

Winderosion in Mittelfranken?*

Eine GIS-gestützte Abschätzung der potentiellen Gefährdung einer Agrarlandschaft im Süden Erlangens

VON

ANDREA ROSEBROCK

mit 6 Abbildungen und 7 Tabellen

1 Einleitung

Seit der Mensch Ackerbau betreibt, besteht eine erhöhte Gefahr von Boden-erosion aufgrund der temporär fehlenden oder nur spärlich ausgeprägten Vegetationsdecke. Wasser und Wind sind die beiden wichtigsten Transportmittel, die den Abtrag von Boden bewirken können.

Erosion stellt eine Veränderung im Landschaftshaushalt dar, die sich überwiegend kontinuierlich vollzieht. Eine solche permanent ablaufende ökologische Schädigung droht in einer Gesellschaft, deren Interesse von den Medien vor allem auf die spektakulären, katastrophalen Umweltprobleme gelenkt wird, in Vergessenheit zu geraten (SCHRÖDER, BERGNER und KLAHRE 1995: 1). Im Mittelpunkt der Erosionsforschung stand daher zunächst das Bedürfnis nach Reduzierung der ökonomischen Schäden für die Landwirtschaft; erst in jüngerer Zeit spielt auch der ökologische Aspekt eine wichtige Rolle.

Durch Wind verursachte Erosionsschäden können der Bodenerosion durch Wasser vergleichbare Ausmaße annehmen. Messungen in Norddeutschland haben gezeigt, daß bei einem einzigen mehrtätigen Erosionsereignis auf vegetationsfreien, frisch bearbeiteten Ackerflächen Bodenverluste von bis zu 200 t pro Hektar vorkommen können. Zum Vergleich: Bei der Erosion durch Wasser wird bereits bei Bodenabträgen von 30 t pro Hektar und Jahr die Erosionsgefährdung als sehr hoch bezeichnet (KUNTZE, ROESCHMANN und SCHWERTFEGER 1994: 360). Insbesondere in den offenen Lößlandschaften sind derartig hohe Abträge keine Seltenheit (SCHRÖDER 1982, 1985, KRIEG 1990, LÖWA 1996), so daß Profilverkürzungen ein beträchtliches Ausmaß erreicht haben (SCHRÖDER und LÖWA 1991, SCHRÖDER 1992). Völlig ungeklärt blieb bei diesen Untersuchungen allerdings der Anteil der Winderosion am Gesamtabtrag.

*) Kurzfassung einer Zulassungsarbeit, die am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg im Jahr 1996 abgeschlossen wurde.

Für die Quantifizierung und Modellierung von Bodenabtrag durch Wasser liegen erheblich umfangreichere Forschungsergebnisse vor als für die Winderosion, was vor allem auf zwei Ursachen zurückzuführen sein dürfte. Zum einen ist die Schädigung durch Winderosion noch weniger augenfällig, da linienhafte Spuren nahezu völlig fehlen und Bodenabtrag ohne eingehende Untersuchung i.d.R. nur anhand selektiver Akkumulation an verschiedenen Stellen deutlich wird. Zum anderen ist die Erfassung der Deflation durch erheblich größere meßtechnische Schwierigkeiten gekennzeichnet als die Messung der Bodenerosion durch Wasser.

Bodenabtrag durch Wasser findet aufgrund der Schwerkraft immer in Richtung des Gefälles statt. Untersuchungsparzellen können durch einfache Hindernisse räumlich von der Umgebung abgegrenzt und am unteren Ende mit einer Auffangvorrichtung zur Quantifizierung des transportierten Materials versehen werden.

Bei der Winderosion dagegen kann der Transport in alle Himmelsrichtungen stattfinden. Daher werden Sedimentfallen benötigt, die sich automatisch der Windrichtung anpassen. Da sie in jedem Falle die Luftströmung beeinflussen, wird die Messung verfälscht. Eine kleinräumige Abgrenzung eines Untersuchungsgebietes ist nicht möglich, da sie notwendigerweise einen Windschutz darstellen müßte. Dieser jedoch vermindert die zu untersuchende Erosion. Wissenschaftliche Erkenntnisse über den Bodenabtrag durch Wind wurden daher überwiegend im Windkanal gewonnen.

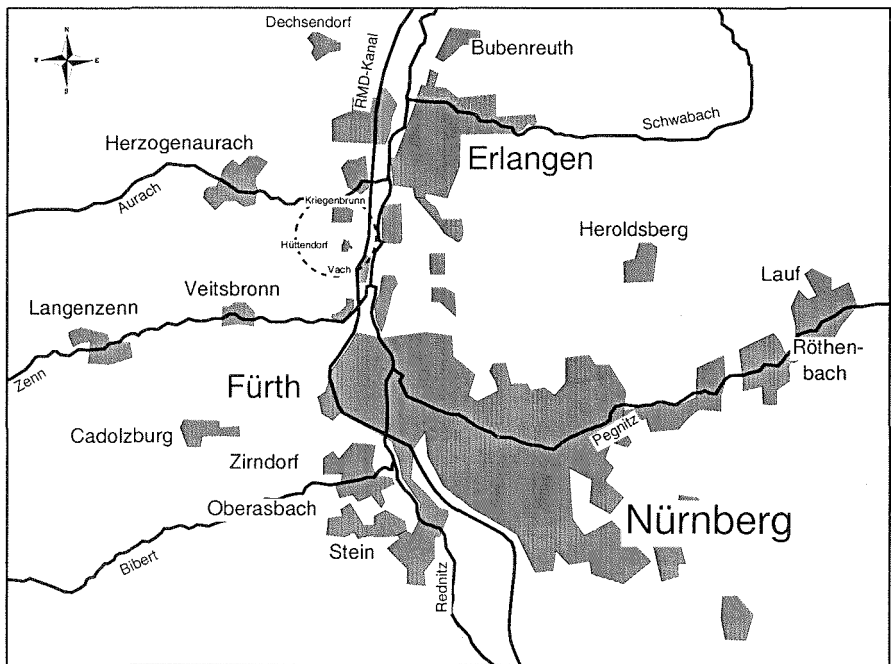


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

Für beide Arten der Bodenerosion wurden verschiedene Modelle entwickelt, die den Bodenabtrag in Abhängigkeit von den jeweiligen Einflußfaktoren quantifizieren sollen. Aus den o.g. Gründen existieren im Bereich der Deflation noch nicht so ausgereifte Modelle wie bei der Wassererosion mit der USLE (universal soil loss equation) und ihren Modifikationen, obwohl die erste Bodenabtragsgleichung für Wind, die „Wind Erosion Equation“ (WEQ), von WOODRUFF & SIDDOWNAY (1965) bereits 13 Jahre vor der USLE veröffentlicht wurde.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfaßt ein etwa 5,5 km² großes Areal im Südwesten des Stadtgebietes von Erlangen im Bereich der Ortsteile Hüttendorf und Kriegenbrunn im Mittelfränkischen Becken (Abb. 1).

Mit Ausnahme des Waldes im Westen existieren außerhalb des Areals in einem Umkreis von mehr als 5 km keine Windhindernisse, die die Windgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet erheblich beeinflussen können. Dies war ein wichtiger Aspekt für die Auswahl des Gebiets, da somit die Bewertung von Windbarrieren und Windgeschwindigkeit allein anhand der Verhältnisse innerhalb des Untersuchungsgebietes vorgenommen werden konnte.

