 und 2019	54

Abbildung 16:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2017	56
Abbildung 17:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2018	57
Abbildung 18:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2019	58
Abbildung 19:	Anteil von Fruchtarten mit geringer bzw. sehr geringer Schutzwirkung an der Ackerfläche (als Gesamtfläche aller Fruchtarten) im Vergleich mit der sich ergebenden gemittelten Schutzwirkungsstufe und der Bodenerosionsgefährdungsstufe je Bundesland für das Jahr 2019	59
Abbildung 20:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung (z.B. Mais) (Szenario 1)	60
Abbildung 21:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit mittlerer Schutzwirkung (z.B. Winterweizen) (Szenario 2).....	61
Abbildung 22:	Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr guter Schutzwirkung (Dauerbegrünung, z.B. Ackergras) (Szenario 3	62
Abbildung 23:	Vergleich der modellierten bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Szenario 1 bis 3 anhand der gemittelten Schutzwirkung je Bundesland	63
Abbildung 24:	Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen für die Fruchtartenverteilung in den Jahren 2017 bis 2019	65
Abbildung 25:	Bodenerosionsgefährdung durch Wind unter Einbeziehung von Windhindernissen und einer sehr geringen, mittleren und sehr guten Schutzwirkung der Bewirtschaftung (Szenario 1 bis 3) .	66
Abbildung 26:	Finale Bodenerosionsgefährdung durch Wind im Vergleich für die sechs Modellläufe in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Einbeziehung der Schutzwirkung von Windhindernissen (für alle Modellläufe identisch) für einen Detailausschnitt	67
Abbildung 27:	Vergleich der Ergebnisse der abgestuften Modellierung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind für die Jahre 2017, 2018 und 2019 sowie die drei Szenarien 1, 2 und 3 anhand der	

	aufsummierten Anteile der Gefährdungsklassen „sehr hoch“ und „hoch“	68
Abbildung 28:	Vergleich der mittleren Bodenerosionsgefährdung (anteilig gewichteter arithmetischer Mittelwert aus den Stufen 0, 1, 2, 3, 4, 5) in Abhängigkeit von der Schutzwirkung von Bewirtschaftung und Windhindernissen für die Bundesländer für Einzeljahre und Fruchtartenszenarien	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stufen der Erodierbarkeit vegetationsfreier und trockener Oberböden durch Wind in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Gehalt an organischer Substanz (Humus) nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5; Ad-hoc-AG Boden 2005).....	33
Tabelle 2:	Matrix zur Ausweisung der natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der Bodenerodierbarkeit durch Wind und der Bodenerosivität des Windes (Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in m/s) nach DIN 19706 (2013)	36
Tabelle 3:	Ableitung der Schutzwirkung für die Fruchtarten für konventionelle Bearbeitung sowie korrigiert für pfluglose Bearbeitung, Zwischenfrüchte und Untersaaten	53
Tabelle 4:	Matrix zur Ableitung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind anhand der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen	55
Tabelle 5:	Matrix zur Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen	64

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ABAG/USLE	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung/Universal Soil Loss Equation
ATKIS	Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BÜK 1000	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BGR)
BÜK 200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BGR)
CDC	Climate Data Center des DWD
DGM1	Digitales Geländemodell in einer Rasterweite von 1 m
DGM10	Digitales Geländemodell in einer Rasterweite von 10 m
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DOM1	Digitales Oberflächenmodell in einer Rasterweite von 1 m
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
N	Nord
NN	Normalnull
NO	Nordost
NW	Nordwest
O	Ost
S	Süd
SO	Südost
SW	Südwest
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
W	West
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V.

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielstellung

Mit Inkrafttreten der neuen Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) im Jahr 2023 als Teil der sogenannten Mantelverordnung (BGBl. I S.2598) wird nun neben der Erosion durch Wasser auch die Erosion durch Wind adressiert (§9 BBodSchV) und ist zu berücksichtigen. Bodenerosion durch Wind ist grundsätzlich ein natürlicher Prozess, der allerdings bspw. durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung insbesondere bei fehlender Bodenbedeckung verstärkt wird und auf den betroffenen Flächen (On-site) sowie am Ort der Ablagerung des transportierten Materials (Off-site) Schäden hervorruft.

Neben den bereits gegenwärtig erkennbaren Gefährdungen und Risiken stellt sich darüber hinaus die Frage, in welchem Maß sich in Deutschland die Bodenerosionsgefährdung durch Wind unter dem Einfluss des Klimawandels und der Bewirtschaftung verändert und inwiefern Gegenmaßnahmen zur Verminderung bzw. Vermeidung von Bodenerosion durch Wind zu ergreifen und Handlungsempfehlungen abzuleiten sind.

Die Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Ackerflächen erfolgt unter Berücksichtigung der Bodenerodierbarkeit durch Wind, der Bodenerosivität des Windes, der Schutzwirkung von Windhindernissen und der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Bodenbedeckung durch die Frucht). Bundesweite Betrachtungen zur Bodenerosionsgefährdung durch Wind wurden bereits in einem vom Umweltbundesamt (UBA) finanzierten Forschungsprojekt von Wurbs & Steininger (2017) umgesetzt. Ziel dieses Vorhabens war es, diese bundesweite Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Grundlage bestehender methodischer Ansätze (DIN 19706 2013, Bug et al. 2020) zu aktualisieren. Hintergrund ist die Verfügbarkeit neuer und räumlich höher aufgelöster Datengrundlagen. So konnten Wurbs & Steininger (2017) zum damaligen Zeitpunkt für die Ausweisung der Erodierbarkeit des Bodens lediglich auf die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000), die flächendeckend für Deutschland vorlag, zurückgreifen. Seit 2020 ist die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BÜK 200, BGR) flächendeckend verfügbar und soll im vorliegenden Vorhaben genutzt werden. Regionalspezifische Gegebenheiten können somit differenzierter wiedergegeben werden. Darüber hinaus sollen weitere neu verfügbare und hochaufgelöste Datengrundlagen genutzt werden und daran anknüpfend methodische Anpassungen zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der Ergebnisse vorgeschlagen, diskutiert und umgesetzt werden.

Die Ergebnisse sollen in ein bestehendes webbasiertes Auswertewerkzeug (MoRE-Toolbox; <https://stoffeintrage-more.de/>) integriert und öffentlich verfügbar gemacht werden. Sie bilden die Grundlage für zukünftige Szenarienbetrachtungen zur Minimierung des Erosionsrisikos durch Wind mit Blick sowohl auf die Auswirkungen des Klimawandels und Maßnahmen im Rahmen des natürlichen Klimaschutzes als auch die Ableitung geeigneter Maßnahmen zum Erosionsschutz.

Methoden und Ergebnisse

Die Modellierungen zur Bodenerosionsgefährdung durch Wind erfolgen durchgängig auf einem deutschlandweiten Raster mit einer Kantenlänge von 10 m.

Das methodische Vorgehen orientiert sich grundsätzlich an den Vorgaben gemäß DIN 19706 (2013).

In einem ersten Schritt wurde die **Bodenerodierbarkeit durch Wind** bezogen auf vegetationsfreie und trockene mineralische Oberböden abgeleitet. Wichtige Datengrundlage war

die BÜK 200 (Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000). Die Erodierbarkeit des Bodens wurde dabei gemäß DIN 19706 (2013) aus der Bodenart des Oberbodens und der jeweiligen Humusgehaltsstufe nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5; Ad-hoc-AG Boden 2005) abgeleitet. Gebel et al. (2024) und Fuchs et al. (2022) hatten in ihren Arbeiten bereits die Datenbasis der BÜK 200 und die Zuordnung der darin enthaltenen polygonbezogenen Profil- und Horizontmerkmale der miteinander vergesellschafteten Bodenformen zu Nutzungskategorien von ATKIS-DLM (BKG 2019) auf ein 10 x 10 m Raster disaggregiert. Diese Ergebnisse konnten hier direkt genutzt werden. Bei der Ermittlung der Bodenerodierbarkeit durch Wind wurden alle Landnutzungsklassen berücksichtigt, für die die benötigten Bodendaten verfügbar sind (Ackerland, Grünland, Obstplantage, Weingarten, Nadelwald, Laubwald und Mischwald). Eine „hohe“ bis „sehr hohe“ Bodenerodierbarkeit ergibt sich auf ca. 22 % der betrachteten Fläche Deutschlands, insbesondere in den nördlich gelegenen überwiegend lockergesteinsbeeinflussten Regionen. Für knapp 47 % der betrachteten Fläche ist die Erodierbarkeit durch Wind als „niedrig“ einzuschätzen.

Für die sich anschließende Ableitung der **Bodenerosivität des Windes** als eine Funktion der Windgeschwindigkeit wurden analog zur DIN 19706 (2013) die Rasterdaten zum langjährigen Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in freien Lagen in 10 m Höhe über Grundlage des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Climate Data Center, 200 m x 200 m, Periode 1981-2000) genutzt. Diese Werte wurden ebenfalls auf das 10 m x 10 m Raster disaggregiert. Die Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten erfolgt nach DIN 19706 (2013). Höhere Windgeschwindigkeiten treten erwartungsgemäß im Nordwesten Deutschlands, aber auch in den küstennäheren Gebieten der Ostsee sowie in den Gebirgslagen auf.

In Abhängigkeit von der Bodenerodierbarkeit durch Wind und der Bodenerosivität des Windes ergibt sich die **natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind**. Sowohl hinsichtlich der Bodenerodierbarkeit als auch der Bodenerosivität des Windes besteht ein deutliches Nord-Süd-Gefälle, welches sich entsprechend auch in der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind widerspiegelt. Die Hotspots der natürlichen Bodenerosionsgefährdung liegen in der Nordhälfte Deutschlands und hier in den Lockergesteinsgebieten (Jung- und Altmoränenlandschaften) sowie abgeschwächt in den höheren Mittelgebirgslagen. Auf gut 20 % der betrachteten Fläche wird somit eine hohe bis sehr hohe natürliche Bodenerosionsgefährdung ausgewiesen.

Für die Ausweisung von **Windhindernissen** sollten Datensätze herangezogen werden, die eine bundesweite Vergleichbarkeit gewährleisten. Hierbei stehen linienhafte und flächenhafte Objekte, wie Hecken und Baumreihen, genauso wie Siedlungsobjekte oder Waldparzellen im Fokus. Die erforderliche Kategorisierung von Windhindernissen findet sich in der DIN 19706 (2013). Dort sind die Höhen der Hindernisse pauschal nach Nutzung gemäß ATKIS-DLM-Datensatz des BKG (2022) in unterschiedlichen Hinderniskategorien festgesetzt. Die Kategorisierung der Windhindernisse erfolgt allerdings stark vereinfachend. So erhalten die vorgegebene Nutzungskategorien von ATKIS-DLM pauschal eine einheitliche Höhe (z.B. 20 m für die Nutzungskategorie „Wald“). Die hierbei überwiegend als Polygone abgelegten Nutzungen erhalten zudem durchgängige Höhen. Zum Beispiel sind alle Siedlungsobjekte vollflächig 10 m hoch, unabhängig von der Art der Bebauung. Durch die Festlegung auf den Datensatz des ATKIS-DLM können zudem nur Windhindernisse erfasst werden, die dort als Nutzungskategorie klassifiziert wurden. So sind insbesondere linienhafte Strukturen, wie Hecken, Baumreihen, etc. in ATKIS-DLM nicht ausreichend miterfasst.

In einem ersten Schritt wurde, den Vorgaben der Kategorisierungen der DIN 19706 (2013) folgend, der ATKIS-DLM-Datensatz wie oben erläutert genutzt, um Windhindernisse und deren Höhen auszuweisen. Da Windhindernisse und deren Schutzwirkung einen erheblichen Einfluss

auf das Winderosionsgeschehen haben, wurde parallel geprüft, inwieweit höher aufgelöste Datenquellen für die Ausweisung in Frage kommen. Hier bietet sich insbesondere das inzwischen bundesweit konsistent verfügbare Digitale Oberflächenmodell (DOM) des BKG (2019) mit einer 1 m Gitterweite an. Eine Extrahierung von Windhindernissen aus dem DOM1 ist prinzipiell durch eine Differenzenbildung mit einem Digitalen Geländemodell (DGM), in dem die Geländeform der Erdoberfläche abgebildet wird und damit Bauwerke und Vegetationsbestandteile nicht enthalten sind, möglich. Die Höhenwerte des DOM1 wurden auf das 10 m Raster aggregiert und von dem erzeugten Mittelwert der Höhen des DGM10 je Rasterzelle subtrahiert. Im Ergebnis wurde die mittlere Höhe des Hindernisses je 10 m x 10 m Rasterzelle ausgegeben. Objekte, die nicht als Windhindernisse interpretiert werden sollen (z.B. Freileitungen) wurden so weit wie möglich eliminiert.

Im Ergebnis wird deutlich, dass auf Grundlage der Nutzung von DOM und DGM die Windhindernisse sowohl hinsichtlich Lage als auch Höhe mit einer deutlich höheren Genauigkeit ausgewiesen werden können, als dies bei der Nutzung der ATKIS-DLM-Geometrien möglich ist. Aus diesem Grund wurde entschieden, Windhindernisse und deren Höhe abweichend zur DIN 19706 (2013) sowie zu Wurbs & Steininger (2017) auf Basis von dem aus DOM/DGM abgeleiteten Datensatz für die weitere Arbeit und die Ausweisung der Schutzwirkung zu verwenden.

Die Klassifizierung der **Schutzwirkung von Windhindernissen** erfolgt nach DIN 19706 (2013) für Ackerflächen, da diese aufgrund der bewirtschaftungsbedingten phasenweisen Unbedecktheit, potenziell von einem besonders hohen Erosionsrisiko durch Wind betroffen sein können. Hier wird davon ausgegangen, dass sowohl vor (im Luv) als auch nach Windhindernissen (im Leebereich) eine Schutzwirkung vor Winderosion senkrecht zur jeweiligen Windrichtung besteht. Diese unterteilt sich in fünf Schutzwirkungsstufen 5 bis 1 (sehr hoch bis gering). Die höchste Schutzwirkung (Stufe 5) besteht unmittelbar vor und hinter dem Hindernis bis zu einer Entfernung, die der 5-fachen Höhe des Hindernisses entspricht. Im Luvbereich wird angenommen, dass darüber hinaus keine Schutzwirkung besteht. Im Leebereich wird eine weitere Schutzwirkung angenommen, die mit zunehmender Entfernung vom Hindernis abnimmt. Die maximale Schutzwirkung in der geringsten Schutzstufe reicht bis zu einer Entfernung, die der 25-fachen Höhe des Hindernisses entspricht.

Für die Ermittlung der Schutzwirkung sind darüber hinaus die Häufigkeiten der acht Hauptwindrichtungen zu berücksichtigen. Die Verteilung der Hauptwindrichtungen wurde hierfür aus dem Datensatz des DWD (1 km Raster, tägliche Werte von 1995 bis 2012, Krähenmann et al. 2016) generiert.

In der Auswertung der acht Hauptwindrichtungen im langjährigen Mittel (1995 bis 2012) wird deutlich, dass Südwestwinde zwar vorherrschend sind (67,1 %), ihr Anteil gegenüber allen anderen Hauptwindrichtungen mit 23,7 % allerdings nicht sehr dominant ist. Am zweithäufigsten sind Westwinde.

Für jede der acht Hauptwindrichtungen kann der Wind grundsätzlich in einem Bereich von 45° auf ein Hindernis auftreffen. Dadurch ergibt sich durch das Hindernis ein trichterförmiger Bereich, der jeweils potenziell überstrichen werden kann und bei senkrecht zur Windrichtung stehenden Hindernissen Schutzwirkungsbereiche bildet. Dies ist bei der Ableitung der Schutzwirkung im Luv- und Leebereich für jedes Hindernis zu berücksichtigen.

Die Ausweisung der Schutzwirkungsbereiche je Hauptwindrichtung für die Ackerflächen zeigt, dass die Exposition von Hindernissen im Gelände in bundesweiter Betrachtung relativ gleichverteilt ist. Es gibt also keine Hauptwindrichtung, die besonders stark durch Hindernisse gepuffert wird. Auch der Anteil der Ackerfläche, auf dem keine Schutzwirkung durch

Hindernisse angenommen werden kann, liegt bei allen Hauptwindrichtungen bei ungefähr 34 %. Aufgrund der Dominanz von Südwest- und Westwinden werden aber Hindernisse, die senkrecht zu diesen beiden Windrichtungen angeordnet sind, eine vergleichsweise höhere Wirksamkeit im Hinblick auf die Minderung des Bodenerosionsrisikos durch Wind entfalten können.

Gemäß DIN 10706 (2013) wird die Schutzwirkung von Windhindernissen jeweils nur in Bezug auf die vorherrschende Windrichtung ermittelt. Auch wenn die vorherrschende Hauptwindrichtung bundesweit überwiegend Südwest ist, ist ihr Anteil bezogen auf alle Hauptwindrichtungen nicht dominant. Es kommt somit zu einer hohen Überbewertung der Schutzwirkung von Hindernissen, die aufgrund ihrer Exposition z.B. eine Schutzwirkung gegenüber Südwestwinden entfalten können. Alternativ empfehlen Bug et al. (2020) eine prozentual gewichtete Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen für die Ableitung der Schutzwirkung (siehe auch Schäfer et al. 2017). Folge der gewichteten Mittelwertbildung ist eine Verschiebung der Schutzwirkung. Bereiche mit sehr hoher und hoher Schutzwirkung werden gemindert. Die Flächen mit mittlerer, geringer und sehr geringer Schutzwirkung nehmen hingegen zu, während die Bereiche mit fehlender Schutzwirkung zurück gehen. Trotzdem erscheint diese Methode für die hier im Mittelpunkt stehende bundesweite und stärker regionalisiert angelegte Betrachtung als deutlich geeigneter, um Schutzwirkungsbereiche von Windhindernissen auf Ackerflächen und daraus abgeleitet die Bodenerosionsgefährdung abzubilden. Daher wurden, diesem Ansatz folgend, abweichend zur DIN die Schutzwirkungsbereiche von Windhindernissen für Ackerflächen grundsätzlich für alle acht Hauptwindrichtungen ermittelt und entsprechend der Anteile der Hauptwindrichtungen gewichtet gemittelt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Einstufung der **Schutzwirkung von Fruchtarten**. Die Beeinflussung der Bodenerosionsgefährdung auf Ackerflächen durch die angebauten Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen und ggf. Bewirtschaftungsmaßnahmen wird ebenfalls in der DIN 19706 (2023) näher ausgeführt. Es werden fünf Schutzwirkungsstufen (sehr gering bis sehr gut) ausgewiesen, die hauptsächlich die Bodenbedeckung bzw. fehlende Bodenbedeckung widerspiegeln. Diese Einstufungen der Schutzwirkung gelten für eine konventionelle Bewirtschaftung mit dem Pflug, also nicht für pfluglose Bodenbearbeitung und berücksichtigen keinen Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten.

Für die bundesweite Ableitung der Schutzwirkungsstufen in Abhängigkeit von der angebauten Fruchtart wurde die digital vorliegende Verteilung der Hauptfruchtarten auf Ackerflächen für die Jahre 2017 bis 2019 genutzt (Blickensdörfer et al. 2021). Die Daten wurden auf Grundlage von Sentinel-Daten abgeleitet und liegen als Raster-Datensatz mit einer Gitterweite von 10 m vor. Dieser Datensatz hat eine sehr hohe räumliche Auflösung mit einem vertretbaren Maß an Unschärfe. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu Daten der Agrarstatistik (z.B. Kreisebene), die keine räumliche Verortung von Fruchtarten erlaubt. Die Fruchtartenverteilung der Jahre 2017, 2018 und 2019 zeigt erwartungsgemäß eine im bundesweiten Mittel recht ähnliche prozentuale Verteilung der Fruchtarten. Erst bei hoher räumlicher Auflösung wird der kleinräumige Wechsel der Fruchtarten deutlich.

Für pfluglose Bodenbearbeitung und den Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten kann ausgehend von den oben genannten Schutzstufen ein höherer Bodenbedeckungsgrad durch Zuschläge zur Schutzwirkungsstufe berücksichtigt werden. Hier wird weitgehend den Vorgaben in DIN 19706 (2013) und Bug et al. (2020) gefolgt.

Im Ergebnis der Ableitung der Schutzwirkung für die Fruchtarten auf Basis der korrigierten Schutzwirkungsstufen für die drei betrachteten Einzeljahre 2017, 2018 und 2019 zeigt sich, dass sich die Schutzwirkungsstufen im bundesweiten Mittel nur unwesentlich voneinander

unterscheiden. Hotspotgebiete mit besonders niedrigen Schutzwirkungen liegen im Nordwesten Deutschlands, im Oberrheingraben sowie in Bayern insbesondere aufgrund höherer Maisanteile.

Für weitere Betrachtungen wurden drei Bewirtschaftungsszenarien festgelegt, indem flächendeckend der Anbau einer Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung (Vegetationsdecke geschlossen ab Sommer, z.B. Mais, Szenario 1, Worst case), mit mittlerer Schutzwirkung (Wintergetreide, Aussaat nach 1. Okt., Szenario 2) und mit sehr guter Schutzwirkung (Dauerbegrünung, Futterpflanzen, Szenario 3, Best case) unterstellt wird.

Die Ableitung der **bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung** erfolgt gemäß DIN 19706 (2013) aus der Stufe der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen für die drei Einzeljahre sowie die drei Szenarien. In allen Betrachtungen wird deutlich, dass die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung im Wesentlichen in der Nordhälfte Deutschlands größer ist, was in der dort ebenfalls höheren Einstufung im Hinblick auf die natürliche Bodenerosionsgefährdung begründet ist.

Die Ergebnisse für die Einzeljahre unterscheiden sich wegen der nahezu gleichbleibenden mittleren Fruchtartenverteilung nur in der kleinräumigen Betrachtung. Sehr hohe Risiken werden lediglich für ca. 0,3 bis 0,4 %, hohe Risiken für knapp unter 5 % der Ackerfläche ausgewiesen. Keine bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung ergibt sich auf ca. 72 % der Ackerfläche. Eine erhöhte bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung ist vor allem in den nordwestlichen Teilen Deutschlands u.a. aufgrund höherer Maisanteile gegeben. Mögliche Maßnahmen zur Minderung der Bodenerosion durch Wind könnten hier u.a. Fruchtartenwechsel, eine Erhöhung der Anteile bodenkonservierender Bearbeitung oder auch die Anlage von Windschutzpflanzungen sein.

Bei der Ermittlung der bewirtschaftungsbezogenen Schutzwirkung durch Wind für Szenario 1 (Worst case) wird flächendeckend eine sehr geringe Schutzwirkung auf der Ackerfläche angenommen. Die Ergebnisse entsprechen denjenigen der natürlichen Bodenerosionsgefährdung. Bei Anbau einer Fruchtart mit mittlerer Schutzwirkung (Szenario 2) ergibt sich im ungünstigsten Fall eine mittlere Bodenerosionsgefährdung. Die höchsten Werte treten auch hier in den Regionen mit höherer natürlicher Bodenerosionsgefährdung, also insbesondere in der nördlich gelegenen Hälfte Deutschlands auf. Im Falle einer sehr guten Schutzwirkung der angebauten Fruchtart (Szenario 3) wird keine Bodenerosionsgefährdung mehr ausgewiesen.

In einem letzten Schritt erfolgt die Einstufung der **Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung und der Schutzwirkung von Windhindernissen** analog der Methode der DIN 19706 (2013) getrennt für die sechs Modellläufe.

Hierbei wird jeweils von derselben Schutzwirkung von Windhindernissen ausgegangen. Für die drei betrachteten Einzeljahre (2017 bis 2019) ändert sich zwar die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung, was sich im Mittel aber nur marginal auswirkt. Für die Szenarien 1 bis 3 wird, wie oben beschrieben, eine flächendeckende Verbreitung von je einer Kultur mit sehr geringer, mittlerer und sehr guter Schutzwirkung unterstellt.

Die Ergebnisse für die ermittelte Bodenerosionsgefährdung für die drei Einzeljahre unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Eine hohe bis sehr hohe Bodenerosionsgefährdung beschränkt sich auf ca. 1 % der Ackerfläche, keine Gefährdung ist hingegen für 85 % der Ackerfläche ausgewiesen.

Erwartungsgemäß unterscheidet sich die final ermittelte Bodenerosionsgefährdung durch Wind für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien 1 bis 3 deutlich voneinander.

- In Szenario 1 werden ca. 8 % der Ackerfläche mit einer hohen bis sehr hohen Gefährdung belegt, für 45,5 % wird hingegen keine Gefährdung ausgewiesen.
- Szenario 2 geht von einer maximal mittleren Gefährdung aus, die für 2,1 % der Ackerfläche gilt. Der Anteil mit keiner Gefährdung steigt hingegen auf 82,3 % an.
- Für Szenario 3 werden keine Gefährdungen der Ackerfläche durch die Bodenerosion durch Wind ausgewiesen.

Diskussion der Ergebnisse

Die im Mittelpunkt des Vorhabens stehende Bewertung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerböden nutzt bereits bestehende Ansätze, insbesondere die in der DIN-Norm 19706 (2013) beschriebene Verfahrensweise. Vor allem bei der Vorgehensweise zur Ermittlung der Windhindernisse und deren Höhe sowie bei der Konvention zur Ausweisung der sich daraus ableitenden Schutzwirkungsbereiche wird aber bewusst von der DIN Norm abgewichen.

Die nach DIN 19706 (2013) einbezogenen vier Kriterien „Boden“, „Klima / Witterung“, „Bewirtschaftung / Bodenbedeckung“ und „Schutzwirkung Windhindernisse“ werden nacheinander und relativ gesehen gleichgewichtet verarbeitet. Diese Vorgehensweise mit allerdings abweichenden Kriterien wurde analog auch bei der Erarbeitung der DIN 19708 (2017) in Anwendung der ABAG/USLE für die Bewertung von Bodenerosion durch Wasser realisiert (vgl. Schwertmann et al. 1990, Wischmeier & Smith 1978). Zudem ist wie auch bei der Konzeption der ABAG bzw. USLE festzuhalten, dass die einbezogenen Kriterien weitgehend nicht voneinander abhängen und sich somit nicht gegenseitig verstärken oder abschwächen. Dieses Prinzip sollte auch bei der Anwendung der DIN 19706 (2013) so erhalten bleiben. Insofern ist der Spielraum für Modifizierungen hier eng begrenzt.

Dieser Logik folgend wurde insbesondere geprüft, inwieweit die seit 2013 weiter fortgeschrittene Verfügbarkeit von Eingangsdaten zur Ableitung der Erosionsgefährdung anhand der vier oben genannten Kriterien für die Umsetzung des Verfahrens nach DIN 19706 (2013) genutzt werden kann.

Hinsichtlich der Bodendaten wurde auf die Datenbasis der BÜK 200 (BGR 2022) zurückgegriffen, die auf Bundesebene flächendeckend und harmonisiert digital verfügbar ist. Höher aufgelöste Bodenübersichtskarten (z.B. im Maßstab 1:50.000) liegen nicht in allen Bundesländern digital und flächendeckend vor. Weiterhin sind diese Kartenwerke an den jeweiligen Ländergrenzen nicht ausreichend harmonisiert. Deshalb wurde deren Nutzung im vorliegenden Vorhaben verworfen. Auch wenn die BÜK 200 als Kartenwerk mit Informationen im kleinen Maßstab stärker generalisierte Bodendaten bereitstellt, als z.B. die BK50, ist doch davon auszugehen, dass die für die Ableitung der Bodenerodierbarkeit benötigten Informationen zu Bodenarten und Humusgehalten für die im vorliegenden Vorhaben vollzogenen Ableitungen in ausreichender Genauigkeit vorliegen.

Die Windgeschwindigkeit wurde den Vorgaben der DIN 19706 (2013) folgend berücksichtigt. Die sich im langjährigen Mittel aus dem DWD-Datensatz ergebenden Windgeschwindigkeiten sind logischerweise geglättet, Starkwinde sind aufgrund ihrer geringen zeitlichen Frequenz nicht enthalten. In der DIN wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem die natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind je nach vorliegender Stufe der Bodenerodierbarkeit bereits bei Windgeschwindigkeiten > 3,0 m/s die höchste Risikostufe erreicht. Würde die Windgeschwindigkeit in höherer zeitlicher Auflösung einbezogen, wäre der Bewertungsrahmen

der DIN-Norm hier also neu zu überdenken, da eine Verschiebung hin zu höheren Risikostufen zu erwarten wäre.

Eine Ermittlung der Schutzwirkung fokussiert auf bestimmte Jahreszeiten mit besonders geringer Bodenbedeckung erfolgte nicht, da die Bodenbedeckung auf Ackerflächen je nach Bewirtschaftungspraxis, der angebauten Fruchtart und der Witterung im Anbaujahr sehr unterschiedlich ausfallen kann. Prinzipiell sind je nach Konstellation und Zusammenspiel dieser Faktoren fast das gesamte Jahr Phasen mit geringer Bodenbedeckung denkbar, wenn auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unbedeckter Phasen in den Sommermonaten (insbesondere Juni und Juli) am geringsten sein dürfte. Auch die DIN 19706 (2013) sieht keine jahreszeitliche Limitierung bei der Ableitung der Hauptwindrichtung vor. Der erosionsmindernde oder fördernde Effekt der Bodenbedeckung wird durch Einbeziehung der Schutzwirkung von Fruchtarten und deren Bewirtschaftungspraxis bereits abgebildet. Insofern würde der Fokus auf bestimmte Jahresphasen mit geringer Bodenbedeckung zu einer Doppelbewertung des Aspekts der Bodenbedeckung führen, was vermieden werden sollte.

Informationen zur Windgeschwindigkeit liegen weder für die verschiedenen Hauptwindrichtungen noch für die jeweils abgeleitete vorherrschende Hauptwindrichtung vor. Insofern geht eine ermittelte vorherrschende Hauptwindrichtung nicht zwangsläufig mit besonders hohen Windgeschwindigkeiten einher. Beide Sachverhalte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden in der DIN 19706 (2013) nicht im Zusammenhang betrachtet und somit losgelöst voneinander bewertet.

Für die Ableitung der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. (alternativ) Fruchtfolgen wurde für die Jahre 2017 bis 2019 ein hoch aufgelöster Datensatz genutzt (Blickensdörfer et al. 2021). Zusätzlich wurden Szenarien betrachtet, in denen von einem flächendeckenden Anbau einer Fruchtart der Risikostufe 1, 3 bzw. 5 ausgegangen wurde. Die risikomindernde Wirkung von Bewirtschaftungspraktiken, wie der pfluglosen Bodenbearbeitung oder Zwischenfruchtanbau kann aktuell nur grob und ohne räumliche und zeitliche Differenzierung berücksichtigt werden, da diese Daten bundesweit nicht höher aufgelöst verfügbar waren.

Der Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen wurde besonderes Augenmerk gewidmet. Auch hier macht die DIN 19706 (2013) klare Vorgaben hinsichtlich deren Wirksamkeit in Bezug auf die Hindernishöhe und die sich ergebenden Schutzwirkungsbereiche.

Weiterhin definiert die DIN, dass die Ausweisung der Schutzbereiche von Hindernissen senkrecht zur Hauptwindrichtung im Jahresmittel erfolgen soll. Tagesmittel der stündlichen Raster der Windrichtung für Deutschland (Krähenmann et al. 2016) hält der DWD digital vor. Prinzipiell ist es somit auch möglich, Hauptwindrichtungen für ausgewählte Monate im langjährigen Mittel zu extrahieren. Wie oben bereits diskutiert würde aber eine Modifizierung der Ermittlung der Hauptwindrichtung vom langjährigen Jahresmittel zu bestimmten Phasen des Jahres, z.B. mit besonders geringer Bodenbedeckung, zu einer Übergewichtung des Einflusses der Bodenbedeckung in der Bewertungsmatrix der DIN 19706 (2013) führen. Der Einfluss der Bodenbedeckung ist bei der Ausweisung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind bereits enthalten. Insofern wurde auf eine solche Vorgehensweise bewusst verzichtet und die langjährigen Mittelwerte der Hauptwindrichtungen genutzt.

