

Digitales Raumstrukturmodell zur Prognose von Bereichen mit linearer Erosion auf Parzellen und in Einzugsgebieten

Von dem Fachbereich Geowissenschaften und Geographie
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. Nat.
genehmigte Dissertation
von

Diplom Geograph Jens Bierbaum
geboren am 09.10.1967, in Essen-Werden

2001

Referent: Prof. Dr. Th. Mosimann
Korreferent: Prof. Dr. G. Kuhnt
Tag der Promotion: 27.06.2000

Schlagwörter: Bodenerosion, Raumstruktur, Modell
Keywords: soil erosion, rill, model

Das Wichtigste in Kürze

Jedes Jahr gelangen über diffuse Stoffeinträge aus der Landwirtschaft große Mengen von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln in die Vorfluter. Ausgelöst durch erosive Prozesse wird von Ackerschlägen Bodenmaterial gelöst und über Gräben und andere Tiefenlinien in die Gewässer geleitet. Während durch den flächenhaften Bodenabtrag größere Mengen von Feinerde innerhalb der Parzelle bewegt werden können, ist die lineare Erosion der Hauptprozess für die Off-site Schäden, d.h. den Transport über die Parzellen hinaus. Um wirksame Gegenmaßnahmen einleiten zu können, muss sowohl der Erosionsprozess als auch die Lage des Auftretens von linearer Erosion bekannt sein. Während zum heutigen Zeitpunkt die Entwicklung von Bodenerosionsmodellen, die den flächenhaften Abtrag gut prognostizieren können, weit vorangeschritten ist, fehlt aus wissenschaftlicher Sicht ein geeignetes Instrumentarium zur qualitativen und quantitativen Bestimmung des gebündelten Abflusses.

Das vorliegende empirische Modell kann anhand flächenhaft vorliegender Basisdaten eine Prognose der Lage von linienhaften Erosionsformen auf Parzellen- bzw. Einzugsgebietsebene ermitteln. Auf Grundlage der Reliefanalyse werden alle erosionswirksamen Raumstrukturelemente der Testfläche durch höhendifferenzierte Unterschiede in ein hydrologisches Netzwerk eingebunden. Hierbei wird innerhalb einer Ackerparzelle der Einfluss von Formen wie z.B. Fahrspuren, Vorgewende und Ackerrandfurche in das Modell integriert. Außerhalb der Fläche übernehmen Gräben, Bankette und Straßen vor allem die richtungsweisende Funktion für den Oberflächenabfluss und Feinerdetransport.

Das Modell besitzt einige Teilmodule, die aufgrund geometrischer Verfahren eine teilweise automatische Generierung von vorhandenen Strukturelementen berechnen können. Zur Bestimmung des Abflusses wird das Curve Number Verfahren eingesetzt. Damit kann der Einfluss von Raumstrukturen auf unterschiedlich intensive Niederschläge ermittelt werden. Zudem ist ein wichtiges empirisches Verfahren zur Prognose von Akkumulationszonen eingebunden. Die Anwendung des Modells beschränkt sich auf Niederschlagsereignisse außerhalb der Wintermonate. Nicht parametrisierbare Raumstrukturelemente können die Qualität des Modellergebnisses verringern.

Das Modell kann sehr gut die Lage von linienhaften Erosionsformen vorhersagen. Alle beobachteten Hauptabflussbahnen wurden korrekt erkannt. Die Lageungenauigkeit ist im Bereich weniger Meter zu finden. Damit zeigt sich die Anwendung als geeignetes Instrument für präventive Maßnahmen zum Erosionsschutz.

Abstract

Diffuse processes result in high volumes of nutrients and plant-protective agent to reach waterways from agricultural sources. Soil matter is being eroded from plough and led over ditches and other longitudinal suppressions into waters. While by the planar soil erosion larger quantities of fine earth can be moved within the plot, the linear erosion is the main case for off site damage, i.e. the transport beyond the plots. In order to be able to initiate effective counter measures, both the erosion process and the position of occurring linear erosion must be known.

While at today's point in time the development of soil erosion models, which can prognosticate the planar erosion well, has progressed far, suitable tools are missing for the qualitative and quantitative determination of the bundled discharge from scientific view.

The available empirical model can determine a prognosis of the position of linear erosion forms on plot or catchment area level on the basis of planarly available base data. On the basis of the relief analysis all erosion-effective regional structure items of the test surface are merged through elevator-differentiated differences into a hydrologic network. With that, the influence of forms within a field plot, e.g. ruts, wheeling and furrow at edge of field, is integrated into the model. Outside of the plot, ditches, road shoulders and roads take over all the function pointing the way for the surface discharge and fine earth transport.

The model possesses some modules, which can calculate a partial automatic generation of existing structural components due to geometrical procedures. For the determination of the discharge the Curve Number procedure is used. Thus the influence can be determined by regional structures on differently intensive precipitation. In addition, an important empirical procedure for the prognosis of accumulation zones is merged.

The application of the model is limited to precipitation events outside of the winter months. Non-parameterisable regional structure items can reduce the quality of the model output. The model can predict very well the position of linear erosion forms. All observed main discharge courses were correctly detected. Inaccuracy of position is within a few meters only. Thus the application commends itself as a suitable tool for preventive measures for erosion protection.

Vorwort

Die Arbeit ist im Rahmen eines DFG geförderten Projektes des Geographischen Institutes der Universität Hannover entstanden. Das Projekt wurde von einer Arbeitsgruppe von 1995 bis 1999 bearbeitet. Der Arbeitstitel lautet: „Räumlich differenzierte Erfassung der partikelgebundenen Nährstoffanlieferung an Oberflächengewässer unter Einsatz Geographischer Informationssysteme“

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Thomas Mosimann für seine engagierte Betreuung des Projektes und die hervorragende Unterstützung meiner Arbeit.

Für die Übernahme des Korreferats möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Kuhnt bedanken.

Weiterhin danke ich Herrn PD. Dr. Rainer Duttmann für die sehr gute Zusammenarbeit in dem DFG-Projekt, die vielen fruchtbaren Diskussionen sowie die exzellente fachliche Beratung. Gleichmaßen hilfreich zeigten sich die vielen Gespräche mit Dr. Johannes Voges und Volker Wickenkamp. Daran anschließend danke ich allen weiteren Mitarbeitern des Institutes für die gute Zusammenarbeit.

Carsten Temme und Stephan Wrede gebührt großer Dank für ihren unermüdlichen Einsatz bei den Kartierungen und der guten Bearbeitung ihrer Diplomarbeiten.

Zum Schluss möchte ich noch meinen Eltern für ihren immerwährenden Support während meines Studiums danken, sowie meiner Freundin Christiane für die vielen hilfreichen Stunden.

Hannover, im Mai 2000

Jens Bierbaum

Inhaltsverzeichnis

Das Wichtigste in Kürze	2
Vorwort	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Kartenverzeichnis	9
1. Einführung	11
1.1 Das Problem.....	11
1.2 Ziele und Aufbau.....	14
1.3 Methodisches Vorgehen	16
2. Das Untersuchungsgebiet und sein Erosionsgeschehen	20
2.1 Geoökologische Ausstattung	20
2.1.1 Gestein und Relief.....	20
2.1.2 Böden.....	22
2.1.3 Niederschlagsbedingungen	23
2.2 Das beobachtete Erosionsgeschehen im Untersuchungsgebiet.....	26
2.3 Bedeutung von Wasserzufluss und Übertritten	29
3. Wirkung der Oberflächenstrukturelemente auf die lineare Erosion	31
3.1 Vorgehen bei der Auswertung.....	32
3.2 Die bevorzugte Bearbeitungsrichtung und ihre Wirkung.....	34
3.2.1 Bedeutung für die Herausbildung linearer Erosion.....	34
3.2.2 Bedeutung für die Bestimmung der Erosionsrichtung	35
3.3 Wirkung von Fahrspuren.....	35
3.3.1 Bedeutung für die Herausbildung linearer Erosion.....	36
3.3.2 Bedeutung für die Bestimmung der Erosionsrichtung	38
3.4 Wirkung von Vorgewende	40
3.5 Wirkung von sonstigen Strukturelementen	40

3.6	Einfluss von Raumstrukturelementen und Relief auf die lineare Erosion. Ein Vergleich.....	41
3.7	Einfluss von Relief und Nutzung auf die Ausbildung linearer Erosionsformen	43
3.7.1	Häufigkeitsverteilung von Rillen-Rinnenquerschnitten in Abhängigkeit von Relief und Nutzung.....	43
3.7.2	Einfluss von Hangneigung auf die Entstehung unterschiedlicher Erosionsformen.....	44
3.7.3	Die Tiefe der linienhaften Erosionsformen.....	46
3.7.4	Einfluss unterschiedlicher Kulturpflanzen und landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden auf die Entstehung von linearen Erosionsformen	48
3.7.5	Zusammenhang zwischen Bodenbedeckungsgrad und Ausbildung von Rillen und Rinnen.....	49
3.7.6	Zusammenhang zwischen Hanglänge und Tiefe von Erosionsformen.....	50
4.	Vorhersage der räumlichen Verteilung linearer Erosionsformen auf Parzellenebene	52
4.1	Modellansatz.....	52
4.1.1	Generierung und Aufbereitung der Basisdaten.....	54
4.2	Parametrisierung der Strukturelemente.....	58
4.2.1	Hydrologische Berechnungen.....	60
4.2.2	Ermittlung potentieller Akkumulationsflächen	63
4.2.3	Berechnung der direkten Abflussmenge nach dem Curve-Number-Verfahren des U.S. Soil Conservation Service.....	66
4.2.4	Einfluss der Bodenbedeckung auf den Oberflächenabfluss.....	67
4.3	Automatische Erkennung von Fahrspuren, Vorgewende und Bearbeitungsrichtung	69
4.3.1	Eingangsdaten und Aufbereitung des Datensatzes	70
4.3.2	Methodik.....	71
5.	Modellergebnisse und Vergleich des Modellergebnisses mit den Beobachtungen	76
5.1	Übersicht zu den durchgeführten Berechnungen	76
5.2	Modellergebnisse für das Gebiet Kloster (Lamspringe).....	79
5.2.1	Die Raumstruktursituation im Gebiet Kloster	80
5.2.2	Vergleich der modellierten mit den prognostizierten Erosionsformen.....	81

5.3 Exemplarische Darstellung der Modellergebnisse am Beispiel des Gebietes Ilde	86
5.3.1 Die Raumstruktursituation im Gebiet Ilde.....	86
5.3.2 Vergleich der modellierten mit den prognostizierten Erosionsformen.....	87
5.4 Ursachen der Fehleinschätzung von modellierten linearen Leitbahnen.....	92
6. Einschätzung der linearen Erosion durch die Landwirte	94
6.1 Kenntnisstand zur Verbreitung der Erosion	94
6.2 Beurteilung des Schadensausmaßes.....	95
7. Fazit und Perspektiven	98
7.1 Modellqualität und Parametrisierung des Bodenerosionsprozesses.....	98
7.2 Datenverfügbarkeit von Modelleingangsgrößen	100
7.3 Anwendungsperspektiven des Modells auf unterschiedlichen Maßstabsebenen.	101
8. Zusammenfassung	103
9. Literatur.....	109
ANHANG.....	115

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Einsatz des Modells unter verschiedenen Dimensionsebenen	17
Abb. 2: Erläuterung und Abfolge der wichtigsten Hypothesen des Modells	18
Abb. 3: Karte des Untersuchungsgebietes.....	21
Abb. 4: Flächenanteile der K-Faktoren ackerbaulich genutzter Böden im Untersuchungsgebiet Ilde (nach Duttmann 1999)	24
Abb. 5: Erosive Niederschläge (Gesamt und I_{30}) im Untersuchungsgebiet Ilde 1995-1997 und mittlere monatliche Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag der DWD Referenzstation Hildesheim (1951-1980).....	25
Abb. 6: Flächennutzung im Untersuchungsgebiet.....	26
Abb. 7: Anzahl der erfassten Erosionstypen im Untersuchungsgebiet im gesamten Beobachtungszeitraum	28