Das Gebiet liegt im Bereich des Sandsteinkeupers. Im N und E steht Blasen-sandstein an, stellenweise durchzogen von Zwischenletten. In höheren Bereichen steht Coburger Sandstein, der ebenfalls Zwischenletten aufweist, über den Dachletten des Blasen-sandsteins an. Im SE steht Burgsandstein mit sandigen Basisletten an. Nordwestlich von Kriegenbrunn befindet sich eine Talfüllung aus Sand der Oberterrasse der Regnitz, die mit feinsandigen Flußlehmen der Aurach überlagert ist (NALENZ 1992). In den höheren Lagen weist er abweichend von der Geologischen Karte Blatt 6431 Herzogenaurach zusätzlich schluffige Deckschichten aus Löß bzw. Lößlehm mit einer Mächtigkeit von mehr als 40 cm aus. Das Areal ist damit durch eine verhältnismäßig große Heterogenität gekennzeichnet, wie Abbildung 2 zeigt.

NALENZ (1992) gliedert in seiner bodenkundlichen Untersuchung des Gebietes zehn verschiedene Bodentypen aus. Mit weit über 40% dominiert reine Braunerde, gefolgt von Pseudogleyen mit etwas mehr als 20% – vor allem auf den verschiedenen Lettenstandorten. Desweiteren kommen v.a. Pseudogley-Braunerden, bzw. Braunerde-Pseudogleye und verschiedene Parabraunerde-Kombinationen vor. Auch ein Teil der Böden auf den Schluffdecken zeigt Anzeichen von Pseudovergleyung. In der Bodenkarte sind die Bodentypen grob in drei Klassen (sandig, schluffig, tonig-sandig) unterteilt, die durch Fingerprobe bestimmt wurden (NALENZ 1992).

Das Untersuchungsgebiet wird – abgesehen von den Ortschaften – zu etwa 90% ackerbaulich genutzt. Im Jahr 1995 entfielen etwa 50% dieser Fläche auf Wintergetreideanbau, 20% auf Sommergetreideanbau und ein weiteres Fünftel war

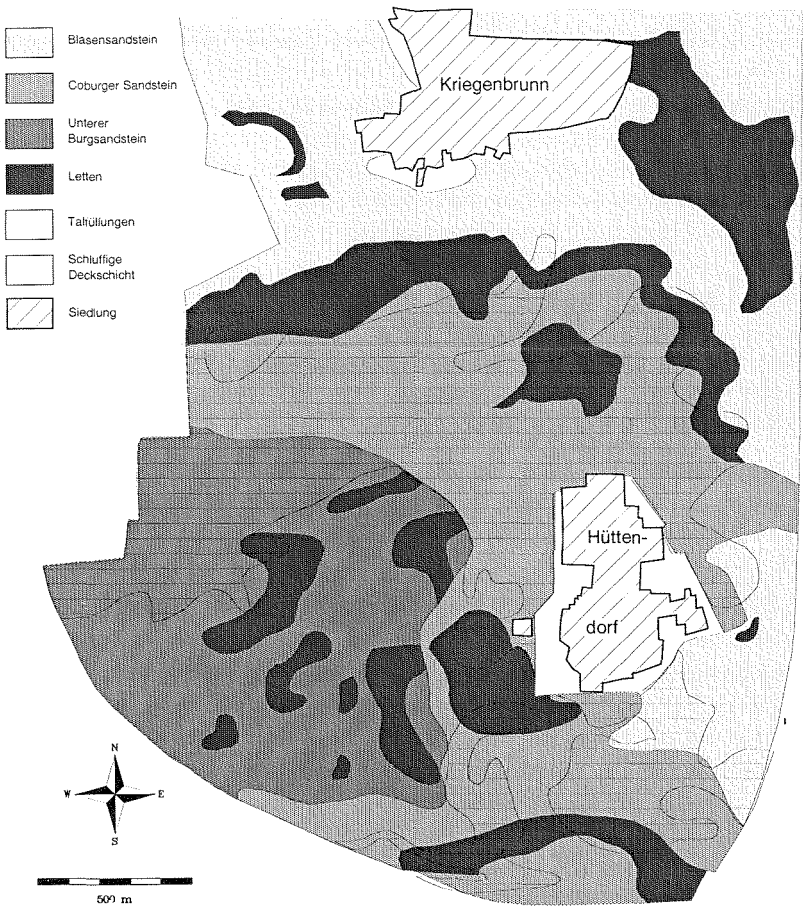


Abb. 2: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets (Quelle: NALENZ 1992)

mit Mais bestellt. Das restliche Zehntel teilten sich verschiedene Anbaufrüchte, unter denen Hackfrüchte dominierten.

3 Ausgangslage

Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten hat Anfang der 60er Jahre ein Gutachten zur Untersuchung der Bodenerosion in der BRD in Auftrag gegeben, das unter dem Namen des Hauptbearbeiters RICHTER (1965) mit

dem Titel „Bodenerosion - Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland“ veröffentlicht wurde.

Anhand von vorliegenden Schadensberichten sowie Klimadaten, vorherrschenden Bodenarten und -typen und vorwiegender Nutzung wurde die Gefährdung einer Region für den Bodenabtrag durch Wind bestimmt. Die Einschätzung des Mittelfränkischen Beckens lautet wie folgt: „Im Ostteil des Mittelfränkischen Beckens, vor allem im Nürnberg-Erlanger Raum, tritt Winderosion auf, wie Meldungen von *J. Trummert* (Naturschutzbeauftragter im Regierungsbezirk Ansbach) und *W. Costa* (Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur, Pflanzenbau und Pflanzenschutz, München) besagen. Es werden zwar Schutzpflanzungen und Beregnungen der Gemüsebauflächen um Nürnberg durchgeführt, doch reichen diese quantitativ noch nicht aus. Leichte, um das Gebiet der Nürnberger Sandplatte mäßige Deflationswirkung ist zu erwarten.“ (RICHTER 1965: 539)

Für den gesamten Raum des Mittelfränkischen Beckens wurde darin die Gefahr des Bodenabtrags durch Auswehung als stärker angesehen als die Erosion durch Wasser. In der diesem Aufsatz zugrundeliegenden Arbeit (ROSEBROCK 1996) sollte ein Beispielgebiet aus dem genannten Raum anhand neuerer theoretischer Erkenntnisse und Möglichkeiten auf seine potentielle Gefährdung durch Winderosion hin untersucht werden.

Wie für viele andere physisch-geographische Fragestellungen, die sich durch eine große räumliche Variabilität ihrer Einflußfaktoren auszeichnen, bietet sich auch für die Abschätzung der Bodenerosion durch Wind die Verwendung Geographischer Informationssysteme (GIS) an. Die bisher existierenden Modelle eignen sich für einen solchen Einsatz jedoch nicht. Erst seit wenigen Jahren werden in der Forschung neue Ansätze untersucht, die die Möglichkeiten von GIS zu nutzen imstande sind. Verfügbar sind solche universell einsetzbaren GIS-Verfahren zur Quantifizierung der Winderosion gegenwärtig noch nicht. Für Teilbereiche wurde daher ein eigener Lösungsansatz gewählt. Im Hinblick auf Klima und Nutzung wurde eine Differenzierung der Gefährdung nach Jahreszeiten vorgenommen. Verwendung fanden dabei das Raster-GIS IDRISI und das Digitalisier- und Plotprogramm POLY PLOT.

4 Theoretische Modelle

Eines der ersten Modelle zur Quantifizierung des Materialtransports war die Berechnung der Sandtransportrate von BAGNOLD (1941, zit. n. WILSON und COOKE 1980). Seine Forschungen in den 30er Jahren bedeuteten einen erheblichen Fortschritt für das Verständnis des Systems der Winderosion. Er wählte einen rein physikalischen Ansatz, bei dem er seine theoretischen Überlegungen in Experimenten im Windtunnel testete und durch Feldbeobachtungen und -messungen in der libyschen Wüste ergänzte. Ergebnis seiner Überlegungen war die Angabe einer Sandtransportrate.