Abweichen von der DIN 19706 (2013) wurde zur Ableitung der Schutzwirkung von Windhindernissen nicht nur die vorherrschende Hauptwindrichtung berücksichtigt, sondern nach der Empfehlung von Bug et al. (2020) sowie Schäfer et al. (2017) die Schutzwirkungsbereiche prozentual gewichtet unter Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen abgeleitet. Bei ausschließlicher Berücksichtigung der vorherrschenden

Hauptwindrichtung ergäbe sich eine deutliche Überschätzung der Risikominderung immer dann, wenn die Dominanz der vorherrschenden Windrichtung eher gering ausfällt. Dies ist jedoch auf der bundesweiten Betrachtungsebene im Regelfall gegeben. So sind die beiden Hauptwindrichtungen Südwest und West relativ gesehen zwar dominant, trotzdem liegen die Anteile der verbleibenden sechs Hauptwindrichtungen immer noch auf einem relevant hohen Niveau. Bei bundesweiter Betrachtung des Phänomens Winderosion bzw. deren Risiko und möglichen Optionen zur Risikominderung steht eher die regionalisierte Betrachtung und Bewertung des Phänomens im Vordergrund, weswegen die oben beschriebene Vorgehensweise mit anteiliger Berücksichtigung aller Hauptwindrichtungen gewählt wurde. Stehen standortsbezogene Fragen im großen Maßstab im Vordergrund (z.B. Planung einer Windschutzhecke), kann eine Betrachtung der dominanten Hauptwindrichtung eher sinnvoll sein. Allerdings wäre es in dieser Maßstabsebene wiederum sinnvoll zu prüfen, ob die vorherrschende Hauptwindrichtung auch in Phasen fehlender oder geringer Bodenbedeckung dominant auftritt und somit die Windschutzpflanzung ihre optimale Wirkung entfalten kann. Weiterhin würde es sich hier anbieten zusätzlich zur Windrichtung auch die Windgeschwindigkeit für diese Phasen geringer Bodenbedeckung einzubeziehen. So geht eine ermittelte vorherrschende Hauptwindrichtung nicht zwangsläufig mit besonders hohen Windgeschwindigkeiten einher. Beide Sachverhalte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden in der DIN 19706 (2013) nicht im Zusammenhang betrachtet und somit losgelöst voneinander bewertet.

Eine Berücksichtigung der für die Auslösung von Winderosion relevanten Treiber und deren Wirkung auf das Risiko für Winderosion erfordert einen Wechsel hin zu einer stärker prozessorientierten räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Modellierung an Stelle der sehr stark vereinfachenden und auf die Abbildung langjähriger mittlerer Risiken abzielenden DIN 19706 (2013). Eine prozessbasierte Betrachtung des Erosionsrisikos wäre auch Voraussetzung für die bisher fehlende bundesweite quantifizierende Betrachtung Abtrags- sowie Akkumulationsraten.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die deutschlandweite Einstufung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind nach DIN 19706 (2013) zeigt die möglichen Risiken in Bezug auf das Auftreten von Bodenerosion unter bestimmten Rahmenbedingungen. Hotspotgebiete in Deutschland und die maßgeblichen Faktoren können identifiziert werden.

Um weitergehende Aussagen treffen zu können ist es prinzipiell und mit vertretbarem Aufwand möglich, Maßnahmenszenarien wie eine Zunahme von Windhindernissen und die Wirkung dieser Maßnahmen auszuweisen. Weiterhin zeigt sich, dass der durch die DIN-Norm aufgespannte Bewertungsrahmen für die bundesweite Bewertung durchaus geeignet ist, um z.B. Maßnahmen zur Minderung des Erosionsrisikos durch eine Modifikation der Bewirtschaftung (z.B. Wechsel der Fruchtart, konservierende Bodenbearbeitung, Dauerbegrünung) abzubilden.

Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der ausgewiesenen Windhindernisse auf Basis des DOM1 (aggregiert auf das 10 m x 10 m Raster), können sowohl die Informationen zu den Windhindernissen selbst als auch die Ergebnisse der Schutzwirkung von Windhindernissen auch für Anwendungen im großen Maßstab (Standortebene, lokal) genutzt bzw. weiterverarbeitet werden. Zukünftig könnte unter Nutzung des DGM1 an Stelle des DGM10 (wie hier vorgenommen) die Ableitung von Windhindernissen aus dem DOM1 noch weiter verbessert werden.

Auch eine Nutzung der DIN 19706 (2013) zur Abbildung von Effekten des Klimawandels ist insofern möglich, als dass dadurch indizierte Veränderungen der Kriterien 2 bis 4 (langjähriges Jahresmittel der Windgeschwindigkeit, Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftung,

Schutzwirkung von Windhindernissen) einbezogen werden können, insofern die Daten hierfür vorliegen. Auch die Auswirkungen der Veränderungen im Fruchtartenspektrum auf der Ackerfläche, wie eine Zunahme bzw. Abnahme z.B. von Mais oder dem Anteil dauerbegrünter oder konservierend bearbeiteter Flächen sind abbildbar. Denkbar sind Einschätzung zur notwendigen Schutzwirkung von Windhindernissen, um das Winderosionsrisiko für Fruchtarten mit geringer Schutzwirkung (wie Mais) zu verringern.

Jährlich variierende oder innerjährlich auftretende Effekte der Witterung sowie Bewirtschaftung werden dagegen nicht mehr durch die DIN-Norm wieder gegeben. Auch fehlen weitere wichtige Parameter und deren klimawandelbedingte Veränderungen, wie die Starkwindhäufigkeit oder die Oberbodenfeuchte (Wurbs & Steininger 2017).

Die Möglichkeit einer quantitativen Einordnung und Bewertung des Phänomens Winderosion kann die Anwendung der DIN 19706 (2013) weder im bundesweiten Regionalmaßstab noch auf Standortebene liefern, da es sich lediglich um eine Risikobewertung handelt. Eine Quantifizierung der Bodenerosion durch Wind ist derzeit nur unter Nutzung zeitlich höher aufgelöster stärker prozessbasierter Ansätze möglich. Hier bietet sich die Nutzung der RWEQ (Revised Wind Erosion Equation Model, siehe Fryrear et al. 2000, Borelli et al. 2017) an, die auch für großräumige Modellierungen möglich ist und empirische und prozessbasierte Erkenntnisse verbindet.

Die Modellierung des Bodenabtrags durch Wind könnte über den RWEQ-Ansatz auch auf nationaler Ebene genauso wie diejenige durch Wasser mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung verbessert werden. Die Veränderung der Treiber von Bodenerosion durch Wind werden bei der Berücksichtigung der Modellierung einbezogen. Effekte des Klimawandels sowie des Landnutzungswandels sowie von Maßnahmen zur Minderung von Winderosion können besser berücksichtigt werden.

Summary

Background and objective

With coming into force of the new Federal Soil Protection Ordinance (BBodSchV) in 2023 as part of the so-called Mantelverordnung (BGBl. I S.2598), erosion by wind is now also addressed in addition to erosion by water (§9 BBodSchV) and must be taken into account with regard to hazard prevention of harmful soil changes caused by erosion. Soil erosion by wind is basically a natural process, but it is intensified, for example, by agricultural cultivation, especially in the absence of soil cover, and causes damage on the affected areas (on-site) and at the place where the transported material is deposited (off-site).

In addition to the currently recognisable hazards and risks, the question also arises as to what extent the risk of soil erosion due to wind in Germany will change under the influence of climate change and cultivation and to what extent countermeasures to reduce or prevent soil erosion due to wind should be taken and recommendations for action derived.

As part of this project, the soil erosion risk due to wind is determined nationwide for arable land, taking into account the soil erodibility due to wind, the soil erosivity of wind (as an annual average of wind speed), the protective effect of wind barriers and the protective effect of management measures. The existing methodological approaches (DIN 19706 2013, Bug et al. 2020) as well as newly available and high-resolution data bases are used for this purpose. Furthermore, methodological adjustments to improve these results are proposed, implemented and discussed. The results are publicly available via an existing web-based evaluation tool (MoRE-Toolbox; <https://stoffeintraege-more.de/>).

Nationwide analyses on the risk of soil erosion due to wind have already been implemented in a research project by Wurbs & Steininger (2017) funded by the Federal Environment Agency (UBA), although at that time only the soil overview map at a scale of 1:1,000,000 (BÜK 1000, BGR) was available for Germany as a whole to indicate the erodibility of the soil. Since 2020, the soil overview map at a scale of 1:200,000 (BÜK 200, BGR) is available nationwide and is used in this project. Regionally specific conditions can therefore be depicted in a more differentiated manner.

In contrast to DIN 19706 (2013) and Wurbs & Steininger (2017), wind barriers and their height are mapped from the DOM1 in conjunction with DGM10 of the BKG in very high spatial resolution. The convention used here to identify the resulting grid-related protection impact areas follows the explanations in Bug et al. (2020), where these are determined on a weighted basis from all eight main wind directions. Soil cover on arable land is also taken into account in high resolution on the basis of the "National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data" (Blickensdörfer et al. 2021).

The modelling of soil erosion risk due to wind is carried out consistently on a Germany-wide grid with an edge length of 10 m.

The results form the basis for future scenario analyses to minimise the risk of erosion due to wind with regard to both the effects of climate change and measures in the context of natural climate protection and the derivation of suitable erosion control measures.

Methods and results

The methodological approach in this project is based on the specifications of DIN 19706 (2013). The derivation of the management-related soil erosion risk due to wind is carried out for the years 2017, 2018 and 2019 and three scenarios, so that a total of six model runs are calculated.

The BÜK 200 (soil overview map at a scale of 1:200,000) is used as the data basis for the soil erodibility of vegetation-free and dry mineral topsoil due to wind. The **erodibility of the soil** is derived in accordance with DIN 19706 (2013) from the soil type of the topsoil and the respective humus content level according to the Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5; Ad-hoc-AG Boden 2005). As part of previous projects, the BÜK 200 database and the assignment of the polygon-related profile and horizon characteristics of the associated soil types to land use categories of ATKIS-DLM (BKG 2019) have already been disaggregated to the 10 x 10 m grid, which could be used directly here (Gebel et al. 2024, Fuchs et al. 2022).

All land use classes for which the required soil data is available using the BÜK 200 (arable land, grassland, orchards, vineyards, coniferous forest, deciduous forest and mixed forest) are taken into account when determining soil erodibility due to wind. A "high" to "very high" soil erodibility is found on approx. 22 % of the area analysed in Germany, particularly in the northern regions, which are predominantly influenced by loose rock. Wind erodibility is assessed as "low" for just under 47 % of the area analysed.

For the subsequent derivation of the **soil erosivity of the wind** as a function of wind speed, the grid data on the long-term annual average wind speed in open areas at a height of 10 m above ground level from the German Weather Service (DWD, Climate Data Centre, 200 m x 200 m, period 1981-2000) was used, analogous to DIN 19706 (2013). These values were also disaggregated to the 10 m x 10 m grid.

The wind speeds are classified in accordance with DIN 19706 (2013). As expected, higher wind speeds occur in the north-west of Germany, but also in the areas closer to the coast of the Baltic Sea and in the mountainous regions.

The derivation of the **natural soil erosion hazard due to wind** depends on the soil erodibility due to wind and the soil erosivity of the wind.

There is a clear north-south gradient in terms of both soil erodibility by wind and soil erosivity by wind, which is also reflected in the natural soil erosion hazard by wind. The hotspots of natural soil erosion risk are in the northern half of Germany and here in the loose rock areas (young and old moraine landscapes) and to a lesser extent in the mountain ranges. A high to very high natural soil erosion risk is therefore identified on approximately 20 % of the modelled area.

For the nationwide designation of wind barriers, data sets should be used that ensure nationwide comparability. The focus here is on linear and planar objects, such as hedges and rows of trees, as well as settlement objects or forest plots. The required categorisation of wind barriers can be found in DIN 19706 (2013). There, the heights of the barriers are categorised in different categories according to use in accordance with the ATKIS-DLM dataset of the BKG (2022). However, the categorisation of wind barriers is highly simplified. The specified utilisation categories of ATKIS-DLM are given a uniform height (e.g. 20 m for the land use category "forest"). In addition, the land uses, which are predominantly stored as polygons, are given consistent heights (e.g. all settlement objects are 10 m high over their entire surface, regardless of whether they are closed or open buildings). Furthermore, only wind barriers that are present in ATKIS-DLM are recorded (in particular linear structures such as hedges, rows of trees, etc. are not sufficiently recorded in ATKIS-DLM).

In a first step, the ATKIS-DLM dataset was used to identify wind barriers and their heights in accordance with the categorisation requirements of DIN 19706 (2013), as explained above.

As wind barriers and their protective effect have a considerable influence on wind erosion events, it was examined in parallel whether higher-resolution data sources could be considered

for their designation. The Digital Surface Model (DOM) of the BKG (2019) with a 1 m grid width, which is now consistently available nationwide, is particularly suitable here. In principle, wind barriers can be extracted from the DOM1 by creating differences with a digital terrain model (DGM), in which the terrain form of the earth's surface is depicted and therefore buildings and vegetation components are not included. For this reason, the height values of the DOM1 were aggregated to the 10 m grid and the height value of the DGM10 per grid cell was subtracted from the mean value generated in this way. The result is the average height of the obstacle per 10 m x 10 m grid cell.

As part of additional pre-processing steps, height values shown in the DOM1 that are not to be interpreted as wind barriers (e.g. overhead power lines) must be eliminated as far as possible.

As a result of this identification of wind barriers, it is clear that they can be identified on the basis of DOM and DGM with a significantly higher resolution in terms of both position and height than it is possible when using the ATKIS-DLM geometries. For this reason, it was decided to use this data set derived on the basis of DOM/DGM for further work and the designation of the protective effect.

The classification of the **protective effect of wind barriers** is carried out in accordance with DIN 19706 (2013) for arable areas, as these can potentially be affected by a particularly high risk of erosion from wind due to their phase-wise uncoveredness (varying depending on the type of crop and cultivation). It is assumed here that there is a protective effect against wind erosion perpendicular to the respective wind direction both before (upwind) and after wind barriers (downwind). In the downwind area, this is set at 25 times the height of the barrier and is divided into five protection levels 5 to 1. The highest protection level (level 5) exists directly behind the barrier up to a distance corresponding to 5 times the its height. As the distance from the barrier increases, the protective effect decreases accordingly. The maximum protective effect in the lowest protection level extends up to a distance corresponding to 25 times the height of the barrier. In the windward area, it is assumed that only protection level 5 is effective, whose protective effect area in front of the barrier is five times of its height.

To determine the protective effect, the frequencies of the eight main wind directions must also be taken into account. The distribution of the main wind directions was generated from the DWD data set (1 km grid, daily values from 1995 to 2012, Krähenmann et al. 2016).

When analysing the eight main wind directions on a long-term average (1995 to 2012) in relation to all grid cells, it becomes clear that south-westerly winds alone are in the 20 - 25 % share class in 46.7 % of all grid cells, 22.4 % are in the "25 - 30 %" share class and 7.8 % are still in the "30 - 35 %" share class. Westerly winds are the second most common, albeit with significantly lower shares in the respective share classes. The national average share of south-westerly winds across all grid cells is 23.7 %, while that of westerly winds is 20 %. Winds from the south (11.6 %) and east (10.8 %) account for just over 10 %, while winds from the north-east (9.6 %), north-west (9.3 %), south-east (8 %) and north (6.8 %) account for less than 10 %. In relation to all grid cells, the prevailing main wind direction for 67.1 % of the area in Germany is south-west, followed by west with a share of 29.6 %.

For each of the eight main wind directions, the wind can always hit a barrier at an angle of 45°. This results in a funnel-shaped area through the barrier, which can potentially be swept by the respective main wind direction. Perpendicular barriers form areas of protective effect. This must be taken into account when deriving the protective effect in the windward and leeward areas for each barrier.

The nationwide designation of the protective effect areas per main wind direction for arable land shows that the percentage share classes of the protective effect per main wind direction differ only insignificantly in the overall view. This means that the exposure of barriers in the terrain is relatively evenly distributed nationwide. There is therefore no main wind direction that is particularly strongly buffered by barriers. The proportion of arable land on which no protective effect from barriers can be assumed is also around 34 % for all main wind directions. These statements also apply to a more regionalised view, e.g. at the level of the federal states.

However, due to the dominance of south-westerly and westerly winds, barriers that are positioned perpendicular to these two wind directions will have a comparatively higher effectiveness in terms of reducing the risk of soil erosion by wind.

According to DIN 10706 (2013), the protective effect of wind barriers is determined in relation to the prevailing wind direction, which in Germany is south-west and west winds. Alternatively, Bug et al. (2020) recommends a percentage-weighted consideration of all eight main wind directions for the derivation of the protective effect (see also Schäfer et al. 2017). Following this approach, the protective effect areas of wind barriers for arable land were determined for all eight main wind directions, in deviation from DIN.

The protective effect areas were then derived for all eight main wind directions, taking their respective proportions into account in a weighted manner. As a result, the weighted approach according to Bug et al. (2020) reduces areas with a very high and high protective effect. The areas with a medium, low and very low protective effect, on the other hand, increase, while the areas with no protective effect decrease. These shifts are a consequence of the weighted averaging.

The method according to DIN 19706 (2013) only provides the protective effect area in relation to the prevailing main wind direction. Even if the predominant main wind direction nationwide is predominantly south-westerly winds (67.1 %, see Figure 8), their share of 23.7 % (see Figure 7) is not very dominant compared to all other main wind directions. This results in a high overestimation of the protective effect of obstacles that can have a protective effect against south-westerly winds, for example, due to their exposure. In this respect, the method according to Bug et al. (2020) appears to be much more suitable for the nationwide and more regionalised consideration that is the focus here in order to map the protective effect areas of wind barriers on arable land and the soil erosion risk derived from this.

The influence of the soil erosion risk on arable land by the types of crops or crop rotations cultivated and, if applicable, management measures is also described in more detail in DIN 19706 (2023). Here, five levels of protection (very low to very good) are used to categorise the **protective effect of crop types**. These classifications of the protective effect apply to conventional cultivation with the plough and do not take into account for ploughless tillage and the cultivation of catch crops or undersown crops.

The digitally available distribution of the main crop types on arable land for the years 2017 to 2019 (Blickensdörfer et al. 2021) is used here for the nationwide derivation of the protective effect levels depending on the crop type cultivated. The data was derived on the basis of sentinel data and is available as a raster data set with a grid width of 10 metres. The data was transferred to the model grid cells with the "arable land" category (also 10 m grid width). The resulting crop type distribution has a very high spatial resolution with an acceptable degree of fuzziness. This is particularly true in comparison to data from agricultural statistics (e.g. district level), which does not allow the spatial localisation of crop types. As expected, the crop type distribution for 2017, 2018 and 2019 shows a fairly similar percentage distribution of crop types on a national

average. The small-scale change in crop types from 2017 to 2019 only becomes clear at a high spatial resolution.

For ploughless tillage and the cultivation of catch crops or undersown crops, a higher degree of soil cover can be taken into account based on the above-mentioned protection levels by adding to the protection efficiency level. The specifications in DIN 19706 (2013) and Bug et al. (2020) are essentially followed here.

As a result of the derivation of the protective effect for the crop types based on the corrected protective effect levels for the three individual years under consideration, 2017, 2018 and 2019, it can be seen that the protective effect levels differ only insignificantly from each other on a nationwide average. Hotspot areas with particularly low protective effects are located in north-west Germany, in the Upper Rhine Graben and in Bavaria, particularly due to higher maize shares.

For further considerations, three management scenarios are defined by assuming the cultivation of a crop type with a very low protective effect (vegetation cover closed from summer, e.g. maize, scenario 1, worst case), with a medium protective effect (winter cereals, sown after 1 October, scenario 2) and with a very good protective effect (permanent green cover, forage crops, scenario 3, best case).

In accordance with DIN 19706 (2013), the **management-related soil erosion risk** is derived from the level of natural soil erosion risk due to wind and the protective effect of crop types or management measures for all six model runs (three individual years and three scenarios). In all model runs, it is clear that the management-related soil erosion risk is essentially greater in the northern half of Germany, which is also due to the higher categorisation there with regard to the natural soil erosion risk.

The results for the individual years under consideration only differ in the small-scale analysis due to the almost constant average crop type distribution. Very high risks are only identified for approx. 0.3 to 0.4 %, high risks for just under 5 % of the arable land. There is no management-related soil erosion risk on approx. 72 % of the arable land. There is an increased management-related soil erosion risk, particularly in the north-western parts of Germany, partly due to the higher proportion of maize. Possible measures to reduce soil erosion caused by wind could include changing crop types, increasing the proportion of soil conservation tillage or planting windbreaks.

When determining the management-related protective effect of wind for scenario 1 (worst case), a very low protective effect of the cultivated crop type on the arable land is assumed across the board. The results correspond to those of the natural soil erosion risk. Cultivation of a crop type with a medium protective effect (scenario 2) results in a medium soil erosion risk in the worst case. Here too, the highest values occur in the regions with a higher natural soil erosion risk, i.e. particularly in the northern half of Germany. In the case of a very good protective effect of the cultivated crop type (scenario 3), no soil erosion risk is shown.

In a final step, the **soil erosion hazard due to wind** is categorised separately for the six model runs depending on the management-related soil erosion hazard and the protective effect of wind barriers, analogous to the method of DIN 19706 (2013).

The same protective effect of wind barriers is assumed in each case. Although the management-related soil erosion risk changes for the three individual years under consideration (2017 to 2019), this only has a marginal effect on average. For scenarios 1 to 3, as described above, a widespread distribution of one crop each with a very low, medium and very good protective effect is assumed.

The results for the soil erosion risk determined for the three individual years differ only insignificantly from one another. A high to very high soil erosion risk is limited to approx. 1 % of the arable land, while no risk is identified for 85 % of the arable land.

As expected, the final determined soil erosion risk due to wind differs significantly for the different management scenarios 1 to 3. In Scenario 1, approx. 8 % of the arable land is assigned a high to very high risk, while no risk is identified for 45.5 %. Scenario 2 assumes a maximum medium risk, which applies to 2.1 % of the arable land. In contrast, the proportion with no risk increases to 82.3 %. For scenario 3, no threats to arable land from soil erosion by wind are identified.

Discussion of the results

The assessment of soil erosion risk due to wind on arable soils, which is the focus of the project, follows existing approaches, in particular the procedure described in DIN standard 19706 (2013). However, there is a deliberate deviation from the DIN standard, particularly in the procedure for determining wind barriers and their height, as well as in the convention for designating the resulting protective effect areas.

The four criteria "soil", "climate/weather", "cultivation/soil cover" and "protective effect of wind barriers" included in accordance with DIN 19706 (2013) are processed one after the other with equal relative weighting. This approach, albeit with different criteria, was also realised analogously in the development of DIN 19708 (2017) in application of ABAG/USLE for the assessment of soil erosion by water (cf. Schwertmann et al. 1990, Wischmeier & Smith 1978). In addition, as with the conception of ABAG and USLE, it should be noted that the criteria included are largely not interdependent and therefore do not reinforce or weaken each other. This principle should also be maintained when applying DIN 19706 (2013). In this respect, the scope for modifications is strictly limited.

Following this logic, the extent to which the more advanced availability of input data since 2013 for deriving the erosion hazard based on the four criteria mentioned above can be used for the implementation of the procedure in accordance with DIN 19706 (2013) was examined in particular.

With regard to the soil data, the BÜK 200 database (BGR 2022) was used, which is available digitally and harmonised at federal level. Higher-resolution soil overview maps (e.g. at a scale of 1:50,000) are not available digitally and comprehensively in all federal states. Furthermore, these maps are not sufficiently harmonised at the respective state borders. For this reason, their use was rejected in this project. Even if the BÜK 200 as a map series with information on a small scale provides more generalised soil data than e.g. the BK50, it can be assumed that the information on soil types and humus content required for the derivation of soil erodibility is available with sufficient accuracy for the derivations carried out in the present project.

With regard to the inclusion of wind speed, the specifications of DIN 19706 (2013) were followed and the long-term annual average of wind speed in open areas at a height of 10 m above ground level from the German Weather Service (DWD) with a resolution of 200 m was used. The long-term average wind speeds resulting from the DWD data set are logically smoothed; strong winds are not included due to their low temporal frequency. This fact is taken into account in the DIN standard in that the natural risk of soil erosion due to wind reaches the highest risk level at wind speeds > 3.0 m/s, depending on the existing level of soil erodibility. If the wind speed were included in a higher temporal resolution, the assessment framework of the DIN standard would have to be reconsidered here, as a shift towards higher risk levels would be expected.

The determination of the protective effect was not focussed on specific seasons with particularly low soil cover, as soil cover on arable land can vary greatly depending on farming practice, the type of crop grown and the weather conditions in the year of cultivation. In principle, depending on the constellation and interaction of these factors, phases with low soil cover are conceivable for almost the entire year, although the probability of uncovered phases occurring in the summer months (especially June and July) is likely to be the lowest. DIN 19706 (2013) also does not provide for any seasonal limitation in the derivation of the main wind direction. The erosion-reducing or promoting effect of soil cover is already mapped by including the protective effect of crop types and their cultivation practices. In this respect, taking this effect into account when deriving the wind direction distribution by focussing on certain phases of the year with low soil cover would lead to a double assessment of the aspect of soil cover, which should be avoided.

Information on wind speed is not available either for the various main wind directions or for the main prevailing wind direction derived in each case. In this respect, a determined prevailing main wind direction is not necessarily associated with particularly high wind speeds. Both facts, wind speed and wind direction, are not considered in conjunction in DIN 19706 (2013) and are therefore assessed separately from each other.

To derive the protective effect of crop types or (alternatively) crop rotations, the digitally available crop type allocation (grid with 10 m grid spacing) for the years 2017 to 2019 was used here (Blickensdörfer et al. 2021). In addition, scenarios were calculated in which it was assumed that a crop species of risk level 1, 3 or 5 was cultivated across the entire area. The risk-reducing effect of management practices such as ploughless tillage or intercropping can only be considered roughly and without spatial and temporal differentiation, as this data was not available at a higher resolution nationwide.

Particular attention was paid to the designation of the protective effect of wind barriers in this project. Here, too, DIN 19706 (2013) provides clear specifications regarding their effectiveness in terms of barriers height and the resulting protective effect areas, which were not changed here.

Furthermore, the DIN defines that the designation of the protected areas of barriers should be perpendicular to the main wind direction on an annual average. A distinction must be made between eight possible main wind directions (S, SW, W, SE, E, NE, N, NW), each covering a range of 45°. Daily averages of the hourly wind direction grids for Germany (Krähenmann et al. 2016) are available digitally from the DWD and were used here. In principle, it is therefore also possible to extract the main wind directions for selected months in the long-term average. However, as already discussed above, a modification of the determination of the main wind direction from the long-term annual average for certain phases of the year, e.g. with particularly low ground cover, would lead to an overweighting of the influence of ground cover in the evaluation matrix of DIN 19706 (2013). The influence of soil cover is already included in the 2nd criterion "Cultivation-related soil erosion risk due to wind" (influence of cultivation and soil cover). In this respect, such an approach was deliberately dispensed with and the long-term mean values of the main wind directions were used. The eight main wind directions were determined proportionally for each 10 m x 10 m grid cell.

Instead of including the prevailing main wind direction in DIN 19706 (2013), the present project followed the recommendation of Bug et al. (2020) and Schäfer et al. (2017) and derived the designation of the protection impact areas on a percentage-weighted basis, taking into account all eight main wind directions. If only the predominant main wind direction were taken into account when deriving the protection impact areas or levels, this would result in a significant overestimation of the risk reduction whenever the predominance of the main wind direction is

rather low. However, this is generally the case at the national level. For example, although the two main wind directions W and SW are dominant in relative terms, the shares of the remaining six main wind directions are still at a relevantly high level. When considering the phenomenon of wind erosion and its risk nationwide and possible options for risk reduction, the focus is more on the regionalised consideration and assessment of the phenomenon, which is why the approach described above with proportional consideration of all main wind directions was chosen.

If, on the other hand, it is a question of site-related issues on a large scale, focussing the assessment on the dominant main wind direction can again make sense. If, for example, a windbreak hedge is to be created in a specific case, it can be assumed that its location can be optimised via the dominant main wind direction, as stated in DIN 19706 (2013). However, at this scale level, it would again make sense to check whether the prevailing main wind direction is also dominant in phases with little or no ground cover, so that the windbreak planting can develop its optimum effect. In addition to the wind direction, it would also make sense to include the wind speed for these phases of low ground cover. Thus, a determined prevailing main wind direction is not necessarily associated with particularly high wind speeds. Both issues, wind speed and wind direction, are not considered in conjunction in DIN 19706 (2013) and are therefore assessed separately from each other.

Taking into account the drivers relevant to the triggering of wind erosion in their mutual interaction to map the amplification of effects with regard to increasing the risk of wind erosion requires a change to a more process-oriented modelling with a high spatial and temporal resolution instead of the very simplistic DIN 19706 (2013), which is aimed at mapping long-term average risks.

In addition to the derivation of risks for wind erosion, a process-based modelling of wind erosion would also enable a quantifying consideration in the sense of the derivation of e.g. hectare-related erosion and accumulation rates.

Conclusions and recommendations

The Germany-wide categorisation of the risk of soil erosion by wind according to DIN 19706 (2013) shows the possible risks with regard to the occurrence of soil erosion under certain conditions. It becomes clear where hotspot areas for soil erosion by wind are to be expected in Germany and which factors or criteria are primarily responsible for this.

In order to be able to make further statements, it would be possible in principle and with reasonable effort to identify action scenarios such as an increase in wind barriers and the associated increase in the protective effect against wind erosion and, on this basis, to recalculate the resulting soil erosion risk from wind for cultivation scenarios (e.g. for a crop type with a very low protective effect). It also shows that the assessment framework provided by the DIN standard for the nationwide assessment is entirely suitable for modelling measures to reduce the risk of erosion by modifying cultivation (e.g. change of crop type, conservation tillage, permanent green cover).

Due to the high spatial resolution of the identified wind barriers based on the DOM1 (aggregated to the 10 m x 10 m grid), both the information on the barriers themselves and the results of the protective effect of wind barriers can also be used or further processed for applications on a large scale (site level, local). In future, the derivation of wind barriers from the DOM1 could be further improved by using the DGM1 instead of the DGM10 (as carried out here).

It is also possible to use DIN 19706 (2013) to map the effects of climate change insofar as it can be used to include indicated changes in criteria 2 to 4 (long-term annual average wind speed,

protective effect of crop types or cultivation, protective effect of wind barriers), if the data is available. The effects of changes in the range of crops on the arable land, such as an increase or decrease in e.g. maize or the proportion of permanently planted or conservation tilled areas, can also be mapped. Furthermore, it could be determined, for example, how high the average protection level of wind barriers must be in a given area in order not to exceed, for example, a medium wind erosion risk for the crop type "maize" at a certain percentage value.

In contrast, annually varying or intra-annual effects of weather and management are no longer reflected in the DIN standard. Other important parameters and their possible changes due to climate change, such as the frequency of strong winds or topsoil moisture, are also missing (Wurbs & Steininger 2017).

The application of DIN 19706 (2013) cannot provide the possibility of a quantitative categorisation and assessment of the phenomenon of wind erosion, neither on a nationwide regional scale nor at site level, as it is only a risk assessment. In this respect, the DIN standard differs significantly from the USLE or ABAG (Wischmeier & Smith 1978, Schwertmann et al. 1990, DIN 19708 2021) for the quantitative derivation of soil erosion by water. The USLE has thus taken the step from risk modelling to an empirically based quantitative assessment procedure. There is no comparable database for the development of an empirically based approach for modelling wind erosion in the sense of the USLE. In this respect, quantification of soil erosion by wind is currently only possible by using more process-based approaches with a higher temporal resolution. The use of the RWEQ (Revised Wind Erosion Equation Model, see Fryrear et al. 2000, Borelli et al. 2017), which is also possible for large-scale modelling and combines empirical and process-based findings, is an option here.

The modelling of soil erosion by wind could also be improved at the national level using the RWEQ approach, just like that by water, with higher spatial and temporal resolution. Changes in the drivers of soil erosion by wind are included in the modelling. The effects of climate change, land use change and measures to minimise wind erosion could be better taken into account.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Mit Inkrafttreten der neuen Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) im Jahr 2023 als Teil der sogenannten Mantelverordnung (BGBl. I S.2598) wird nun neben der Erosion durch Wasser auch die Erosion durch Wind adressiert (§9 BBodSchV) und ist mit Bezug zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen durch Erosion zu berücksichtigen. Bodenerosion durch Wind ist grundsätzlich ein natürlicher Prozess, der allerdings bspw. durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung verstärkt wird.