Abb. 8: Oberflächenzu- und -abflussverhältnisse auf landwirtschaftlichen Flächen	30
Abb. 9: Anteile der Parzellen mit teilweise gebündeltem oder gebündeltem Zu- oder Abfluss	31
Abb. 10: Verschiedene Formen der Veränderung von reliefbedingten Abflussbahnen durch Strukturelemente (Fahrspuren, Vorgewende)	36
Abb. 11: Bedeutung von Fahrspuren für die Entwicklung von Initialerosionsrinnen. Bündelung des Oberflächenwassers in Reifenprofilen von landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen	38
Abb. 12: Anzahl und Verteilung der Erosionsformen im Untersuchungsgebiet	43
Abb. 13 Tiefe der linearen Erosionsform und der Zusammenhang zwischen Länge der linearen Erosionsformen und Eintiefung.....	47
Abb. 14: Häufigkeiten aller kartierter Erosionsformen und deren monatliche Verteilung auf Parzellen mit den Hauptanbaukulturen Winterweizen, Zuckerrüben und Schwarzbrache	49
Abb. 15: Verteilung der kartierten Erosionsformen unter verschiedenen Nutzungen	49
Abb. 16: Relative Häufigkeiten des Auftretens unterschiedlicher Erosionsformen unter verschiedenen Deckungsgraden der Kulturpflanzen	50
Abb. 17:Prozentualer Anteil der Erosionslänge von Rillen und Rinnen an gesamter erosiver Hanglänge.....	51
Abb. 18: Schema der einzelnen Daten- und Verknüpfungsebenen des Modells zur Ermittlung linearer Erosionsformen	53
Abb. 19: Anzahl der Rasterzellen pro km ² bei unterschiedlichen Gitterabständen	55
Abb. 20: DHM mit abflussloser Senke; links vor und rechts nach Beseitigung der Hohlform mit zusätzlicher Addition von 0.01m Höhe	57
Abb. 21: Datenverknüpfung und -konzeption des Modells. Die grau unterlegten Felder zeigen die unterschiedlichen Formate während der Aufbereitung der Daten an.....	59
Abb. 22: Gerinnequerschnitt und Größe der wichtigsten Raumstrukturelemente im Untersuchungsgebiet.....	60
Abb. 23: Unterschiede des D8- (links) und FD8-Algorithmus (rechts) zur Berechnung von Abflussrichtung in einem gleichmäßigen Raster.....	61
Abb. 24: Abhängigkeit des relativen Bodenabtrages (RBA) von der Bodenbedeckung durch Mulch nach SCHWERTMANN (1990). Durch ein Näherungsverfahren wurde die empirisch ermittelte Kurve einer Gleichung angepasst.....	68
Abb. 25: Parzellierung von Ackerflächen in Bültum (Ilde). Die Bearbeitungsrichtung der einzelnen Ackerflächen wurde zur Validierung zu Projektbeginn kartiert.....	70
Abb. 26: Elimination von Vertex (umkreiste Stützpunkte in A) aus Flächenpolygonen. Die Geometrie der Parzelle (B) bleibt durch Beibehalten der Nodes bestehen.....	72

Abb. 27: Verteilung und Statistik von Stützpunkten der Flächenpolygone: vor und nach Bereinigung der Hilfsstützpunkte (Vertex).....	72
Abb. 28: Längen-Breitenverhältnis der im Untersuchungsgebiet vorgefundenen Parzellen. 100 bedeutet gleiche Länge wie Breite des Ackerschlaes.....	73
Abb. 29: Aufteilung der Parzellen nach Parzellengröße und Längen-Breitenverhältnis. Deutlich ist der höhere Anteil der sehr schmalen Ackerstreifen bei geringen Flächengrößen zu erkennen. Bei den Parzellen mit mehr als 2 ha ist die Flächenform zur automatischen Analyse wegen der gestreckten Form sehr gut geeignet.....	74
Abb. 30: Schematische Darstellung der Berechnung der Bearbeitungsrichtung anhand Anbindung des Vorgewendes an das landwirtschaftliche Wegenetz.....	75
Abb. 31: Niederschlagsmengen in mm/d der Referenzstation Seesen 1998. Deutlich sind die ergiebigen Niederschläge vom 28.10-1.11.1998 zu erkennen. Die Klimadaten konnten zu diesem Zeitpunkt nicht von der im Untersuchungsgebiet betriebenen eigenen Station gewonnen werden. Die Niederschlagsmengen in Seesen sind durch die Lage höher als im Testgebiet.....	79

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Kartierung und Messungen im Untersuchungsgebiet	33
Tab. 2: Relevanz von Raumstrukturen auf Überströmungsmöglichkeit der Elemente, Erosionsrichtung, Bündelung und Beeinflussungsmöglichkeit durch die Bodenbearbeitung. Normal: Niederschlag mittlerer Intensität; Stark: Starkregenereignis..	42
Tab. 3: Hangneigung der verschiedenen Erosionsformen	44
Tab. 4: Einzugsgebietsgröße unterschiedlicher Erosionsformen im Untersuchungsgebiet Lamspringe und Wöllersheim.....	45
Tab. 5: Hangneigung der Akkumulationsflächen im gesamten Untersuchungsgebiet.....	64
Tab. 6: Kombination aus Hangneigung und Bedeckungsgrad zur Ermittlung potentieller Akkumulationsflächen.....	65
Tab. 7: Reduktion der Menge des Oberflächenwassers unter verschiedenen Bodenbedeckungsgraden	69
Tab. 8: Charakterisierung und Übersicht zu den Bodenerosionsereignissen 1995-1998	76
Tab. 9: Bilanz der korrekt und falsch abgebildeten Erosionsformen mit Angabe der Ursachen für fehlerhafte Prognosen	93

Verzeichnis der Karten

Karte 1: Raumstrukturelemente im Raum Kloster (Lamspringe) 1998.....	83
Karte 2: Ergebnisse der Erosionsschadenskartierung im November 1998 (Kloster).....	84
Karte 3: Prognostizierte Abflussbahnen des Erosionsereignisses vom November 1998 im Gebiet Kloster	85
Karte 4: Raumstrukturelemente im Testgebiet Ilde 1998.....	91
Karte 5: Ergebnisse der Erosionsschadenskartierung im Herbst 1998 im Gebiet Ilde	92
Karte 6: Prognostizierte Abflussbahnen 1998 in Ilde	93
Karte 7: Ergebnisse der Befragung der Landwirte im Testgebiet Ilde.....	97

1. Einführung

1.1 Das Problem

In der Agrarlandschaft hat sich in den letzten Jahrzehnten ein erheblicher Wandel im Bereich der Bewirtschaftung und Bearbeitung vollzogen. Die durchschnittliche Flächengröße der Ackerparzellen ist kontinuierlich angewachsen, Bach- und Flussverläufe wurden begradigt, die Fruchtfolge beschränkt sich nur noch auf wenige Anbauprodukte und die Bodenbearbeitungsintensität wurde erheblich erhöht. Diese und andere Maßnahmen führten zu einer Homogenisierung der Landschaft mit zum Teil weitreichenden Folgen für den Menschen (RAT FÜR UMWELTFRAGEN 1985). Die Ertragsmengen im land- und viehwirtschaftlichen Sektor konnten zwar erheblich gesteigert werden, jedoch gelangten immer mehr Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel durch Bodenerosionsprozesse in die Vorfluter. Der Stoffeintrag von landwirtschaftlichen Parzellen in Gewässer zeigt u.a. folgende Problematik auf:

- Einträge von Nährstoffen (z.B. Stickstoff- und Phosphorverbindungen) führen zur Eutrophierung von Oberflächengewässern. Die Diversität der Artenvielfalt nimmt ab, das Gewässer kann im schlimmsten Fall ‚umkippen‘.
- Pflanzenschutzmittel belasten das Ökosystem nachhaltig. Auch hier kann es zur deutlichen Reduzierung von einzelnen Spezien kommen. Besonders hohe Einträge können sogar einen Großteil der natürlichen Fauna und Flora vernichten.

Neben diesen direkten Folgen für die Bäche und Flüsse entstehen für den Menschen weitere schwerwiegende Probleme. Durch den Eintrag von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln wird das Gewässer hinsichtlich der Trinkwasserqualität stark belastet. In Deutschland werden ca. 28% des Trinkwassers aus Oberflächengewässern gewonnen (FREDE, H.-G. & S. DABBERT 1998). Da die verfügbaren Reserven der öffentlichen Wasserversorgung mit Grund- und Quellwasser weitgehend ausgeschöpft sind, muss in Zukunft noch stärker auf Oberflächengewässer zurückgegriffen werden.

Die Aufbereitung des Trinkwassers zeigt aus technischer Sicht wenig Probleme. Jedoch sind die Kosten, die durch Filterung und Reinigung des belasteten Wassers entstehen, aus ökonomischen Gründen nicht tolerierbar. Vorrangiges Ziel sollte also die Bekämpfung der Ursachen der Gewässerverschmutzung sein. Hierbei muss zwischen den einzelnen Verursachern unterschieden werden. Auf der einen Seite emittieren Haushalte und Gewerbebetriebe in Oberflächengewässer. Diese Einträge gelangen punktuell über die

Kanalisation in die Vorfluter und können gezielt durch den Bau von Kläranlagen vermindert werden. Auf der anderen Seite stehen landwirtschaftliche Betriebe, bei denen von Ackerparzellen Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel diffus in Oberflächengewässer eingetragen werden. Die wasserlöslichen Stoffe gelangen zum Großteil über den normalen Wasserkreislauf in die Vorfluter, während partikelgebundene Substanzen (z.B. Stickstoff und Phosphat) über erosive Prozesse direkt in das Gewässer transportiert werden. Als besonders problematisch erweisen sich linienhafte Abtragsformen, da ein sehr hoher Anteil am Gesamterosionsprozesses durch den gebündelten Abfluss in Fließgewässer gelangt. Dieses begründet vor allem die hohe Priorität mit der aus wissenschaftlicher Sicht an der Problematik linienhafter Erosionsformen und deren Prognose gearbeitet werden sollte.

Das Ausmaß der Nährstoffbelastung in Bächen und Flüssen wird anhand der Gesamteinträge in die Küstengewässer deutlich. Nach Schätzungen von WERNER (1991 u. 1994) betrug der Anteil der Phosphoreinträge durch erosionsbedingten Bodenabtrag in Nord- und Ostsee zwischen 38%-58%. Durch Oberflächenabflüsse wird zusätzlich ca. 12% partikelgebundenes Phosphat den Meeren zugeführt. Bedingt durch die Schwierigkeit einer genauen Schätzung können nur undifferenzierte Angaben gemacht werden, jedoch zeigen die Mengen deutlich die Problematik der Gewässerbelastung durch Nährstoffe auf (KTBL Arbeitspapier 1998).

Die Schäden der Bodenerosion beschränken sich aber nicht nur auf Nähr- und Schadstoffimmissionen entfernter Ökotope, sondern sie beeinträchtigen auch die ökologischen Funktionen der betroffenen Ackerschläge. Im Gegensatz zu den ‚Off-site‘ Schäden, die außerhalb der Ackerschläge stattfinden, zeigen sich auf den Parzellen (‚On-site‘) eher ökonomische Probleme für den landwirtschaftlichen Bearbeiter. Die Bodenfruchtbarkeit wird durch den Boden- und Humusabtrag deutlich reduziert. Zusätzlich kann die obere Bodenschicht stark verschlämmt und verdichtet werden. Bei erosiven Niederschlagsereignissen können von größeren Bereichen einer Ackerparzelle das Saatgut weggespült bzw. die Pflanzen durch Sedimentation des Bodenmaterials überlagert werden. Dies bedeutet für den Landwirt hohe Ernteaufälle und erhöhten Maschineneinsatz zur Bearbeitung der betroffenen Fläche. Eine Abschätzung der On-site Folgen der Bodenerosion für verschiedene Standorte in Deutschland wurde u.a. von SCHMIDT, R. (1991) und FRIELINGHAUS et. al. (1992) vorgenommen.