Eines der bekanntesten empirischen Modelle zur Quantifizierung des potentiellen Bodenabtrags durch Winderosion für agrarisch genutzte Flächen ist die „Wind Erosion Equation“ (WEQ). Sie wurde von WOODRUFF & SIDDOWNAY (1965) entwickelt und 1965 veröffentlicht.

In der WEQ wird der potentielle Bodenabtrag pro Jahr als Funktion verschiedener sog. „äquivalenter Faktoren“ angegeben, die aus einer größeren Anzahl „primärer Faktoren“ abgeleitet werden. Als „äquivalente Faktoren“ gehen die Boden- und Hügelrodierbarkeit (I'), der Bodenrauhigkeitsfaktor (K'), der Klimafaktor (C'), die Feldlänge (L') und die Vegetation (V) in die Berechnung des potentiellen Bodenverlusts (E in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) ein:

$$E = f(I', K', C', L', V)$$

Der Bodenerodierbarkeitsfaktor wird in Masse pro Flächeneinheit pro Jahr angegeben. Die weiteren Faktoren führen zu einer Reduzierung oder Erhöhung der Bodenerodierbarkeit.

Verschiedene Schwächen der WEQ (vgl. ROSEBROCK 1996) führten zunächst zur Abwandlung des Modells, später zur Entwicklung der „Revised Wind Erosion Equation“ (RWEQ). Diese wird von verschiedenen Institutionen in den USA, die Winderosionsberechnungen durchführen, als Übergangslösung eingesetzt, bis ein neues, computergestütztes, prozeßorientiertes Verfahren, das „Wind Erosion Prediction System“ (WEPS) für den Feldeinsatz zur Verfügung steht.¹

Einen Überblick über weitere Ansätze zur Bodenabtragsberechnung, Bodenerodibilitätsbestimmung und Windschutzberechnung bietet ZACHAR (1982: 362 ff).

In Deutschland läuft seit 1990 ein Verbund-Forschungsvorhaben zur Quantifizierung der Bodenerosion durch Wind zur Entwicklung eines numerischen Modells zur Vorhersage von Bodenabträgen und der Wirksamkeit verschiedener möglicher Bodenschutzmaßnahmen. Der dabei gewählte Ansatz unterscheidet sich grundlegend von der WEQ. Neben dem quantitativen Einfluß der Faktoren auf die Winderosion wird der räumlichen Verteilung der Faktoren große Bedeutung beigemessen. Basis des neuen Modells ist ein vektororientiertes Geographisches Informationssystem, das die Ausstattung des zu untersuchenden Raumes aufnimmt. Darunter werden auch Windhindernisse und Feldlänge – in generalisierter Form – festgehalten (SCHMIDT 1993 und HASSENPFUG 1993).

Die vorhandenen Modelle lassen eine räumliche Differenzierung der Einflußfaktoren nicht zu. Daher wurde bei der Entwicklung des eigenen Ansatzes im wesentlichen lediglich auf die Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse der Winderosion, die im Rahmen der o.g. Modellbildungen gewonnen wurden, zurückgegriffen.

5 Die Einflußfaktoren im Untersuchungsgebiet

5.1 Böden

Die Bodenart wurde für 23 Standorte der verschiedenen geologischen Einheiten aus Proben aus des Ap-Horizontes durch das Pipettierverfahren nach Köhn ermittelt. Die Meßergebnisse der über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilten Proben zeigen eine große Variabilität der Bodenarten. Die Spanne reicht von schwach schluffigem Sand (Su2) bis zu mittel tonigem Schluff (Ut3). Am häufigsten wurden sandig-lehmige Schluffe (Uls) und verschieden lehmige Sande ermittelt. Die Einstufung erfolgte anhand der bodenkundlichen Kartieranleitung (4. Aufl. 1994).

Zur Bestimmung der Aggregatgrößen wurden zusätzlich Trockensiebungen von Proben aus dem Ap für 100 Standorte durchgeführt. In welchem Verhältnis die kinetische Energieeinwirkung durch die Siebung zu den Disaggregierungsprozessen auf dem Feld steht, konnte nicht geklärt werden. Eine zeitliche Differenzierung der Siebungsdauer ergab lediglich eine geringfügige Verschiebung hin zu kleineren Fraktionen für längere Siebungszeiten. Für eine möglichst genaue Vergleichbarkeit der Siebungsergebnisse wurden alle Proben exakt fünf Minuten mit einer Intensität von 100% und Intervallschaltung gesiebt. Die Ergebnisse der Siebung wurden in vier Aggregatgrößenklassen ($> 0,63\text{mm}$, $> 0,25 - 0,63\text{ mm}$, $> 0,063 - 0,25\text{ mm}$ und $\leq 0,063\text{ mm}$) zusammengefaßt.

NALENZ (1992) beschreibt die ackerbaulich genutzten Böden als schwach humos. Die vorgenommenen eigenen Untersuchungen kamen zu derselben Einschätzung. Unabhängig vom Entnahmezeitpunkt ergab sich ein – über den Glühverlust bei $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermittelter – niedriger Humusgehalt für alle Proben. Die Schwankungsbreite reicht von 1,9% bis 4,5%, der überwiegende Teil bewegt sich um 3%.

5.2 Klima

Zur Beschreibung der klimatischen Verhältnisse wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) durch das Wetteramt Nürnberg erhobene Daten herangezogen. Die Messungen des Nürnberger Wetteramtes erfolgen am Nürnberger Flughafen, in nur etwa 9 km Entfernung vom Untersuchungsgebiet, was neben der guten Datenlage sowie der bereits erwähnten freien Lage ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl des Gebietes war. Der detailliert betrachtete Zeitraum wurde aus ökonomischen und zeitlichen Gründen auf die fünf Jahre 1990 bis 1994 eingeschränkt. Die Auswertung der vorhandenen Klimadaten erfolgte losgelöst von spezifischen Erosionsmodellen ganz allgemein im Hinblick auf die Beziehungen zwischen Windgeschwindigkeit und -richtung und deren jahreszeitspezifische Verteilung.

In einer Untersuchung von 1968 sahen SKIDMORE&WOODRUFF Windgeschwindigkeiten von mehr als 5,4 m/s bei Messung in 10 m Höhe, was einer Windstärke in Beaufort von 4 und größer entspricht, als erosiv an.

Für die Beurteilung einer potentiellen Gefährdung durch Winderosion sind vor allem die gemessenen Windgeschwindigkeiten von Interesse. Dazu wurde zunächst die prozentuale Häufigkeit der gemessenen Windstärken in Beaufort ermittelt. Es zeigte sich, daß die Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten in den untersuchten Jahren nicht erheblich voneinander abwichen. Eine Auswertung des Wetteramtes Nürnberg für die Jahre 1969 bis 1993, wies ebenso wie Tabelle 1 vorherrschend niedrige Windgeschwindigkeiten aus.

Da die Einteilung der Windgeschwindigkeiten in Windstärke-Gruppen nach Beaufort eine nichtlineare Klassifizierung darstellt, die Berechnung von arithmetischen Mitteln sowie die Anwendung weiterer statistischer Verfahren aber diskrete

Tabelle 1: Häufigkeiten der Windstärken in Beaufort 1990 - 1994

Windstärke in Beaufort	Häufigk. in %
Windstille	5,8%
1	29,3%
2	32,5%
3	20,7%
4	8,7%
5	2,5%
6	,5%
7	,1%
8	,0%
Summe	100,0%

Quelle: Eigene Auswertung der Daten vom Wetteramt Nürnberg

Variablen voraussetzen, wurden die Werte der Windstärke der Daten von 1990 bis 1994 in ihre jeweilige mittlere Windgeschwindigkeit überführt.