Insbesondere bei fehlender Bodenbedeckung werden durch den Wind hauptsächlich feine Bodenpartikel, wie z.B. Schluff, Tonminerale oder Humus ausgeblasen, während gröbere und meist humusärmere Partikel auf der Fläche verbleiben. Auf den betroffenen Flächen (On-site) kommt es damit zur Minderung der Bodenfunktionen, wie z.B. dem Wasser- und Nährstoffspeichervermögen des Bodens. Sowohl die Bodenfruchtbarkeit als auch die Biodiversität werden gemindert. Von erosivem Bodenabtrag durch Wind ist bereits bei Windgeschwindigkeiten zwischen 6 bis 8 m pro Sekunde (mäßiger bis frischer Wind; gemessen in 10 Metern Höhe über Geländeoberfläche) auszugehen (BMEL 2019).

Off-site-Schäden entstehen am Ort der Ablagerung des erodierten Materials, indem z.B. Pflanzen überdeckt werden. Mit den transportierten feinen Partikeln werden verstärkt auch anhaftende Nähr- und Schadstoffe verlagert. Hierbei kann es in benachbarten Landökosystemen sowie Gewässern zur Anreicherung der abgelagerten Schadstoffe oder zur Eutrophierung durch Nährstoffeintrag kommen. Auch Gefahren für den Menschen können dann entstehen, wenn sich in Folge massiver Winderosion Staubwolken bilden, die sich z.B. Sicht behindernd auswirken (Wurbs und Steininger 2017).

Neben den bereits gegenwärtig erkennbaren Gefährdungen und Risiken stellt sich darüber hinaus die Frage, in welchem Maß sich in Deutschland die Bodenerosionsgefährdung durch Wind unter dem Einfluss des Klimawandels und der Bewirtschaftung verändert. Eine Häufung von Starkwinden hätte u. U. auch ein erhöhtes Winderosionsrisiko zur Folge, sofern sie bei ungenügender Bodenbedeckung auftreten. Umso wichtiger ist es, frühzeitig Gegenmaßnahmen zur Verminderung bzw. Vermeidung von Bodenerosion durch Wind, zu ergreifen und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Im Rahmen eines vom Umweltbundesamt (UBA) finanzierten Forschungsprojektes (Wurbs und Steininger 2017) wurden hierzu bundesweit bereits Betrachtungen umgesetzt. Es 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. Darauf aufbauend wurden ausgehend von sich verändernden klimatischen Verhältnissen Änderungen der Gefährdungssituation der Bodenerosion durch Wind bis zum Jahr 2100 abgeleitet. Aussagen zu tatsächlich abgetragenen Bodenmengen durch Wind wurden nicht getroffen.

Als harmonisierte Datengrundlage für die Ausweisung der Erodierbarkeit des Bodens lag zum damaligen Zeitpunkt lediglich die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000) flächendeckend für Deutschland vor. Seit 2020 ist – bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) – die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BÜK 200) flächendeckend verfügbar. Die Heterogenität der Bodenvergesellschaftung nimmt unter Verwendung der BÜK 200 gegenüber der BÜK 1000 zu, sodass auch regionalspezifische

Gegebenheiten differenzierter wiedergegeben werden können. Da für die Bewertung der Erosionsgefährdung durch Wind das Eingangssignal Boden einen großen Einfluss hat, hatten bereits Wurbs und Steininger (2017) empfohlen, perspektivisch eine bundesweite Auswertung der Winderosionsgefährdung auf Grundlage der BÜK 200 vorzunehmen. Für die bundesweite Ausweisung der mittleren langjährigen Bodenabträge durch Wasser auf Grundlage der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG/USLE, Universal Soil Loss Equation) wird die BÜK 200 bereits verwendet (Fuchs et al. 2022; <https://stoffeintraege-more.de/>).

1.2 Zielstellung

Ziel der aktuellen Arbeiten war es, sowohl die natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind als auch unter Berücksichtigung von Windhindernissen sowie einer möglichst aktuellen Bewirtschaftung (Fruchtartenspektrum) die bundesweite Ausweisung der Erosionsgefährdung durch Wind, zu aktualisieren. Darüber hinaus sollte der Einfluss der Bewirtschaftung über einzelne Fruchtarten-Szenarien für die ackerbaulich bewirtschaftete Fläche ausgewiesen werden. Hierbei sollen auch bestehende Windhindernisse berücksichtigt werden.

Hierfür waren einerseits die bestehenden methodischen Ansätze sowie neu verfügbare und notwendige Datengrundlagen zu nutzen. Andererseits sollten unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit mögliche methodische Anpassungen zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der Ergebnisse geprüft werden. Die Ergebnisse sollten in ein bestehendes Auswertewerkzeug (Kartenviewer und Statistiktool; <https://stoffeintraege-more.de/>) eingebunden werden. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für:

- zukünftige Szenarienbetrachtungen zur Minimierung des Erosionsrisikos durch Wind mit Blick sowohl auf die Auswirkungen des Klimawandels und Maßnahmen im Rahmen des natürlichen Klimaschutzes,
- die Ableitung geeigneter Maßnahmen zum Erosionsschutz.

Die Ergebnisse können in eine zukünftig mögliche Berichterstattung und die damit in Zusammenhang stehenden Modellierungen und Prognosen zu Veränderungen des Bodenzustands einfließen. Darüber hinaus sind sie ein wichtiger Baustein, wenn Handlungsempfehlungen zum Schutz des Bodens vor Degradation erarbeitet und konzipiert werden.

2 Methoden und Ergebnisse

2.1 Vorbemerkungen

Methodisch liegt in Deutschland gegenwärtig das Verfahren nach DIN 19706 (2013) für die Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf landwirtschaftlich genutzten Ackerböden vor. Dabei handelt es sich um ein einfaches Verfahren, welches vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und vom Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V. (ZALF) gemeinsam mit den landwirtschaftlichen Dienststellen Niedersachsens entwickelt wurde.

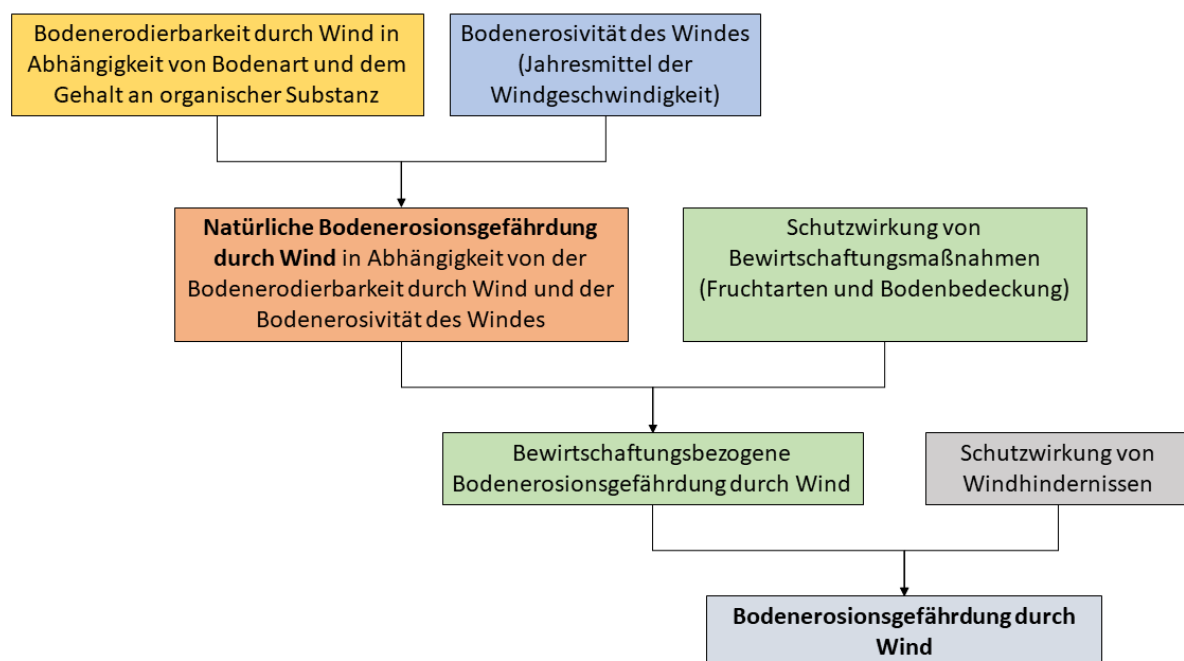
Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Ermittlung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind gemäß DIN 19706 (2013) verdeutlicht Abbildung 1.

Zunächst wird in Abhängigkeit von den vorliegenden Bodeneigenschaften (Bodenerodierbarkeit durch Wind) sowie den mittleren Windgeschwindigkeiten (Bodenerosivität des Windes) die natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind abgeleitet.

Auf Grundlage der natürlichen Bodenerosionsgefährdung in Kombination mit der Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen wird die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen bestimmt. Diese in Kombination mit der Schutzwirkung von Windhindernissen ergibt eine Aussage zur Bodenerosionsgefährdung durch Wind.

Die Ableitungen zur Bodenerosionsgefährdung durch Wind unter Berücksichtigung von Fruchtarten und Windhindernissen beziehen sich ausschließlich auf Ackerflächen.

Abbildung 1: Fließschema zur Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wind für Ackerflächen nach DIN 19706 (2013)



Quelle: DIN 19706 (2013)

In den nachfolgenden Kapiteln werden das Vorgehen und die Ergebnisse für die bundesweite Ableitung der Winderosionsgefährdung Schritt für Schritt vorgestellt. Das methodische Vorgehen orientiert sich dabei an den Vorgaben gemäß DIN 19706 (2013), weicht allerdings in einzelnen Schritten begründet davon ab. Die Modifizierungen werden methodisch erläutert und alle Ergebnisse schrittweise vorgestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Ableitung der Schutzwirkung von Windhindernissen direkt im Anschluss an die Ermittlung der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind vorgenommen. Erst danach erfolgt die Ableitung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind für mehrere Betrachtungsjahre (2017, 2018, 2019) bzw. drei Szenarien, die dann im nächsten Schritt, jeweils für die drei Jahre bzw. drei Szenarien unter Einbeziehung der Schutzwirkung von Windhindernissen zur finalen Bodenerosionsgefährdung durch Wind weitergeführt wird.

2.2 Datengrundlagen

Für die Ableitung der gegenwärtig zu erwartenden flächenbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind wurden die nachfolgend aufgelisteten räumlichen Eingangsdaten genutzt:

- ▶ Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200), Datenquelle: BGR (2020)
- ▶ Digitales Geländemodell: DGM10 (10 m Raster, TIFF file), Datenquelle: GeoBasis-DE / BKG 2017
- ▶ Digitales Oberflächenmodell: DOM1 (1 m Raster, TIFF file), Datenquelle: GeoBasis-DE / BKG 2019 (<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-oberfaechenmodell-dom1.html>)
- ▶ Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (200 m x 200 m Raster), Version V0.1, 2014, zeitliche Abdeckung: 01.01.1981 - 31.12.2000, Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD) Climate Data Center (CDC) 2014, online verfügbar: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/wind_parameters/resol_200x200/
- ▶ Tagesmittel der stündlichen Raster der Windrichtung für Deutschland (Projekt TRY-Weiterentwicklung), Version V001 (Krähenmann et al. 2016), online verfügbar: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/Project_TRY/wind_direction/
- ▶ National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data (2017, 2018 and 2019) (Blickensdörfer et al. 2021), online verfügbar nach Anfrage: <https://zenodo.org/records/5153047#.YWFyXn1CREZ>
- ▶ Flächennutzung: Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS-DLM) aller Bundesländer (Shape file), Datenquelle: GeoBasis-DE / BKG 2019

Alle oben aufgeführten Flächendaten wurden auf ein deutschlandweites Raster mit einer Kantenlänge von 10 m mit Deckungsgleichheit zum hier genutzten DGM 10 bezogen, welches zugleich auch die Grundgeometrie für die bundesweit durchgeführten Simulationen bildet.

Im Rahmen von vorangegangenen Projekten wurde die Datenbasis der BÜK 200 und die Zuordnung der darin enthaltenen polygonbezogenen Profil- und Horizontdaten zu Nutzungskategorien bereits aufbereitet und genutzt, so dass auf diese Vorarbeiten direkt zurückgegriffen werden konnte (Gebel et al. 2024, Fuchs et al. 2022). Hierbei erfolgte die Zuordnung der Profile sowie der Bodenarten und Humusgehalte (Oberboden) zu den Nutzungskategorien auf Basis von ATKIS-DLM (BKG 2019) unter Nutzung einer Routine, die die

polygonbezogen vorliegenden Informationen der BÜK 200 für die jeweiligen nutzungsbezogenen Profile und relevanten Horizonte auf die Rasterzellen (10 m x 10 m) disaggregiert (siehe auch Gebel et al. 2024).

2.3 Bodenerodierbarkeit durch Wind

Als Datengrundlage für die Bodenerodierbarkeit vegetationsfreier und trockener mineralischer Oberböden durch Wind wird die BÜK 200 genutzt. Die Ableitung erfolgt auf Grundlage des in der DIN 19706 (2013) beschriebenen methodischen Vorgehens. Die Erodierbarkeit des Bodens wird dabei aus der Bodenart des Oberbodens und der jeweiligen Humusgehaltsstufe nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5; Ad-hoc-AG Boden 2005) abgeleitet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Stufen der Erodierbarkeit vegetationsfreier und trockener Oberböden durch Wind in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Gehalt an organischer Substanz (Humus) nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5; Ad-hoc-AG Boden 2005)

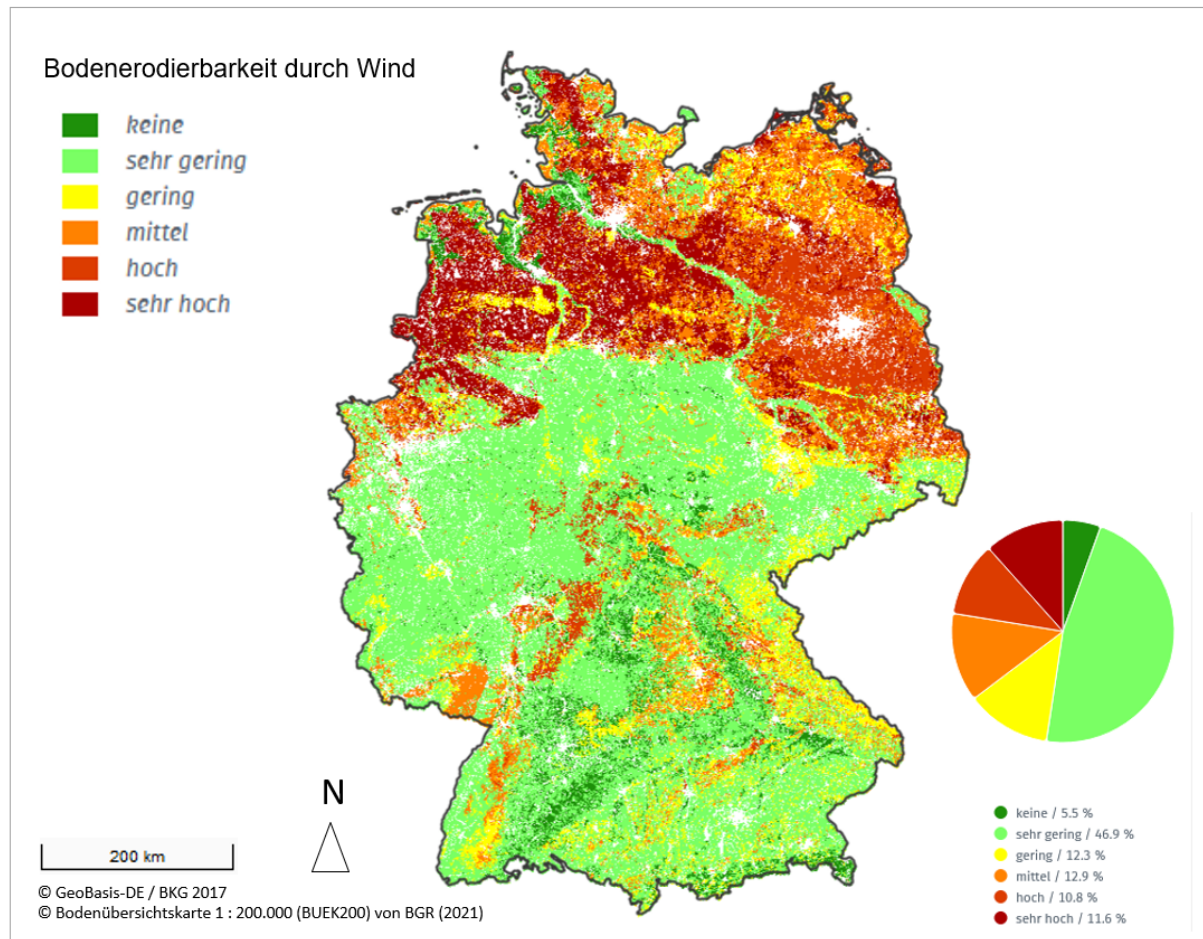
Bodenart ¹	Humusfrei bis sehr schwach humos, Humus in Masse-Prozent (%): < 1	Sehr schwach humos bis sehr stark humos, Humus in Masse-Prozent (%): 1 – 15	Extrem humos, anmoorig, Humus in Masse-Prozent (%): > 15 – 30	Organisch, Torf, Humus in Masse-Prozent (%): ≥ 30
Tt, Tu4, Tu3, Tu2, Ts4, Ts3, Ts2	1 (sehr gering)	0 (keine)	1 (sehr gering)	5 (sehr hoch)
Lts, Ls4, Ls3, Ls2, Lt3, Lt2, Lu, Uu, Ut4, Ut3, Ut2, Uls, Sl4, St3	2 (gering)	1 (sehr gering)	2 (gering)	5 (sehr hoch)
Us, Slu, Sl3, St2	3 (mittel)	2 (gering)	3 (mittel)	5 (sehr hoch)
Sl2, Su4, Su3, Su2	4 (hoch)	3 (mittel)	4 (hoch)	5 (sehr hoch)
mS, gS, mSgs, gSfs, gSms	5 (sehr hoch)	4 (hoch)	5 (sehr hoch)	5 (sehr hoch)
fSgs, mSfs, fS, fSms	5 (sehr hoch)	5 (sehr hoch)	5 (sehr hoch)	5 (sehr hoch)

Quelle: DIN 19706 (2013)

Die nach Tabelle 1 ermittelte Bodenerodierbarkeit durch Wind auf dem 10 m x 10 m Raster zeigt Abbildung 2. Hierbei werden alle Landnutzungsklassen berücksichtigt, für die die benötigten Bodendaten verfügbar sind (Ackerland, Grünland, Obstplantage, Weingarten, Nadelwald, Laubwald und Mischwald). Bei Flächen ohne Einfärbung handelt es sich um solche, für die keine Bodeninformationen zur Verfügung standen (insbesondere Siedlungsbereiche). Eine „hohe“ bis „sehr hohe“ Bodenerodierbarkeit ergibt sich auf ca. 22 % der betrachteten Fläche Deutschlands, insbesondere in den nördlich gelegenen überwiegend lockergesteinsbeeinflussten Regionen. Für knapp 47 % der einbezogenen Fläche ist die Erodierbarkeit durch Wind als „niedrig“ einzuschätzen.

¹ Kurzzeichen Bodenart: Tt: reiner Ton, Tu4/Tu3: stark schluffiger/mittel schluffiger Ton, Tu2: mittel toniger Lehm, Ts4/Ts3/Ts2: stark/mittel/schwach sandiger Ton, Lts: sandig-toniger Lehm, Ls4/Ls3/Ls2: stark/mittel/schwach sandiger Lehm, Lt3/Lt2: mittel/schwach toniger Lehm, Lu: schluffiger Lehm, Uu: reiner Schluff, Ut4/Ut3/Ut2: stark/mittel/schwach toniger Schluff, Uls: sandig-lehmiger Schluff, Sl4/Sl3/Sl2: stark/mittel/schwach lehmiger Sand, St3/St2: mittel/schwach toniger Sand, Us: sandiger Schluff, Slu: schluffig-lehmiger Sand, Su4/Su3/Su2: stark/mittel/schwach schluffiger Sand, mS: Mittelsand, gS: Grobsand, mSgs: grobsandiger Mittelsand, gSfs: feinsandiger Grobsand, gSms: mittelsandiger Grobsand, fSgs: grobsandiger Feinsand, mSfs: feinsandiger Mittelsand, fS: Feinsand, fSms: mittelsandiger Feinsand

Abbildung 2: Bodenerodierbarkeit vegetationsfreier und trockener mineralischer Oberböden durch Wind gemäß DIN 19706 (2013)

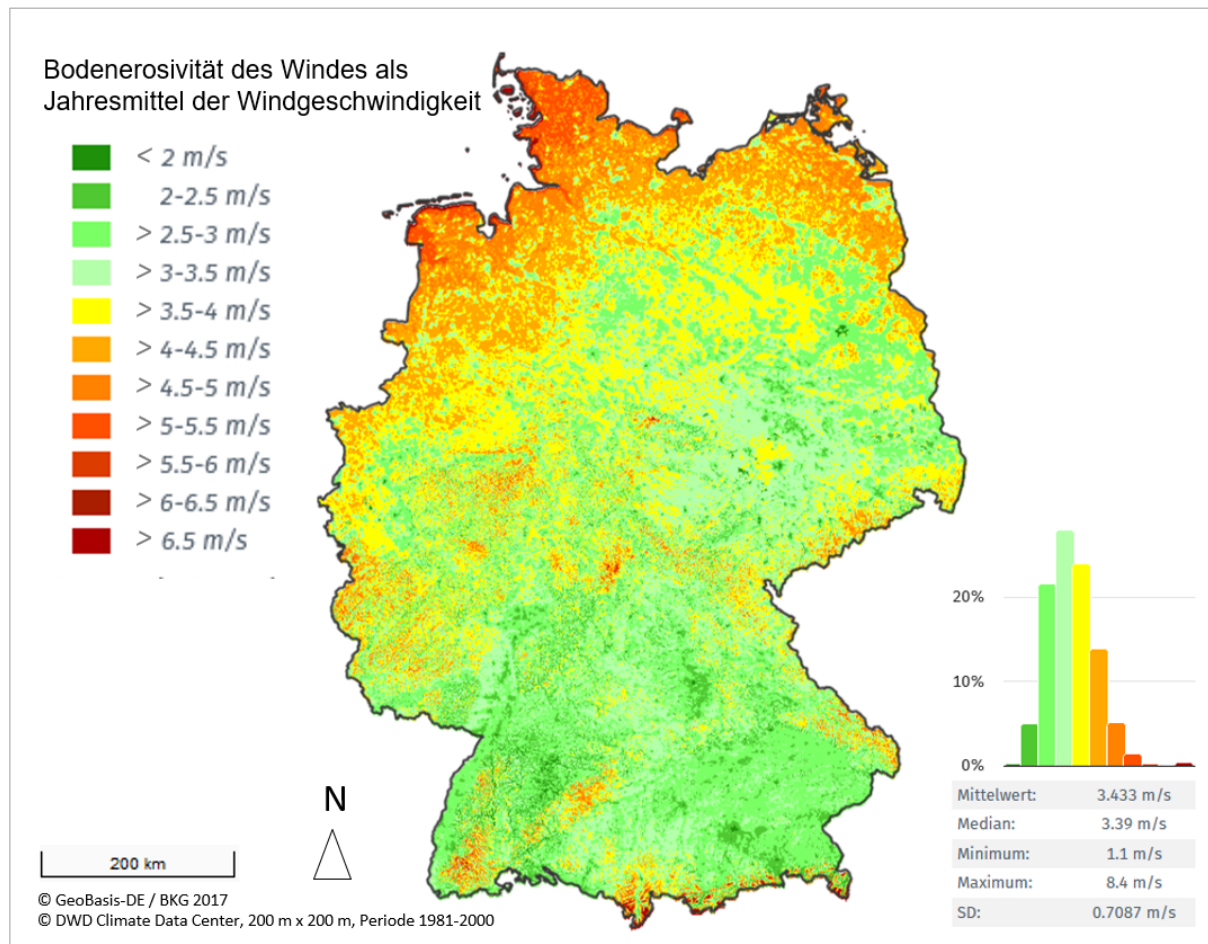


Quelle: eigene Darstellung, VisDat

2.4 Bodenerosivität des Windes als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit

Für die sich anschließende Ableitung der Bodenerosivität des Windes als eine Funktion der Windgeschwindigkeit wurden die Rasterdaten zum langjährigen Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in freien Lagen in 10 m Höhe über Grund des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Climate Data Center, 200 m x 200 m, Periode 1981-2000) genutzt. Diese Werte wurden ebenfalls auf das 10 m x 10 m Raster disaggregiert (Abbildung 3). Ein aktualisierter bundesweit vorliegender Datensatz hierzu ist derzeit nicht verfügbar. Aufgrund der hier vorliegenden Nutzung langjähriger Jahresmittel ergibt sich eine starke Glättung der Werte, womit sich z.B. die Abbildung von Effekten des Klimawandels eher in Grenzen halten dürften. Somit kann eine ausreichende Repräsentativität des Datensatzes auch über die hier genutzte Periode 1981–2000 hinaus für die langjährigen mittleren Betrachtungen angenommen werden.

Abbildung 3: Bodenerosivität des Windes als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit gemäß DIN 19706 (2013); Basis: Daten des Deutschen Wetterdienst (DWD Climate Data Center, 200 m x 200 m, Periode 1981-2000)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Die Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten erfolgt nach DIN 19706 (2013) (siehe nachfolgende Tabelle 2). Aufgrund der methodisch vorgegebenen Mittelwertbildung über die Periode 1981–2000 liegt der Maximumwert lediglich bei 8,4 m/s. In Anbetracht der Tatsache, dass Spitzengeschwindigkeiten für Wind um ein Vielfaches höher liegen können, erscheint dieser Wert niedrig. Allerdings berücksichtigt die in der DIN 19706 (2013) eingeführte Bewertung der natürlichen Bodenerosionsgefährdung über die Bodenerosierbarkeit sowie das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit diese Glättung in der Bewertungsmatrix, indem prinzipiell Winde mit Windgeschwindigkeiten > 3,0 m/s bereits in der höchsten Gefährdungsstufe eingeordnet werden können.

Höhere Windgeschwindigkeiten treten erwartungsgemäß im Nordwesten Deutschlands, aber auch in den küstennäheren Gebieten der Ostsee sowie in den Gebirgslagen auf.

2.5 Natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind

Die Ableitung der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind ergibt sich in Abhängigkeit von der Bodenerodierbarkeit durch Wind (Abbildung 2) und der Bodenerosivität des Windes (Abbildung 3) wie in Tabelle 2 ausgeführt. Nicht berücksichtigt wird hierbei der Einfluss der

witterungsabhängigen Feuchtigkeit an der Bodenoberfläche auf die natürliche Bodenerosionsgefährdung. Zudem wird ein vegetationsloser trockener Boden unterstellt.

Tabelle 2: Matrix zur Ausweisung der natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der Bodenerodierbarkeit durch Wind und der Bodenerosivität des Windes (Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in m/s) nach DIN 19706 (2013)

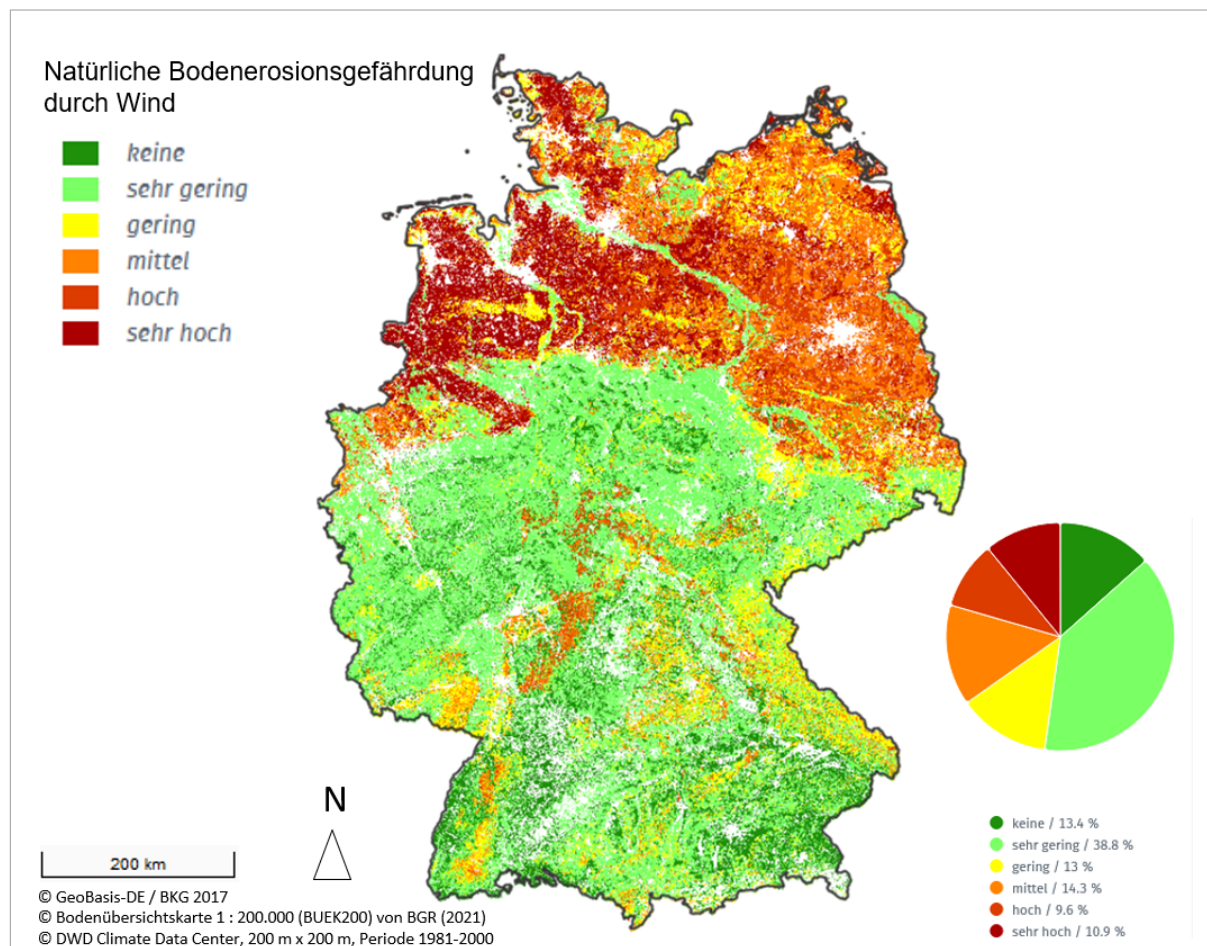
Stufen der Bodenerodierbarkeit durch Wind	< 2,0 m/s	2,0 bis 3,0 m/s	>3,0 bis 4,0 m/s	>4,0 bis 5,0 m/s	>5,0 bis 6,0 m/s	> 6,0 m/s
0 (keine)	0	0	0	0	1	1
1 (sehr gering)	0	0	1	1	2	2
2 (gering)	0	1	2	2	3	3
3 (mittel)	1	2	3	3	4	5
4 (hoch)	2	3	4	4	5	5
5 (sehr hoch)	3	4	5	5	5	5

Quelle: DIN 19706 (2013)

Die rasterbasierte bundesweit ermittelte natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind gemäß DIN 19706 (2013) für die oben bereits genannten Nutzungskategorien (Ackerland, Grünland, Obstplantage, Weingarten, Nadelwald, Laubwald und Mischwald) zeigt Abbildung 4. Bei Flächen ohne Einfärbung handelt es sich um solche, für die keine Bodeninformationen zur Verfügung standen (insbesondere Siedlungsbereiche). Sowohl hinsichtlich der Bodenerodierbarkeit durch Wind als auch hinsichtlich der Bodenerosivität des Windes besteht ein deutliches Nord-Süd-Gefälle, welches sich entsprechend auch in der natürlichen Erosionsgefährdung widerspiegelt. Die Hotspots der natürlichen Bodenerosionsgefährdung liegen in der Nordhälfte Deutschlands und hier in den Lockergesteinsgebieten (Jung- und Altmoränenlandschaften) sowie abgeschwächt in den höheren Mittelgebirgslagen. Auf gut 20 % der modellierten Fläche wird somit eine hohe bis sehr hohe natürliche Bodenerosionsgefährdung ausgewiesen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird zum Einen die Schutzwirkung von Windhindernissen, zum Anderen die Schutzwirkung von Fruchtarten (Ackerfrüchte) einbezogen. Diese Bewertungen beziehen sich analog der Methode der DIN 19706 (2013) ausschließlich auf Ackerflächen, da diese aufgrund ihrer phasenweisen Unbedecktheit (je nach Fruchtart und Bewirtschaftung variierend) potenziell von einem besonders hohen Erosionsrisiko durch Wind betroffen sein können. Nichtsdestotrotz sind auch andere Nutzungskategorien durch Winderosion gefährdet, wie zum Beispiel gerodete Waldflächen, was in der DIN 19706 (2013) aber aufgrund der anzunehmenden deutlich geringeren Relevanz nicht mit abgedeckt wird.