Das Ausmaß dieser Schädigungen hat aber auch hinsichtlich des Bodenschutzes in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. In dem Bundesbodenschutzgesetz (1998) und der Bundes- Boden- und Altlastenverordnung (1999) wird eine Reduzierung der

Bodenerosion auf landwirtschaftlichen Flächen gefordert. Der Boden muss im Sinne des Bundesbodenschutzgesetzes BbodSchG (1998) unter anderem als Lebensgrundlage für den Menschen und als Bestandteil des Naturhaushaltes (insbesondere mit seinen Wasser- und Stoffkreisläufen) dienen. Dies kann aber nur unter einer entsprechenden Land- und Bodennutzung umgesetzt werden, die den ökonomischen und ökologischen Belangen möglichst gerecht wird. Dazu zählt vor allem die Einhaltung der rechtlichen Regelungen sowie auch das Handeln nach Leitsätzen der ‚guten fachlichen Praxis‘. Darunter sind u.a. folgende Ziele zu verstehen:

- Die Bodenstruktur ist zu erhalten oder zu verbessern.
- Bodenverdichtungen sind soweit wie möglich zu vermeiden.
- Bodenabträge sollen durch standortangepasste Nutzung verhindert werden.
- Die biologische Aktivität des Bodens und der standorttypische Humusgehalt sollen erhalten werden.

Die Durchsetzung dieser Ziele kann fast ausnahmslos vom Landwirt selbst durchgeführt werden, da alle Vorgaben direkt oder indirekt durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen erfüllt werden können. Für die standortgerechte Bearbeitung des Bodens sollten u.a. folgende Leitsätze gelten:

- Alle Maßnahmen sollten wissenschaftlich als abgesichert gelten.
- Die Bodenbearbeitung sollte dem sachkundigen Anwender in der Praxis keine Probleme bereiten.
- Die Bodenbearbeitung sollte wirtschaftlich tragbar sein.

Besonders der erste Leitsatz stellt die Wissenschaft auch in heutiger Zeit vor einige Probleme. Die Bodenerosionsforschung hat in den letzten zwei Jahrzehnten bei der Modellentwicklung große Fortschritte gemacht. Angefangen von einfachen empirischen Modellen wie der ABAG bzw. USLE (WISHMEIER 1965) bis zu physikalisch begründeten deterministischen Varianten wie dem WEPP-Modell (2000) kann der flächenhafte Bodenabtrag zufriedenstellend prognostiziert werden. Die Qualität der Modellaussagen orientiert sich dabei vor allem an dem Umfang und der Auflösung der bereitgestellten Grunddaten. Besonders die komplexeren Modelle der letzten Jahre verlangen einen nicht mehr praxisgerechten Aufwand zur Ermittlung der Basisdaten um der Realität angepasste Ergebnisse zu erhalten. Zudem muss in den meisten Fällen eine Modellkalibrierung erfolgen,

die durch Felduntersuchungen gestützt wird. Damit verbleibt die Anwendung des Modells fast ausschließlich bei Universitäten und wissenschaftlich unterstützten Behörden.

Aus heutiger Sicht zeigt sich die ABAG bzw. DABAG immer noch als geeignetes Werkzeug zur Prognose von flächenhafter Bodenerosion. Jedoch wird sowohl hier als auch bei anderen Modellen der lineare Bodenabtrag nur unzureichend erfasst. Aktuelle Simulationsmodelle wie OPUS und WEPP u.a. können den gebündelten Abfluss von Haupttiefenlinien (‘Talweg-Erosion’) ermitteln, jedoch werden keine Raumstrukturen mit ihrem abflussleitenden bzw. -verändernden Einfluss in die Berechnung integriert. Daher sind die Ergebnisse besonders im Parzellen- und Einzugsgebietsmaßstab sehr ungenau.

Die hohe Bedeutung des linearen Bodenabtrages am gesamten Erosionsgeschehen zeigen vor allem eigene Beobachtungen im Untersuchungsgebiet. Es wurde nachgewiesen, dass für den partikelgebundenen Austrag aus landwirtschaftlich genutzten Flächen die lineare Erosion als wichtigster Ursachenprozess hervorgeht. Nur hier ist die Kraft des gebündelten Oberflächenwassers so stark, dass größere Mengen von Bodenmaterial aus der Parzelle hinaus gespült werden können und von dort aus über Grabensysteme bzw. direkt in die Vorfluter gelangen. Dieses trägt erheblich zu dem Eintrag von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln bei. Aus diesem Grunde muss ein geeignetes Instrumentarium entwickelt werden, das durch genauere Prognosen die Einleitung von präventiven Maßnahmen zum Schutz des Bodens ermöglicht. Das vorliegende Modell bietet dem Bearbeiter entsprechender Planungsaufträge eine Möglichkeit der Lokalisierung von Entstehungsbereichen und -verlauf linearer Erosionformen.

1.2 Ziele und Aufbau

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur lagegetreuen Prognose linearer Erosionsformen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Das Vorhersagemodul soll als Ergänzung zu bestehenden Bodenerosionsmodellen eingesetzt werden. Die Abteilung Physische Geographie und Landschaftsökologie der Universität Hannover beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der flächendifferenzierten Erfassung von Erosionsprozessen. Im Vordergrund stand bisher die GIS-gestützte Anwendung verschiedener Modelle auf unterschiedlichen Maßstabsebenen.

Für die vorliegende Arbeit musste aus technischen Gründen eine Abkehr von den bekannten GIS-Systemen (ARC/INFO, GRASS) erfolgen, da einige Kernprobleme der

Modellberechnung nicht mit dem bestehenden Funktionsumfang gelöst werden konnten. Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist die Entwicklung eines eigenständigen Programmmoduls, das folgende Zielvorgaben erfüllen soll:

1. Wissenschaftliche Zielvorgaben

- Herleitung und Aufbau eines digitalen Raumstrukturmodells zur großmaßstäblichen Prognose von Bereichen mit linearer Erosion.
- Maßstabsübergreifende Konzeption des Modells. Das Modell kann sowohl auf Parzellenebene als auch in elementaren Einzugsgebieten angewendet werden.
- Ermittlung von Übertrittsbereichen, d.h. Prognose von Bereichen bevorzugten Nährstoff und Pflanzenschutzmittelaustrags (On-site, Off-site Schäden).
- Ausscheidung potentieller Akkumulations- und Sedimentationsbereiche.

2. Wichtige Teilschritte im Rahmen dieses Zieles

- Statistische Analyse von Zusammenhängen zwischen linearen Erosionsformen und Reliefparametern.
- Automatische Generierung von Vorgewende, Fahrspuren und Bearbeitungsrichtung auf landwirtschaftlichen Parzellen anhand des Straßen- und Wegenetzes.
- Überprüfung und Kalibrierung der Modellergebnisse anhand kartierter Erosionsaufnahmen.

3. Technische Zielvorgaben

- Umsetzung der Modellberechnungen in einem praxisgerechten eigenständigen Modul mit moderner GUI-Oberfläche.
- Erstellung und Aufbereitung der Basisdaten unter ARC/INFO. Dazu zählen u.a. Eingabe und Digitalisierung von Strukturdaten und Interpolation der Höhendaten.
- Aufbau und Integration einer Strukturelementdatenbank in das Prognosemodell.
- Praxistaugliche Ausgabe bzw. Präsentationsmöglichkeit der oberirdischen Transportpfade, Sedimentationsflächen und Übertrittsstellen.

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Entwicklung eines Modells zur Prognose linearer Erosion bzw. jede andere Modellentwicklung komplexer landschaftsökologischer Systeme und Prozesse verlangt vom Entwickler eine genaue Analyse des Betrachtungsgegenstandes. Ökologische Prozesse weisen eine so hohe Komplexität auf, dass eine realistische Abbildung des Modells mit allen Prozessen und Faktoren nicht umsetzbar ist. Als Lösung bietet sich die Erstellung eines abstrakten Modells an. Hier wird die Realität als System abgebildet. Dies geschieht, indem das Gesamtmodell in einzelne Teilkompartimente aufgeteilt bzw. in einzelne Elementbausteine übertragen wird. Bedingt durch die hohe Heterogenität der landschaftlichen Realität müssen die einzelnen Kompartimente durch vereinfachende Funktionen ausgedrückt werden. Die Anforderungen (siehe R. DUTTMANN, 1999) an den Entwickler der Modellbausteine sollten u.a. folgende Bedingungen aufweisen:

- Auswahl der relevanten Basisdaten und Festlegung des Umfangs der für die Modellierung benötigten Struktur- und Prozessgrößen.
- Bestimmung der Betrachtungsdimension des Untersuchungsgegenstandes, Erfassung struktureller und prozessualer Größen in dem entsprechenden Maßstab.
- Strukturierung des Aufnahme-, Meß- und Analysekonzeptes.
- Geeignete Auswahl von GIS, Datenbanken und Programmiersprachen (Objektorientierte Datenbanken, OOP, z.B. C++ oder Visual-Basic)

Eine besondere Situation ergibt sich aus der Anwendbarkeit des Modells in verschiedenen Maßstabsdimensionen. Die topische Dimension kann in Bezug auf das vorliegende Modell in zwei Dimensionsebenen unterteilt werden: Der Parzellen-Microskale und die Einzugsgebiets-Microskale. Beide Maßstabsbereiche unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der Strukturvariablen und der Komplexität der Wirkungszusammenhänge als auch in der zeitlichen Diskretisierung der ablaufenden Prozesse. Dem Modell müssen Basisdaten zugefügt werden, die den räumlichen und zeitlichen Ansprüchen der jeweiligen Dimension gerecht werden. Der Übergang vom kleineren zum größeren Maßstab ist mit einer Zunahme der Prozessvariablen verknüpft. Dies beschränkt die Anwendung des Prognosemodells in Parzellen auf den wissenschaftlichen Sektor, während im Einzugsgebiets-Microscale der landwirtschaftliche Bearbeiter die Datenverfügbarkeit erreichen kann (siehe Abb. 1).

Das grundlegende Konzept zur Entwicklung eines Modells zur Bestimmung linearer Abflusspfade stammt aus einem Vergleich eines Netzwerks von Fließgewässern. Durch Beobachtungen und Erosionskartierungen im Gelände wurden Regelmäßigkeiten in der

Entstehung und im Verlauf von Erosionsbahnen ermittelt. Dies zeigt vor allem die Bildung eines hydrologischen Netzwerkes von Abflussbahnen auf Parzellenebene. Das flächenhaft entstehende Oberflächenwasser wird in Kleinstformen gesammelt und gelangt über Fahr- und Saatspuren gebündelt in die hangabwärts gelegenen Bereiche. Die Hauptaufgabe zur Lösung dieser Problematik liegt in der Aufnahme und Bewertung der für den Steuerungsprozess wichtigen Raumstrukturelemente.

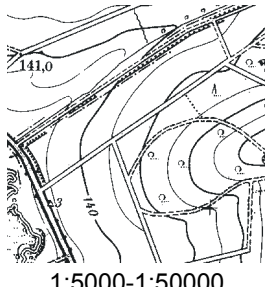
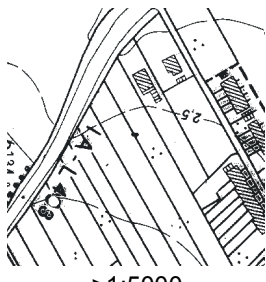
Kartenmaßstab	Dimension	Beeinflussende Strukturelemente	Ergebnisse
 1:5000-1:50000	Einzugsgebiets-Mikroskale (elementare Einzugsgebiet)	Gräben Bankette Straßen/Wege Röhren Gully Unterführungen Stauanlagen Sickerbecken	Hydrologisches Netzwerk auf Einzugsgebietsebene
 >1:5000	Parzellen-Mikroskale (Parzelle als Elementarfläche)	Saatspuren Fahrspuren Vorgewende Ackerrandfurchen Punktuelle Wasserzufuhr z.B. aus defekter Drainung Quellen, Stauwasser andere landwirtschaftliche . Bearbeitungsspuren	Abflusssystem auf Parzellen und Ackerflächen

Abb. 1: Einsatz des Modells unter verschiedenen Dimensionsebenen

Jedes Element besitzt eine differenzierte Strukturhöhe, die sich unterschiedlich in ihren Auswirkungen auf den Oberflächenabfluss zeigt. Einzelne Elemente können in ihrer Wirkung den Abfluss bündeln, stauen und abweichend von der natürlichen Gefällerrichtung in unterschiedliche Richtungen leiten. Abb. 2 zeigt eine Aufstellung der wichtigsten Hypothesen, die zur Erstellung des Modells geführt haben. Die einzelnen Hypothesen können in ihrer Funktionalität in einem absteigenden Baum gegliedert werden, da die Folgehypothese jeweils auf ihrem Vorgänger beruht bzw. eine Ergänzung dazu darstellt.