Tabelle 2 zeigt, daß die einzelnen Windrichtungen unterschiedliche durchschnittliche Windgeschwindigkeiten aufwiesen. Die höchsten Mittelwerte traten bei Westwinden auf, gefolgt von den Windrichtungen NE und SW. Die Stärke der W-Winde hebt sich deutlich von den anderen ab, während die Durchschnittswerte für den Bereich von N über E bis S sehr nah beieinander liegen.

Tabelle 2: Arithmetisches Mittel der Windgeschwindigkeit (1990 - 1994) für die einzelnen Windrichtungen

Richtung	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
m/s	2,2	2,4	2,3	2,4	3,0	4,3	3,5	2,3

Quelle: Eigene Auswertung der Daten vom Wetteramt Nürnberg

Bei einer Differenzierung der durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten nach einzelnen Monaten jeweils für die Jahre 1990 bis 1994 fielen deutliche Schwankungen der Monatsmittel auf. Die Spitzenwerte wurden dabei in den Winterhalbjahren erreicht. Eine einfache Varianzanalyse zeigte, daß auch in der Grundgesamtheit, d.h. über die Stichproben 1990 bis 1994 hinaus, die Werte für die Windgeschwindigkeit monatliche Unterschiede aufweisen.

Da zumindest der westliche Teil Deutschlands i.d.R. dem zyklonalen Westwindklima mit einer Dominanz der Luftmassenbewegungen vom Ozean her zugerechnet wird, könnte man eine entsprechende Verteilung der Windrichtungen erwarten. Die Abbildung 3 relativiert diese Einschätzung.

Auch eine Stärkewindrose des Wetteramtes für den Zeitraum 1969 bis 1993, der eine andere Aufteilung (30°-Segmente) zugrunde liegt, zeigt deutlich, daß neben einem Schwerpunkt im Bereich Westen Winde aus östlichen Richtungen sehr häufig auftreten.

Für eine Ermittlung der potentiellen Gefährdung durch Winderosion ist darüber hinaus nachzuvollziehen, wie Luftbewegungen aus den verschiedenen Windrichtungen mit Niederschlag und Feuchtigkeit verbunden sind.

Zunächst wurden die Windrichtungen für die Meßzeitpunkte, an denen es im Verlaufe der vorangegangenen acht Stunden zu Niederschlag gekommen war, denen der trockenen Meßzeitpunkte gegenübergestellt. Insgesamt fast zwei Drittel der „feuchten Winde“ stammen aus dem Bereich SW bis NW. Waren die dem Meßzeitpunkt vorhergehenden acht Stunden niederschlagsfrei, überwogen die Windrichtungen NE und E.

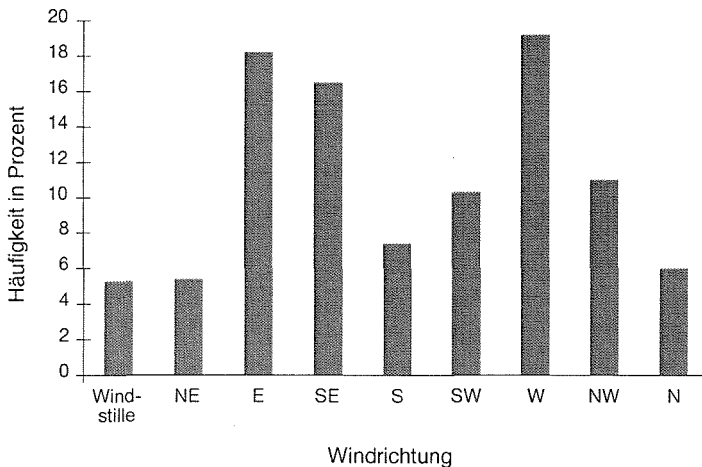


Abb. 3: Häufigkeit der Windrichtungen 1990 - 1994²

Es wird deutlich, daß bei Trockenheit über längere Zeiträume die Windrichtungen E und SE dominieren. Neben der Korrelation von Windrichtung und Niederschlag sind mögliche Beziehungen zwischen Windrichtung und -geschwindigkeit von Interesse, denn noch so trockene Winde sind für die Bodenerosion irrelevant, wenn sie nie die Schwellenwindgeschwindigkeit überschreiten. Die folgende Kreuztabelle (Tab. 4) gibt Aufschluß über die Verteilung.

Abschließend wurde die Auswertung auf die Fälle beschränkt, die eine Windgeschwindigkeit von mehr als 5,4 m/s aufweisen und damit als potentiell erosiv angesehen werden. Zunächst wurde überprüft, wie sich diese Fälle im monatlichen Vergleich darstellen. Hier zeigt sich, daß im Untersuchungszeitraum Winde mit einer Windstärke von 4 oder mehr am häufigsten im März auftraten. In diesem Monat waren sie im Durchschnitt doppelt so häufig wie in den Monaten Mai bis November.

Bei einer Reduzierung der Fälle auf die Meßzeitpunkte, die in den vorangegangenen acht Stunden keinen Niederschlag aufwiesen, ergab sich ein sehr ähnliches Bild.

Der sog. Student-Newman-Keuls-Test wurde herangezogen, um festzustellen, welche Monatsmittel sich signifikant voneinander unterscheiden. Der Test kam zu dem Ergebnis, daß sich der Mittelwert des Monats März signifikant von denen der Monate 4, 6, 7, 8 und 12 unterscheidet, ebenso wie der Januar gegenüber den Monaten Juni bis August.

Anschließend wurde untersucht, wie häufig, in welchen Monaten und aus welchen Richtungen Winde mit einer Stärke von mindestens 4 Beaufort bei unterschiedlich langer vorausgehender Trockenheit auftraten (Tab. 5 und Tab. 6)

Tabelle 5: Windrichtungshäufigkeiten bei Windstärken über 4 Beaufort nach unterschiedlich langer vorausgegangener niederschlagsfreier Zeit (1990 - 1994)

Wind- richt.	Vorangegangene niederschlagsfreie Zeit							
	8h		24h		48h		72h	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
NE	8	2,3	7	3,5	3	2,1	3	2,9
E	73	20,7	64	32,2	56	39,4	45	42,9
SE	27	7,6	24	12,1	21	14,8	13	12,4
S	3	0,8	0	0	0	0	0	0
SW	23	6,5	11	5,5	7	4,9	4	3,8
W	155	43,9	62	31,2	34	23,9	21	20
NW	58	16,4	27	13,6	17	12	15	14,3
N	6	1,7	4	2	4	2,8	4	3,8
Summe	353	100	199	100	142	100	105	100

Quelle: Eigene Auswertung der Daten vom Wetteramt Nürnberg

Tabelle 6: Monatliche Häufigkeiten von Windstärke 4 Beaufort oder größer bei unterschiedlich langer vorausgegangener niederschlagsfreier Zeit (1990 - 1994)

Monat	Vorausgegangene niederschlagsfreie Zeit							
	8h		24h		48h		72h	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Jan.	34	9,6	16	8	12	8,5	6	5,7
Feb.	28	7,9	18	9	14	9,9	11	10,5
März	49	13,9	29	14,6	15	10,6	10	9,5
April	34	9,6	23	11,6	16	11,3	14	13,3
Mai	30	8,5	21	10,6	18	12,7	13	12,4
Juni	30	8,5	13	6,5	10	7	8	7,6
Juli	26	7,4	19	9,5	14	9,9	12	11,4
Aug.	25	7,1	16	8	14	9,9	10	9,5
Sept.	23	6,5	11	5,5	7	4,9	4	3,8
Okt.	23	6,5	14	7	10	7	9	8,6
Nov.	20	5,7	6	3	4	2,8	3	2,9
Dez.	31	8,8	13	6,5	8	5,6	5	4,8
Summe	353	100	199	100	142	100	105	100