Abbildung 4: Natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind gemäß DIN 19706 (2013)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

2.6 Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen

2.6.1 Ausweisung von Windhindernissen

Für die bundesweite Ausweisung von Windhindernissen sollen Datensätze herangezogen werden, die eine bundesweite Vergleichbarkeit gewährleisten. Hierbei stehen linienhafte und flächenhafte Objekte, wie Hecken und Baumreihen, genauso wie Siedlungsobjekte oder Waldparzellen im Fokus. Die erforderliche Kategorisierung von Windhindernissen findet sich in Tabelle 8 der DIN 19706 (2013). Dort sind die Höhen der Hindernisse pauschal nach Nutzung gemäß ATKIS-DLM-Datensatz des BKG (2022) in unterschiedlichen Hinderniskategorien wie folgt festgesetzt

- ▶ 20 m (Wald/Forst),
- ▶ 15 m (Gehölz, Feldgehölze),
- ▶ 10 m (Baumreihe, Feuchtgebiete, Siedlungsobjekte/Bebauung),
- ▶ 8 m (Hecken, Knick, < 20 m Länge),
- ▶ 1 m (Feldblockgrenzen mit Wegesaum oder einem Nutzungswechsel Acker/Grünland) und
- ▶ 0 m (Einzelbäume).

Die Kategorisierung der Windhindernisse erfolgt somit stark vereinfachend:

- ▶ vorgegebene Nutzungskategorien von ATKIS-DLM erhalten pauschal eine einheitliche Höhe (z.B. 20 m für die Nutzungskategorie „Wald“),
- ▶ die in ATKIS-DLM überwiegend als Polygone abgelegten Nutzungen erhalten eine durchgängige Höhe (z.B. sind alle Siedlungsobjekte vollflächig 10 m hoch, unabhängig davon, ob es sich um eine geschlossene oder offene Bebauung handelt),
- ▶ es werden nur Windhindernisse erfasst, die in ATKIS-DLM vorhanden sind (insbesondere linienhafte Strukturen, wie Hecken, Baumreihen, etc. sind in ATKIS-DLM nicht ausreichend miterfasst).

In einem ersten Schritt wurde, den Vorgaben der Kategorisierungen der DIN 19706 (2013) folgend, der ATKIS-DLM-Datensatz wie oben erläutert genutzt, um Windhindernisse und deren Höhen auszuweisen. Das Ergebnis der Ausweisung zeigt Abbildung 5 (oberes Bild) anhand eines Detailausschnittes.

Da Windhindernisse und deren Schutzwirkung einen erheblichen Einfluss auf das Winderosionsgeschehen haben, wurde parallel geprüft inwieweit höher aufgelöste Datenquellen für deren Ausweisung in Frage kommen. Hier bietet sich insbesondere das inzwischen bundesweit konsistent verfügbare Digitale Oberflächenmodell (DOM) des BKG (2019) mit einer 1 m Gitterweite an. DOM sind Modelle der Höhen und Formen der Erdoberfläche inklusive Bauwerke und Vegetation. Das DOM1 bildet die Situation jeweils zum Zeitpunkt der Erfassung ab, die je nach Kachel unterschiedlich sein kann. Somit können z.B. bei Vegetations- und Wasserflächen Höhensprünge auftreten (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2020).

Eine Extrahierung von Windhindernissen aus dem DOM1 ist prinzipiell durch eine Differenzenbildung mit einem Digitalen Geländemodell (DGM), in dem die Geländeform der Erdoberfläche abgebildet wird und damit Bauwerke und Vegetationsbestandteile nicht enthalten sind, möglich.

Ursprünglich war vorgesehen die Differenzenbildung von DOM und DGM jeweils auf Basis der hochaufgelösten Datensätze mit einer 1 m Gitterweite vorzunehmen und das Ergebnis auf das für die Ergebnisdarstellung genutzte 10 m Gitter zu aggregieren. Allerdings konnte der bundesweit beim BKG vorliegende DGM1-Datensatz im Rahmen des Projektes nicht ohne erheblichen Kostenaufwand zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde eine abweichende Verfahrensweise gewählt, die letztlich zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt. Hierbei wurden die Höhenwerte des DOM1 auf das 10 m Raster aggregiert und von dem hierbei erzeugten Mittelwert der Höhenwert des DGM10 je Rasterzelle substrahiert. Im Ergebnis wird die mittlere Höhe des Hindernisses je 10 m x 10 m Rasterzelle abgebildet.

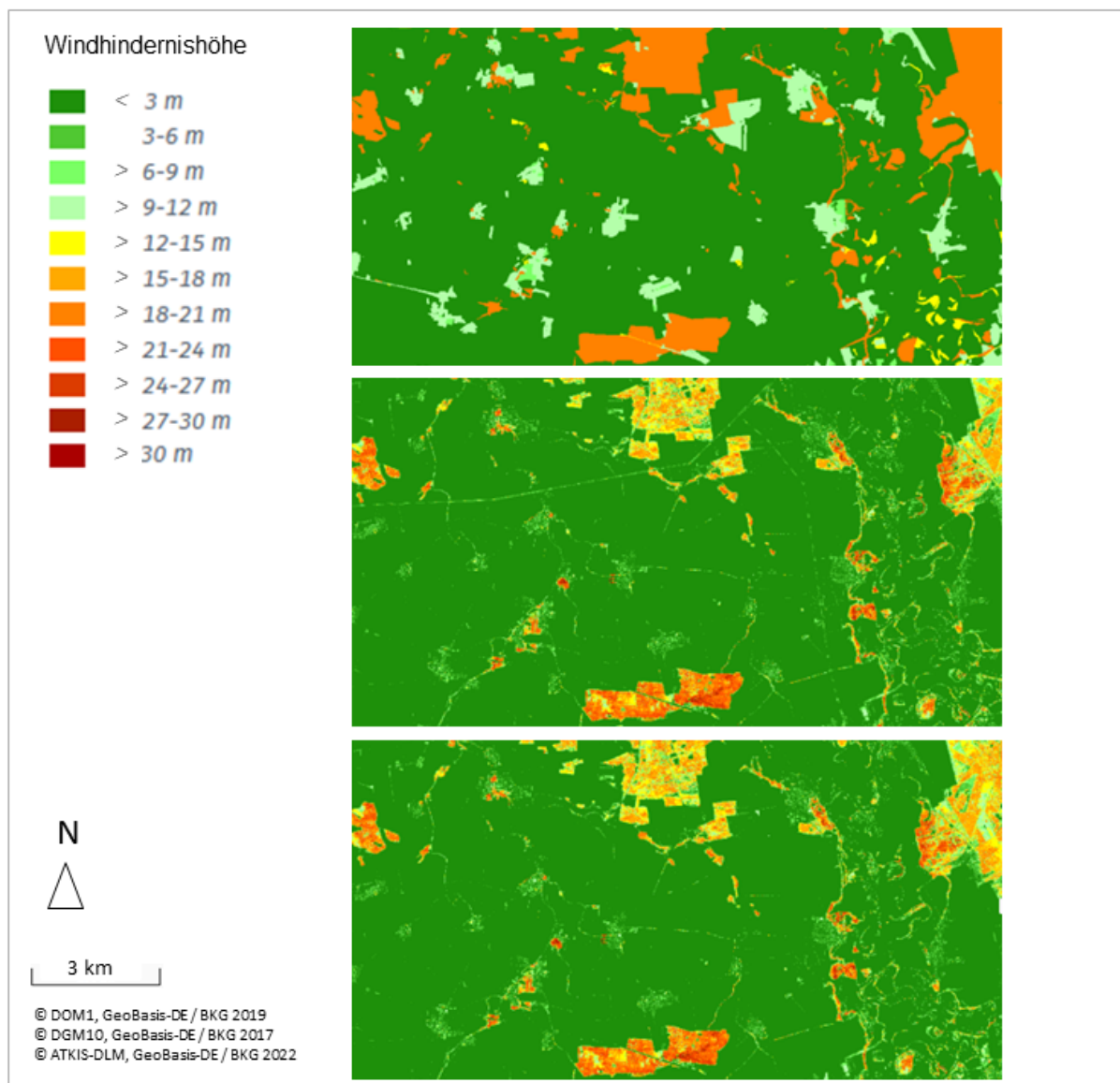
Allerdings müssen zusätzliche Präprozessierungsschritte durchgeführt werden, um im DOM1 ausgewiesene Höhenwerte, die nicht als Windhindernisse interpretiert werden sollten (z.B. Freileitungen), so weit wie möglich zu eliminieren (siehe Abbildung 5, mittleres Bild). Dies erfolgte, indem die Linien- und Punktelemente der Hochspannungsleitungen und -masten (sowie weiterer einschlägiger Elemente wie Funkmasten, Antennen, Schornsteine, Kräne, Lifte etc.) aus dem ATKIS-DLM genutzt wurden, um Pufferzonen von 30 m um die betreffenden ATKIS-DLM-Elemente zu generieren. In diesen Pufferzonen wurde auf die oben beschriebene Differenzenbildung aus DOM und DGM verzichtet und zunächst stattdessen eine Hindernishöhe von 0 m eingesetzt. Um den Informationsverlust durch diese Bereinigung möglichst gering zu halten, wurden in den Pufferbereichen die ggf. vorhandenen ATKIS-DLM-Kategorien zur Ableitung der Hindernishöhen (siehe oben) (wie in der DIN 19706 2013 vorgesehen) genutzt.

Das Ergebnis dieser Ausweisung von Windhindernissen zeigt exemplarisch Abbildung 5 (unteres Bild). Es wird deutlich, dass auf Grundlage von DOM und DGM die Windhindernisse sowohl hinsichtlich Lage als auch Höhe mit einer deutlich höheren Auflösung ausgewiesen werden können. So werden beispielsweise Saumstrukturen durch Baumreihen oder Hecken deutlich vollständiger wiedergegeben, als dies bei der Nutzung der ATKIS-DLM-Geometrien (siehe oberes Bild) möglich ist. Auf eine vereinfachende einheitliche bzw. vollflächige Vergabe von Höhen für bestimmte Nutzungskategorien kann verzichtet werden.

Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse wurde entschieden, den auf Basis von DOM/DGM abgeleiteten Datensatz für die weitere Arbeit und die Ausweisung der Schutzwirkung zu verwenden.

Abbildung 5: Ermittelte Windhindernisse im Vergleich unterschiedlicher Ausweisungsmethoden

Oben: Kategorisierung von ATKIS-DLM nach DIN 19706 (2013), Mitte: Differenzenbildung von DOM1 und DGM10 (unbereinigt), unten: Differenzenbildung von DOM1 und DGM10 (bereinigt, hier Freileitungen entfernt)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Für die weitere Bearbeitung werden die generierten Hindernishöhen grundsätzlich bei 20 m abgeschnitten, um die ausgewiesenen Schutzwirkungsbereiche nicht zu groß werden zu lassen. Hier wird sich bewusst an der Methodik der DIN 19706 (2013) orientiert, die über die ATKIS-DLM-Nutzungskategorien ebenfalls nur Hindernishöhen bis 20 m Höhe zulässt und in ihrem Bewertungsansatz auf diese Höhenamplitude eingestellt ist.

Auch werden keine Windhindernisse < 2 m Höhe einbezogen, da von einer Höhengenaugkeit des DOM1 nur bis 1 m ausgegangen werden kann. Wie oben bereits erwähnt bildet das DOM1 die Situation jeweils zum Zeitpunkt der Erfassung ab. Bei Vegetations- und Wasserflächen können so beispielsweise geringe Höhengsprünge auftreten. In ihrer Wirkung vergleichbare Effekte können z.B. dann auftreten, wenn eine Fläche mit gut entwickeltem Silomais neben einer Fläche liegt, auf der Winterweizen angebaut wurde, der bereits abgeerntet ist. Zudem sind geringfügige Inkonsistenzen zwischen dem DOM1 und dem DGM10 möglich. Die Höhenauflösung sollte deshalb gröber sein als der mögliche Fehler beim DOM1.

Für Hindernisse, die lediglich eine Rasterzelle isoliert betreffen und somit auf einer angrenzenden benachbarten Rasterzelle kein Hindernis ausgewiesen wird, wird eine Höhe von 0 m angenommen. Hierbei handelt es sich vor allem um Einzelbäume, die laut DIN 19706 (2013) nicht als Hindernisse einbezogen werden.

Der hier erzeugte bundesweite Datensatz zur Höhe von Hindernissen kann zukünftig auch für die Bearbeitung von Sachverhalten außerhalb dieses Vorhabens genutzt werden. Ein Download der Daten ist über die webbasierte MoRE-DE Toolbox (stoffeintraege-more.de) möglich.

2.6.2 Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen

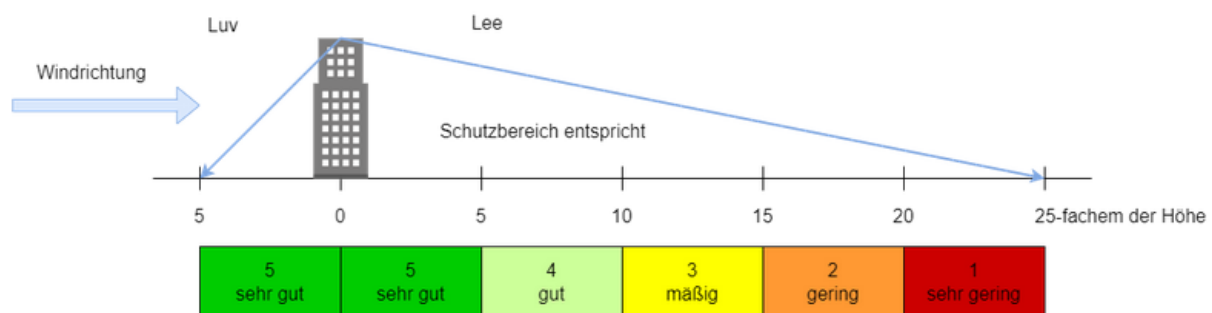
Die Klassifizierung der Schutzwirkung der Windhindernisse erfolgt nach DIN 19706 (2013) für Ackerflächen, da diese aufgrund ihrer phasenweisen Unbedecktheit (je nach Fruchtart und Bewirtschaftung variierend) potenziell von einem besonders hohen Erosionsrisiko durch Wind betroffen sein können. Hier wird davon ausgegangen, dass sowohl vor (im Luv) als auch nach Windhindernissen (im Leebereich) eine Schutzwirkung vor Winderosion senkrecht zur jeweiligen Windrichtung besteht. Diese wird im Leebereich des Hindernisses angesetzt und unterteilt sich in fünf Schutzwirkungsstufen (5 bis 1). Die höchste Schutzwirkung (Stufe 5) besteht unmittelbar hinter dem Hindernis bis zu einer Entfernung, die der 5-fachen Höhe des Hindernisses entspricht. Mit zunehmender Entfernung vom Hindernis nimmt die Schutzwirkung ab. Die Maximale Ausdehnung der Schutzwirkung in der geringsten Schutzstufe reicht bis zu einer Entfernung, die der 25-fachen Höhe des Hindernisses entspricht:

- ▶ Stufe 5 (sehr gut): Schutzbereich entspricht ausgehend vom Hindernis der 5-fachen Höhe des Hindernisses,
- ▶ Stufe 4 (gut): Schutzbereich entspricht ausgehend vom Hindernis der 10-fachen Höhe des Hindernisses,
- ▶ Stufe 3 (mäßig): Schutzbereich entspricht ausgehend vom Hindernis der 15-fachen Höhe des Hindernisses,
- ▶ Stufe 2 (gering): Schutzbereich entspricht ausgehend vom Hindernis der 20-fachen Höhe des Hindernisses,
- ▶ Stufe 1 (sehr gering): Schutzbereich entspricht ausgehend vom Hindernis der 25-fachen Höhe des Hindernisses.

Im Luvbereich wird angenommen, dass allein Schutzwirkungsstufe 5 wirkt, deren Schutzwirkungsbereich vor dem Hindernis die 5-fache Höhe des Hindernisses beträgt (Abbildung 6).

Bezogen auf ein 10 m hohes Hindernis bedeutet dies, dass im Luv- und im Leebereich senkrecht zur Windrichtung ein 50 m tiefer Raum mit der Stufe 5 besteht. Im Leebereich schließt sich daran ein jeweils 50 m tiefer Raum mit Stufe 4, Stufe 3, Stufe 2 und Stufe 1 an. Jenseits von 250 m Abstand zum Windhindernis wird keine Schutzwirkung mehr ausgewiesen.

Abbildung 6: Stufen der Schutzwirkung und Einteilung von Schutzbereichen vor und hinter Windhindernissen



Quelle: DIN 19706 (2013), verändert durch VisDat

Für die Ermittlung der Schutzwirkung sind darüber hinaus die Häufigkeiten der acht Hauptwindrichtungen zu berücksichtigen. Die Verteilung der Hauptwindrichtungen kann hierfür aus dem Datensatz des DWD (1 km Raster, tägliche Werte von 1995 bis 2012, Krähenmann et al. 2016) generiert werden.

Eine Fokussierung der Ermittlung der Schutzwirkung auf bestimmte Jahreszeiten mit besonders geringer Bodenbedeckung erfolgte nicht, da die Bodenbedeckung auf Ackerflächen je nach Bewirtschaftungspraxis (z.B. konventionell oder pfluglos, Direktsaat, Strip-Till, Anbau von Zwischenfrucht oder Untersaat), der angebauten Fruchtart und der Witterung (phänologischen Entwicklung) im Anbaujahr sehr unterschiedlich ausfallen kann. Prinzipiell sind je nach Konstellation und Zusammenspiel dieser Faktoren fast das gesamte Jahr Phasen mit geringer Bodenbedeckung denkbar, wenn auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unbedeckter Phasen in den Sommermonaten (insbesondere Juni und Juli) am geringsten sein dürfte. Auch die DIN 19706 (2013) sieht keine jahreszeitliche Limitierung bei der Ableitung der Hauptwindrichtung vor (siehe auch Kap. 4). Der erosionsmindernde oder fördernde Effekt der Bodenbedeckung wird durch Einbeziehung der Schutzwirkung von Fruchtarten und deren Bewirtschaftungspraxis (Kap. 2.7) bereits abgebildet. Insofern würde eine Berücksichtigung dieses Effektes bei der Ableitung der Windrichtungsverteilung durch eine Fokussierung auf bestimmte Jahresphasen mit geringer Bodenbedeckung zu einer Doppelbewertung des Aspekts der Bodenbedeckung führen, was vermieden werden sollte.

Informationen zur Windgeschwindigkeit liegen weder für die verschiedenen Hauptwindrichtungen noch für die jeweils abgeleitete vorherrschende Hauptwindrichtung vor. Insofern geht eine ermittelte vorherrschende Hauptwindrichtung nicht zwangsläufig mit besonders hohen Windgeschwindigkeiten einher. Beide Sachverhalte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden in der DIN 19706 (2013) nicht im Zusammenhang betrachtet und somit losgelöst voneinander bewertet.

Abbildung 7 zeigt die Anteile der acht Hauptwindrichtungen im langjährigen Mittel (1995 bis 2012), bezogen auf alle Rasterzellen. Dabei wird deutlich, dass Südwestwinde allein bei 46,7 % aller Rasterzellen in der Anteilsklasse 20 – 25 % liegen, 22,4 % liegen in der Anteilsklasse „25 – 30 %“ und immerhin noch 7,8 % in der Anteilsklasse „30 – 35 %“. Am zweithäufigsten sind Westwinde mit allerdings deutlich geringeren Anteilen in den jeweiligen Anteilsklassen.

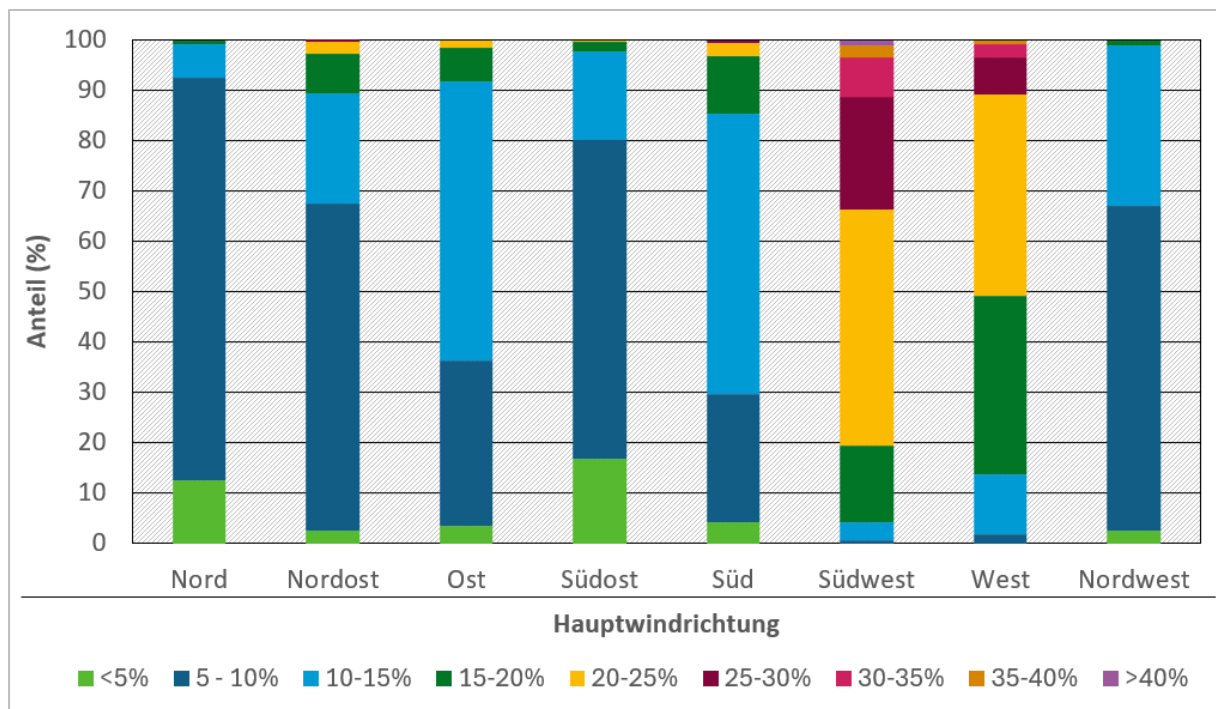
Der Anteil von Südwestwinden liegt, betrachtet über alle Rasterzellen, im bundesweiten Mittel bei 23,7 %, derjenige von West-Winden bei 20 %. Bei knapp über 10 % liegen Winde aus Süd (11,6 %) und Ost (10,8 %), unter 10 % beträgt der Anteil von Winden aus Nordost (9,6 %), Nordwest (9,3 %), Südost (8 %) und Nord (6,8 %).

Zum besseren Verständnis des Sachverhaltes werden am Beispiel einer ausgewählten Rasterzelle die Verhältnisse der Windverteilung, bezogen auf die acht Hauptwindrichtungen sowie die Ableitung der vorherrschenden Hauptwindrichtung exemplarisch erläutert. Die Verteilungen der Hauptwindrichtungen für diese Rasterzelle sehen wie folgt aus:

- ▶ Nord (N) = 6,2 %,
- ▶ Nordost (NO) = 7,4 %,
- ▶ Ost (O) = 9,6 %,
- ▶ Südost (SO) = 7,1 %,
- ▶ Süd (Süd) = 15,5 %,
- ▶ Südwest (SW) = 26,3 %,
- ▶ West (W) = 16,5 % und
- ▶ Nordwest (NW) = 11,4 %.

Somit ist die vorherrschende Hauptwindrichtung Südwest. Mit dem Wert von 26,27 % liegt die Rasterzelle in der Klasse 25 – 30 % gemäß der Einteilung in Abbildung 7.

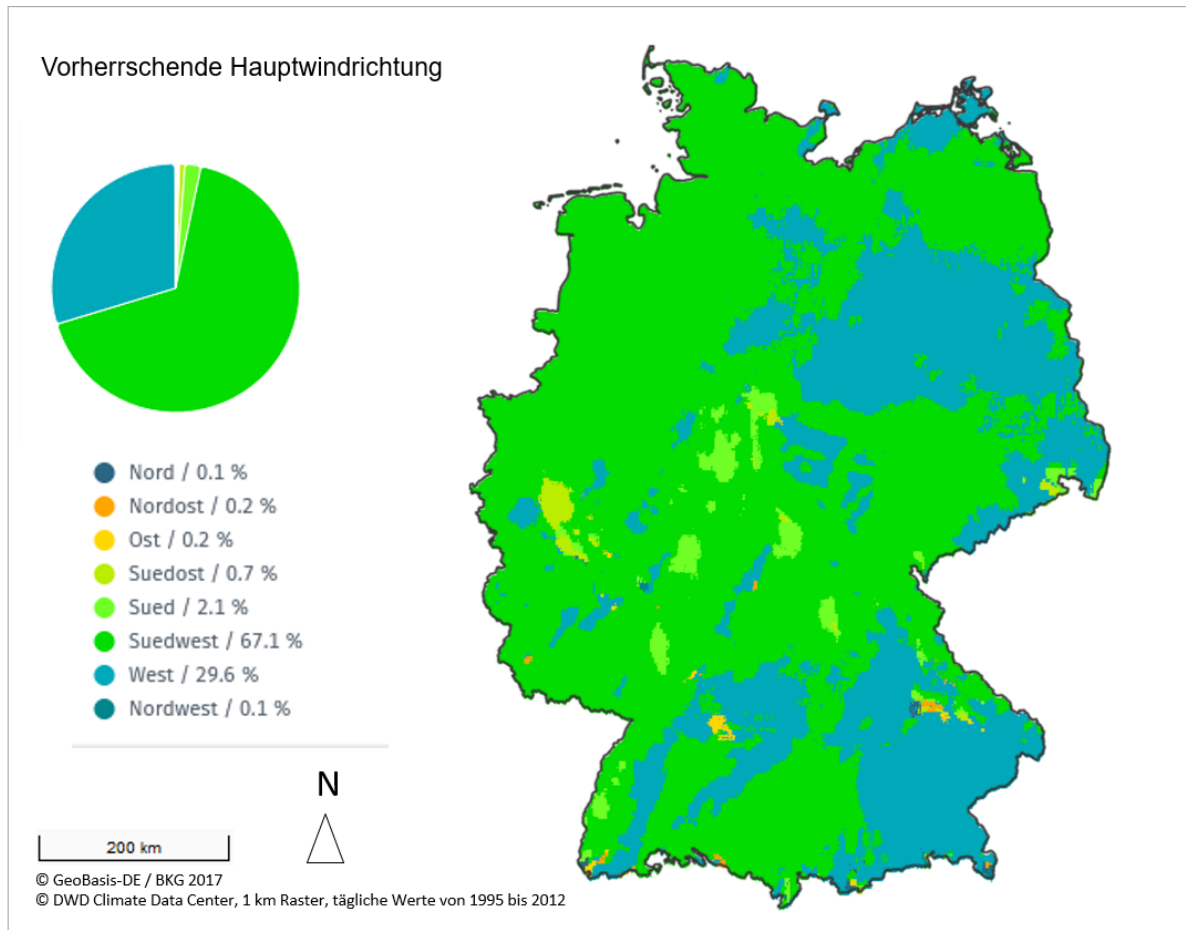
Abbildung 7: Prozentuale Aufteilung der Anteilsklassen je Hauptwindrichtung für den Zeitraum 1995 bis 2012, bezogen auf alle Rasterzellen (Krähenmann et al. 2016)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Bezogen auf alle Rasterzellen liegt die vorherrschende Hauptwindrichtung für einen Anteil von 67,1 % der Fläche in Deutschland bei SW, gefolgt von W mit einem Anteil von 29,6 % (Abbildung 8). Bezogen auf die oben beschriebene Beispiel mit vorherrschender Hauptwindrichtung SW (26,27 %) gehört diese Rasterzelle also zu den 67,1 % aller Rasterzellen mit vorherrschender Hauptwindrichtung SW von Abbildung 8.

Abbildung 8: Rasterbasierte vorherrschende Hauptwindrichtung im Bundesgebiet für den Zeitraum 1995 bis 2012 (Krähenmann et al. 2016)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

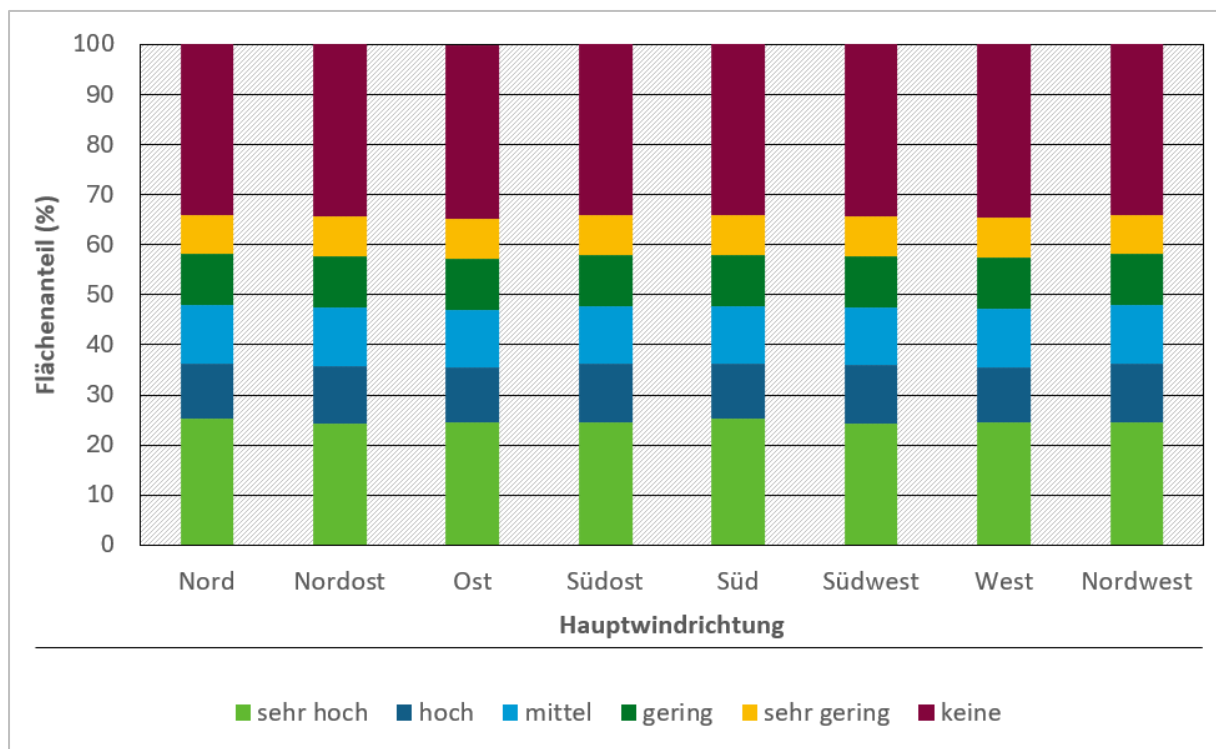
Für jede der acht Hauptwindrichtungen kann der Wind grundsätzlich in einem Bereich von 45° ($360^\circ/8$) auf ein Hindernis auftreffen. Dadurch ergibt sich durch das Hindernis ein trichterförmiger Bereich, der bei der jeweils gegebenen Hauptwindrichtung potenziell überstrichen werden kann (siehe Abbildung 10). Senkrecht dazu stehende Hindernisse bilden Schutzwirkungsbereiche. Dies ist bei der Ableitung der Schutzwirkung im Luv- und Leebereich für jedes Hindernis zu berücksichtigen. Die Berechnung dieser potenziell möglichen (maximalen) Schutzwirkungsbereiche ist aus folgenden Gründen mit einem sehr hohen Prozessierungsaufwand verbunden:

- ▶ Die Berechnung erfolgt bundesweite hochaufgelöst auf dem 10 m x 10 m Raster,
- ▶ die 45° -Abdeckung muss für jede der acht Hauptwindrichtungen bei der Ausweisung der Schutzwirkung sowohl im Luv- als auch im Leebereich beachtet werden,
- ▶ die Schutzwirkungsbereiche eines oder mehrerer Hindernisse können sich überlagern.