Die Eingangshypothese geht von einem natürlich unbeeinflussten Relief aus, in dem der Oberflächenabfluss aufgrund des Gefälles in idealisierten Tiefenlinien entwässert wird. Die aktuellen Verfahren, die zur Reliefanalyse erforderlich sind (‘Flowdirection’, ‘Flowaccumulation’ u.a.), werden noch ausführlich in Kapitel 4.2.1 erläutert.

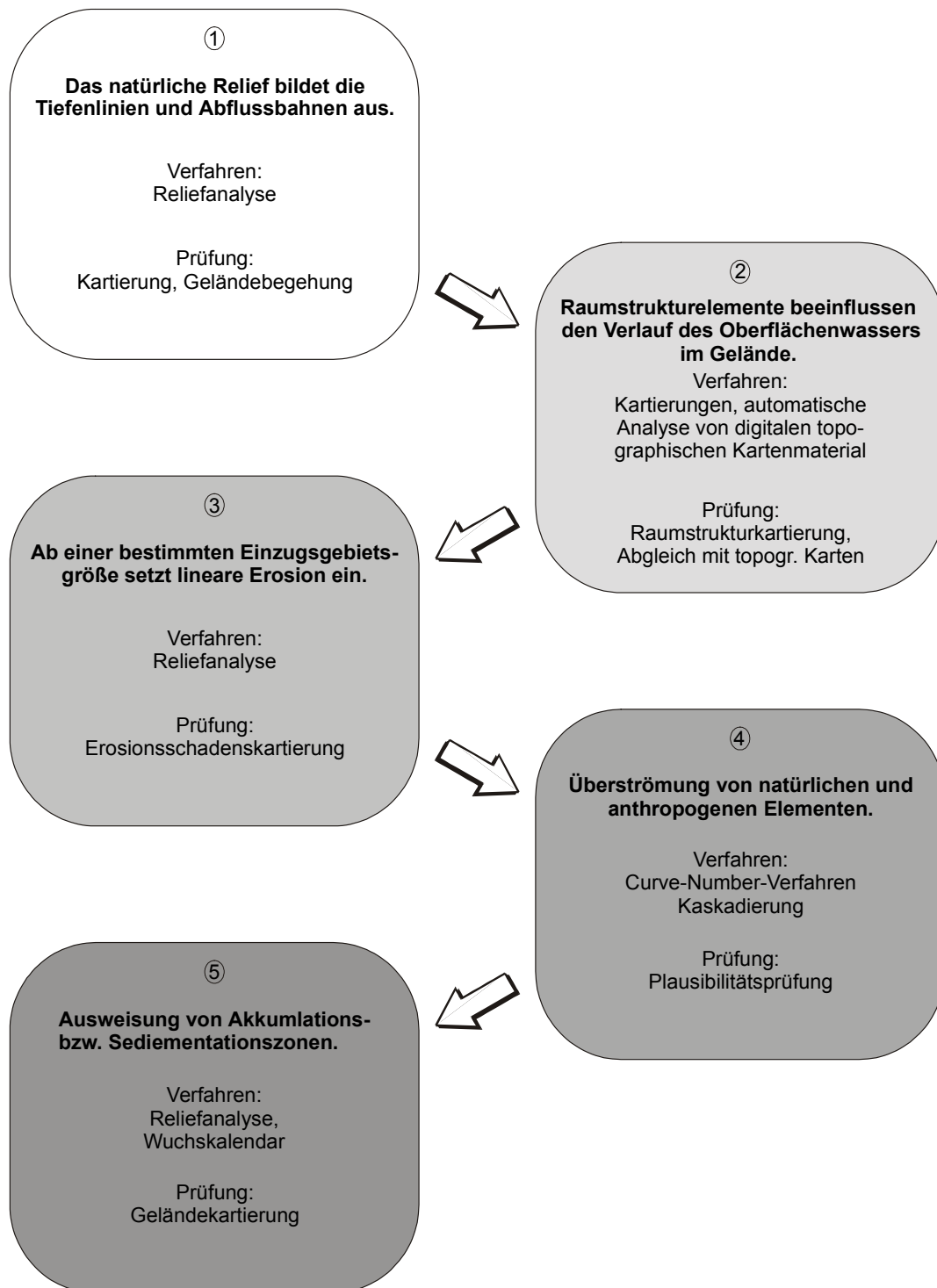


Abb. 2: Erläuterung und Abfolge der wichtigsten Hypothesen des Modells

In der folgenden zweiten Phase werden auf der Bodenoberfläche Strukturelemente mit ihrer realen Höhe bzw. Tiefe erfasst. Dadurch ergeben sich Höhendifferenzen zur Geländeoberfläche, die wiederum die Entstehung von neuen Fließwegen bewirken. Ackerrandfurchen auf landwirtschaftlichen Flächen können z.B. als Sammler und

wasserleitendes Element wirken. Als gängige bzw. neue Verfahren können Kartierungen und automatische Analysen von topographischen Karten genutzt werden. Die dritte Hypothese schließt ein Verfahren zur Abschätzung von Entstehungspunkten der linearen Erosion ein. Abhängig von der Größe des hangaufwärts liegenden EZG können Startpunkte von Rinnen bzw. Rillen ermittelt werden. Die angewendeten Verfahren bestehen aus einer Plausibilitätsprüfung, Kartierungen und Geländebegehungen. In der vierten Hypothese wird die Niederschlagsintensität mit in die Berechnung aufgenommen. In Abhängigkeit von der Quantität des oberflächlich ablaufenden Wassers können die in der vorherigen Phase integrierten Strukturelemente in ihrem Wirkungsgefüge verändert werden. Kleinere Formen wie Fahrspuren u.a. können bei größeren Abflussmengen überströmt werden und verändern somit die vorgegebene Fließrichtung trotz ihrer eintiefenden Form nur minimal. Das Curve-Number-Verfahren soll als geeignetes Instrumentarium zur Bestimmung des Oberflächenabflusses eingesetzt werden. Im letzten Schritt soll noch die Wirkung von Akkumulations- bzw. Sedimentationszonen in das Modell eingebracht werden. Auf diesen Flächen kann durch die verringerte Fließgeschwindigkeit des Oberflächenwassers das mitgeführte Bodensubstrat abgelagert werden. In Abhängigkeit von der Größe der Akkumulationszone kann die erosive Wirkung des Abtragsprozesses sogar zum Stillstand kommen.

Die genannten Haupthypothesen und Arbeitsschritte stellen das Grundgerüst der vorliegenden Modellentwicklung dar. Aufbauend auf diesen Überlegungen werden in den folgenden Kapiteln ausführlich die technischen und inhaltlichen Grundlagen ausgeführt und diskutiert.

2. Das Untersuchungsgebiet und sein Erosionsgeschehen

2.1 Geoökologische Ausstattung

Das Testgebiet befindet sich im südniedersächsischen Berg- und Hügelland. Es liegt im Einzugsgebiet der Lamme im Leinebergland ca. 40km nordöstlich von Hannover. Die untersuchte Fläche ist in drei Teilgebiete unterteilt. Das flächenmäßig größte Gebiet Ilde liegt im westlichen Ambergau. Es wird im Norden durch Ausläufer des Hildesheimer Waldes und im Süden durch die Harplage begrenzt. Die beiden anderen Teilgebiete, Wöllersheim und Kloster-Lamspringe, befinden sich weiter südlich am Rande des Heber bzw. seiner nordwestlichen Fortsetzung und zugleich in der Nähe der gleichnamigen Ortschaften.

2.1.1 Gestein und Relief

Geologisch-geomorphologisch betrachtet liegen die Untersuchungsflächen im Bereich der Mittelgebirgsschwelle. Die hier anstehenden mesozoischen Schichten sind vom oberen Jura bis in das Tertiär in mehreren Schüben von der mit Salzwanderung und Aufstieg begleiteten saxonischen Bruchschollentektonik betroffen worden. Aus den dabei entstandenen Sedimentgesteinen wurden dann vor allem im Pleistozän durch die Abtragsprozesse Schichtkämme und Schichtstufen herauspräpariert, die als bewaldete Vollformen mit offenen lößbedeckten Tälern und Becken die Landschaft gestalten. Die eigenen Untersuchungsgebiete werden von Schichtkämmen umrahmt, deren Firstbildner Gesteine des Oberen Muschelkalks sind. Im Untergrund des Ambergau-Beckens finden sich hingegen Gesteine des Unteren und Mittleren Keupers. Tertiäre Gesteine stehen zwischen den Ortschaften Evensen und Bodenburg an, wo sie sich zu einem Rücken aufwölben.

Während der Elster- und Saaleeiszeit waren der Ambergau und die umliegenden Höhenzüge nahezu vollständig vom Inlandeis bedeckt. Dessen glaziale und glaziäre Lockermaterialien finden sich im gesamten Beckenbereich und auf den unteren Hängen der umrahmenden Bergzüge. Die vor allem drenthestadialen Grundmoränenreste sind heute nur noch inselhaft vorhanden, wobei sie, ähnlich wie die tertiären und triassischen Gesteine, von Lößlehmdecken aus der Weichselkaltzeit überlagert werden.



Abb. 3: Übersichtskarte der Region Hildesheim mit den drei Untersuchungsgebieten Kloster (Lamspringe), Ilde und Wöllersheim.

Die Mächtigkeit dieser äolischen Decksedimente sowie ihrer Umwandlungs- und Umlagerungsprodukte erreicht normalerweise 0,5 - 2 m, kann aber in Leelagen (M. KLAUBE 1984) auch bis zu 6 m betragen. Die bodenerosiven Prozesse im Holozän und besonders im Mittelalter haben im Talgrund der Lamme und kleinerer Bachläufe zur Bildung von Auenlehmen geführt. Die Mächtigkeit dieser Sedimente liegt bei 0,5 - 2 m.

2.1.2 Böden

Im Untersuchungsgebiet haben sich, vor allem differenziert durch die Lage im Relief und das Ausgangssubstrat der Bodenbildung, verschiedene Bodentypen und -subtypen entwickelt. Im Folgenden soll eine kurze Auflistung der besonders weitflächig verbreiteten standorttypischen Böden und ihrer Erosionsanfälligkeit gegeben werden.

1. Pseudogley-Parabraunerde

Dieser Bodensubtyp hat die weiteste Verbreitung im Untersuchungsgebiet. Die Parabraunerden, aus denen er hervorgegangen ist, sind schluffige Böden mit hoher Bodenfruchtbarkeit, die intensive landwirtschaftliche Bearbeitung zulassen. Ihr Vorkommen erstreckt sich größtenteils auf Standorte mit Lößlehm, sie werden aber auch auf Geschiebelehm angetroffen. Im Oberboden bewirkt eine relative Schluffanreicherung eine Abnahme der Strukturstabilität. Als Folge kann der Boden leichter verschlämmen und erreicht selbst bei geringen Hangneigungen eine höhere Erosionsanfälligkeit. Die durch die Toneinlagerung im Unterboden bewirkte Pseudovergleyung kann bei überlagernden Schichten der Grundmoräne der dominante bodenbildende Prozess werden.

2. Braunerde

Im Gegensatz zu den Parabraunerden finden sich die Braunerden häufiger auf den Mittel- und steileren Oberhängen mit geringer Lößbedeckung. Auch über dem Geschiebelehm von Grundmoränen bilden sich häufig Braunerden, die dann mehr oder weniger häufig pseudovergleyt sind. Aufgrund der kleinräumigen Unterschiede in den Ausgangsgesteinen und der Schichtmächtigkeiten können keine allgemeingültigen Angaben zur Erosionsanfälligkeit der Braunerden gemacht werden.

3. Rendzinen

Bei fehlender Lößbedeckung entstehen auf den steilsten Abschnitten der Oberhänge und auf den Kuppen- und Rückenbereichen der Muschelkalk-Schichtkämme Rendzinen.

Diese Böden besitzen, je nach Horizontmächtigkeit und Kluftsystem im Untergrund, eine geringe bis sehr geringe Erosionsanfälligkeit. Der K-Faktor erreicht auf flachgründigen tonreichen Böden einen Wert von 0,3 – 0,5. Können sich die bei der Kalksteinverwitterung gebildeten Residualtone bis zu einer Mächtigkeit von 10-50cm (DUTTMANN, R.1999) entwickeln, entstehen Stauwasserhorizonte, die zur Bildung von pseudovergleyten Rendzina-Braunerden bzw. Pseudogley-Braunerden führen.