Quelle: Eigene Auswertung der Daten vom Wetteramt Nürnberg

Zunächst ein Blick auf die absolute Häufigkeit solcher Konstellationen: Windstärken größer als 4 Beaufort ohne Niederschlag in den vorausgegangenen acht Stunden traten in den untersuchten fünf Jahren 353mal auf, im Schnitt pro Jahr etwa 70mal. Nach 24 niederschlagsfreien Stunden wurde eine entsprechende Windgeschwindigkeit nur noch 199mal gemessen, was durchschnittlich 40 Vorkommen pro Jahr bedeutet. Nach 48 Stunden ohne Niederschlag wurde eine Windgeschwindigkeit von 5,4 m/s noch 142mal überschritten (Ø pro Jahr ca. 28), nach 72 Stunden Trockenheit noch 105mal (Ø pro Jahr 21).

Die Auflistung in Tabelle 7 zeigt deutlich, daß potentiell erosive Wetterlagen die absolute Ausnahme sind.

Tabelle 7: Prozentuale Häufigkeit von Windgeschwindigkeiten größer als 5,4 m/s bei gleichzeitig andauernder Trockenheit unterschiedlicher Dauer.

niederschlagsfrei	proz. Häufigkeit
8 h	6,4 %
24 h	3,6 %
48 h	2,6 %
72 h	1,9 %

Quelle: Eigene Auswertung der Daten vom Wetteramt Nürnberg

Eine Austrocknung der Bodenoberfläche nach bereits acht Stunden ist sicher selten und fällt, so es überhaupt dazu kommt, in die vegetationsreichere Sommerzeit. Es ist davon auszugehen, daß i.d.R. weit mehr als 24 h Trockenheit nötig sind, bis die Bodenoberfläche so ausgetrocknet ist, daß ein Sedimenttransport einsetzen kann. Zur genaueren Eingrenzung erosiver Wetterlagen wäre es sinnvoll, zusätzlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und in den Wintermonaten auch den Erdbodenzustand heranzuziehen. Es kann davon ausgegangen werden, daß im Jahresdurchschnitt potentiell erosive Wetterlagen weniger als 3 % des gesamten Jahres ausmachen.

Tabelle 5 gibt auch Auskunft über die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Windrichtungen für diese Wetterlagen. Während bei acht niederschlagsfreien Stunden die Windrichtung Westen bei weitem überwiegt, nimmt mit zunehmender Zeit ohne Niederschläge dieser Anteil kontinuierlich ab, die prozentuale Häufigkeit für die Windrichtung Osten steigt dagegen überdurchschnittlich. Für Zeiträume mit 48 oder mehr Stunden ohne Niederschlag kommen mehr als die Hälfte der Winde mit einer Stärke 4 Beaufort oder größer aus Osten und Südosten.

Bei Betrachtung der Verteilung der angeführten Wetterlagen nach Monaten fallen zwei Maxima auf. Neben den Frühjahrsmonaten Februar bis Mai weisen die Monate Juli und August eine größere Häufigkeit auf. Deutlich geringer fallen die Zahlen vor allem in den Monaten Juni, September und November aus, bei 72 Stunden Trockenheit auch in den Wintermonaten Dezember und Januar.

Als Ergebnis dieser Auswertungen läßt sich zusammenfassen, daß potentiell erosive Wetterlagen im Untersuchungsraum im Durchschnitt sehr selten auftreten. Am häufigsten sind sie in den Monaten Februar bis Mai sowie in den Sommermonaten Juli und August zu beobachten. Absolut vorherrschend sind dabei östliche Windrichtungen.

6 GIS-gestützte Datenauswertung

Zur Einschätzung der potentiellen Gefährdung durch Winderosion für das Beispielgebiet wurde ein eigener Ansatz gewählt, der es ermöglicht, vergleichende Aussagen über das Gefährdungspotential einzelner Areale vorzunehmen. Voraussetzung dafür war die Verwendung eines Raster-GIS, das die Möglichkeit bietet, die Einflußfaktoren differenziert zu erfassen und flexibel miteinander zu verknüpfen. Dadurch lassen sich räumliche und zeitliche Differenzen theoretisch in jeder beliebigen Auflösung nachbilden.

Einbezogen wurden dazu die Feldlänge in Windrichtung, die erodierbaren Bodenfaktionen sowie die Windgeschwindigkeit.

6.1 Arbeitsgrundlagen

Als Grundlage dienten zwei Karten des Vermessungsamtes Erlangen im Maßstab 1:5 000 von 1992. Daraus wurden mit dem Programm PolyPlot die linearen, für die Berechnung bedeutsamen Elemente wie Straßen, Feldwege, Flurgrenzen und die Waldgrenze digitalisiert. Die Ortschaften wurden ebenfalls aus dieser Karte entnommen, anschließend generalisiert und in der weiteren Berechnung als einheitliche Fläche behandelt.

Für die Berechnungen in Idrisi wurde das Untersuchungsgebiet in ein Raster aufgeteilt. Für die als in sich homogen angenommenen, quadratischen Rasterflächen wurde eine Kantenlänge von 5 Metern gewählt. Diese Auflösung gewährleistet einerseits eine gute räumliche Differenzierungsmöglichkeit, andererseits noch vertretbare Dateigrößen.

6.2 Erodierbare Bodenfraktionen

Zur Beurteilung der Bodenerodierbarkeit wurde die Aggregatfraktion 0,063 bis 0,25 mm herangezogen, da diese Partikelgrößen nach Aussage der gesamten zur Verfügung stehenden Literatur der am leichtesten erodierbare Anteil des Bodens sind (vgl. u.a. HASSENPLUG 1990, NEEMANN 1991).

Die für die Winderosion relevanten Aggregatanteile wurden einer rechnerischen Interpolation unterzogen. Bei verschiedenen zuvor durchgeführten statistischen Untersuchungen hatte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Aggregation und geologischem Ausgangsmaterial herausgestellt. Vor diesem Hintergrund bot sich eine Interpolationsberechnung getrennt nach den geologischen Einheiten Blasen-sandstein, Coburger Sandstein, Burgsandstein und Letten an. Die Lettenstandorte wurden dabei als eine Klasse behandelt.

Für die Interpolation im Raster-GIS wurde ein Verfahren gewählt, daß den Wert für jeden zu berechnenden Punkt anhand der nächsten vier bis acht Nachbarn ermittelt. Errechnet wird aus diesen Nachbarn ein distanz-gewichteter Durchschnitt. Dieses Interpolationsverfahren wurde für die Standorte der geologischen Einheiten separat durchgeführt. Die berechneten Bilder wurden anschließend übereinandergelegt, so daß jede Rasterfläche mit einem Wert versehen war. Zur Vermeidung von unrealistischen, scharfen Sprüngen zwischen einzelnen Flächen, die sich aus der Verschneidung ergaben, wurde das gesamte Bild noch vier Mittelwertfilter-Durchläufen unterzogen.

Abbildung 4 enthält das erläuterte Berechnungsergebnis für die Aggregatgrößenklasse 0,063 – 0,25 mm. Es liegen nur für solche Areale Berechnungsergebnisse vor, für die die zugrundeliegende Karte eine Aussage zur Geologischen Einheit bot. Die nicht berechenbaren Gebiete wurden in der Karte weiß gelassen, wie die direkte Umgebung von Hüttendorf und die Bereiche im Westen des Untersuchungsgebiets.