Die technische Umsetzung erfolgte deshalb unter Nutzung besonders effizienter Datendateiformate (Apache Parquet), um eine optimale Komprimierung und Performanz zu gewährleisten. Die bundesweite Ausweisung der Schutzwirkungsbereiche je Hauptwindrichtung für die Ackerflächen zeigt Abbildung 9. Dabei wird deutlich, dass sich in der Gesamtbetrachtung die prozentualen Anteilsklassen der Schutzwirkung je Hauptwindrichtung nur unwesentlich

unterscheiden. Das heißt, dass die Exposition von Hindernissen im Gelände in bundesweiter Betrachtung relativ gleichverteilt ist. Es gibt also keine Hauptwindrichtung, die besonders stark durch Hindernisse gepuffert wird. Auch der Anteil der Ackerfläche, auf dem keine Schutzwirkung durch Hindernisse angenommen werden kann, liegt bei allen Hauptwindrichtungen bei ungefähr 34 %. Diese Aussagen gelten auch für eine stärker regionalisierte Betrachtung z.B. auf Ebene der Bundesländer.

Abbildung 9: Prozentuale Anteile der Schutzwirkungsstufen je vorherrschender Hauptwindrichtung auf Ackerflächen

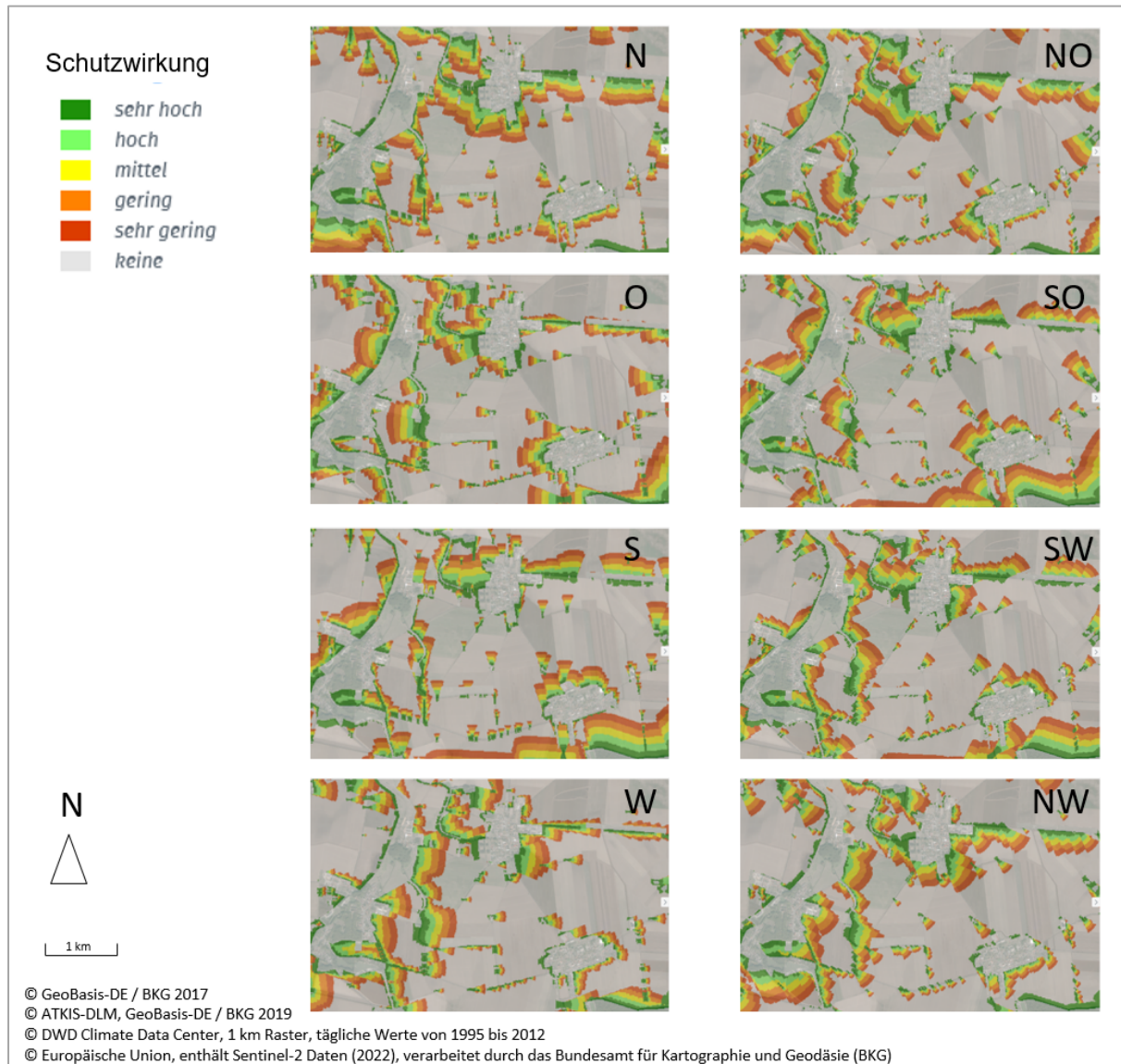


Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Aufgrund der Dominanz von Südwest- und Westwinden werden Hindernisse, die senkrecht zu diesen beiden Windrichtungen angeordnet sind, eine vergleichsweise höhere Wirksamkeit im Hinblick auf die Minderung des Bodenerosionsrisikos durch Wind entfalten können.

Gemäß DIN 10706 (2013) wird die Schutzwirkung von Windhindernissen in Bezug auf die vorherrschende Windrichtung ermittelt, die in Deutschland bei Südwestwinden, gefolgt von Westwinden liegt. Alternativ empfehlen Bug et al. (2020) eine prozentual gewichtete Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen für die Ableitung der Schutzwirkung (siehe auch Schäfer et al. 2017). Diesem Ansatz folgend wurden abweichend zur DIN die Schutzwirkungsbereiche von Windhindernissen für Ackerflächen für alle acht Hauptwindrichtungen ermittelt. Abbildung 10 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für ein Beispielgebiet.

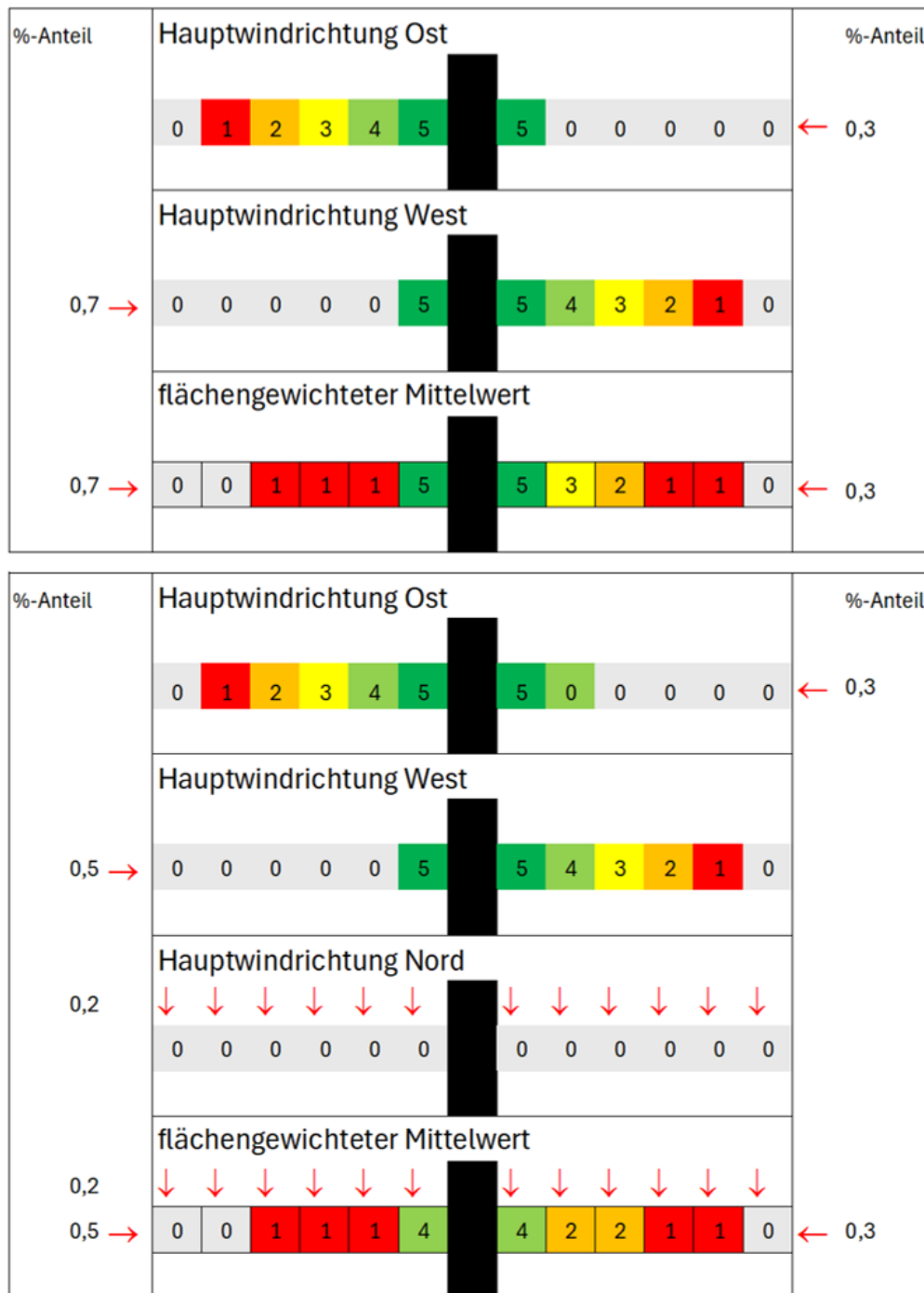
Abbildung 10: Rasterbasierte Ermittlung der Schutzwirkungsbereiche für Windhindernisse auf Ackerflächen je Hauptwindrichtung (Detailausschnitt)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Im Ergebnis werden mit der gewichteten Vorgehensweise nach Bug et al. (2020) Bereiche mit sehr hoher und hoher Schutzwirkung gemindert. Die Flächen mit mittlerer, geringer und sehr geringer Schutzwirkung nehmen hingegen zu, während die Bereiche mit fehlender Schutzwirkung zurück gehen. Diese Verschiebungen sind eine Folge der gewichteten Mittelwertbildung, die in der nachfolgenden Abbildung 11 anhand eines vereinfachten Beispiels erklärt wird. Im ersten Beispiel (Abbildung oben) werden für die beiden Hauptwindrichtungen „Ost“ (30 %-Anteil) und „West“ (70 %-Anteil) die Schutzwirkungsbereiche vor und hinter einem Hindernis (schwarzer Balken) zunächst für jede der beiden Windrichtungen getrennt und dann flächengewichtet gemittelt dargestellt. Durch die flächengewichtete Mittelung reduzieren sich die Schutzwirkungsstufen, bezogen auf den Westwind weniger stark als diejenigen, bezogen auf den Ostwind.

Abbildung 11: Beispielhafte Erläuterung der flächengewichteten Mittelung der Schutzwirkungsbereiche, reduziert auf zwei (oben) bzw. drei (unten) Windrichtungen



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Im zweiten Beispiel (Abbildung unten) wird zusätzlich eine dritte Hauptwindrichtung „Nord“ (20 %-Anteil) berücksichtigt. Die Hauptwindrichtung „West“ hat einen 50 %-Anteil und Ost einen 30 %-Anteil. Im Ergebnis reduzieren sich die Schutzwirkungsstufen stärker als im ersten Beispiel, da die Null-Werte des Nordwindes (aufgrund des in dieser Richtung fehlenden Windhindernisses) eingerechnet werden müssen. Die Schutzwirkungsstufen „5“ gehen auf den Wert „4“ zurück.

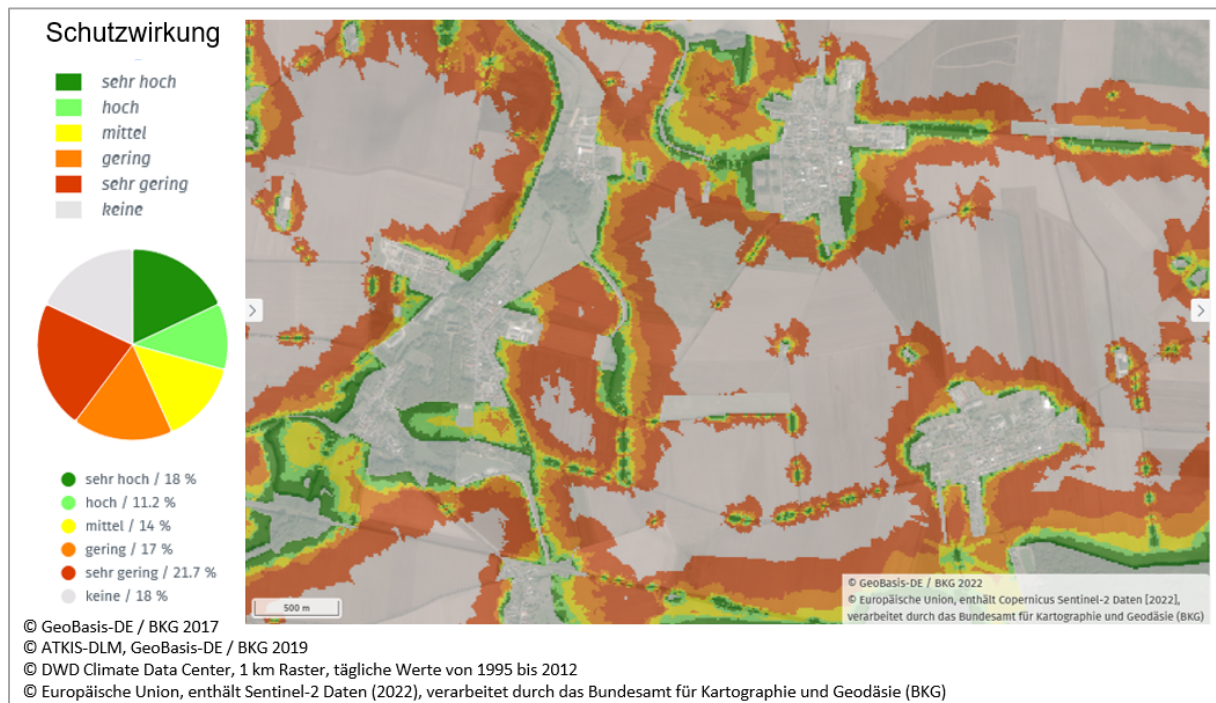
Mit der Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen wird es zu weiteren Effekten bei der Mittelwertbildung kommen. Trotzdem ist davon auszugehen, dass direkt im Lee- bzw. Luv-Bereich von Hindernissen in vielen Fällen die Schutzstufe 5 oder zumindest die Stufe 4 erhalten bleibt. Abweichungen hiervon sind nur bei sehr ungleicher Verteilung der acht Hauptwindrichtungen denkbar, z.B. bei sehr hoher Dominanz von Nord- oder Südwinden. Weiter vom Hindernis entfernt bzw. bei sehr hohen Hindernissen mit großem Schutzwirkungsbereich sind allerdings auch hier größere Abnahmen der Schutzstufen durch die Mittelwertbildung möglich. Allerdings kommt es auch zu einer flächenmäßigen Erhöhung der Schutzwirkungsbereiche, bedingt durch den Glättungseffekt aufgrund der Einbeziehung aller acht Windrichtungen. Die Bereiche ohne Schutzwirkung nehmen parallel dazu ab.

Im Ergebnis liefert die Methode nach Bug et al. (2020) die Schutzwirkungsbereiche über alle acht Hauptwindrichtungen unter gewichteter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Anteile. Die Methode nach DIN 19706 (2013) liefert dagegen den Schutzwirkungsbereich, bezogen auf die vorherrschende Hauptwindrichtung. Auch wenn die vorherrschende Hauptwindrichtung bundesweit überwiegend bei Südwestwinden liegt (67,1 %, siehe Abbildung 8), ist deren Anteil mit 23,7 % (siehe Abbildung 7) gegenüber allen anderen Hauptwindrichtungen nicht sehr dominant. Es kommt somit zu einer hohen Überbewertung der Schutzwirkung von Hindernissen, die aufgrund ihrer Exposition z.B. eine Schutzwirkung gegenüber Südwestwinden entfalten können. Insofern erscheint die Methode nach Bug et al. (2020) für die hier im Mittelpunkt stehende bundesweite und stärker regionalisiert angelegte Betrachtung als deutlich geeigneter, um Schutzwirkungsbereiche von Windhindernissen auf Ackerflächen und daraus abgeleitet die Bodenerosionsgefährdung abzubilden.

Die Ausweisung der Schutzwirkungsbereiche erfolgte somit unter gewichteter Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen nach Bug et al. (2020). Das Ergebnis der Ausweisung zeigt Abbildung 12 für einen Detailausschnitt. Die Statistik bezieht sich hierbei auf den kompletten bundesweit erzeugten Datensatz.

Unabhängig davon können die in Abbildung 10 ausgewiesenen Schutzwirkungsbereiche von Windhindernissen auch separat für eine der acht ausgewiesenen Hauptwindrichtungen abgerufen und analog der Vorgehensweise in der DIN 19706 (2013) für spezielle Fragestellungen (z.B. die optimierte Exposition einer Windschutzpflanzung) genutzt werden.

Abbildung 12: Rasterbasierte bundesweite Ausweisung der Schutzwirkungsstufen für Windhindernisse unter Einbeziehung der anteilig gemittelten Hauptwindrichtungen auf Ackerflächen (Detailausschnitt)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

2.7 Ausweisung der Schutzwirkung in Bezug auf Fruchtarten und der Art der Bewirtschaftung (Bodenbedeckung)

2.7.1 Zuordnung der Schutzwirkungsstufen für Fruchtarten und Bodenbedeckung

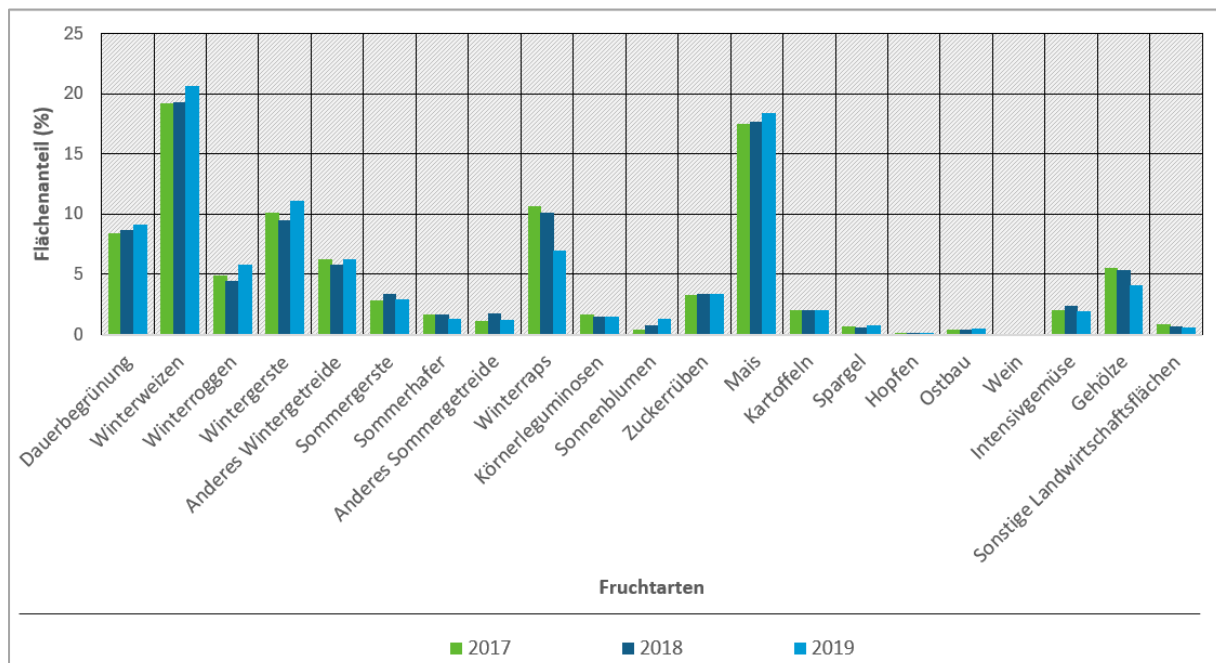
Die Beeinflussung der Bodenerosionsgefährdung auf Ackerflächen durch die angebauten Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen und ggf. Bewirtschaftungsmaßnahmen wird ebenfalls in der DIN 19706 (2023) näher ausgeführt. Hier wird hinsichtlich der Einstufung der Schutzwirkung von Fruchtarten von fünf Schutzwirkungsstufen ausgegangen, die wie folgt hinterlegt sind:

- Schutzwirkungsstufe 1 (sehr gering, Vegetationsdecke geschlossen ab Sommer):
Hülsenfrüchte, Mais, Hackfrüchte, Gartenbau
- Schutzwirkungsstufe 2 (gering, Vegetationsdecke geschlossen ab Frühsommer):
Sommergetreide, Sommerraps, Flachs, Ölfrüchte, Sonnenblumen
- Schutzwirkungsstufe 3 (mittel, Vegetationsdecke geschlossen ab Frühjahr): Winterweizen, Winterroggen (Aussaat nach 1. Oktober), Wintermenggetreide
- Schutzwirkungsstufe 4 (gut, Vegetationsdecke geschlossen ab Spätherbst): Wintergerste, Winterroggen (Aussaat vor 1. Oktober), Winterraps, Grünbrache
- Schutzwirkungsstufe 5 (sehr gut, Vegetationsdecke ganzjährig geschlossen):
Dauerbegrünung (Grünland), Futterpflanzen (Klee, Luzerne, Ackergras)

Diese Einstufungen der Schutzwirkung gelten für eine konventionelle Bewirtschaftung mit dem Pflug, also nicht für pfluglose Bodenbearbeitung und berücksichtigen keinen Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten.

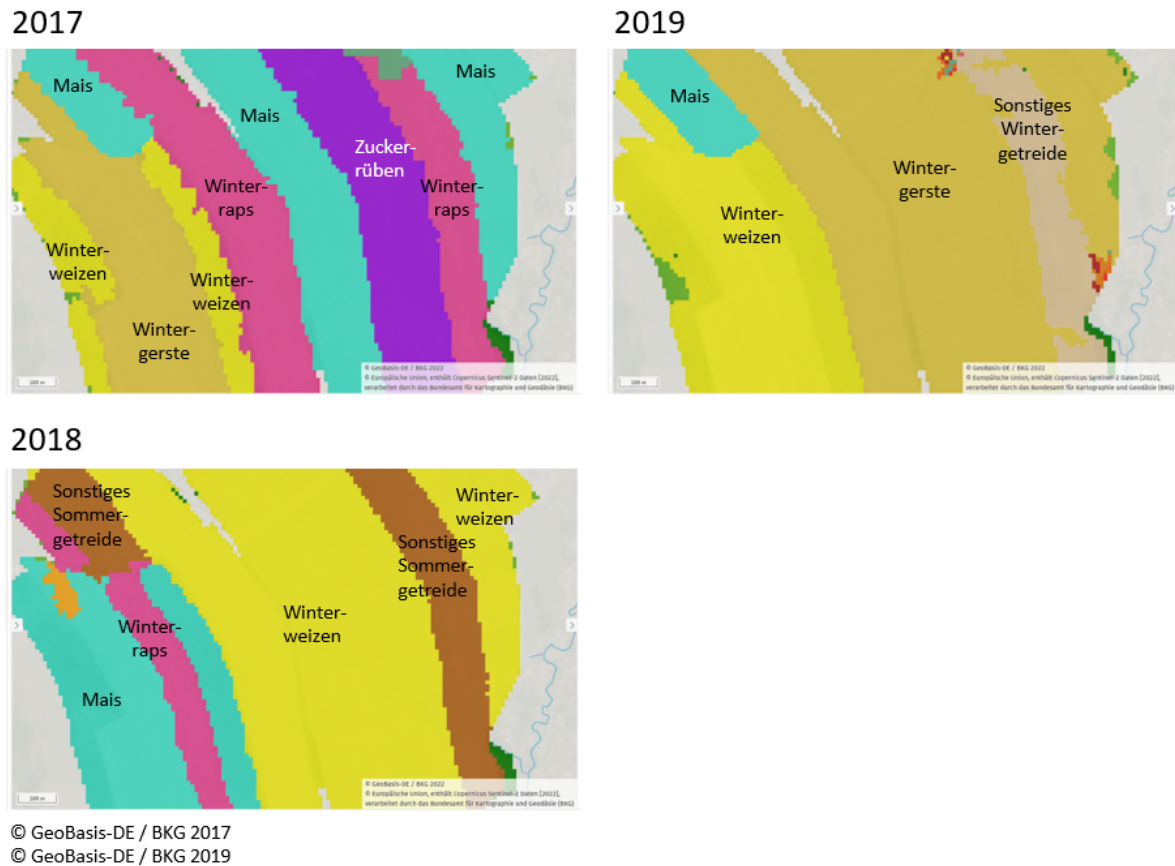
Für die bundesweite Ableitung der Schutzwirkungsstufen in Abhängigkeit von der angebauten Fruchtart wird die digital vorliegende Verteilung der Hauptfruchtarten auf Ackerflächen für die Jahre 2017 bis 2019 genutzt (Blickensdörfer et al. 2021). Die Daten wurden auf Grundlage von Sentinel Daten abgeleitet und liegen als Raster-Datensatz mit einer Gitterweite von 10 m vor. Diese Daten wurden auf die Modellrasterzellen mit der Nutzung „Acker“ (ebenfalls 10 m Gitterweite) übertragen (dominante Fruchtart). Da es sich bei Blickensdörfer et al. (2021) um satellitengestützte Interpretationen der jeweils detektierten Fruchtarten handelt, kommt es auch zu Fruchtartenwechseln, die nicht dem räumlichen Muster von Schlägen oder Teilschlägen folgen. Hierbei handelt es sich unter Umständen um Fehlklassifizierungen. Die Gründe hierfür können vielfältig sein. Neben grundsätzlich vorhandenen Interpretationsunschärfen kann es z.B. zu witterungsbedingt untypischen Ausprägungen einer Fruchtart oder Überprägungen durch Beikräuter kommen. Trotzdem ist das sich ergebende räumliche Muster der Fruchtartenverteilung ausreichend plausibel und liefert in Anbetracht der hier vorzunehmenden bundesweiten Betrachtung eine sehr hohe räumliche Auflösung mit einem vertretbaren Maß an Unschärfe. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu Daten der Agrarstatistik, wie z.B. auf Kreisebene, die keine räumliche Verortung von Fruchtarten erlauben. Eine vergleichende Zusammenstellung der Fruchtartenverteilung der Jahre 2017, 2018 und 2019 zeigt Abbildung 13. Hierbei zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Jahre 2017 bis 2019 im bundesweiten Mittel recht ähnliche prozentuale Verteilungen der Fruchtarten liefern. Erst bei hoher räumlicher Auflösung wird der kleinräumige Wechsel der Fruchtarten zwischen den Jahren deutlich, wie Abbildung 14 exemplarisch für einen Gebietsausschnitt zeigt.

Abbildung 13: Fruchtartenverteilung auf Ackerflächen im Bundesgebiet für die Jahre 2017, 2018 und 2019 auf Basis der Auswertung von Sentinel-Daten (Blickensdörfer et al. 2021)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 14: Wechsel der Fruchtartenverteilung von 2017 bis 2019 für ein Beispielgebiet (Blickensdörfer et al. 2021)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Die alternativ mögliche Einstufung der Schutzwirkung von Fruchtfolgen gemäß Tabelle 5 der DIN 19706 (2013) wird hier nicht genutzt, da die nötige Datengrundlage bundesweit nicht verfügbar ist.

Für pfluglose Bodenbearbeitung und den Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten kann ausgehend von den oben genannten Schutzstufen ein höherer Bodenbedeckungsgrad durch Zuschläge zur Schutzwirkungsstufe berücksichtigt werden. So kann gemäß DIN 19706 (2013) bzw. LBEG (2020) in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung in Prozent für diejenigen Fruchtarten ein Zuschlag erfolgen, die in Schutzwirkungsstufe 1 bzw. 2 enthalten sind, also für Fruchtarten mit einer Aussaat im Frühjahr. Der tatsächlich zu erwartende Einfluss von pflugloser Bearbeitung (Direktsaat, Mulchsaat) oder Zwischenfrucht- bzw. Untersaatenanbau auf die Zunahme der Bodenbedeckung und den sich daraus ableitenden Zuschlag zur Schutzwirkungsstufe ist allerdings nur sehr eingeschränkt erfassbar. Nach derzeitigem Stand liegt der Anteil solcher Bewirtschaftungspraktiken bundesweit in Summe bei ca. 40 % der Ackerfläche (Häußermann et al. 2023, Lülfs-Baden et al. 2020). Bei Mulchsaat ist von einer Bedeckung der Bodenoberfläche mit Pflanzenresten von mindestens 30 % zu rechnen (agrarheute 2016), was einen Zuschlag von +1 bis +2 (bei 50 % Bodenbedeckung) rechtfertigen würde. Darauf aufbauend wurde für die aktuellen Arbeiten die folgende Vorgehensweise festgelegt:

- ▶ Ein Zuschlag um **eine** Schutzwirkungsstufe wird bei den Fruchtarten der Schutzwirkungsstufe 1 und 2 vorgenommen, was einer eher konservativen Interpretation der DIN-Norm im Hinblick auf die Erhöhung der Schutzwirkung entspricht.
- ▶ Zusätzlich wurde aber auch für Fruchtarten der Schutzwirkungsstufe 3 (also abweichend zur DIN 19706 2013) eine Höherstufung um **eine** Schutzwirkungsstufe vorgenommen, um die zu erwartende positive Wirkung der Mulchsaat z.B. auch bei Wintergetreide mit späterer Aussaat berücksichtigen zu können.

Die konkrete Einstufung der Schutzwirkungsstufe (konventionell, pfluglos) und ggf. deren Erhöhung unter Berücksichtigung der anteiligen pfluglosen Bearbeitung inklusive dem Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten zeigt Tabelle 3. Hierbei gelten zusätzlich folgende Randbedingungen:

- ▶ Eine Erhöhung der Schutzwirkungsstufe erfolgt nur bis maximal Stufe 4, um eine Gleichschaltung mit dauerbegrünten Flächen zu verhindern.
- ▶ Bei Intensivgemüse, Erdbeeren und Spargel wird unterstellt, dass keine pfluglose Bearbeitung erfolgt.
- ▶ Die Dauerkulturen Wein- und Obstanbau sowie Gehölze werden mit „4“ bewertet, für den Fall, dass sie unschärfebedingt auf Flächen mit der Nutzung „Acker“ vorhanden sind. Hierdurch werden unerwünschte „NULL“-Werte vermieden.
- ▶ Hopfenanbau sowie „sonstige Landwirtschaftsflächen“ werden mit dem mittleren Wert „3“ belegt, da weitergehende Informationen hierzu fehlen.