4. Kolluvien

Ebenso wie in den Niederungen der Lamme haben sich auch in den Talgrundbereichen kleinerer Bäche z.T. mächtige Auenablagerungen gebildet. Je nach Grundwassereinfluss sind darauf Vega-Gleye und Gley-Vegas entstanden. Des weiteren finden sich fluviatile Ablagerungen auch an ehemaligen Bachläufen sowie in nur periodisch durchflossenen Tiefenlinien. Im Gegensatz zu den oben genannten Böden unterliegen diese Sedimente keiner Auendynamik und bilden meistens Gley-Kolluvisole und Kolluvisol-Gleye aus.

Zur Bestimmung der Erosionsanfälligkeit von Böden wird als Standard der K-Faktor der ABAG herangezogen. Anhand der Korngrößenverteilung, organischer Substanz, Aggregatklasse und Durchlässigkeitsklasse kann die Erodierbarkeit des Bodens geschätzt werden (SCHWERTMANN, U.1990 u.a.). Besonders der hohe Schluffanteil der drei Untersuchungsgebiete im Lößhügelland lässt hier die K-Faktorwerte bis über 0,7 ansteigen (Abb. 4). Standorte mit Schluffanteilen von mindestens 70 Gew.-% weisen immer K-Faktoren von mehr als 0,75 auf. Insgesamt zeigen sich die drei Teilgebiete, bedingt durch die Bodeneigenschaften, als relativ erosionsanfällig. Jedoch wird der Gefährdungsgrad durch den Bodenerodierbarkeitsfaktor K gelegentlich auch überschätzt. Dies zeigt sich besonders bei Böden, die einen höheren Tongehalt aufweisen (DUTTMANN, R. 1999).

2.1.3 Niederschlagsbedingungen

Die an der Referenzstation Hildesheim gemessene durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge (30jährige Reihe des DWD) beträgt 715mm. Der größte Teil davon, d.h. etwa 60-65%, fällt in der Vegetationsperiode von April bis Oktober. Ein Vergleich der Werte der Referenzstation mit den gemessenen Daten der eigenen Messstationen im Untersuchungsgebiet Ilde zeigt für die Monate März bis November allerdings bei dem Niederschlag deutliche Unterschiede (Abb. 5). Da die Ilde Station nur einen einfachen Regenmesser nach HELLMANN besitzt, können für die Wintermonate keine Aussagen gemacht werden.

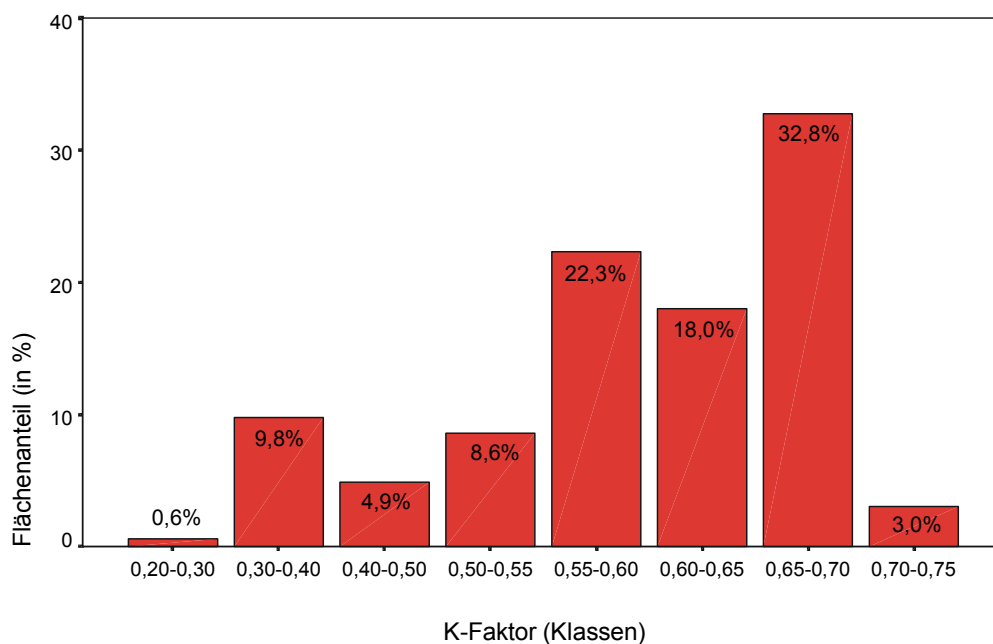


Abb. 4: Flächenanteile der K-Faktoren ackerbaulich genutzter Böden im Untersuchungsgebiet Ilde (nach Duttmann 1999)

Die Erosivität der Niederschläge lässt sich mit dem R-Faktor der USLE ausdrücken. Dieser Parameter wird u.a. von U. SCHWERTMANN (1990) zur Modellberechnung von Erosionsereignissen eingesetzt (z.B. in der ABAG). P. SAUERBORN (1994) hat flächendeckend für Deutschland den R-Faktor bestimmt. Für das zu untersuchende Gebiet ist ein Wert von 45 N/h kennzeichnend. J. VOGES (1999) konnte die R-Faktorwerte für das Untersuchungsgebiet durch Einbeziehung von Luveffekten stärker räumlich differenzieren. Während sich im Mittel eine Abnahme der R-Faktoren in den Tal- und Muldenbereichen ergibt, werden sie auf Kuppen und in Hangbereichen erhöht.

Zur Parametrisierung einzelner erosiver Niederschlagsereignisse werden von U. SCHWERTMANN u.a. (1990) zwei Möglichkeiten verwendet. Ein Regenereignis muss mindestens 10 mm Ergiebigkeit besitzen oder, falls dieser Grenzwert nicht erreicht wird, muss die maximale 30-Minuten-Intensität (I_{30}) 10 mm/h aufweisen. Die I_{30} -Intensität wird berechnet, indem die höchste 30-minütige Niederschlagsmenge in mm, bezogen auf eine Stunde, verdoppelt wird. Einzeln betrachtet werden dabei nur Niederschläge, die mindestens 6 h auseinander liegen.

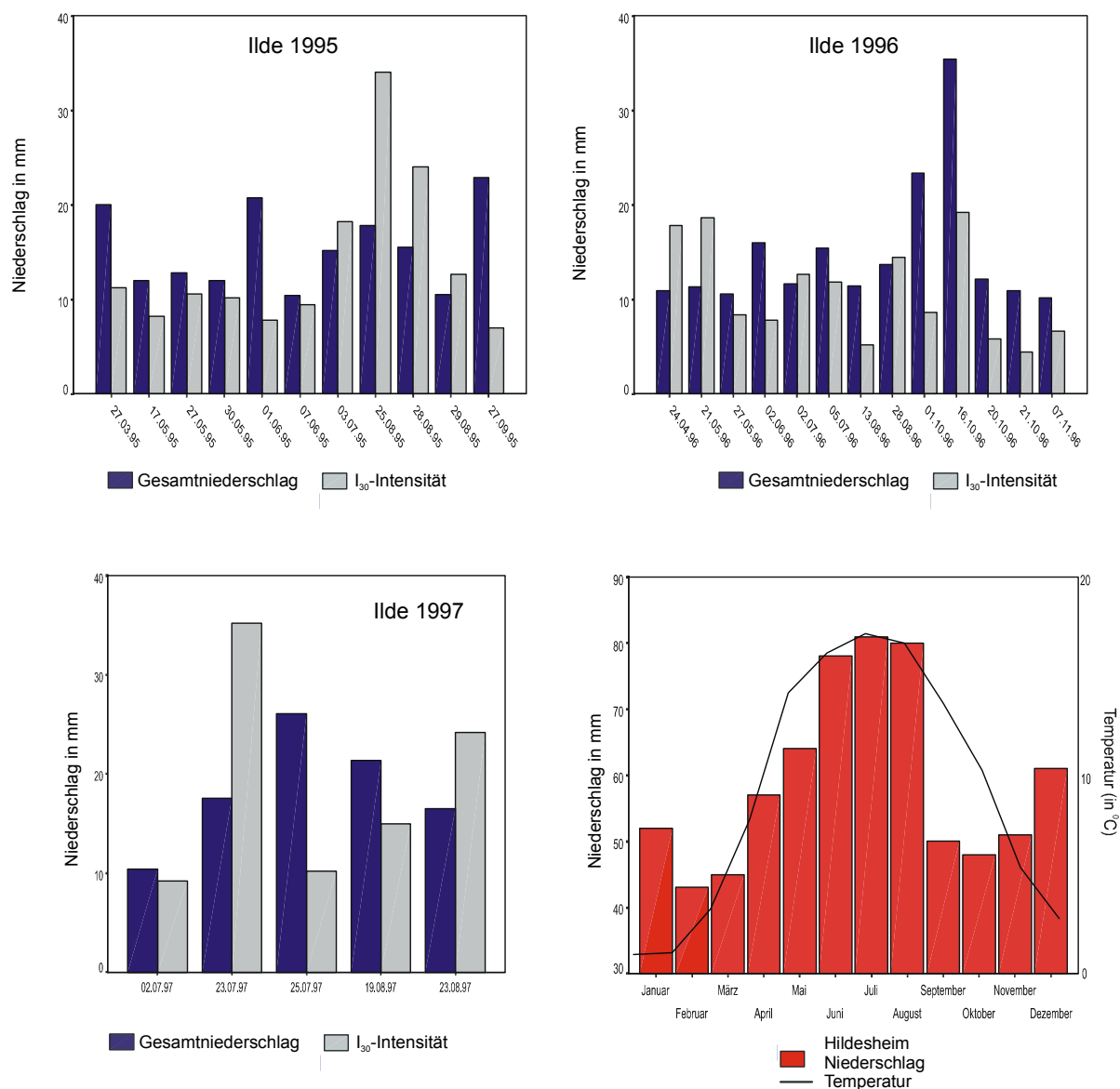


Abb. 5: Erosive Niederschläge (Gesamt und I₃₀) im Untersuchungsgebiet Ildesheim 1995-1997 und mittlere monatliche Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag der DWD Referenzstation Hildesheim (1951-1980)

Insgesamt sind in den Jahren 1995-1997 29 erosive Niederschläge aufgetreten (1995: 11 erosive Niederschläge, 1996: 13, 1997: 5). Die mittlere Anzahl von etwa 10 Ereignissen pro Jahr deckt sich annähernd mit den 12 Fällen (basierend auf 590 mm Jahresniederschlag in Ildesheim), errechnet durch die Berechnungsformel von K. AUERSWALD (1993). Diese Formel bestimmt auf der Grundlage von (in Bayern) statistisch ermittelten Werten das langjährige Mittel der Zahl der erosiven Niederschläge pro Jahr.

In Abb. 5 sind deutlich die unterschiedlichen Formen der Regenereignisse im Untersuchungsgebiet zu erkennen. In den Frühjahr- und Sommermonaten (z.B. 25.8.95 und 23.7.97) sind einige heftige regenintensive Gewitterschauer niedergegangen. Die I_{30} -Intensität lag am 25.8.95 bei 34 mm/h (Gesamtniederschlag 17.8mm/d) und am 23.7.97 bei 35.2 mm/h (Gesamtniederschlag 17.6mm/d). Dies entspricht nahezu der doppelten Gesamttagesniederschlagsmenge. Demgegenüber zeigt ein Großteil der anderen Termine eher langanhaltende Dauerniederschläge mit geringeren Niederschlagsintensitäten. Beide Niederschlagsstypen haben im Untersuchungsgebiet Erosion ausgelöst. Das Schadensausmaß der Bodenerosion zeigt keine klare Verteilung anhand der Niederschlagsform, so dass beide Formen bzw. Mischformen als erosive Erscheinungen aufgenommen wurden.

2.2 Das beobachtete Erosionsgeschehen im Untersuchungsgebiet

Das gesamte Untersuchungsgebiet zur Erfassung der linearen Erosionsformen umfasst einen Bereich von 27,8 km² und ist in drei Teilgebiete aufgeteilt. Während die Untersuchungsgebiete Kloster/Lamspringe (4 km²) und Wöllersheim (1,41km²) komplette Einzugsgebiete darstellen, umschließt das flächengrößte Gebiet Ilde (22,37 m²) mehrere Kleineinzugsgebiete. Über 71% der Gebietsfläche wird intensiv landwirtschaftlich genutzt.