Die durchgängig dunkel gefärbten Gebiete im Norden und Osten von Hüttendorf weisen einen relativ hohen Anteil an der interpolierten Aggregatfraktion auf. Sie liegen überwiegend im Bereich des Blasensandsteins, der hier auch keine schluffigen Deckschichten aufweist. Zwischen Hüttendorf und Kriegenbrunn fällt ein Streifen mit einem relativ niedrigen Anteil an Aggregaten der Größenordnung 0,063 - 0,25 mm auf. In den übrigen Bereichen gibt es keine weiteren zusammenhängenden Areale mit einheitlicher Struktur. Dieses Bild visualisiert damit auch die in der statistischen Untersuchung aufgefallene Streuung des untersuchten Aggregatanteils.

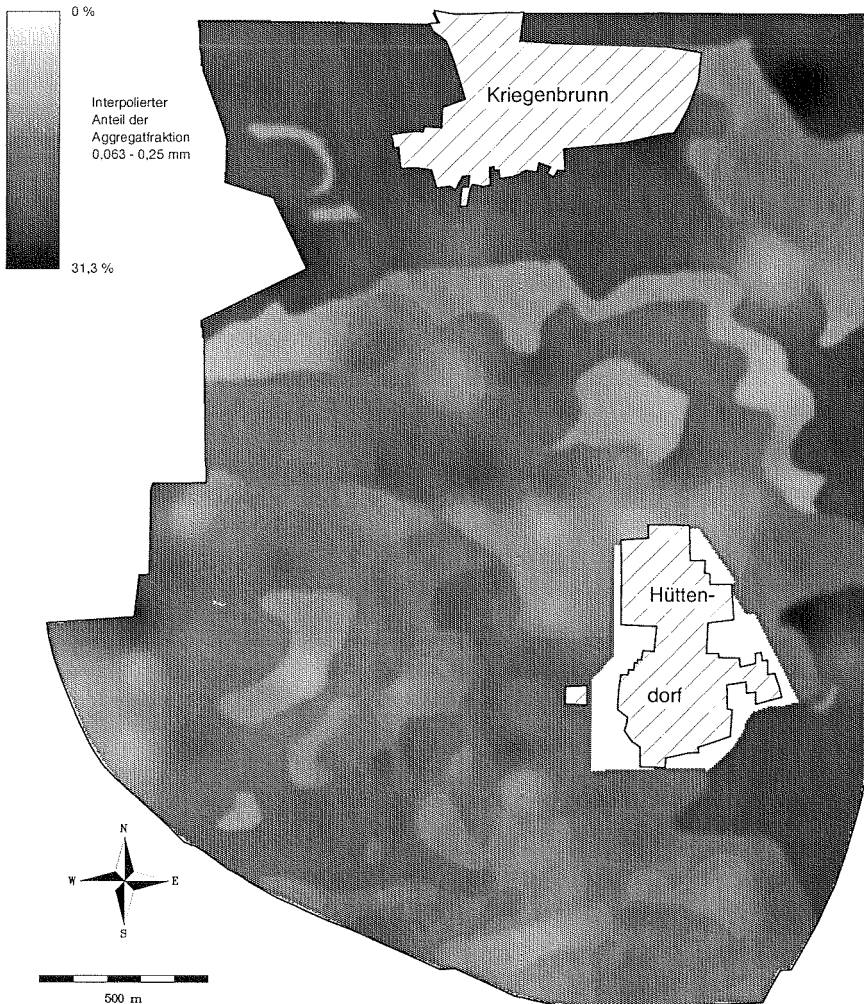


Abb. 4: Karte des interpolierten Anteils der Aggregatfraktion 0.063 - 0,25 mm

Das vorgenommene Verfahren weist allerdings – ebenso wie die zur Zeit in der Praxis übliche manuelle Interpolation – die Schwäche auf, daß die Ergebnisse von den Werten, die für die Proben ermittelt wurden, nach oben und unten begrenzt sind. Die Bandbreite der Verteilung kann daher bei diesem Verfahren gegenüber der Realität verringert sein, was eine nicht korrekte Abbildung der räumlichen Differenzen zur Folge hat. Wesentlich geeigneter zur Interpolation der räumlichen Ausprägung der Bodeneigenschaften wären moderne Verfahren der Scattered Data Approximation, die sich mit der Interpolation irregulär verteilter Daten in zwei- oder dreidimensionalen Räumen befassen (PFEIFLE u. SEIDEL 1995). „Idrisi“ bot die Voraussetzungen dafür nicht; die theoretisch mögliche Programmierung eines geeigneten Moduls wäre im Rahmen der Zulassungsarbeit zu zeitaufwendig gewesen.

6.3 Feldlänge in Windrichtung

Bei der Berechnung der Feldlänge wurde für jedes Pixel in Abhängigkeit von der Windrichtung ermittelt, welche Strecke die Luftströmung vom Feldrand bis einschließlich der zu berechnenden Rasterfläche bereits zurückgelegt hat. Die Berechnung wurde für die acht Richtungen N, E, W, S, NE, SE, SW und NW durchgeführt, die von den zur Verfügung stehenden Klimadaten vorgegeben waren. Der verwendete Algorithmus ist nicht auf diese acht Richtungen beschränkt. Liegen detailliertere Windrichtungs-Angaben vor, sind Berechnungen im 1°-Abstand in gleicher Weise möglich.

Zur Berechnung der Feldlänge wurden Straßen, Wege, Windhindernisse und Flurgrenzen als Grenzen herangezogen. Für die Himmelsrichtungen NE, SE, SW und NW wurden die Flurgrenzen, die eine Breite von 1 Pixel aufwiesen, bei diagonalen Verläufen durch ein selbst entwickeltes Filterverfahren ergänzt, da bei zwei nur an den Ecken aneinandergrenzenden Pixeln die Grenze nicht als solche erkannt wird.

In Abhängigkeit von der durchschnittlichen Häufigkeit des Vorkommens der einzelnen Windrichtungen kann für beliebige Zeiträume eine Gewichtung der Feldlängen vorgenommen werden. So kann das Untersuchungsgebiet anhand der mittleren Feldlänge differenziert werden und Areale ausgegrenzt werden, die im Mittel des betrachteten Zeitraums eine große Feldlänge und somit höhere Gefährdungsdiskposition aufweisen als solche Gebiete mit einer kurzen mittleren Feldlänge.

Herangezogen für diese Berechnung wurden die Häufigkeiten für Windgeschwindigkeiten $> 5,4$ m/s mit 48 vorangegangenen Stunden ohne Niederschlag (vgl. Tab. 7).

Bei der Berechnung der Feldlänge in Windrichtung bietet ein Raster-GIS große Vorteile gegenüber einem Vektor-GIS, da für jedes Pixel die Feldlänge angegeben werden kann, die der Wind der jeweiligen Richtung bereits zurückgelegt hat. Damit kann auf die Intensität des Avalanchingeffekts für jede Rasterfläche geschlossen

werden. Je höher die Auflösung, desto genauer wird das Ergebnis. Durch die Ausgabe als Bild oder Karte ist das Ergebnis direkt visualisierbar und interpretierbar. Darüber hinaus ist die Berechnung völlig unabhängig von der Form des Schlages.