Tabelle 3: Ableitung der Schutzwirkung für die Fruchtarten für konventionelle Bearbeitung sowie korrigiert für pfluglose Bearbeitung, Zwischenfrüchte und Untersaaten

ID	Fruchtart	Schutzwirkungsstufe für konventionelle Bearbeitung	Korrigierte Schutzwirkungsstufe unter Anrechnung von pflugloser Bearbeitung und Zwischenfrucht- und Untersaatenanbau
10	Grünland, Dauerbegrünung	5	5
31	Winterweizen	3	4
32	Winterroggen	3 bis 4	4
33	Wintergerste	4	4
34	Anderes Wintergetreide	3	4
41	Sommergerste	2	3
42	Sommerhafer	2	3
43	Anderes Sommergetreide	2	3
50	Winterraps	4	4
60	Körnerleguminosen	1	2
70	Sonnenblumen	2	3
80	Zuckerrüben	1	2
91	Silomais	1	2
92	Körnermais	1	2
100	Kartoffeln	1	2
110	Weinanbau	4	4
120	Erdbeeren	1	1
130	Spargel	1	1
140	Zwiebeln	1	1
150	Hopfen	3	3
160	Obstbau	4	4
181	Möhren	1	1
182	Sonstiges Intensivgemüse	1	1
555	Gehölze	4	4
999	Sonstige Landwirtschaftsflächen	3	3

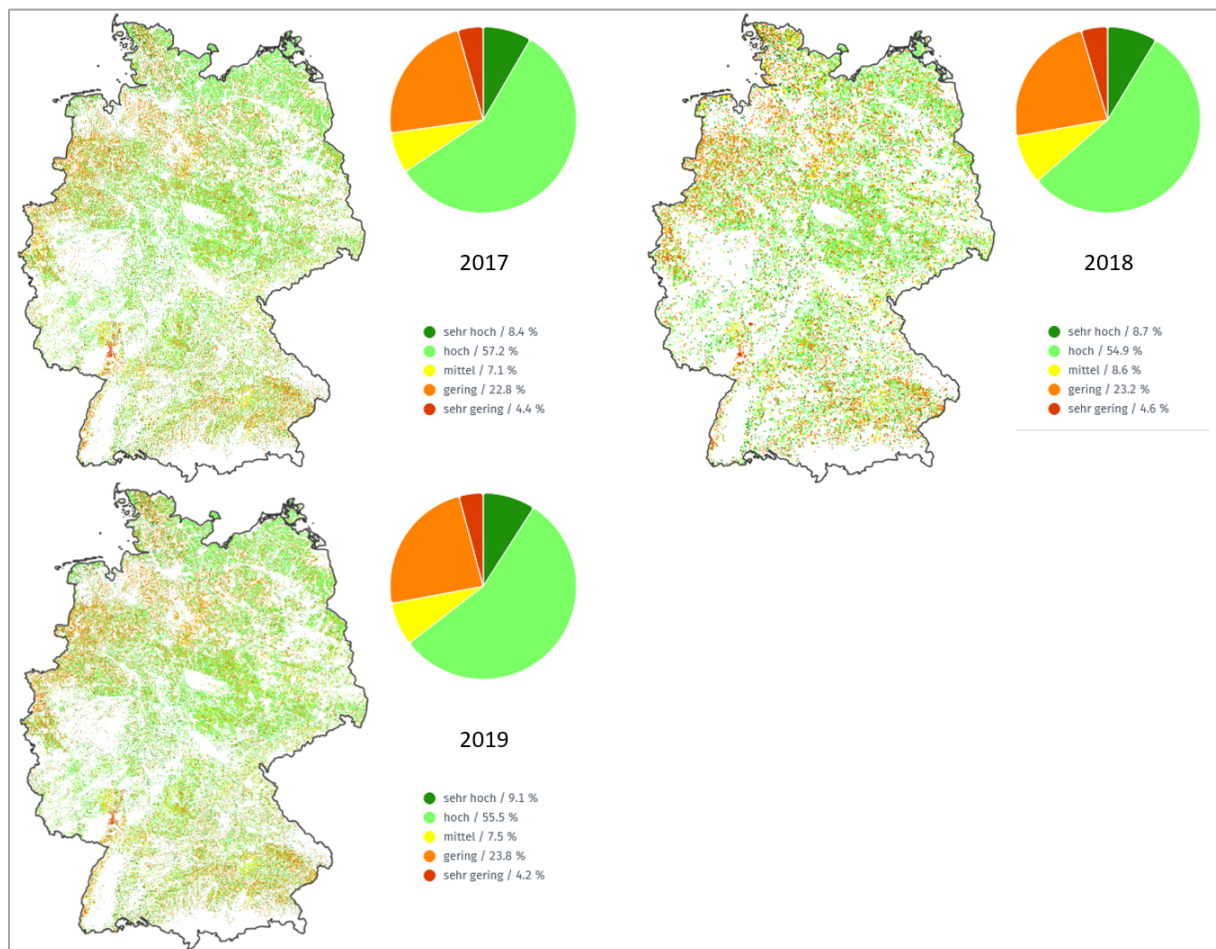
Quelle: DIN 19706 (2013), modifiziert

2.7.2 Schutzwirkung von Fruchtarten

Die Ergebnisse der Ableitung der Schutzwirkung für die Fruchtarten auf Basis der korrigierten Schutzwirkungsstufen gemäß Tabelle 3 für die drei betrachteten Einzeljahre 2017, 2018 und

2019 veranschaulicht Abbildung 15. Hierbei wird deutlich, dass sich die Schutzwirkungsstufen im bundesweiten Mittel nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Je nach Betrachtungsjahr und auf der jeweiligen Fläche unterscheiden sich die Stufen allerdings deutlich. Das grobe räumliche Muster der Verteilung bleibt aber gleich. Hotspotgebiete mit einer sehr geringen Schutzwirkung liegen im Nordwesten Deutschlands, im Oberrheingraben sowie in Bayern insbesondere aufgrund höherer Maisanteile.

Abbildung 15: Bewertung der Schutzwirkung von Fruchtarten auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung der Jahre 2017, 2018 und 2019



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Für weitere Betrachtungen werden die folgenden drei Bewirtschaftungsszenarien festgelegt und die Schutzwirkung berechnet:

- ▶ Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung (Vegetationsdecke geschlossen ab Sommer, z.B. Mais) unter Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen (Szenario 1, Worst case),
- ▶ Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit mittlerer Schutzwirkung (Wintergetreide, Aussaat nach 1. Okt.) unter Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen (Szenario 2) und
- ▶ Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr guter Schutzwirkung (Dauerbegrünung, Futterpflanzen) unter Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen (Szenario 3, Best case).

Auf eine Visualisierung bzw. Auswertung der Ergebnisse für die Schutzwirkung von Fruchtarten kann hier verzichtet werden, da alle Ackerflächen einheitlich die Schutzwirkungsstufe „sehr gering“ (Szenario 1), „mittel“ (Szenario 2) bzw. „sehr gut“ (Szenario 3) erhalten.

2.7.3 Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind

Die Ableitung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung erfolgt gemäß DIN 19706 (2013) aus der Stufe der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Matrix zur Ableitung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind anhand der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen

Stufen der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind	Schutzwirkung der Fruchtarten Stufe 1 (sehr gering)	Schutzwirkung der Fruchtarten Stufe 2 (gering)	Schutzwirkung der Fruchtarten Stufe 3 (mittel)	Schutzwirkung der Fruchtarten Stufe 4 (gut)	Schutzwirkung der Fruchtarten Stufe 5 (sehr gut)
0 (keine)	0	0	0	0	0
1 (sehr gering)	1	0	0	0	0
2 (gering)	2	1	0	0	0
3 (mittel)	3	2	1	0	0
4 (hoch)	4	3	2	1	0
5 (sehr hoch)	5	4	3	2	0

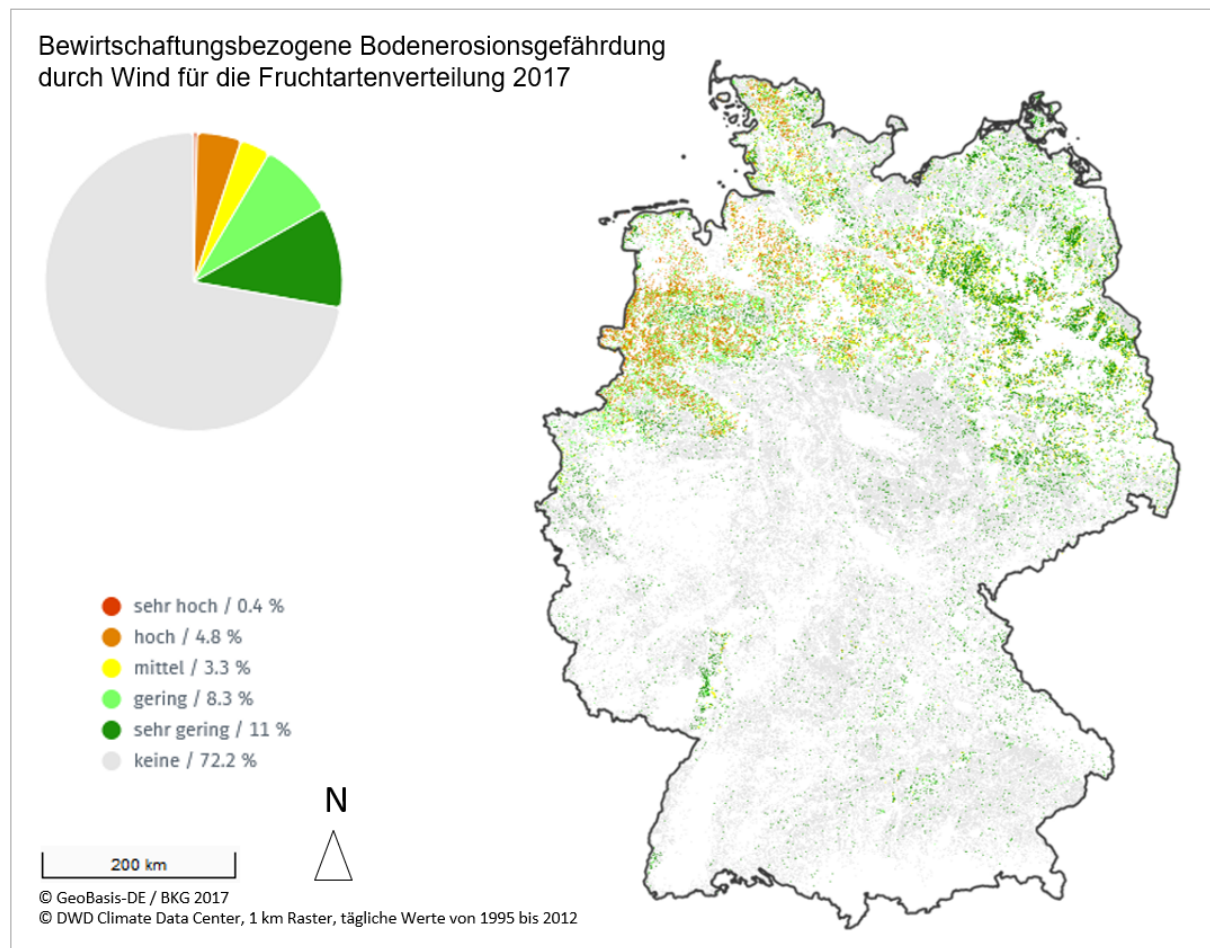
Quelle: DIN 19706 (2013)

Abbildung 16 bis Abbildung 22 veranschaulichen das Ergebnis der Ableitung der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind für die drei Betrachtungsjahre 2017 bis 2019 bzw. die drei ausgewählten Szenarien.

In allen Modellläufen wird deutlich, dass die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung im Wesentlichen in der Nordhälfte Deutschlands größer ist, was in der dort ebenfalls höheren Einstufung im Hinblick auf die natürliche Bodenerosionsgefährdung begründet ist (vgl. Abbildung 4).

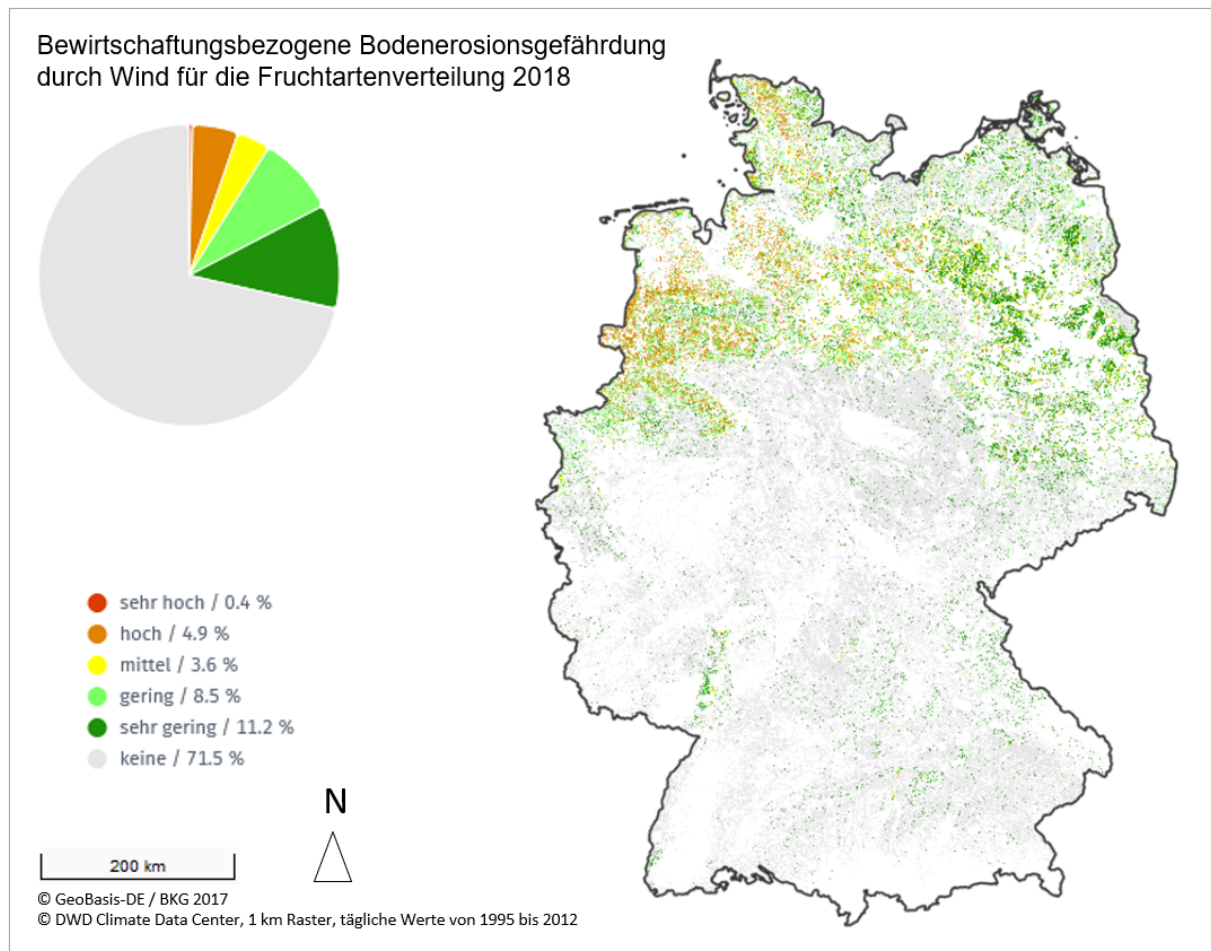
Die Ergebnisse für die betrachteten Einzeljahre (Abbildung 16 bis Abbildung 18) unterscheiden sich wegen der nahezu gleichbleibenden mittleren Fruchtartenverteilung nicht in der bundesweiten statistischen Auswertung, dafür aber bei kleinräumiger Betrachtung. Sehr hohe Risiken werden lediglich für ca. 0,3 bis 0,4 %, hohe Risiken für knapp unter 5 % der Ackerfläche ausgewiesen. Keine bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung ergibt sich auf ca. 72 % der Ackerfläche.

Abbildung 16: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2017



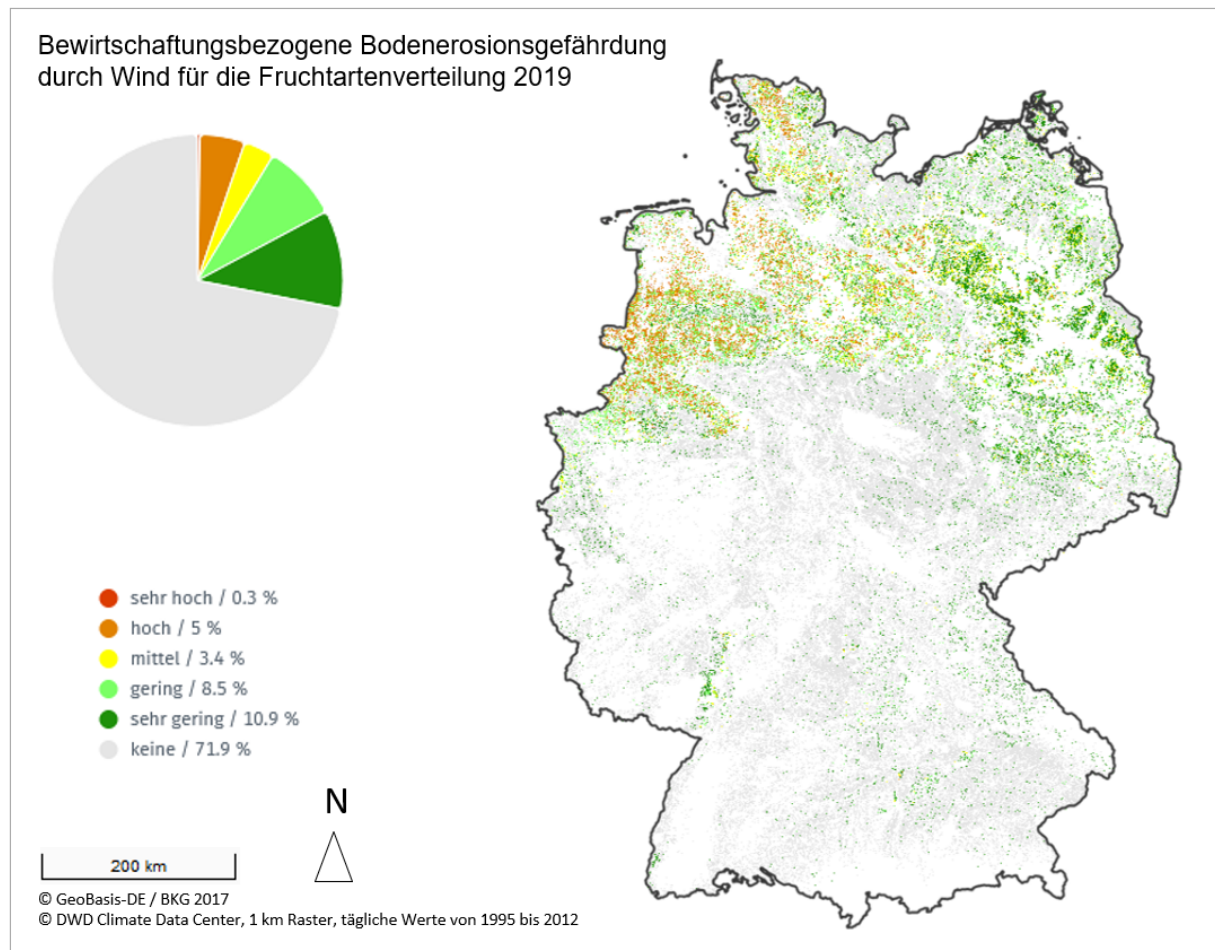
Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 17: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2018



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 18: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für die Fruchtartenverteilung im Jahr 2019



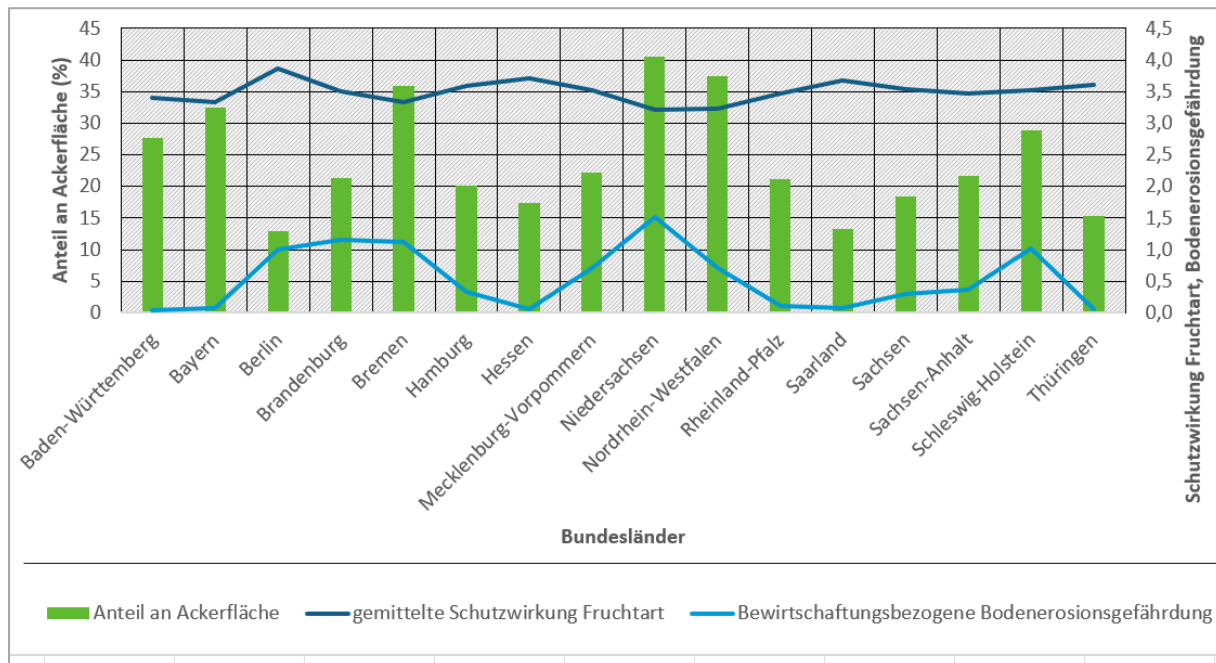
Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Für die drei hier betrachteten Jahre zeigt sich, dass eine erhöhte bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung vor allem in den nordwestlichen Teilen Deutschlands gegeben sein dürfte, da hier die Anteile von Ackerrasterzellen mit sehr hohen und hohen Gefährdungen deutlich höher liegen als in den übrigen Landesteilen. Dies ist darin begründet, dass in diesen Regionen vergleichsweise hohe Anteile der Fruchtarten mit einer geringen bzw. sehr geringen Schutzwirkung (siehe Tabelle 3) vorliegen. Die Prozentanteile dieser Fruchtarten (Mais, Zuckerrübe, Spargel, Kartoffeln, Möhren, Zwiebel, sonstiges Intensivgemüse, Körnerleguminosen) wurden beispielhaft für das Betrachtungsjahr 2019 je Bundesland aufsummiert und der sich ergebenden mittleren Schutzwirkung über alle angebauten Fruchtarten gegenübergestellt (siehe Abbildung 19). Um hier Mittelwerte bilden zu können, wurden den eigentlich ordinal skalierten Schutzwirkungsstufen von „sehr gering“ bis „sehr gut“ jeweils metrische Werte von „1“ bis „5“ zugeordnet. Weiterhin erfolgt ein Vergleich mit der je Bundesland generierten bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdungsstufe. Auch hier wurden Mittelwerte gebildet, indem den Bodenerosionsgefährdungsstufen von „keine“ bis „sehr hoch“ jeweils metrische Werte von „0“ bis „5“ zugeordnet wurden.

Hierbei wird deutlich, dass die Länder mit höheren Anteilen der Fruchtarten mit geringer bis sehr geringer Schutzwirkung auch signifikant niedrigere mittlere Schutzwirkungen für ihre gesamte Ackerfläche erhalten. Die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdungsstufe folgt dieser Logik nur in den Ländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Bremen. In

Nordrhein-Westfalen ist die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung hingegen vergleichsweise niedrig, trotz geringer mittlerer Schutzwirkung. In Brandenburg und Berlin wird eine erhöhte bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung ausgewiesen trotz eher niedrigem Anteil von Fruchtarten mit geringer bis sehr geringer Schutzwirkung. Hier wirkt sich jeweils die Bodenerodierbarkeit durch Wind als maßgeblicher Einflussfaktor aus. Diese ist in Nordrhein-Westfalen gering, in Berlin und Brandenburg hingegen eher hoch bewertet.

Abbildung 19: Anteil von Fruchtarten mit geringer bzw. sehr geringer Schutzwirkung an der Ackerfläche (als Gesamtfläche aller Fruchtarten) im Vergleich mit der sich ergebenden gemittelten Schutzwirkungsstufe und der Bodenerosionsgefährdungsstufe je Bundesland für das Jahr 2019



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Im Hinblick auf die hier ermittelte bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung erscheint die Tatsache, dass in den Nordländern Deutschlands (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Bremen) bei grundsätzlich höherer natürlicher Bodenerosionsgefährdung zugleich hohe Anteile an Fruchtarten mit sehr geringer bzw. geringer Schutzwirkung angebaut werden eher problematisch. Mögliche Maßnahmen zur Minderung der Bodenerosion durch Wind könnten hier u.a. Fruchtartenwechsel, eine Erhöhung der Anteile bodenkonservierender Bearbeitung oder auch die Anlage von Windschutzpflanzungen sein.

Nachfolgend wird die bewirtschaftungsbezogene Schutzwirkung durch Wind für die Szenarien 1 (Worst case) bis 3 (Best case) ermittelt.

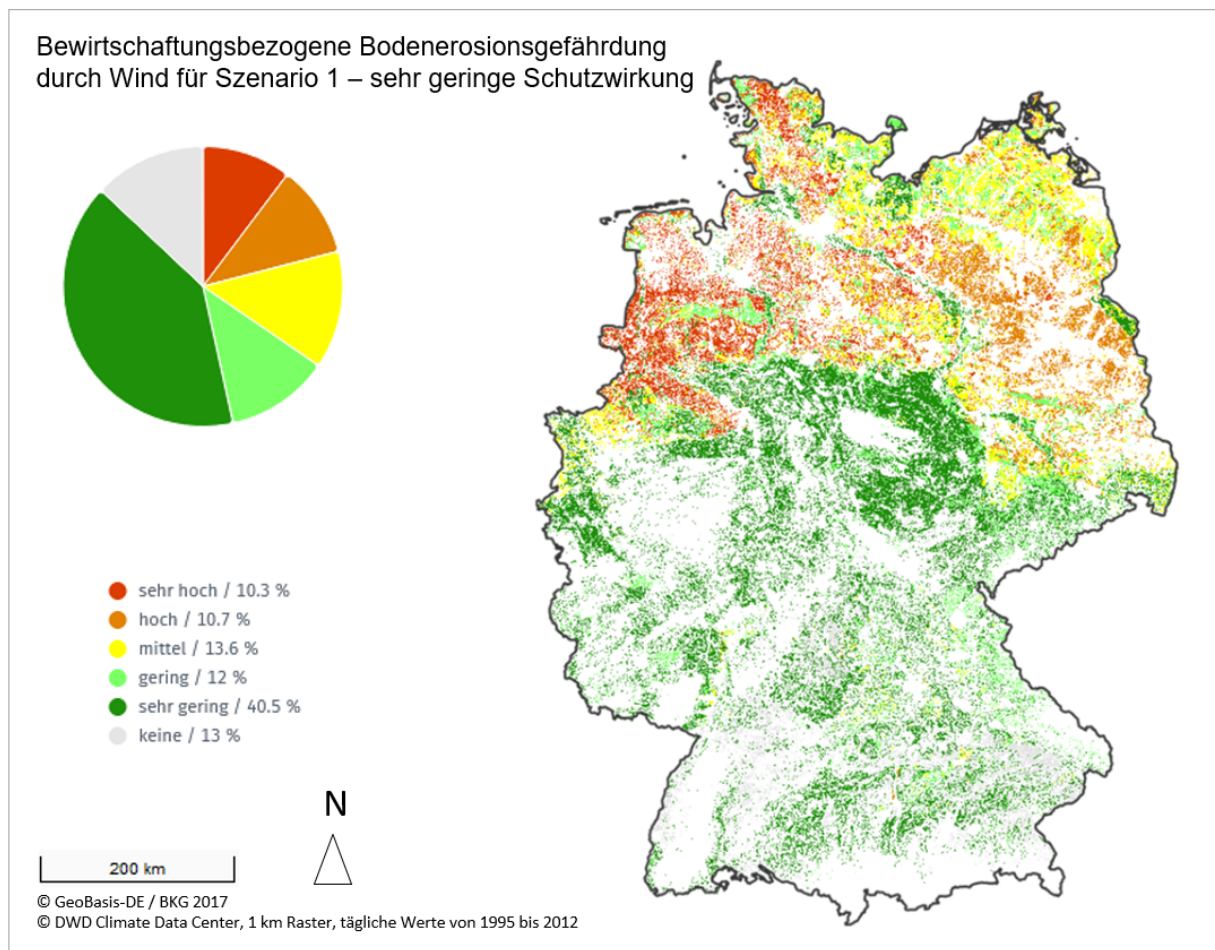
In Szenario 1 (Abbildung 20) wird flächendeckend eine sehr geringe Schutzwirkung der angebauten Fruchtart auf der Ackerfläche (z.B. beim Anbau von Mais mit Pflugeinsatz) angenommen. Die Ergebnisse entsprechen denjenigen der natürlichen Bodenerosionsgefährdung (vgl. Tabelle 4).

Für eine angebaute Fruchtart mit mittlerer Schutzwirkung (Szenario 2, hier z.B. konventioneller Anbau von Winterweizen, Abbildung 21) ergibt sich im ungünstigsten Fall eine mittlere Bodenerosionsgefährdung. Die höchsten Werte treten auch hier in den Regionen mit höherer

natürlicher Bodenerosionsgefährdung, also insbesondere in der nördlich gelegenen Hälfte Deutschlands auf.

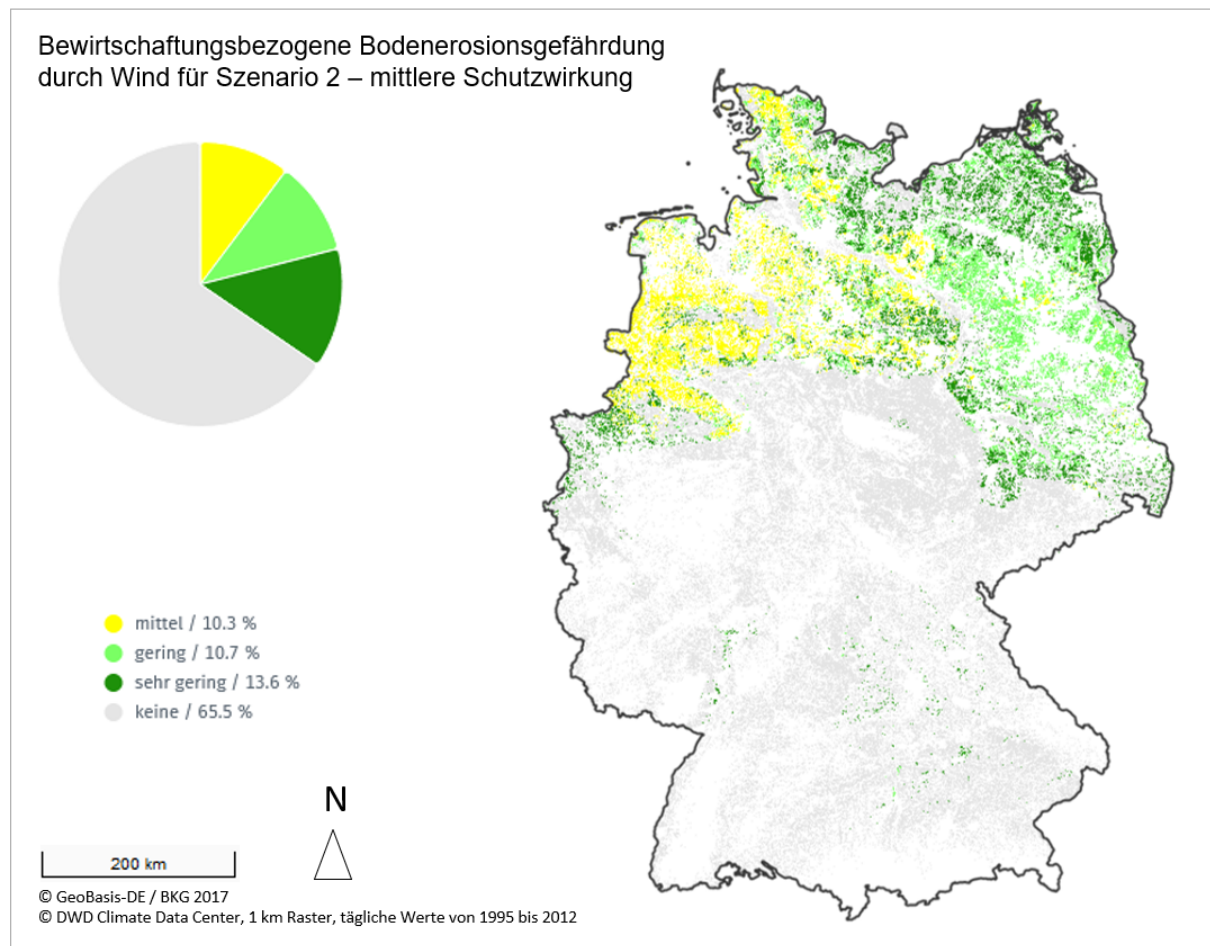
Im Falle einer sehr guten Schutzwirkung der angebauten Fruchtart (Szenario 3, z.B. Ackergras, Abbildung 22) wird keine Bodenerosionsgefährdung mehr ausgewiesen (vgl. auch hier Tabelle 4).