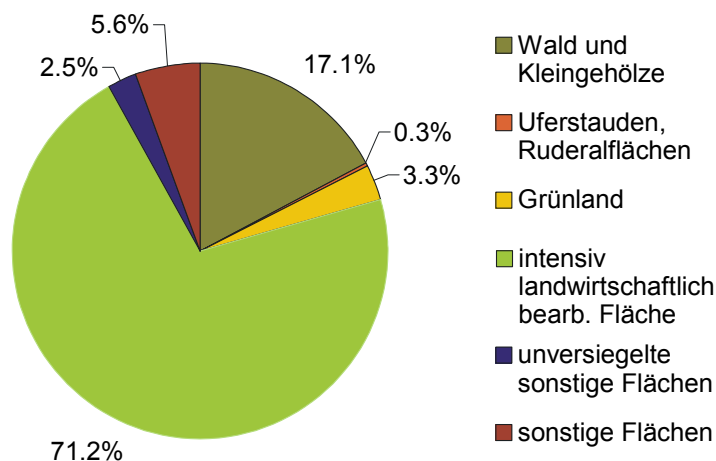


Abb. 6: Flächennutzung im Untersuchungsgebiet

Die Bewirtschaftung erfolgt dabei meist in dreijährigen Fruchtfolgen, wobei Getreideanbau einen Anteil von ca. 60% vor den Zuckerrüben mit ca. 25% erreicht. Die wichtigsten Fruchtfolgen sind:

- Winterweizen-Winterweizen-Zuckerrüben (41%),
- Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (29%),
- Winterweizen-Wintergerste-Winterraps (6%).

Bedingt durch diese Fruchtfolgen ist im Hinblick auf das Erosionsgeschehen in dem gesamten Winterhalbjahr – d.h. von der Aussaat des Wintergetreides im Oktober/November bis zu einem Erreichen des Bedeckungsgrades von 20-30% im April – mit einem erhöhten Risiko für Bodenerosion zu rechnen. Der Anbau von Zuckerrüben verschiebt das Gefährdungspotential des Bodenabtrags in den Zeitraum von Anfang März bis Mitte Juni. Diese zeitlichen Angaben entsprechen der von V. WICKENKAMP (1995) zusammengestellten Tabelle der Bodenbedeckungsgrade nach Nutzungsarten im Jahreszeitenverlauf. Das Erosionsmodell Erosion 2D/3D zeigt anhand weiterer Untersuchungen von WALTHER (1989) und MICHAEL (1994) zu phänologischen Terminen und Entwicklungsstadien in Sachsen ähnliche Verläufe der Bodenbedeckungsgrade im Vergleich zu dem Untersuchungsgebieten in Ambergau an.

Die Erfassung des Erosionsgeschehens im Untersuchungsgebiet erfolgte über Kartierungen, die nach ergiebigen Niederschlagsereignissen von Mitarbeitern des Institutes vorgenommen wurden. Für eine genauere Untersuchung der lokal zu erfassenden Regenmengen konnten die Klimamessstationen vom DWD in Bockenem und Hildesheim genutzt werden. Für die Erosionsforschung werden aber Angaben zur örtlichen Verteilung der Niederschläge benötigt. Aus diesem Grund wurden 3 Klimamessstationen im Untersuchungsgebiet Ilde aufgestellt, die mit einer 5-minütigen Messauflösung Niederschlagsmenge, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Bodentemperatur, Temperatur 2 m und Feuchte erfassen konnten. Die Stationen wurden im Abstand von ca. 500 m sowohl in Hang- als auch in Tallagen aufgestellt, um die kleinräumige Diversität der Niederschläge berücksichtigen zu können. Außerdem bestand während der Niederschlagsperioden bzw. nach Starkregen intensiver telefonischer Kontakt mit den ortsansässigen Landwirten, um eine sofortige Kartierung des Erosionsgeschehens nach einem Niederschlagsereignis zu ermöglichen. In der ersten Messperiode (1995-1996) erfolgte außer der ereignisbezogenen Kartierung noch eine kontinuierlich stattfindende monatliche Überprüfung der Bodenerosion, die jedoch im folgenden Zeitraum (1997-1998) wegen vernachlässigbarer Veränderungen der Erosionsformen eingestellt wurde.

Insgesamt wurden im Untersuchungszeitraum 260 Einzelformen kartiert. Den größten Anteil erlangten mit 53,1% (138 Fälle) die linienhaften Erosionsformen vor den flächenhaft-linienhaften mit 36,5% (95 Fälle) und den flächenhaften mit 10,4% (27 Fälle).

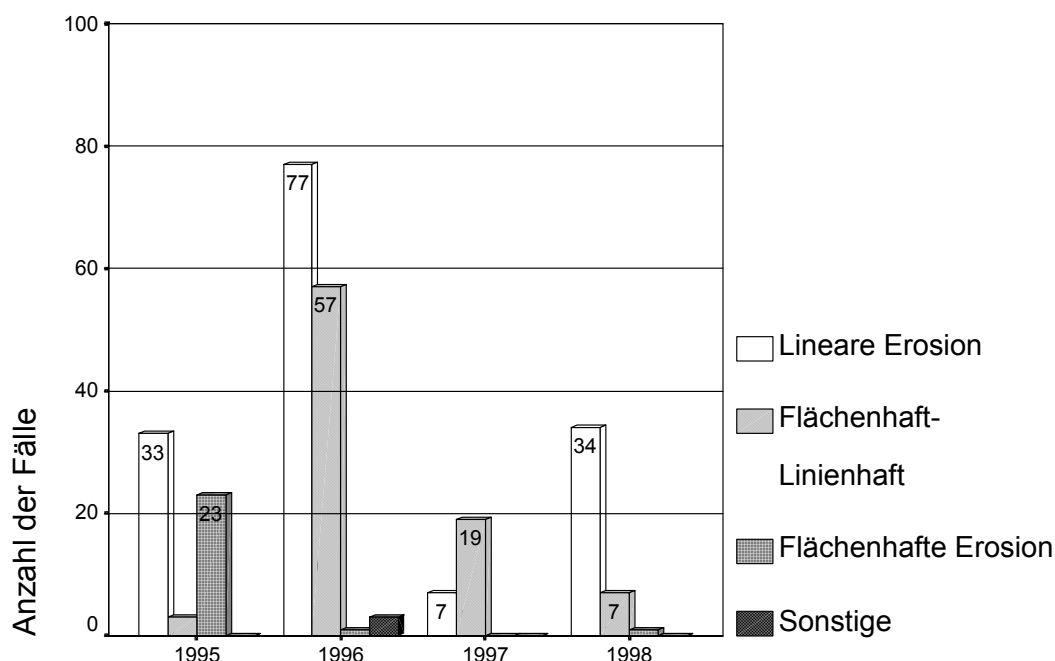


Abb. 7: Anzahl der erfassten Erosionstypen im Untersuchungsgebiet im gesamten Beobachtungszeitraum

Betrachtet man die Verteilung der Erosionsformen der einzelnen Jahre (Abb. 7)

mit den auslösenden Niederschlagsereignissen, so lässt sich für das Jahr 1995, bedingt durch das Fehlen besonders erosiver Niederschläge im Frühjahr, eine relativ ausgeglichene Verteilung der Erosionsformen erkennen.

Im Gegensatz dazu steht das Jahr 1996, in dem durch ein extremes Abtragsereignis im Februar (Niederschlagsmengen mittlerer Intensität und Schneeschmelze auf gefrorenem Boden) ein Großteil der Schäden durch linienhafte bzw. flächenhaft-linienhafte Formen verursacht wurde.

Das Jahr 1997 war durch zwei Erosionsereignisse geprägt. Im Februar erfolgte die Bildung von flächenhaft-linienhafter Erosion durch Dauerniederschläge mittlerer Intensität auf wassergesättigtem Boden. Die Erosionsformen waren fast ausschließlich im Bereich von

Fahrspuren zu finden. Das zweite Ereignis erfolgte im Mai durch einen Starkregen, der eine große räumliche Variabilität aufwies. Während die Teilgebiete Ilde und Wöllersheim nur geringfügig mit wenigen unbedeutenden Erosionsformen betroffen waren, wurden im Gebiet Kloster (Lamspringe) massive Schäden durch flächenhaft-linienhafte und linienhafte Bodenerosion hervorgerufen. Erstmals wurden, bedingt durch Off-site Effekte benachbarter Ackerschläge und gebündeltem Zufluss von Nachbarparzellen, Talwegerosion und Grabenbildung mit Tiefen von bis zu 60 cm beobachtet.

Im Gegensatz zu den vorherigen Jahren erfolgte 1998 das einzige kartierbare Ereignis im Herbst durch mehrtägigen Niederschlag auf wassergesättigtem Boden. Die meisten Ackerparzellen zeigten einen hohen Grad von Verschlammung auf. Die flächenhaft-linienhaften Erosionsformen waren fast ausschließlich in Bereichen von Saat- und Fahrspuren zu finden. Ein Großteil der linienhaften Formen entstand durch gebündelten Zufluss von hangaufwärts liegenden Straßen bzw. Wegen. Dies zeigte sich besonders im Ilder Untersuchungsgebiet, in dem 80% der erfassten linearen Erosionsformen durch gebündelten Fremdwasserzufluß entstanden waren.

2.3 Bedeutung von Wasserzufluss und Übertritten

Abb. 8 zeigt die hohe Bedeutung der Fremdwasserzuflüsse und Wasserübertritte von erosionsaktiven Parzellen in benachbarte Bereiche. Zusammengefasst lässt sich festhalten:

- Etwa 35% aller Parzellen mit linearer Erosion weisen Fremdwasserzufluss auf.
- Bei über 80% der Flächen mit linearem Abtrag und flächenhaft-linienhaftem Bodenabtrag erfolgt ein Übertritt auf hangabwärts liegende Parzellen, Straßen und Wege. Der Stofftransport führt also über die Fläche hinaus.
- Nur 8% der durch flächenhaft-linienhafte Erosion betroffenen Parzellen sind durch gebündelten Wasserzufluss betroffen. Bei den Off-site Effekten entsteht mit 28% bzw. 24% kein Wasserabfluss oder teilweise flächenhafter Wasserabfluss. Der größte Teil des Oberflächenwassers fließt gebündelt aus der Parzelle ab (44% der Fälle).

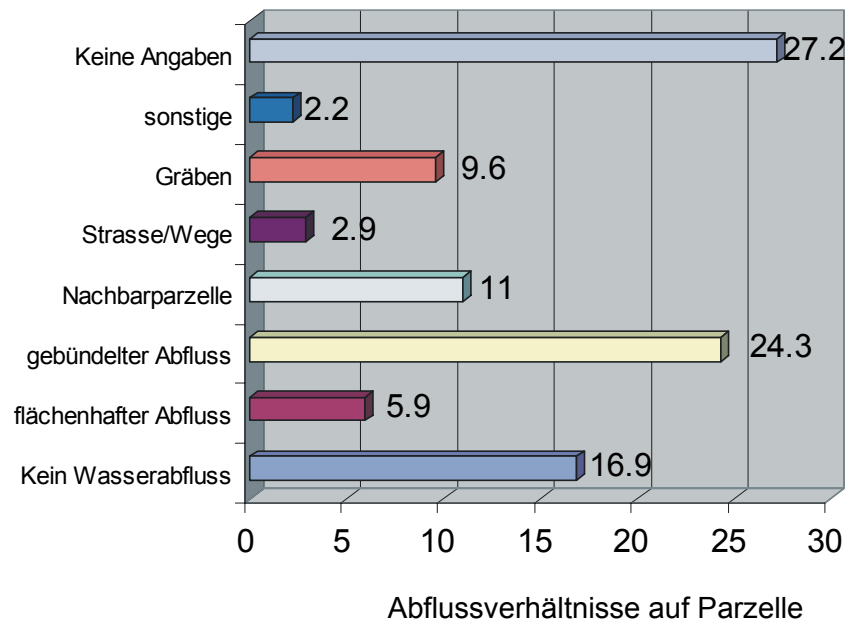
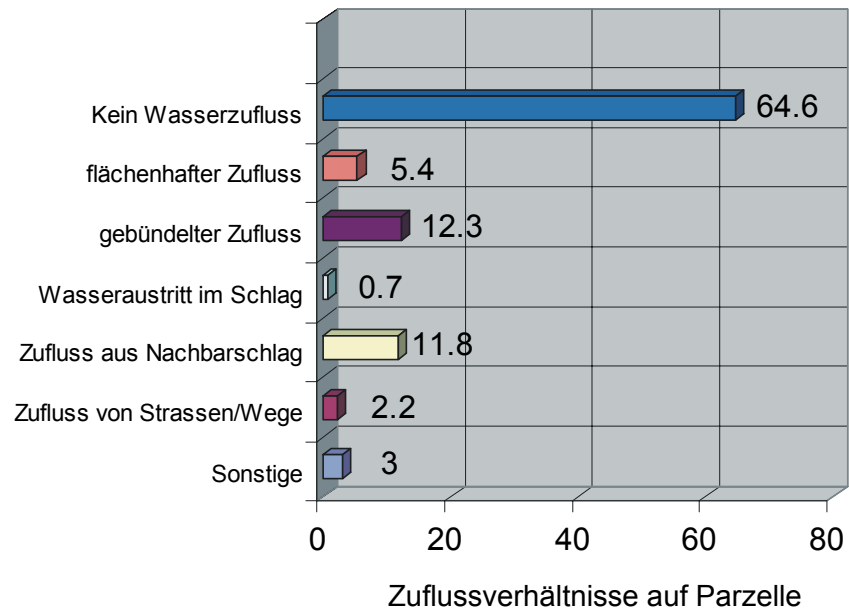