In Abbildung 5 kommt das Überwiegen östlicher Windrichtungen klar zum Ausdruck. Die mittleren Feldlängen sind auf den Westseiten der Schläge größer als auf den Ostseiten. Insgesamt herrschen verhältnismäßig kurze Feldlängen vor. Eine durchschnittliche Länge von 250 m oder mehr wird nur an wenigen Stellen erreicht. Besonders auf den unregelmäßig geformten Feldern werden die starken lokalen Unterschiede deutlich.

6.4 Reduzierung der Windgeschwindigkeit durch Windhindernisse

Bei der Ausweisung einer potentiellen Gefährdung durch Winderosion ist zu berücksichtigen, in welchen Arealen es durch die Existenz von Windhindernissen zu einer Veränderung der Windgeschwindigkeit kommt. Für die Beispielberechnung wurden zunächst die Höhen der vorhandenen Windhindernisse erfaßt. Der Wald weist eine Höhe von etwa 17 m auf, die drei Wasserspeicher etwa 4 m. Für die Ortschaften wurde der Einfachheit halber eine einheitliche Höhe von 10 m angesetzt. Für jede der drei Höhenklassen wurde die Auswirkung von Lee- und Luveffekt getrennt für alle acht Windrichtungen ermittelt. Der Lееffekt wurde in Anlehnung an KNAUER (1993) nach dem 20fachen der Hindernishöhe als beendet angenommen, der Beginn des Luveffekts in 5-facher Entfernung vor dem Hindernis angesetzt. Für die Reduzierung der Windgeschwindigkeit eine lineare Funktion angenommen; der Einsatz anderer Funktionen wäre ebenso möglich.

In den Berechnungen wurde der Effekt als Prozentsatz der ursprünglichen Windgeschwindigkeit ausgedrückt. Zur Kombination von Luv- und Lee-Effekt wurden jeweils die Bilder für dieselbe Windrichtung miteinander multipliziert. Durch Multiplikation mit einer angenommenen Ausgangswindgeschwindigkeit kann für jede Rasterfläche eine absolute Windgeschwindigkeit ermittelt werden.

Schwäche dieser Vorgehensweise ist, daß zwar eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit an Hindernissen simuliert werden kann, nicht jedoch der Effekt von Turbulenzen. Diese Möglichkeit bietet bisher allerdings auch kein anderes der Modelle zum Bodenabtrag durch Wind.

Analog zur Feldlänge kann die prozentuale Windgeschwindigkeit für beliebige Zeiträume nach anteiligen Vorkommen der einzelnen Windrichtungen gewichtet werden. Grundlage für die Berechnung bildeten dieselben Zeiträume wie für die mittlere Feldlänge. Die Berechnung zeigte, daß der überwiegende Teil des Untersuchungsgebiets durch keinerlei Einschränkung der Windgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. Der reduzierende Einfluß der Windhindernisse ist verhältnismäßig gering. Da die potentiell erosiven Winde überwiegend aus östlicher Richtung



Abb. 5: Karte der mittleren Feldlänge der erosiven Windgeschwindigkeiten

kommen, hat der Wald im Westen relativ wenig Auswirkung auf die Windgeschwindigkeit.

6.5 Ermittlung einer relativen Erosionsgefährdung

Bei dieser Ermittlung geht es um die Darstellung der unterschiedlichen räumlichen Disposition im Untersuchungsgebiet. Als Maßstab für die mögliche Gefährdung können natürlich nur die Differenzen im untersuchten Gebiet selbst dienen.

Beabsichtigt war die räumlich differenzierende Darstellung des „Grundgefährdungspotentials“ auf der Basis der bestehenden klimatischen und räumlichen Verhältnisse, sowie der verhältnismäßig wenig anthropogen beeinflussbaren Aggregateigenschaften des Bodens für eine unbedeckte, ebene Bodenoberfläche. Auf mögliche Einschränkungen durch den Einfluß der weiteren Faktoren wie Rauigkeit, Vegetation und Wirtschaftsweise wurde nicht weiter eingegangen.

Für die Kombination der Merkmalsausprägungen Aggregatverteilung, mittlere Feldlänge und prozentuale Windgeschwindigkeit wurde auf Grundsätze der Fuzzy-Logik zurückgegriffen. Fuzzy-Methoden erlauben die Arbeit mit unscharfen Gruppeneinteilungen wie schwach und stark, ohne feste Grenzen dazwischen zu ziehen. Auf die Bildung von Klassen wird verzichtet, die Zuordnung zu einer Gruppe wird als Wahrscheinlichkeit mit einem Wert zwischen 0 und 1 ausgedrückt.

Für alle drei einbezogenen Einflußfaktoren wurde eine lineare Funktion zugrundegelegt. Der Wert 0, gleichbedeutend mit „keine Gefährdung“ wurde jeweils auch den realen Werten 0 (0 m Feldlänge, 0% Windgeschwindigkeit, 0% Aggregate der Fraktion 0,063 – 0,25 mm) zugeordnet. Der Wert 1, gleichbedeutend mit „stärkste Gefährdung“ wurde der jeweils vorkommenden höchsten Ausprägung zugewiesen. (mittl. Feldlänge: 400 m, Windgeschwindigkeit: 100%, Aggregatfraktion 0,063 – 0,25 mm: 31,3%)

Durch die Wahl dieser auch als Kontrollpunkte bezeichneten Größen kann die Gewichtung der einzelnen Faktoren beeinflußt werden. Stünde beispielsweise fest, daß bei Feldlängen von weniger als 100 m garantiert kein Abtrag vorkommen kann, würde der Wert 0 bereits der Länge 100 m zugewiesen. Alle darunter liegenden Längen würden dann der Wahrscheinlichkeit 0% zugeordnet. Generell sind auch andere als lineare Verläufe der Wahrscheinlichkeitszuordnung möglich; bei genaueren Kenntnissen über die Beziehung auch sinnvoll. Die Kombination der so einzeln erstellten relativen Gefährdungsgrade wird durch eine einfache Multiplikation dieser Prozentsätze erreicht.

Eine relative Gefährdung konnte nur für die Bereiche des Untersuchungsgebiets ausgewiesen werden, die Daten zu allen drei kombinierten Merkmalsausprägungen enthielten. Für einige Areale, für die keine Information zum Anteil der Aggregate 0,063 - 0,25 mm zur Verfügung stand, konnte daher keine Berechnung vorgenommen werden. Windhindernisse, Straßen, Feldwege, Teiche und der Wald blieben natürlich ebenfalls ausgeschlossen.

Insgesamt führt die Kombination der drei Faktoren zu dem Ergebnis, daß der größte Teil des Untersuchungsgebietes eine äußerst geringe Gefährdung aufweist. Einer der Hauptgründe dafür liegt in der geringen West-Ost-Ausdehnung vieler Schläge. Die Felder mit der relativ stärksten Gefährdung zeichnen sich im Gegensatz dazu durch eine verhältnismäßig große Länge in W-E-Richtung aus. Sie finden sich vor allem im Norden des Untersuchungsgebiets, wo vielfach auch ein größerer Anteil an erodierbaren Aggregatfraktionen vorliegt (vgl. Abb. 6)



Abb. 6: Karte der relativen Gefährdung durch Winderosion

Ein großer Vorteil dieser Verfahrensweise ist seine Offenheit für räumliche und inhaltliche Ergänzungen. Bei Anwendung gleicher Kontrollpunkte und Funktionen auf andere Regionen ist das Gefährdungspotential direkt vergleichbar. Bei Erhebung des Einflusses zusätzlicher Faktoren ist die Einbindung über einfache Multiplikation möglich. Bei einer großräumigeren Betrachtung wäre so z.B. auch die Häufigkeit erosiver Wetterlagen in die Karte integrierbar.