Abbildung 20: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung (z.B. Mais) (Szenario 1)



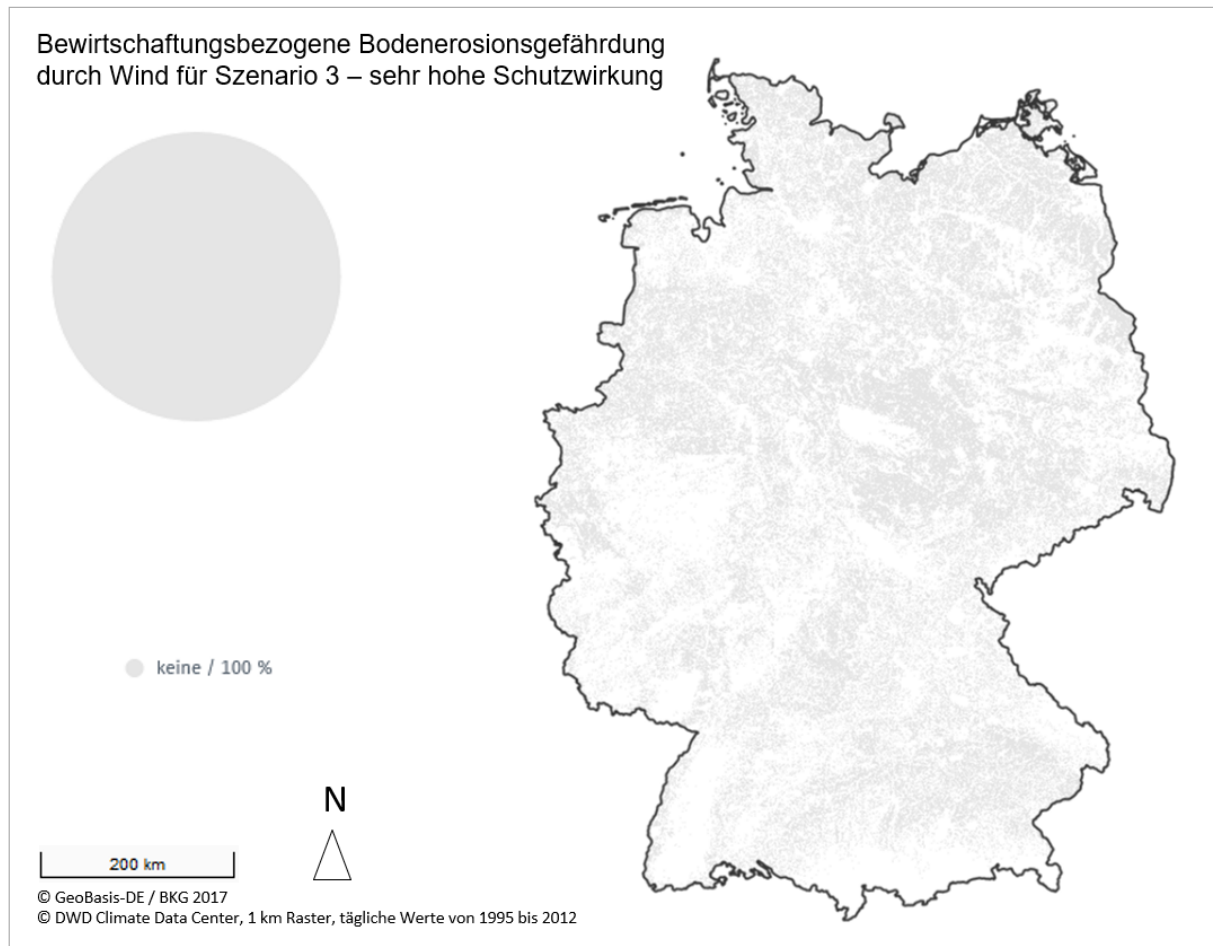
Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 21: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit mittlerer Schutzwirkung (z.B. Winterweizen) (Szenario 2)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 22: Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind auf Ackerflächen für eine Fruchtart mit sehr guter Schutzwirkung (Dauerbegrünung, z.B. Ackergras) (Szenario 3)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Eine vergleichende Betrachtung der modellierten bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung von Szenario 1 bis 3 in den Bundesländern liefert Abbildung 23. Auch hier wurden arithmetische Mittelwerte gebildet, weswegen den eigentlich ordinal skalierten Bodenerosionsgefährdstufen von „keine“ bis „sehr hoch“ jeweils metrische Werte von „0“ bis „5“ zugewiesen wurden.

Während für Szenario 3 bei Annahme der Schutzwirkungsstufe 5 keine Bodenerosionsgefährdung ausgewiesen wird („0“-Wert), ergeben sich bei den beiden anderen Szenarien abgestufte mittlere Bodenerosionsgefährdungen je Bundesland. Ausschlaggebend für die Verteilung der Werte im Vergleich der Bundesländer ist die natürliche Bodenerosionsgefährdung, die aufgrund der höheren Windgeschwindigkeit im Norden Deutschlands und der höheren Bodenerodierbarkeit zusätzlich in Brandenburg und Berlin vergleichsweise hoch liegt.

Abbildung 23: Vergleich der modellierten bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Szenario 1 bis 3 anhand der gemittelten Schutzwirkung je Bundesland



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

2.8 Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen

2.8.1 Einstufung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind

In einem letzten Schritt erfolgt die Einstufung der Erosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung und der Schutzwirkung von Windhindernissen (Tabelle 5).

Tabelle 5 bildet die Bewertungsgrundlage für die in den nachfolgenden Modellläufen abgeleiteten Ergebnisse zur Einstufung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Ackerflächen. Hierbei wird jeweils von derselben Schutzwirkung von Windhindernissen ausgegangen. Für die drei betrachteten Einzeljahre (2017 bis 2019) ändert sich zwar die bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung, was sich im Mittel aber nur marginal auswirkt. Für die Szenarien 1 bis 3 wird, wie oben beschrieben, eine flächendeckende Verbreitung von je einer Kultur mit sehr geringer, mittlerer und sehr guter Schutzwirkung unterstellt.

Tabelle 5: Matrix zur Ableitung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen

bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind	Schutzwirkung von Windhindernissen Stufe 1	Schutzwirkung von Windhindernissen Stufe 2	Schutzwirkung von Windhindernissen Stufe 3	Schutzwirkung von Windhindernissen Stufe 4	Schutzwirkung von Windhindernissen Stufe 5
0 (keine)	0	0	0	0	0
1 (sehr gering)	1	0	0	0	0
2 (gering)	2	1	0	0	0
3 (mittel)	3	2	1	0	0
4 (hoch)	4	3	2	1	0
5 (sehr hoch)	5	4	3	2	1

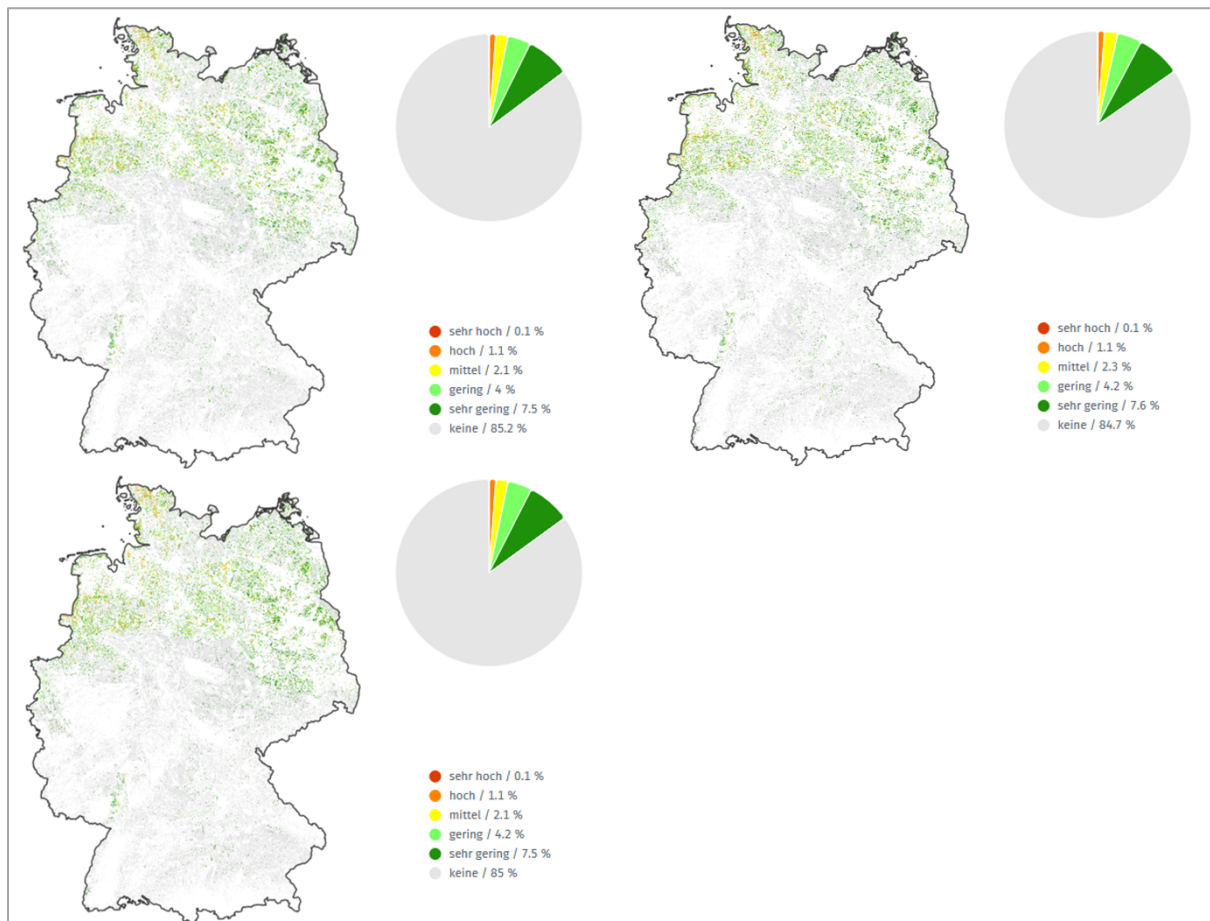
Quelle: DIN 19706 (2013)

2.8.2 Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen für die sechs Modellläufe

Die ermittelte Bodenerosionsgefährdung unter Einbeziehung der natürlichen Bodenerosionsgefährdung durch Wind, der Schutzwirkung von Bewirtschaftung sowie unter Berücksichtigung der mittleren Schutzwirkung von Windhindernissen für die Fruchtartenverteilung in den Jahren 2017, 2018 und 2019 zeigt Abbildung 24.

Die Ergebnisse für die drei Einzeljahre unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Eine hohe bis sehr hohe Bodenerosionsgefährdung beschränkt sich auf ca. 1 % der Ackerfläche, keine Gefährdung ist hingegen für 85 % der Ackerfläche ausgewiesen.

Abbildung 24: Bodenerosionsgefährdung durch Wind in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Schutzwirkung von Windhindernissen für die Fruchtartenverteilung in den Jahren 2017 bis 2019

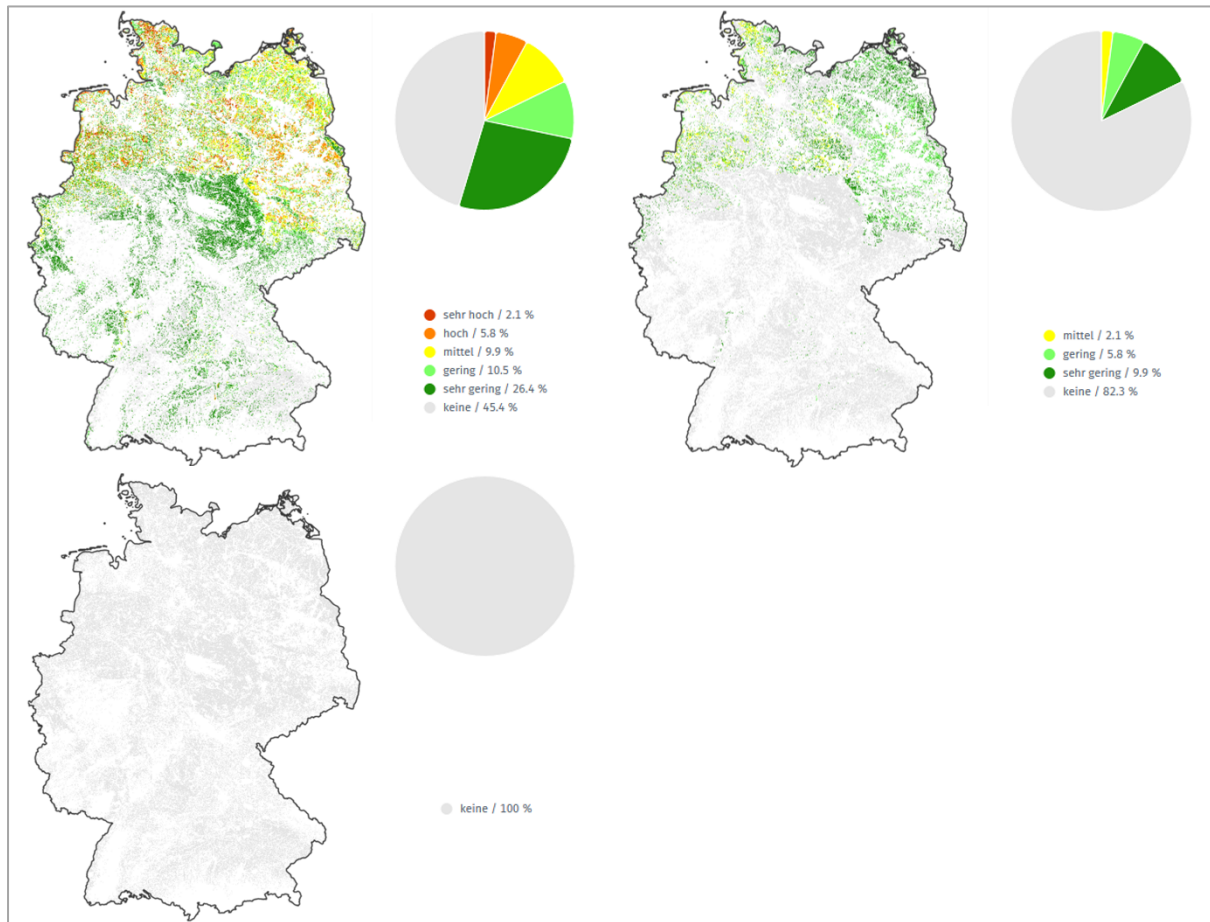


Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse für die drei Bewirtschaftungsszenarien 1 bis 3 (sehr geringe, mittlere und sehr gute Schutzwirkung der Bewirtschaftung).

Erwartungsgemäß unterscheidet sich die final ermittelte Bodenerosionsgefährdung durch Wind für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien 1 bis 3 (Abbildung 25) deutlich voneinander. In Szenario 1 werden ca. 8 % der Ackerfläche mit einer hohen bis sehr hohen Gefährdung belegt, für 45,5 % wird hingegen keine Gefährdung ausgewiesen. Szenario 2 geht von einer maximal mittleren Gefährdung aus, die für 2,1 % der Ackerfläche gilt. Der Anteil mit keiner Gefährdung steigt hingegen auf 82,3 % an. Für Szenario 3 werden keine Gefährdungen der Ackerfläche durch die Bodenerosion durch Wind ausgewiesen, da durch die ganzjährige Bodenbedeckung der Dauerbegrünung eine sehr gute Schutzwirkung angenommen und das Risiko grundsätzlich auf den Wert „0“ absenkt wird.

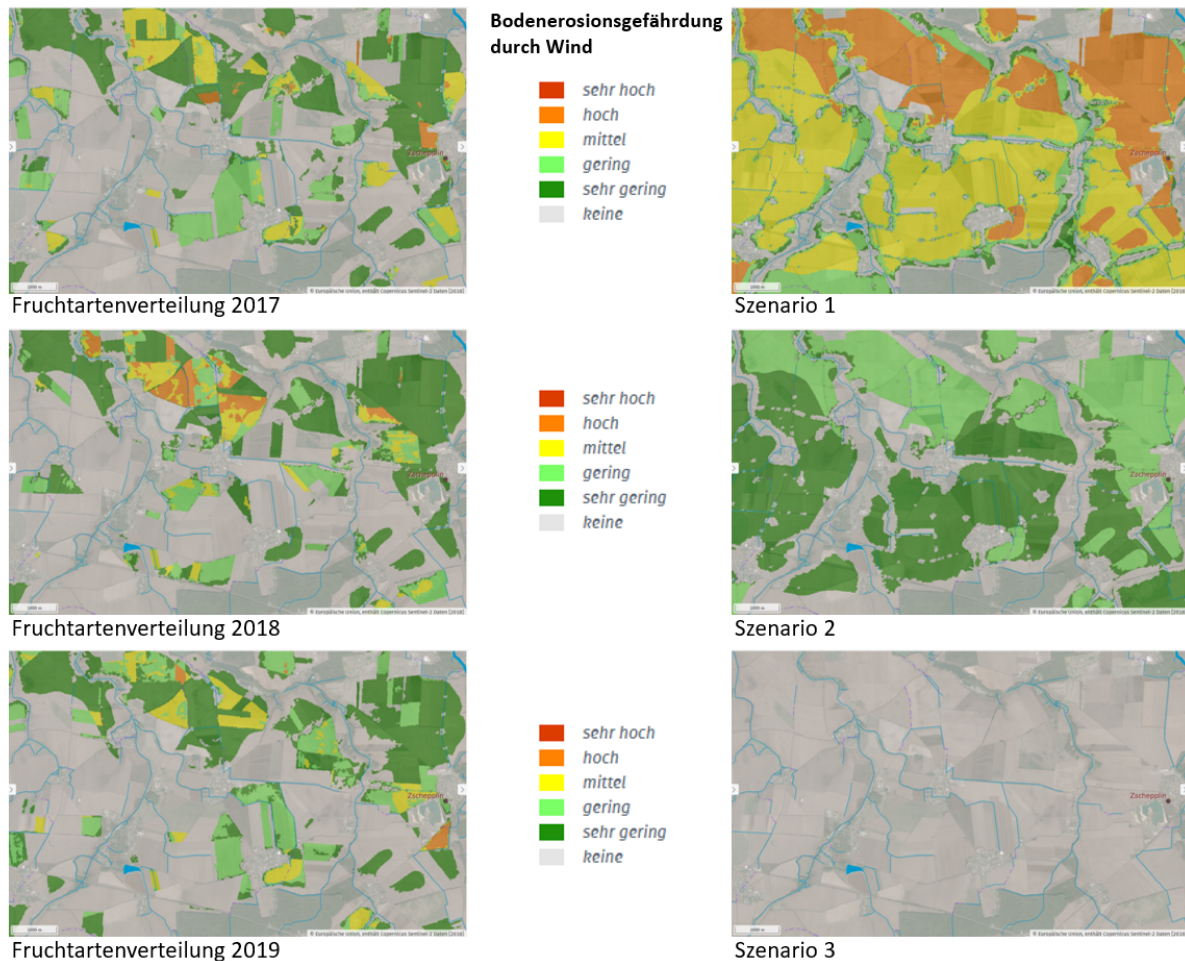
Abbildung 25: Bodenerosionsgefährdung durch Wind unter Einbeziehung von Windhindernissen und einer sehr geringen, mittleren und sehr guten Schutzwirkung der Bewirtschaftung (Szenario 1 bis 3)



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Abbildung 26 zeigt einen Vergleich der ermittelten finalen Bodenerosionsgefährdung für einen Detailausschnitt. Hierbei wird deutlich, inwieweit sich die unterschiedliche Fruchtartenverteilung von 2017 bis 2019 auf die Ergebnisse auswirkt (linke Seite). Die rechte Bildseite zeigt die Differenzen für die drei unterschiedlich angesetzten Schutzwirkungen der Bewirtschaftung (Szenario 1 – sehr gering, Szenario 2 – mittel, Szenario 3- sehr gut). Die Schutzwirkung der Windhindernisse geht auch hier gleich ein und beruht auf den anteilig gemittelten Windrichtungen je Rasterzelle.

Abbildung 26: Finale Bodenerosionsgefährdung durch Wind im Vergleich für die sechs Modellläufe in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbezogenen Bodenerosionsgefährdung durch Wind und der Einbeziehung der Schutzwirkung von Windhindernissen (für alle Modellläufe identisch) für einen Detailausschnitt

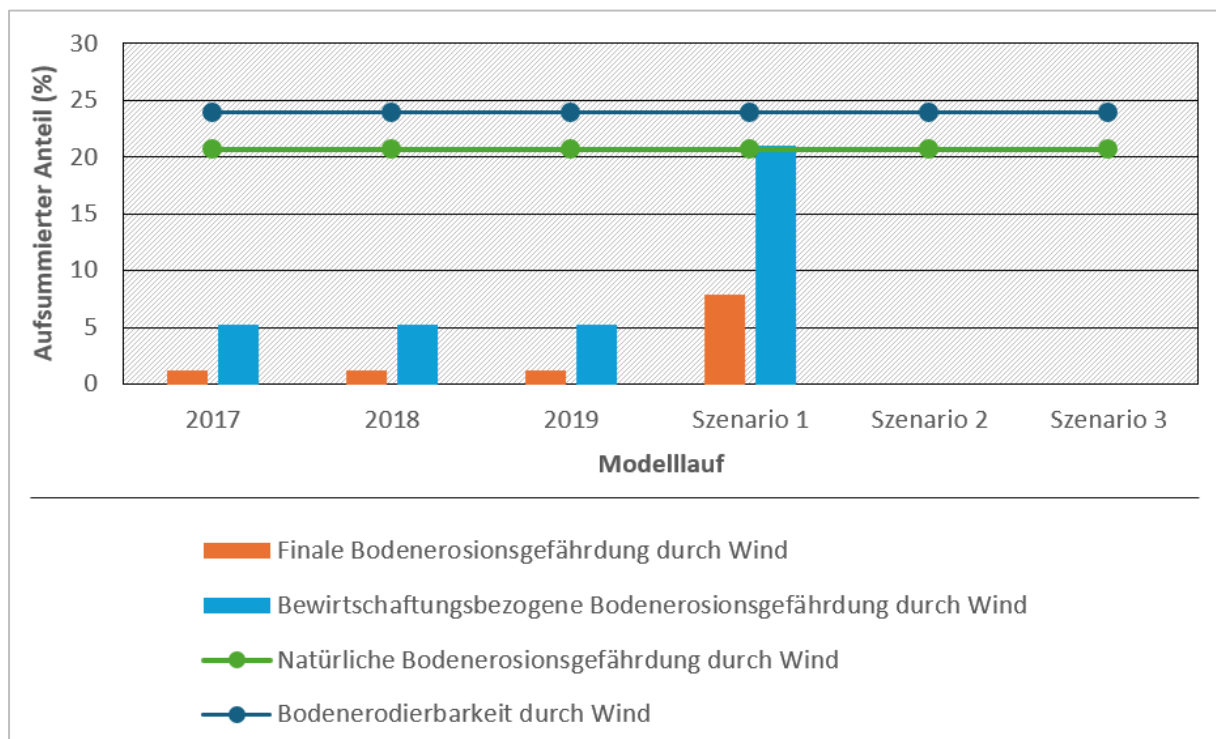


Quellen: GeoBasis-DE / BKG 2017; ATKIS-DLM, GeoBasis-DE / BKG 2019; Europäische Union, enthält Sentinel-2 Daten (2022), verarbeitet durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG); eigene Darstellung, VisDat

Nachfolgend wird für alle Zwischenergebnisse und das Endergebnis gegenübergestellt welcher Anteil der Flächen mit einer hohen bis sehr hohen Gefährdung ausgewiesen wird (Abbildung 27). Hierbei wird deutlich, dass die von der Bodenart und dem Gehalt an organischer Substanz gesteuerte Bodenerodierbarkeit durch Wind einen etwas höheren Anteil an den Gefährdungsklassen 4 und 5 aufweist, als dies bei der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind (Hinzunahme des Faktors „Windgeschwindigkeit“) der Fall ist. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die Klassen 4 bzw. 5 in beiden Bewertungen überwiegend in der Nordhälfte Deutschlands, also auf gemeinsamen Flächen auftreten. Die Verminderung des Erosionsrisikos durch Hinzunahme des zweiten Treibers hält sich deshalb in Grenzen.

Die Berücksichtigung der Bewirtschaftung führt zu einer deutlichen Absenkung der Anteile der Klassen 4 und 5. Die Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen verringert die Anteile der beiden Klassen noch deutlich stärker. Ein relevantes Gefährdungspotenzial ergibt sich hier vor allem bei Szenario 1 (Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung der Bewirtschaftung).

Abbildung 27: Vergleich der Ergebnisse der abgestuften Modellierung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind für die Jahre 2017, 2018 und 2019 sowie die drei Szenarien 1, 2 und 3 anhand der aufsummierten Anteile der Gefährdungsklassen „sehr hoch“ und „hoch“

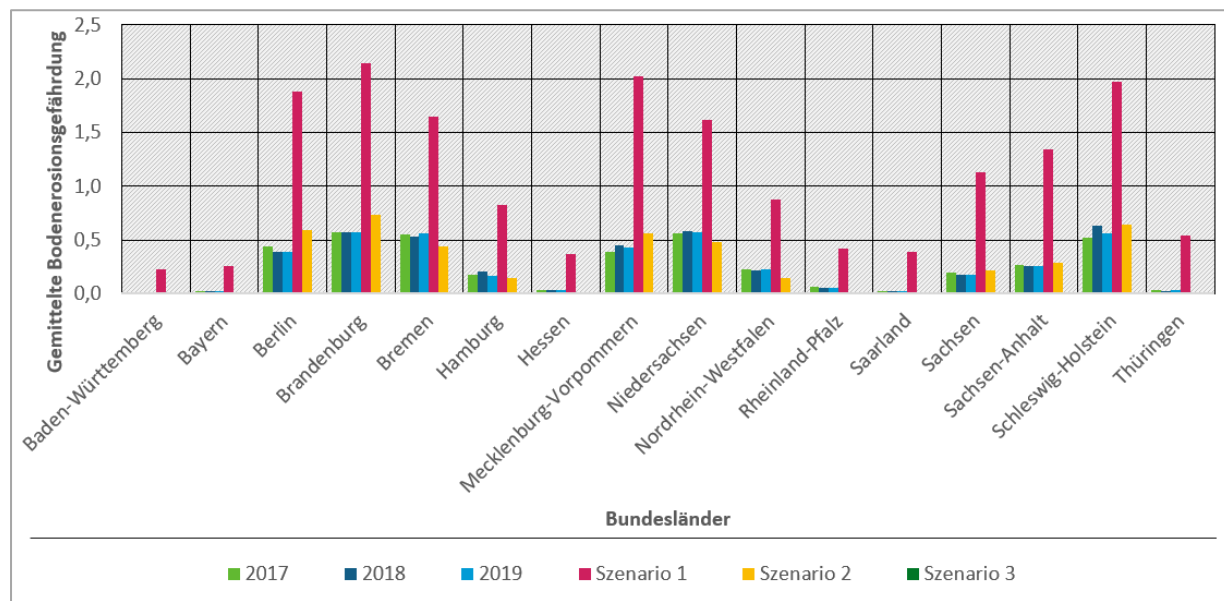


Quelle: eigene Darstellung, VisDat

Einen abschließenden Vergleich der sich ergebenden jeweiligen mittleren Bodenerosionsgefährdung (anteilig gewichteter arithmetischer Mittelwert aus den Stufen 0, 1, 2, 3, 4, 5) in Abhängigkeit von der Schutzwirkung von Bewirtschaftung und Windhindernissen für die Bundesländer zeigt Abbildung 28.

Die Ergebnisse für die Modellläufe 2017, 2018 und 2019 (Fruchtartenverteilung 2017 bis 2019) unterscheiden sich innerhalb eines Bundeslandes erwartungsgemäß nur unwesentlich. Weiterhin wird deutlich, dass einige Bundesländer bereits mit der Fruchtartenverteilung von 2017 bis 2019 eine geringere Erosionsgefährdung erreichen, als dies bei Annahme von Szenario 2 (mittlere Schutzwirkung der Fruchtart, z.B. Winterweizenanbau mit Pflug) zu erwarten wäre. Bei der Annahme einer sehr geringen Schutzwirkung der Fruchtart (Szenario 1, z.B. Maisanbau) steigen die Erosionsrisiken in allen Bundesländern beträchtlich an. Trotzdem erreichen die Mittelwerte auch hier lediglich Werte bis „2“, was im Mittel einer geringen Erosionsgefährdung entspricht.

Abbildung 28: Vergleich der mittleren Bodenerosionsgefährdung (anteilig gewichteter arithmetischer Mittelwert aus den Stufen 0, 1, 2, 3, 4, 5) in Abhängigkeit von der Schutzwirkung von Bewirtschaftung und Windhindernissen für die Bundesländer für Einzeljahre und Fruchtartenszenarien



Quelle: eigene Darstellung, VisDat

3 Überführung der Ergebnisse in das bestehende webbasierte Auswertungswerkzeug

Die oben ausgeführten Zwischen- und Endergebnisse und die Eingangsdaten wurden in das bestehende webbasierte Auswertungswerkzeug (MoRE-DE Toolbox, <https://stoffeinträge-more.de>) integriert. Die Ablage der Daten erfolgt dabei auf der Rasterebene mit einer Gitterweite von 10 m. Für den Nutzer stehen hier sowohl ein Kartenmodul zur Visualisierung als auch ein Statistikmodul zur Auswertung der Daten zur Verfügung. Die Daten sind auf der Rasterebene sowie für zahlreiche einzugsgebietsbezogene und administrative Bezugsräume abgelegt und können entsprechend abgefragt werden. Über einen Nutzungsfilter können die Abfragen auch auf einzelne oder mehrere Landnutzungstypen sowie vorher selektierte Räume begrenzt werden.

Ein Export der Daten als SHP-File ist möglich. Dieser erfolgt über das Kartenmodul und bezieht sich unmittelbar auf das Ergebnis der aktuellen Abfrage (Datenanzeige). Für den Export von Rasterdaten darf auf Grund des Datenumfangs eine vorgegebene maximale Raumausdehnung nicht überschritten werden. Weiterhin ist auch ein Datenexport aus dem Statistikmodul möglich. Auch hier werden die in einer Tabelle enthaltenen abgefragten Ergebnisse exportiert. Bezüglich des Datenformats kann zwischen XLSX- und CSV-Files ausgewählt werden. Die abgefragten Daten werden über einen Link zum Download als ZIP-File bereitgestellt. Eine dabei enthaltene Readme-Datei gibt Informationen zu den exportierten Daten sowie zur vorgeschriebenen Zitierhinweise.

Die Ablage der im vorliegenden Vorhaben erzeugten Ergebnisse erfolgt über die Auswahl des Modells „Winderosion“ und anschließende Selektierung eines der sechs vorgehaltenen Szenarien (z.B. „sehr geringe Schutzwirkung von Fruchtarten“). Nach Aufruf werden im Layerbaum des Kartenmoduls die verfügbaren Layer mit weiteren Sublayern angezeigt.

4 Diskussion der Ergebnisse

Ziel des Projektes war es, bundesweit die Erosionsgefährdung durch Wind unter Berücksichtigung von Landschaftselementen (Windhindernissen) sowie der Bewirtschaftung (Berücksichtigung von Bodenbedeckung) für die ackerbaulich genutzte Fläche aktualisiert auszuweisen und die hierbei erzeugten Ergebnisse in einem frei zugänglichen Webportal (<https://stoffeintraege-more.de>) zu veröffentlichen.