Abb. 8: Oberflächenzu- und -abflussverhältnisse auf landwirtschaftlichen Flächen

3. Wirkung der Oberflächenstrukturelemente auf die lineare Erosion

Während der vierjährigen Untersuchungsperiode hat sich gezeigt, dass die lineare Erosion der maßgebliche Prozess für den Bodenaustrag aus Ackerparzellen ist. Während durch den flächenhaften Bodenabtrag größere Mengen von Bodenmaterial innerhalb eines Schlages in Gefällerrichtung transportiert werden, verursachen Erosionsrinnen und -rillen meistens sogenannte Off-site Effekte. Hierbei führen die Leitlinien der Erosion über den Ackerrand hinaus in benachbarte Parzellen, Gräben, Gewässer, Wege und andere Flächen (z.B. Wälder, Grünland). Abb. 9 zeigt die Anteile der parzellenübergreifenden Zu- und Abflüsse auf den 260 kartierten von Erosion betroffenen Flächen.

Auffällig zeigt sich hier der hohe Anteil des gebündelten Abflusses, der in der Regel zu den hohen Bodenverlusten aus einer Ackerparzelle führt. Keinesfalls darf der Anteil des teilweise flächenhaft abfließenden Wassers unberücksichtigt bleiben. Häufig entstehen solche Formen im unteren Hangbereich, indem Rinnen- /Rillensysteme der in Falllinie bearbeiteten Parzellen in das Vorgewende gelangen.

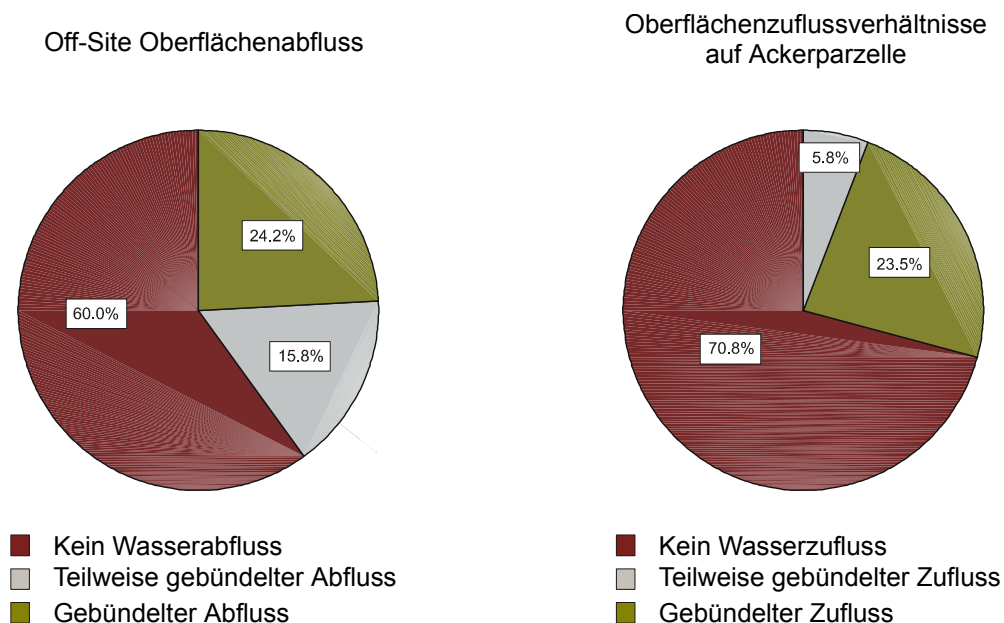


Abb. 9: Anteile der Parzellen mit teilweise gebündeltem oder gebündeltem Zu- oder Abfluss

Durch die Querbearbeitung verlieren die Erosionsformen ihre ursprünglich vorgegebene Fließrichtung und eine Auffächerung bzw. Verbreiterung der Abflussbahnen findet statt. Sofern der untere Hangbereich ein geringes Gefälle aufweist, wird die erosive Kraft des

Wassers vermindert und der Transport von Sedimenten nimmt ab. Trotzdem hat die Kartierung im Untersuchungsgebiet gezeigt, dass ein Großteil des teilweise flächenhaften Abflusses den Rückhalt von Bodenmaterial nur selten beeinflusst hat und somit ein wichtiger Prozess im Erosionsgeschehen bleibt.

Infolge des eben erläuterten Geschehens wird deutlich, daß die linearen Erosionsformen einen sehr wichtigen Anteil am Erosionsprozess besitzen. Besondere Bedeutung erlangt hierbei die Frage nach der genauen Lage der Rinnen und Rillen. Die Entstehung der Abflussbahnen richtet sich nicht nur nach den vorgegebenen Tiefenlinien, sondern wird in hohem Maße durch Raumstrukturen verändert. Als wichtigste Strukturen auf landwirtschaftlichen Flächen sind zu nennen:

1. Bearbeitungsrichtung
2. Vorgewende
3. Fahrspuren bzw. Saatspuren
4. Ackerrandfurchen
5. Sonstige Bearbeitungsspuren

Diese Strukturelemente sorgen sowohl im Parzellen-Mikroskale als auch im Einzugsgebiets-Mikroskalbereich für eine wesentliche Veränderung der Abflussleitbahnen. Die Erosionsspuren folgen weiterhin den Tiefenlinien, doch können Lageveränderungen der Rinnen und Rillen von mehreren Metern entstehen. Zudem sind die Bearbeitungsrichtung und die Fahrspuren ein wichtiger Faktor zur **Initierung** von Erosion.

Alle Raumstrukturelemente zeigen sowohl eine große Wirkung auf die Bildung von Bodenerosion als auch auf die Veränderung der Richtung des Oberflächenabflusses im Rahmen der vom Relief vorgegebenen Abflussleitlinien. Die folgenden Ausführungen dokumentieren die Wirkungszusammenhänge zwischen Erosion und wasserleitenden Bearbeitungsformen und deren Integration in das Modell.

3.1 Vorgehen bei der Auswertung

Die wichtigste Methode zur Erfassung von Bodenerosionsprozessen ist die Kartierung. Nur hier können unter realen Feldbedingungen qualitative und quantitative Aussagen über das Ausmaß von Erosion gemacht werden. Besonders die durch eine Vielzahl von Geo- und Anthropofaktoren beeinflussten Strukturelemente können präzise verortet und vermessen werden.

Aus diesem Grunde wurden im Untersuchungsgebiet Flächenkartierungen der Bodenerosion und der beteiligten Raumstrukturen vorgenommen. Die Erosions- und Raumstrukturkartierung gliedert sich in zwei Bereiche. Einerseits muss der Bearbeiter möglichst präzise die verorteten Schäden und strukturellen Geländemerkmale in eine Karte eintragen (Kartengrundlage DGK 5). Andererseits muss ein Erosionsschadensformular ausgefüllt werden, das u.a. genaue Angaben zu Transportpfaden, Bearbeitungszustand, Kulturzustand, On-site und Off-site Effekten usw. enthält (siehe Anhang Erosionsschadensformular). Hiermit ist es u.a. möglich, die Abtragsvolumina von linienhaften Bodenerosionsformen zu quantifizieren.

Die Kartierungen wurden in den ersten beiden Jahren sowohl kontinuierlich (monatlich), als auch nach wichtigen Einzelereignissen erstellt. Aufgrund der gesammelten Erfahrungen wurde im zweiten Projektzeitraum die Anzahl der Geländeaufnahmen reduziert. Nur Starkregen bzw. lang andauernde Niederschlagsereignisse haben kartierbare Veränderungen aufgezeigt, so dass Bearbeiter zur Feldaufnahme in das Untersuchungsgebiet fahren mussten. Die Kartierung wurde durch telefonischen Kontakt der im Untersuchungsgebiet ansässigen Landwirte mit Projektmitarbeitern ausgelöst. Als mögliches erosives Niederschlagsereignis wurde ein Regenschauer beschrieben, in dem mindestens ein 10-minütiges 'Hochspringen der Tropfen auf regennasser Fahrbahn' beobachtet werden kann. Zur Überprüfung wurden drei Klimamessstationen aufgestellt, die im 5min Messzeitraum Daten über Niederschlag, Feuchte, Temperatur Wind usw. aufnehmen. Die Stationen wurden in einem Rhythmus von 10-12 Tagen ausgelesen und zur weiteren Auswertung in eine Datenbank eingebunden.

Kartierung		Klimamessungen
Kontinuierlich	Ereignisbezogen	5-minütiges Messintervall Auslesen des Dataloggers der Klimastationen alle 10-12 Tage Gleichzeitig erfolgt eine Prüfung, ob neue Erosionsschäden vorzufinden sind Ergänzend werden Klimadaten vom DWD und der BBA eingesetzt
Monatliche Überprüfung der Testgebiete auf Erosion Aufnahme des Bedeckungsgrades im 14-tägigen Rhythmus über einen zweijährigen Messzeitraum	Nach jedem erosiven Niederschlagsereignis Auslösung durch Wetterbeobachtung und Kontaktaufnahme mit den ortsansässigen Landwirten	

Tab. 1: Kartierung und Messungen im Untersuchungsgebiet

3.2 Die bevorzugte Bearbeitungsrichtung und ihre Wirkung

Die Bewirtschaftungsmethoden der Landwirte im Untersuchungsgebiet richten sich hauptsächlich nach ökonomischen Aspekten des Feldfruchtanbaus, d.h. die Betriebsleiter streben eine Bewirtschaftung der Ackerparzellen mit möglichst geringem Aufwand von Maschinen- und Zeiteinsatz an. Dies hat zur Folge, dass die meisten landwirtschaftlichen Flächen in Richtung ihrer längsten Ausdehnung bearbeitet werden. Nur so kann mit sehr wenig Wendemanövern und damit geringem Zeit- und Kraftstoffaufwand die Parzelle bewirtschaftet werden. Im Untersuchungsgebiet wurden 98,3% aller landwirtschaftlichen Flächen in Richtung ihrer größten Ausdehnung bearbeitet (ausgehend von einem Längen-/Breitenverhältnis von 1:0,8). Die anderen Parzellen konnten aufgrund ungünstig gelegener Zufahrtswege nicht in dieser Richtung bewirtschaftet werden.

Aufgrund dieser Bewirtschaftungsmethoden und der Lage und Ausdehnung der Ackerschläge im Untersuchungsgebiet zeigt sich, dass 79,3% aller landwirtschaftlichen Flächen in Gefällerichtung bearbeitet werden. Nur 8,8% der Ackerflächen werden quer zur Falllinie bewirtschaftet. Der restliche Anteil sind Parzellen, die aus Mischformen bestehen bzw. der Schrägbearbeitung zugeordnet werden können.