7 Zusammenfassung

Unter der Voraussetzung, daß sich die klimatischen Verhältnisse auch im weiteren Umkreis der Wettermeßstation Nürnberger Flughafen nicht wesentlich vom dort aufgezeichneten Klima unterscheiden, wird die potentielle Gefährdung durch Winderosion für Mittelfranken als sehr gering angesehen.

Die Einschätzung einer leichten bis mäßigen Gefährdung nach RICHTER (1965) kann nicht geteilt werden, da es nur sehr selten zu potentiell erosiven Wetterlagen kommt. Weniger als 3 Prozent des Jahres kann einer solchen Wetterlage zugerechnet werden. Bei dem Zeitraum mit dem dennoch im Jahresablauf höchsten Gefährdungspotential handelt es sich eindeutig um die Frühjahrsmonate März und April, evtl. auch die erste Maihälfte, sowie den Monat August. Wie die Auswertung der Wetterdaten gezeigt hat, treten in diesen Monaten potentiell erosive Wetterlagen gehäuft auf. Gleichzeitig sind diese Monate - zumindest für das Untersuchungsgebiet - durch eine spärliche Vegetationsbedeckung gekennzeichnet. Beim Anbau von Sommergetreide ist der Boden im März noch völlig frei, bei Mais entwickelt sich eine schützende Vegetationsdecke noch später. Im August dagegen ist, bzw. wird das Getreide bereits geerntet. Dann verbleiben lediglich Stoppeln auf dem Feld, teilweise wird sofort gepflügt; es besteht also nur geringe oder gar keine Vegetationsbedeckung. In diesen Monaten kann es vereinzelt zu Sedimenttransport kommen, insbesondere im Zusammenhang mit Bodenbearbeitungsmaßnahmen.

Im Untersuchungsgebiet dürfte die Gefahr einer Verwehung von Bodenmaterial zusätzlich dadurch geringer ausfallen, daß sich ein Großteil der Felder in Nord-Süd-Richtung erstreckt. Damit ist i.d.R. die Bearbeitung in derselben Richtung vorgegeben. Den Abtrag reduzierende Rillen und Furchen durch die Bewirtschaftung liegen damit quer zur Richtung, aus der am häufigsten potentiell erosive Winde auftreten.

Generell ausgeschlossen werden kann eine Gefährdung der Böden durch Winderosion im mittelfränkischen Raum jedoch nicht. Vor allem Areale mit sandigen Böden, wie sie sich auf dem Blasensandstein entwickelt haben, bergen ein gewisses Risiko. Sollte in den genannten kritischeren Monaten einmal Sturm bei andauernder Trockenheit auftreten, könnten bei solch einem einzigen Erosionsereignis durchaus größere Mengen an Boden abgetragen werden.

Anmerkungen

- 1) Die vorliegenden Informationen zum WEPS und zur RWEQ wurden einer Veröffentlichung der Wind Erosion Research Unit der Kansas State University entnommen, die im World Wide Web unter folgender Adresse zugänglich ist: <http://www.weru.ksu.edu>
- 2) Das Wetteramt konnte die Daten zur Windrichtung nur klassifiziert nach 8 Richtungen zur Verfügung stellen. Die Angabe „S“ z.B. deckt daher das gesamte Segment SSE bis SSW ab.

Literatur

- BAGNOLD, R.A. 1941: The physics of blown sand and desert dunes. London.
- BERGNER, U., J. KLAHRE u. H. SCHRÖDER 1995: Korngrößendifferenzierungen durch Bodenerosion auf einem Testschlag im Saalkreis. In: Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft 42: 119 - 131.
- Bodenkundliche Kartieranleitung*, 4. Aufl. 1994. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- HASSENPLUG, W. 1990: Winderosion. In: BLUME, H.P. (Hrsg.), Handbuch des Bodenschutzes. Landsberg: 183 - 197.
- HASSENPLUG, W. 1993: Bodeninformationssysteme zur flächenhaften Quantifizierung und Modellierung der Bodenverwehung in Norddeutschland - Konzepte und Perspektiven. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 72: 1189 - 1192.
- KRIEG, A. 1990: Verteilung, Ausmaß und Bilanzierung der Bodenerosion im Raum Querfurt. Inst. f. Geogr., Halle.
- KUNTZE, H., G. ROESCHMANN und G. SCHWERTFEGER 1994: Bodenkunde. Stuttgart, 5. Aufl.
- LÖWA, K. 1996: Zur Anwendbarkeit der Universal soil loss equation und der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung im großmaßstäbigen Bereich - dargestellt am Beispiel des Querfurter Raumes. Halle.
- LÖWA, K. und H. SCHRÖDER 1991: Zum Ausmaß bodenerosiver Abspülschäden in der Lößlandschaft des südöstlichen Harzvorlandes. In: Erdkunde, 45: 255 - 263.
- KNAUER, N. 1993: Ökologie und Landwirtschaft. Situation, Konflikte, Lösungen. Stuttgart.
- NALENZ, O. 1992: Bodenkundliche Kartierung im Gebiet Kriegenbrunn/Hüttendorf auf Blatt 6431 Herzogenaurach. Erlangen, Diplomarbeit, Teil 1.
- NEEMANN, W. 1991: Bestimmung des Bodenerodierbarkeitsfaktors für winderosionsgefährdete Böden Norddeutschlands - Ein Beitrag zur Quantifizierung der Bodenverluste. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe F, Heft 25, Hannover.
- PFEIFLE, R. und H.-P. SEIDEL 1995: Fitting Triangular B-Splines to Functional Scattered Data. Computer Graphics Group, Universität Erlangen, email: {pfeifle, seidel}@informatik.uni-erlangen.de, 12/1995.
- RICHTER, G. 1965: Bodenerosion - Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. Bad Godesberg.
- ROSEBROCK, A. 1996: Einsatz von Winderosions-Modellen in Geographischen Informationssystemen. Erlangen, Zulassungsarbeit.
- SCHMIDT, K. 1993: Bodeninformationssystem zur flächenhaften Quantifizierung und Modellierung der Bodenverwehung in Norddeutschland - Realisation und Auswertungsbeispiele. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 72: 1243 - 1246.
- SCHRÖDER, H. 1982: Qualitative und quantitative Untersuchungen zur Erfassung der bodenerosiven Abspülung. - Dargestellt mittels Testuntersuchungen im Einzugsgebiet der Weida (Pegel Stedten). MLU Halle, Dissertation A.
- SCHRÖDER, H. 1985: Erfassungsmethodik und Ausmaß bodenerosiver Abspülungen auf Hanglagen im südöstlichen Harzvorland. - Raum Querfurt. In: Hall. Jb. f. Geowiss., 10, Gotha, S. 81-92.

Winderosion in Mittelfranken

- SCHRÖDER, H. 1992: Bodenerosive Landschaftsschäden in Fernerkundungsaufzeichnungen. In: GRUNERT, J. und P. HÖLLERMANN, Geomorphologie und Landschaftsökologie, Heft 85, Bonn. S. 55 - 67.
- SCHRÖDER, H., U. BERGNER und J. KLAHRE 1995: Das Ausmaß geoökologischer Prozesse bodenerosiver Abspülung in Lößlandschaften des Mitteldeutschen Trockengebietes. Erlangen.
- WILSON, S.J. und R.U. COOKE 1980: Wind erosion. In: KIRKBY, M.J. and MORGAN, R.P.C. (Hrsg.). Soil Erosion. Norwich: 217 - 248.
- WOODRUFF, N.P. und F.H. SIDDOWAY 1965: A Wind Erosion Equation. In: Soil Science Society of America Proceedings 29: 602 - 608.
- ZACHAR, D. 1982: Soil Erosion. Amsterdam, Oxford, New York.