Für die Bewertung des Erosionsrisikos wurden die bereits bestehenden Ansätze, hier insbesondere die in der DIN-Norm 19706 (2013) beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Erosionsgefährdung von landwirtschaftlich genutzten Ackerböden, nachvollzogen. Von den Vorgaben der DIN 19706 (2013) abgewichen wurde vor allem bei der Vorgehensweise zur Ermittlung der Windhindernisse und deren Höhe sowie bei der Konvention zur Ausweisung der sich daraus ableitenden Schutzwirkungsbereiche (LBEG 2020).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es sich bei der DIN 19706 (2013) um eine ordinalskalierte Bewertung handelt. Die Bewertung erfolgt je Bewertungskriterium in den Stufen „0“ (keine, Kriterium nicht vorhanden) bzw. „1“ (sehr gering) bis „5“ (sehr hoch). Werden zwei Bewertungskriterien genutzt, um eine resultierende Bewertung abzuleiten, so erfolgt keine metrische Ableitung aus den beiden Kriterien, sondern eine ebenfalls ordinalskalierte.

Die nach DIN 19706 (2013) einbezogenen Kriterien sind:

- ▶ **Bodenart und organische Bodensubstanz** (Oberboden): 1. Kriterium „Bodenerodierbarkeit durch Wind“ → Einfluss des Bodens
- ▶ **Jahresmittel der Windgeschwindigkeit**: 2. Kriterium „Natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind“ → Einfluss von Klima / Meteorologie
- ▶ **Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen**: 3. Kriterium „Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind“ → Einfluss der Bewirtschaftung und Bodenbedeckung
- ▶ **Schutzwirkung von Windhindernissen** (4. Kriterium): finale „Bodenerosionsgefährdung durch Wind“

Die vier Kriterien „Boden“, „Klima / Witterung“, „Bewirtschaftung / Bodenbedeckung“ und „Schutzwirkung Windhindernisse“ werden nacheinander und relativ gesehen gleichgewichtet verarbeitet. Diese Vorgehensweise mit allerdings abweichenden Kriterien wurde analog auch bei der Erarbeitung der DIN 19708 (2017) in Anwendung der ABAG/USLE für die Bewertung von Bodenerosion durch Wasser realisiert (vgl. Schwertmann et al. 1990, Wischmeier & Smith 1978). Zudem ist wie auch bei der Konzeption der ABAG bzw. USLE festzuhalten, dass die einbezogenen Kriterien weitgehend nicht voneinander abhängen und sich somit nicht gegenseitig verstärken oder abschwächen. Dieses Prinzip sollte auch bei der Anwendung der DIN 19706 (2013) so erhalten bleiben. Insofern ist der Spielraum für Modifizierungen hier eng begrenzt. So führt z.B. eine Modifizierung der Ermittlung der Hauptwindrichtung vom langjährigen Jahresmittel zu bestimmten Phasen des Jahres mit besonders geringer Bodenbedeckung zu einer stärkeren Gewichtung des Kriteriums „Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen“, da dieses Kriterium die Risikowirkung in Bezug auf die Frage der Bodenbedeckung bereits vollumfänglich abdeckt. Fruchtarten, wie Mais oder Hackfrüchte erhalten unter wendender Bearbeitung mit dem Pflug eine hohe Risikobewertung, weil sie in längeren Phasen des Jahres unbedeckt sind.

Der Logik des oben erläuterten Prinzips folgend wurde insbesondere geprüft, inwieweit die seit 2013 weiter fortgeschrittene Verfügbarkeit von Eingangsdaten zur Ableitung der Erosionsgefährdung anhand der vier oben genannten Kriterien für die Umsetzung des Verfahrens nach DIN 19706 (2013) genutzt werden kann.

Hierbei ist zu beachten, dass die Entwicklung des DIN-Verfahrens weniger auf seine Anwendung im regionalen, also kleinen bis mittleren Maßstab, abhebt, sondern insbesondere auch für eine standortspezifische Bewertung auf Schlagebene oder Feldblockebene konzipiert wurde: „Eine parzellenscharfe Beratung im Rahmen der guten fachlichen Praxis nach § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) ist nur unter Berücksichtigung zusätzlicher relevanter Nutzungs- und Bewirtschaftungsgegebenheiten möglich und erfordert in erhöhtem Maße die Berücksichtigung der Schutzwirkung von Windhindernissen, die zwar außerhalb der Parzelle liegen, jedoch auf diese einwirken“ (DIN 19706 (2013), S. 4). Insofern lag im vorliegenden Vorhaben ein wichtiger Fokus auf der Beantwortung der Frage,

- ▶ welche Eingangsdaten sind im Sinne einer Nutzung des DIN-Ansatzes bundesweit verfügbar und liegen zugleich in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung vor und
- ▶ inwiefern können flächendeckend hochaufgelöste Datensätze einbezogen werden, ohne dass rechentechnische Limitierungen durch zu hohe Prozessierungszeiten auftreten.

Hinsichtlich der Bodendaten wurde auf die Datenbasis der BÜK 200 (BGR 2022) zurückgegriffen, die auf Bundesebene flächendeckend und harmonisiert digital verfügbar ist. Höher aufgelöste Bodenübersichtskarten (z.B. im Maßstab 1:50.000) liegen nicht in allen Bundesländern digital und flächendeckend vor. Weiterhin sind diese Kartenwerke an den jeweiligen Ländergrenzen nicht ausreichend harmonisiert. Deshalb wurde deren Nutzung im vorliegenden Vorhaben verworfen und die Datengrundlage der BÜK 200 genutzt. Diese definiert für abgegrenzte Raumeinheiten miteinander vergesellschaftete Bodenformen mit Profilen und Horizontmerkmalen, die im Regelfall einer Nutzungskategorie zugeordnet werden können. Auch wenn die BÜK 200 als Kartenwerk mit Informationen im kleinen Maßstab stärker generalisierte Bodendaten bereit stellt, als z.B. die BK50, ist doch davon auszugehen, dass die für die bundesweite Ableitung der Bodenerodierbarkeit benötigten Informationen zu Bodenarten und Humusgehalten für die im vorliegenden Vorhaben vollzogenen Ableitungen in ausreichender Genauigkeit vorliegen.

Bezüglich der Einbeziehung der Windgeschwindigkeit wurde den Vorgaben der DIN 19706 (2013) gefolgt und somit das bundesweit verfügbare langjährige Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in freien Lagen in 10 m Höhe über Grund des DWD in der Auflösung von 200 m genutzt. Die sich im langjährigen Mittel aus dem DWD-Datensatz ergebenden Windgeschwindigkeiten sind logischerweise geglättet, Starkwinde sind aufgrund ihrer geringen zeitlichen Frequenz nicht enthalten. In der DIN wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem die natürliche Bodenerosionsgefährdung durch Wind je nach vorliegender Stufe der Bodenerodierbarkeit bereits bei Windgeschwindigkeiten > 3,0 m/s die höchste Risikostufe erreicht. Würde die Windgeschwindigkeit in höherer zeitlicher Auflösung einbezogen, so wäre der Bewertungsrahmen der DIN-Norm hier also neu zu überdenken, da eine Verschiebung hin zu höheren Risikostufen zu erwarten wäre. Bundesweit verfügbare Rasterdaten zur Windgeschwindigkeit in höherer zeitlicher Auflösung standen allerdings in digitaler Form für das laufende Projekt nicht zur Verfügung. Ihre Ableitung aus Stationsdaten wäre für eine bundesweite Anwendung zwar prinzipiell denkbar, aber sehr aufwändig.

Für die Ableitung der Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. (alternativ) Fruchtfolgen wurde hier die digital vorliegende Fruchtartenzuordnung (Raster mit 10 m Gitterweite) für die Jahre 2017

bis 2019 genutzt (Blickensdörfer et al. 2021). Somit liegt eine hochaufgelöste Verteilung der Fruchtarten über einen dreijährigen und somit ausreichend repräsentativen Zeitraum vor. Zusätzlich wurden Szenarien betrachtet, in denen von einem flächendeckenden Anbau einer Fruchtart der Risikostufe 1, 3 bzw. 5 ausgegangen wurde. Die risikomindernde Wirkung von Bewirtschaftungspraktiken, wie pflugloser Bearbeitung oder Zwischenfruchtanbau kann von deren Wirksamkeit nur grob und ohne räumliche und zeitliche Differenzierung berücksichtigt werden (siehe Kap. 2.7), da diese Daten bundesweit nicht höher aufgelöst verfügbar waren.

Der Ausweisung der Schutzwirkung von Windhindernissen wurde im vorliegenden Vorhaben besonderes Augenmerk gewidmet. Auch hier macht die DIN 19706 (2013) klare Vorgaben hinsichtlich deren Wirksamkeit in Bezug auf die Hindernishöhe und die sich ergebenden Schutzwirkungsbereiche, die hier nicht verändert wurden.

Weiterhin definiert die DIN, dass die Ausweisung der Schutzbereiche von Hindernissen senkrecht zur Hauptwindrichtung im Jahresmittel erfolgen soll. Hierbei ist grundsätzlich zwischen acht möglichen Hauptwindrichtungen (S, SW, W, SO, O, NO, N, NW) zu unterscheiden, die jeweils einen Bereich von 45° abdecken. Tagesmittel der stündlichen Raster der Windrichtung für Deutschland (Krähenmann et al. 2016) hält der DWD digital vor, die hier genutzt wurden. Prinzipiell ist es somit auch möglich, Hauptwindrichtungen für ausgewählte Monate im langjährigen Mittel zu extrahieren. Wie oben bereits diskutiert würde aber eine Modifizierung der Ermittlung der Hauptwindrichtung vom langjährigen Jahresmittel zu bestimmten Phasen des Jahres, z.B. mit besonders geringer Bodenbedeckung, zu einer Übergewichtung des Einflusses der Bodenbedeckung in der Bewertungsmatrix der DIN 19706 (2013) führen. Der Einfluss der Bodenbedeckung ist im 2. Kriterium „Bewirtschaftungsbezogene Bodenerosionsgefährdung durch Wind“ (Einfluss der Bewirtschaftung und Bodendeckung) ja bereits enthalten. Insofern wurde auf eine solche Vorgehensweise bewusst verzichtet und die langjährigen Mittelwerte der Hauptwindrichtungen genutzt. Hierbei wurden für jede 10 m x 10 m Rasterzelle die acht Hauptwindrichtungen anteilig ermittelt.

Anstelle der Einbeziehung der vorherrschenden Hauptwindrichtung in der DIN 19706 (2013) wurde der Empfehlung von LBEG (2020) sowie Schäfer et al. (2017) gefolgt und die Ausweisung der Schutzwirkungsbereiche prozentual gewichtet unter Berücksichtigung aller acht Hauptwindrichtungen abgeleitet. Mit dieser Vorgehensweise können alle acht Hauptwindrichtungen gleichzeitig berücksichtigt werden. Im Ergebnis werden mit dieser Vorgehensweise Bereiche mit sehr hoher und hoher Schutzwirkung gemindert. Die Flächen mit mittlerer, geringer und sehr geringer Schutzwirkung nehmen hingegen zu, während die Bereiche mit fehlender Schutzwirkung zurück gehen. Würde lediglich die vorherrschende Hauptwindrichtung bei der Ableitung der Schutzwirkungsbereiche bzw. -stufen berücksichtigt, ergäbe sich eine deutliche Überschätzung der Risikominderung immer dann, wenn die Dominanz der vorherrschenden Windrichtung eher gering ausfällt. Dies ist jedoch auf der bundesweiten Betrachtungsebene im Regelfall gegeben. So sind die beiden Hauptwindrichtungen W und SW relativ gesehen zwar dominant, trotzdem liegen die Anteile der verbleibenden sechs Hauptwindrichtungen immer noch auf einem relevant hohen Niveau (vgl. Abbildung 7). Bei bundesweiter Betrachtung des Phänomens Winderosion bzw. deren Risiko und möglichen Optionen zur Risikominderung steht eher die regionalisierte Betrachtung und Bewertung des Phänomens im Vordergrund, weswegen die oben beschriebene Vorgehensweise mit anteiliger Berücksichtigung aller Hauptwindrichtungen gewählt wurde. Geht es dagegen um die Klärung standortsbezogener Fragen im großen Maßstab, kann eine Fokussierung der Bewertung auf die dominante Hauptwindrichtung wichtiger sein. Soll z.B. im konkreten Fall eine Windschutzhecke angelegt werden, ist davon auszugehen, dass deren Lage über die dominante Hauptwindrichtung, wie in der DIN 19706 (2013) ausgeführt, optimiert werden kann. Allerdings

wäre es in dieser Maßstabsebene wiederum sinnvoll zu prüfen, ob die vorherrschende Hauptwindrichtung auch in Phasen fehlender oder geringer Bodenbedeckung dominant auftritt und somit die Windschutzpflanzung ihre optimale Wirkung entfalten kann. Weiterhin würde es sich hier anbieten zusätzlich zur Windrichtung auch die Windgeschwindigkeit für diese Phasen geringer Bodenbedeckung einzubeziehen. So geht eine ermittelte vorherrschende Hauptwindrichtung nicht zwangsläufig mit besonders hohen Windgeschwindigkeiten einher. Beide Sachverhalte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden in der DIN 19706 (2013) nicht im Zusammenhang betrachtet und somit losgelöst voneinander bewertet.

Eine Berücksichtigung der für die Auslösung von Winderosion relevanten Treiber im gegenseitigen Zusammenspiel zur Abbildung der Verstärkung von Effekten im Hinblick auf die Erhöhung des Risikos für Winderosion erfordert einen Wechsel hin zu einer stärker prozessorientierten Modellierung an Stelle der sehr stark vereinfachenden und auf die Abbildung langjähriger mittlerer Risiken abzielenden DIN 19706 (2013). Hier müssten die nachfolgend genannten Parameter räumlich und zeitlich hoch aufgelöst gemeinsam einbezogen und bewertet werden:

- ▶ Bodenerodierbarkeit durch Wind als Funktion von Bodenart und Humusgehalt
- ▶ Bodenfeuchte
- ▶ Windrichtung
- ▶ Windgeschwindigkeit
- ▶ Höhe von Windhindernissen
- ▶ Ausrichtung von Windhindernissen
- ▶ Schutzwirkung von Fruchtarten
- ▶ Schutzwirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen

Neben der Ableitung von Risiken für Winderosion wäre über eine prozessbasierte Modellierung von Winderosion auch eine quantifizierende Betrachtung im Sinne der Ableitung von z.B. hektarbezogenen Abtrags- sowie Akkumulationsraten möglich.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die deutschlandweite Einstufung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind nach DIN 19706 (2013) zeigt die möglichen Risiken in Bezug auf das Auftreten von Bodenerosion unter bestimmten Rahmenbedingungen. Es wird deutlich, wo Hotspotgebiete für Bodenerosion durch Wind in Deutschland zu erwarten sind und welche Faktoren bzw. Kriterien hierfür maßgeblich verantwortlich sind. So ergibt sich ein höheres Risiko in der Nordhälfte Deutschlands (Lockergesteinsgebiete, höhere Windgeschwindigkeit), welches aber durch die jeweilige Ausprägung der Schutzwirkung durch die Fruchtart bzw. Bewirtschaftung sowie vorhandene Windhindernisse (kleinräumig) stark überprägt werden kann. Zur Risikoerhöhung trägt hier allerdings bei, dass die Anteile von Fruchtarten mit sehr geringer oder geringer Schutzwirkung mit am höchsten sind.

Die Projektergebnisse liefern einen bundesweiten Vergleich des Erosionsrisikos für jeweils drei Jahre mit räumlich variierender Fruchtartenverteilung (2017 bis 2019) bzw. mit unterschiedlich guter bewirtschaftungsbezogener Schutzwirkung (Szenario 1 bis 3). Es lässt sich feststellen, in welchen Regionen (z.B. Kreisen) bereits gute Schutzwirkungen durch Windhindernisse bestehen und wo noch Verbesserungsbedarf zu sehen ist. Es wird aber auch sichtbar, dass z.B. in einigen Regionen durch die Fruchtartenverteilung im Zeitraum 2017 bis 2019 bereits eine geringere Winderosionsgefährdung ausgewiesen wird als dies unter den Annahmen von Szenario 2 (mittlere Schutzwirkung der Fruchtart, z.B. Winterweizenanbau mit Pflug) zu erwarten wäre.

Um weitergehende Aussagen treffen zu können wäre es prinzipiell und mit vertretbarem Aufwand möglich, Maßnahmenszenarien wie z.B. eine Zunahme von Windhindernissen und die damit verbundene Erhöhung der Schutzwirkung gegen Winderosion auszuweisen (z.B. Erhöhung der mittleren Schutzwirkungsstufe von Hindernissen bis zur Erreichung der Stufe 3 (mittel) in allen Kreisen als Minimumwert). Auf dieser Basis könnte die sich ergebende Bodenerosionsgefährdung durch Wind für Bewirtschaftungsszenarien (z.B. für eine Fruchtart mit sehr geringer Schutzwirkung) neu berechnet werden.

Weiterhin wurden für die durchgeführten Arbeiten die Rahmenbedingungen hinsichtlich der Bewirtschaftung auf den Ackerflächen in verschiedenen Szenarien variiert. Alle anderen Bewertungskriterien wurden in den Szenarien unverändert übernommen. Im Ergebnis ergeben sich, je nach Schutzwirkung der ausgewählten Fruchtart unterschiedlich hohe Erosionsrisiken, die direkt miteinander verglichen werden können. Hierbei zeigt sich, dass der durch die DIN-Norm aufgespannte Bewertungsrahmen für die bundesweite Bewertung durchaus geeignet ist, um z.B. Maßnahmen zur Minderung des Erosionsrisikos durch eine Modifikation der Bewirtschaftung (z.B. Wechsel der Fruchtart, konservierende Bodenbearbeitung, Dauerbegrünung) abzubilden.

Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der ausgewiesenen Windhindernisse auf Basis des DOM1 (aggregiert auf das 10 m x 10 m Raster), können sowohl die Informationen zu den Windhindernissen selbst als auch die Ergebnisse der Schutzwirkung von Windhindernissen auch für Anwendungen im großen Maßstab (lokal) genutzt bzw. weiterverarbeitet werden. So lassen sich für einen beliebig gewählten Gebietsausschnitt in der Webanwendung (siehe Kap. 3) die Schutzwirkungsbereiche durch Windhindernisse anzeigen bzw. es wird ersichtlich, wo niedrige Schutzwirkungen vorliegen. In Verbindung mit weiteren Modellergebnissen (z.B. der Windgeschwindigkeit, der finalen Erosionsgefährdung durch Wind, etc.) können somit leicht Bereiche extrahiert werden in denen Windhindernisse zusätzlich eingebracht bzw. gefördert werden sollen. Die zugehörigen Daten und Geometrien können über die Download-Funktion auch zur Weiterverarbeitung in benachbarten Systemen exportiert werden. Zukünftig könnte

unter Nutzung des DGM1 an Stelle des DGM10 (wie hier vorgenommen) die Ableitung von Windhindernissen aus dem DOM1 noch weiter verbessert werden.

Auch eine Nutzung der DIN 19706 (2013) zur Abbildung von Effekten des Klimawandels ist insofern möglich, als dass dadurch indizierte Veränderungen der Kriterien 2 bis 4 (langjähriges Jahresmittel der Windgeschwindigkeit, Schutzwirkung von Fruchtarten bzw. Bewirtschaftung, Schutzwirkung von Windhindernissen) einbezogen werden können, insofern die Daten hierfür vorliegen. So führt eine regionale Veränderung der Verteilung oder Intensität der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit regional oder insgesamt zu einer Veränderung der Risiken. Auch die Auswirkungen der Veränderungen im Fruchtartenspektrum auf der Ackerfläche, wie eine Zunahme bzw. Abnahme z.B. von Mais oder dem Anteil dauerbegrünter oder konservierend bearbeiteter Flächen sind abbildbar. Weiterhin könnte z.B. ermittelt werden, wie hoch die Schutzwirkungsstufe von Windhindernissen in einem vorgegebenen Gebiet im Mittel sein muss, um ein z.B. mittleres Winderosionsrisiko für die Fruchtart „Mais“ zu einem bestimmten Prozentwert nicht zu überschreiten.

Jährlich variierende oder innerjährlich auftretende Effekte der Witterung sowie Bewirtschaftung werden dagegen nicht mehr durch die DIN-Norm wieder gegeben. Auch fehlen weitere wichtige Parameter und deren klimawandelbedingt mögliche Veränderungen, wie die Starkwindhäufigkeit oder die Oberbodenfeuchte (Wurbs & Steininger 2017).

Die Möglichkeit einer quantitativen Einordnung und Bewertung des Phänomens Winderosion kann die Anwendung der DIN 19706 (2013) weder im bundesweiten Regionalmaßstab noch auf Standortebene liefern, da es sich lediglich um eine Risikobewertung handelt. Hierbei unterscheidet sich die DIN-Norm maßgeblich von der USLE bzw. ABAG (Wischmeier & Smith 1978, Schwertmann et al. 1990, DIN 19708 2022) zur quantitativen Ableitung der Bodenerosion durch Wasser. Die USLE hat somit den Schritt von einer Risikomodellierung hin zu einem empirisch basierten quantitativen Bewertungsverfahren vollzogen, wobei dies nur unter Nutzung unzähliger standardisierter Erosionsmessplots, also auf Basis einer empirisch ermittelten großen Datenbasis möglich war. Diese Datenbasis ist für die Entwicklung eines vergleichbaren empirisch basierten Ansatzes zur Modellierung der Winderosion nicht vorhanden. Insofern ist eine Quantifizierung der Bodenerosion durch Wind derzeit nur unter Nutzung zeitlich höher aufgelöster stärker prozessbasierter Ansätze möglich. Hier bietet sich die Nutzung der RWEQ (Revised Wind Erosion Equation Model, siehe Fryrear et al. 2000, Borelli et al. 2017) an, die auch für großräumige Modellierungen möglich ist und empirische und prozessbasierte Erkenntnisse verbindet. Das Verfahren wurde in den USA für Ackerflächen entwickelt und in den Great Plains intensiv getestet (Fryrear et al. 1999).

Die Eingangsfaktoren der RWEQ basieren auf Feld- und Laborstudien (Woodruff & Siddoway 1965). Das Modell wurde auf Basis von Felddaten zum Massentransport von Bodenpartikeln durch Wind entwickelt und kalibriert (Fryrear et al. 1999). Das Verfahren wurde bereits europaweit umgesetzt und wäre auch auf bundesdeutscher Skala mit entsprechend höherer räumlicher Auflösung realisierbar (Borelli et al. 2017). Letztlich werden Landnutzungsdaten, Klimadaten in täglicher Auflösung, Daten zum unbedeckten Boden (Satellitendaten), Bodenwasserhaushalt, Bodendaten und Daten zum Agrarzensus (insbesondere zur Bodenbearbeitung) benötigt (Zobeck et al. 2000, Youssef et al. 2012, Guo et al. 2013).

Mit Blick auf steigende Anforderungen der Aussagefähigkeit zu Fragen des Bodenzustands auch auf nationaler Ebene ist es wichtig, die Modellierung des Bodenabtrags durch Wind genauso wie diejenige durch Wasser insbesondere in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und im Hinblick auf die Abbildung zu erwartender Effekte des Klimawandels zu verbessern.

Bodenabtrag ist ein entscheidender Faktor bei der Degradation von Böden, dem Verlust ihrer

Funktionalität und schließlich der Verringerung der für die menschliche Ernährung wichtigen Ertragsfähigkeit der Böden. Für die Minderung von Bodenabtrag ist nicht zuletzt auch eine Verbesserung der notwendigen Datengrundlagen wie bspw. der Bodeninformationen und der Bewirtschaftungsdaten nötig. Auch dem Bodenabtrag durch Wind sollte hier zukünftig verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden, was sehr für eine zukünftig zu realisierende Umsetzung der RWEQ auf Bundesebene spricht. Damit können Veränderungen der Treiber von Bodenerosion durch Wind bei der Berücksichtigung der Modellierung einbezogen werden. Effekte des Klimawandels sowie des Landnutzungswandels sowie von Maßnahmen zur Minderung von Winderosion können hierbei berücksichtigt werden. Dabei bietet sich sowohl die Modellierung von „Ist-Zuständen“ mit geeigneten Aktualisierungszyklen (z.B. jeweils sechs Jahre umfassende Bewirtschaftungszeiträume der Wasserrahmenrichtlinie (European Commission 2023) oder Förderperioden des EPLR (Europäische Union 2020)) als auch Szenarienrechnungen (Maßnahmenwirkungen, Nutzung von Klimaprojektionen) an.

Eine Aktualisierung der Risikobewertung für Winderosion gemäß DIN 19706 (2013) in solchen Zeitschritten ist nicht zielführend, da hier – bezogen auf die Eingangsdaten – langjährige Mittel betrachtet werden und somit eine nur geringe Dynamik zu erwarten wäre. Das spricht ebenfalls für einen Wechsel auf Ansätze, wie die RWEQ (Fryrear et al. 2000, Borelli et al. 2017).

Für die im vorliegenden Vorhaben im Mittelpunkt der Betrachtung stehende bundesweite flächendeckende Bewertung des langjährigen mittleren Risikos für Winderosion auf Ackerflächen ist die DIN 19706 (2013) hingegen gut geeignet. Auch die Berechnung von Szenarien im Hinblick auf Veränderungen in der Bewirtschaftung ist auf dieser Grundlage sinnvoll möglich und zielführend. Die Abbildung der Windhindernisse und Schutzbereiche erfolgte unter Nutzung des DOM1 bzw. DGM10 und ist somit auch großmaßstäbig nutzbar. Dieser Datensatz kann also auch für die Beantwortung speziellerer Fragestellungen (z.B. im Hinblick auf die Notwendigkeit weiterer Windhindernisse zur Erhöhung der Schutzbereiche oder die zielführende Anordnung von Windhindernissen) im Rahmen von Detailstudien weiter genutzt werden.

Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass die Ausweisung eines Risikos im Sinne der DIN 19706 (2013) lediglich die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Bodenabträgen durch Wind bewertet. Erst mit einem Wechsel zu einem stärker prozessbasierten Ansatz, wie der RWEQ (Fryrear et al. 2000, Borelli et al. 2017) kann Bodenabtrag unter den jeweiligen modell- und datengetriebenen Rahmenbedingungen verortet und quantifiziert werden.

6 Quellenverzeichnis

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

agrarheute (2016): 9 Fakten zur Mulchsaat. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/management/finanzen/9-fakten-mulchsaat-444011>, zuletzt geprüft am 25.01.2024.

Blickensdörfer, L.; Schwieder, M.; Pflugmacher, D.; Nendel, C.; Erasmí, S.; Hostert, P. (2021). National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data (2017, 2018 and 2019) [Data set]. Online verfügbar unter: Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5153047>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

BMEL (2019): Bodenerosion durch Wind - Entstehen, Prozesse, Schäden. Ein Beitrag von Dr. Hans-Eberhard Kape, LMS Agrarberatung GmbH, Zuständige Stelle für landwirtschaftliches Fachrecht und Beratung Mecklenburg-Vorpommern. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodenerosion-durch-wind.html>, zuletzt geprüft am 19.07.2024.

Borrelli, P.; Lugato, E.; Montanarella, L.; Panagos, P. (2016): A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. Land Degrad. Develop. 28: 335-344, <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Bug, J.; Heumann, S.; Müller, U.; Waldeck, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, 9. Auflage. Hannover. DOI 10.48476/geober_19_2020.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2020): Digitales Oberflächenmodell Gitterweite 1 m DOM1 – produktstand 2020. Stand 14.11.2022. Online verfügbar unter https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/dom1.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2024.

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

DIN 19708 (2022): Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. – 2022-08, Deutsches Institut für Normung e. V.; Berlin (Beuth).

DWD Climate Data Center (CDC) (2014): 200m x 200m Rasterdaten der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m bis 100 m Höhe (in 10m Stufen) und Weibullparameter für Deutschland, Version V0.1. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/wind_parameters/resol_200x200/, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

Europäische Union (2020): Ausführung der EPLR. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/enrd/policy-in-action/rdp-implementation_de.html, zuletzt geprüft am 22.04.2024.

European Commission (2023): Water Framework Directive. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en, zuletzt geprüft am 22.04.2024.

Fryrear, D.W.; Bilbro, J.D.; Saleh, A.; Schomberg, H.; Stout, J.E.; Zobeck, T.M. (1999): RWEQ: improved wind erosion technology. Journal of Soil and Water Conservation 55, 183-189.

Fryrear, D.W.; Sutherland, P.L.; Davis, G.; Hardee, G.; Dollar, M. (2001): Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In: Proceedings of conference sustaining the global farm, In: Stott, D.E.; Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (eds). The 10th International Soil Conservation Organization Meeting: Purdue University; 760-765.

Fuchs, S.; Brecht, K.; Gebel, M.; Bürger, S.; Uhlig, M.; Halbfäß, S. (2022): Phosphoreinträge in die Gewässer bundesweit modellieren – Neue Ansätze und aktualisierte Ergebnisse von MoRE-DE. UBA Texte | 142/2022. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/phosphoreintraege-in-die-gewaesser-bundesweit>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

Gebel, M.; Bürger, S.; Brecht, K.; Fuchs, S.; Wurbs, D. (2024): Erheblichkeit von Bodenabtrag für die Gefahrenabwehr schädlicher Bodenveränderungen (Erosion). UBA Texte, Umweltbundesamt, in Vorbereitung.

Guo, Z.; Zobeck, T.M.; Zhang, K., Li, F. (2013): Estimating potential wind erosion of agricultural lands in northern China using the Revised Wind Erosion Equation and geographic information systems. Journal of Soil and Water Conservation 68: 13-21. DOI:10.2489/jswc.68.1.13.

Häußermann, U.; Bach, M.; Klement, L.; Knoll, L.; Breuer, L.; Strassemer, J.; Pöllinger, F.; Golla, B. (2023): Auswirkungen des Anbaus nachwachsender Rohstoffe und der Verwendung von Gärresten auf die Oberflächen- und Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland. UBA-Texte | 163/20232. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-des-anbaus-nachwachsender-rohstoffe>

Krähenmann, S.; Walter, A.; Brien, S.; Imbery, F.; Matzarakis, A. (2016): Tagesmittel der stündlichen Raster der Windrichtung für Deutschland (Projekt TRY-Weiterentwicklung), Version V001, DWD Climate Data Center (CDC), DOI:10.5676/DWD_CDC/TRY_Basis_v001.

Lülf-Baden, F.; Barrett, S.; Schulze-Höping, M.; Stahl, H. (2020): Zur Situation der Bodenbearbeitung in Sachsen: Eine Analyse zur Verbreitung verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren und der damit verbundenen technischen Ausstattung. Schriftenreihe des LfULG, Heft 5/2020. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/35242>, zuletzt geprüft am 07.05.2024.

Schäfer, W.; Sbresny, J.; Thiermann, A. (2017): Methodik zur Einteilung von landwirtschaftlichen Flächen nach dem Grad ihrer Erosionsgefährdung durch Wind gemäß § 6 Abs. 1 der Agrarzählungen-Verpflichtungenverordnung in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG), Geozentrum Hannover. Online verfügbar unter: https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/62522/Ermittlung_der_potenziellen_Winderosionsgefaehrung_auf_Feldblockebene.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2024.

Schwertmann, U.; Vogl, W.; Kainz, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. – 2. Aufl.; Stuttgart (Ulmer).

Schwieder, M.; Erasmí, S.; Nendel, C.; Hostert, P. (2022). National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data (2020) [Data set]. Online verfügbar unter: Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6451848>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

Veerman, C.; Correia, T.; Bastioli, C.; Biro, B.; Bouma, J.; Cienciala, E.; Emmett, B.; Grand, A.; Filchev, L.; Kriauciuniene, Z.; Pogrzeba, M.; Soussana, J. F., Vela, C., Wittkowski, R. (2020): Caring for Soil is caring for life – ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate. Report number: KI-02-20-673-EN-N, Affiliation: European Commission, DOI: 10.2777/821504.

Wischmeier, W.; Smith, D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Science. Washington DC, 1978 (No. 537).

Woodruff, N.P.; Siddoway, F.H. (1965): A wind erosion equation. Soil Science Society of America Journal 29, 602-608. DOI:10.2136/sssaj1965.03615995002900050035x.

Wurbs, D.; Steininger, M. (2017): 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. UBA Texte | 13/2017. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bundesweite-gefaehrung-der-boeden-durch>, zuletzt geprüft am 12.07.2024.

Youssef, F.; Visser, S.; Karrsenberg, D.; Erpul, G. (2012): Calibration of RWEQ in a patchy landscape; a first step towards a regional scale wind erosion model. *Aeolian research* 3: 467-476. DOI:10.1016/j.aeolia.2011.03.009.

Zobeck, T.M.; Parker, N.C.; Haskell, S.; Guoding, K. (2000): Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82: 247-259. DOI:10.1016/S0167-8809(00)00229-2.