3.2.1 Bedeutung für die Herausbildung linearer Erosion

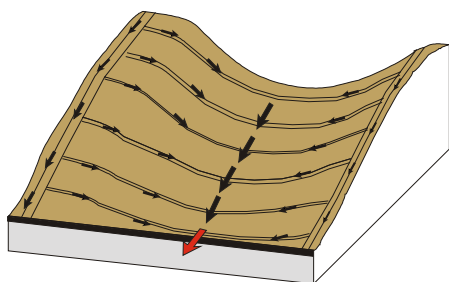
Die Bearbeitungsrichtung ist ein wichtiger Faktor für die Entstehung und Fortführung von Erosion auf einer Ackerparzelle. Besonders unter Bewirtschaftung in Gefällerichtung können schon bei Niederschlägen mit geringer Intensität kleinere Erosionsformen entstehen. Infolge der Ausrichtung vieler Strukturelemente (z.B. Fahrspuren, Ackerrandfurchen, Saatrillen und andere Bearbeitungspuren) kann das Oberflächenwasser ohne Retention direkt hangabwärts fließen. Die Erosionsschäden sind aber meistens nicht so groß, da das Wasser direkt in den Leitbahnen des Strukturelementes abgeführt wird, ohne dass der Abfluss durch zugeführtes oder gesammeltes Wasser gebündelt wird. Anders zeigt sich die Situation bei Starkregenereignissen unter Querbearbeitung. Hier wird das Wasser in den Fahr- und Saatspuren gesammelt und durchbricht in den konkav geformten Muldenbereichen den Randbereich. Es entsteht gebündelter Abfluss, der eine starke erosive Schädigung der Ackerparzelle verursacht.

3.2.2 Bedeutung für die Bestimmung der Erosionsrichtung

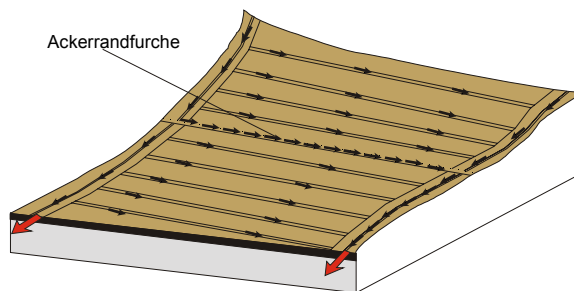
Die Bearbeitungsrichtung einer Ackerparzelle bestimmt in hohem Maße die Abflussbedingungen von Oberflächenwasser. In den Arbeiten von B. LUDWIG u.a. (1996, 1998) wird der Einfluss der Bearbeitungsrichtung und weiterer Strukturelemente auf den Oberflächenabfluss deutlich dargestellt. Besonders bei Schräg- und Querbearbeitung ergeben sich deutliche Unterschiede in der Abflussrichtung im Vergleich mit einer einfachen Betrachtung der reliefbedingten abflusswirksamen Leitbahnen. Dies zeigt sich insbesondere in den hangaufwärts liegenden Bereichen einer Ackerparzelle. Hier kann das Oberflächenwasser über mehrere Meter schräg zur Falllinie abfließen, sofern entsprechende Strukturelemente vorhanden sind (Fahrspuren, Ackerrandfurchen etc.). Dies bestätigen, trotz der geringen Anzahl von Schräg- bzw. Querbearbeitungen, die Kartierungen im Untersuchungsgebiet. Abb. 10 zeigt den Einfluss von Bearbeitungsrichtung und Fahrspuren auf eine Veränderung der natürlichen Erosionsrichtung.

3.3 Wirkung von Fahrspuren

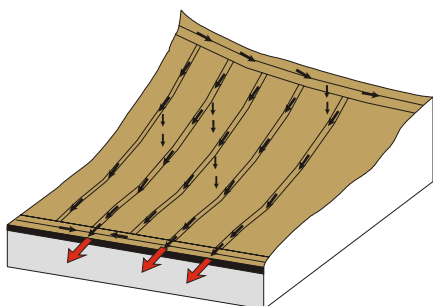
Ein weiterer wichtiger Faktor zur Herausbildung von linearen Erosionsformen sind die Fahrspuren, die von Bearbeitungsgeräten wie z.B. Schleppern und Traktoren verursacht werden. Im Untersuchungsgebiet liegt die durchschnittliche Größe der Ackerparzellen bei 4,15 ha. Um hier eine wirtschaftliche Bearbeitung zuzulassen, sind mittelgroße bis große Schlepper im Einsatz. Diese Traktoren haben, bedingt durch die Nutzung von kombinierten Saat- und Bearbeitungsgeräten, eine Mindestspurbreite von 0,3 m, können aber auch durch Verwendung von Breitbereifung Bearbeitungsspuren mit Breiten bis zu 0,9 m erreichen. Fahrspuren haben Auswirkungen auf zwei Aspekte am Erosionsgeschehen: Auf der einen Seite stellen Bearbeitungsspuren stark verdichtete Bereiche dar, die nur geringe Infiltration zulassen und damit die Bildung von Oberflächenabfluss begünstigen. Auf der anderen Seite formen Fahrspuren die Oberfläche der Ackerparzelle. Es können Tiefenlinien entstehen, die als Leitbahnen für den Oberflächenabfluss eine große Bedeutung erlangen.



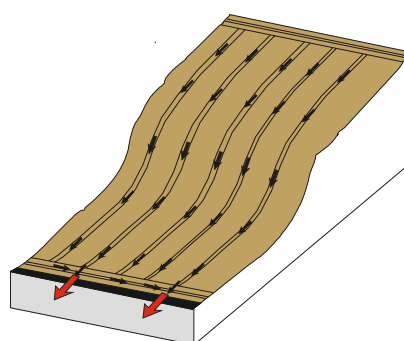
Querbearbeitung mit konkaver Talform
 Fahrspuren sammeln abfließendes Wasser. In der Mulde wird der Fahrspurrand überströmt und der Erosionsprozess verläuft in der Tiefenlinie weiter.



Quer- bzw. Schrägbearbeitung mit Ackerrandfurche
 Das Oberflächenwasser wird in den Fahrspuren bis zum Vorgewende abgeleitet. Danach erfolgt die Bündelung in der Ackerrandfurche, die den erosiven Prozess zur nächsten Parzelle leitet.



Schrägbearbeitung
 Das in den Fahrspuren abfließende Wasser kann den Fahrspurrand an flachen Stellen teilweise überströmen. Es bilden sich in Falllinie neue Leitbahnen, die in Gefällerrichtung bis zur nächsten Bearbeitungsspur führen.



Bearbeitung in Gefällerrichtung
 In den Fahrspuren fließt das Oberflächenwasser direkt in Falllinie ab. Das Vorgewende wird zum Teil direkt durchströmt, kann aber auch bei geringeren Abflussmengen die Erosionsleitbahnen quer zum Gefälle führen.

Abb. 10: Verschiedene Formen der Veränderung von reliefbedingten Abflussbahnen durch Strukturelemente (Fahrspuren, Vorgewende)

3.3.1 Bedeutung für die Herausbildung linearer Erosion

Die im Untersuchungsgebiet beobachtete Rinnenerosion ist bis auf wenige Ausnahmen an der durch landwirtschaftliche Bearbeitung entstehenden Fahrspuren gekoppelt. Auf 93% aller Flächen beginnt die Bildung von Erosionsspuren in Fahrspuren bzw. wirken die Bearbeitungsspuren als Leitbahnen für den gebündelten Abfluss. Auf den restlichen 7% der landwirtschaftlichen Flächen konnte kein Bezug zur Bildung von Initialspuren gefunden werden, da gebündelter Wasserzufluss von benachbarten Flächen erfolgte und die Fahrspur nur noch ihre Funktion als Leitbahn des abfließenden Wassers übernahm. Besonders auf den wenigen Ackerschlägen, die quer zur Gefällerrichtung bearbeitet wurden, erfolgte die Erosion als reine Talwegerosion, d.h. gebündelter Abfluss in den Tiefenlinien des Geländereiefs.

Die Verdichtung des Bodens und die Tiefe von Fahrspuren im Verhältnis zur benachbarten Geländeoberfläche wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Die wichtigsten Faktoren sind:

- Bodenfeuchtigkeitszustand zum Bearbeitungszeitpunkt
- Druckbeanspruchung der Bearbeitungsgeräte und die damit verbundene Fahrspurfläche
- Bodeneigenschaften
- Intensität der Bearbeitung

Der Bearbeitungszeitraum von landwirtschaftlichen Flächen richtet sich nach den Fruchtfolgen. Die im Gebiet häufigste Fruchtfolge ist ein dreijähriger Rhythmus, in dem zwei Jahre Winterweizen bzw. Wintergetreide und ein Jahr Zuckerrüben angebaut werden. Für alle Varianten der Fruchtfolgen bestehen zwei kritische Phasen der Bearbeitung. Das Wintergetreide wird von September bis November ausgesät, Zuckerrüben von März bis April. In beiden Aussaatzeiträumen sind die Oberböden eher feucht bis nass. Während im Herbstzeitraum relativ hohe Niederschlagsmengen fallen, ist der Boden im Frühjahr durch die Schneeschmelze noch stark wassergesättigt (siehe Abb. 5 Monatsmittelwerte der Klimastation Ilde). Des Weiteren stellt sich der Einsatz von schwerem Bearbeitungsgerät als problematisch dar. Bedingt durch die schon eingangs erwähnten Flächengrößen wird im Untersuchungsgebiet von den ansässigen Landwirten die Bearbeitung mit großen und schweren Maschinen durchgeführt. Infolge der mechanischen Beanspruchung und wegen der für die Bodenverdichtung ungünstigen Wetter- und Bodenbedingungen (Lößböden) können sich die Fahrspuren stark eintiefen. Im Untersuchungsgebiet lag die gemessene Eintiefung der Bearbeitungsspuren im Mittel bei etwa 5-6 cm. Unter ungünstigen Bearbeitungsbedingungen wurden Tiefen bis zu 10 cm festgestellt. Die entstandenen Hohlformen wirken zum Großteil als Leitbahnen für den Oberflächenabfluss, können aber auch unter Querbearbeitung als Dämme bzw. als Wasserspeicher des abfließenden Wassers wirken. Dies gilt allerdings nicht für höhere Niederschlagsmengen, da bei Starkregenereignissen die entstehenden Abflussmengen die Dämme und Speicher auffüllen und überströmen. Besondere Bedeutung für den Erosionsprozess erlangen des Weiteren die Profilvertiefungen von Schlepperfahrspuren (FULLEN et al. 1987). Durch das V-Profil der Räder entstehen je nach Fahrtrichtung, abflusssammelnde bzw. abflussteilende Strukturen (Abb. 11). Sofern in Gefällerrichtung bearbeitet wird, entsteht bei Befahrung hangaufwärts ein Profil, das einen gebündelten und konzentrierten Abfluss in der Bearbeitungsspur ermöglicht. Andererseits wirkt hangabwärts ein 'zerteilendes' Profil, das das Oberflächenwasser in den Zwischenspurbereich leitet.

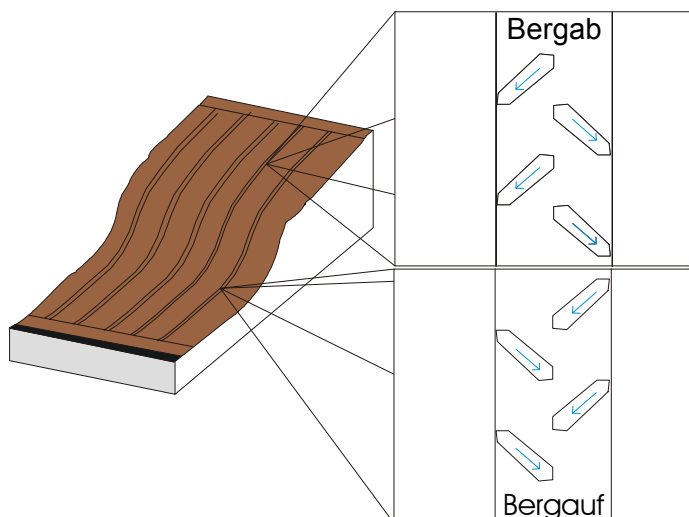


Abb. 11: Bedeutung von Fahrspuren für die Entwicklung von Initialerosionsrinnen. Bündelung des Oberflächenwassers in Reifenprofilen von landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen

3.3.2 Bedeutung für die Bestimmung der Erosionsrichtung

Auf jeder Ackerparzelle entsteht während der Bearbeitung ein gleichmäßiges System von Fahrspuren. In der Hauptbearbeitungsrichtung entstehen parallel verlaufende Fahrspuren, deren Abstand von der Breite der eingesetzten Maschinen abhängig ist. Im Untersuchungsgebiet wurde ein mittlerer Abstand der Bearbeitungsspuren von 16 m ermittelt. Im Bereich des Vorgewendes liegen die Fahrspuren jeweils quer zur Falllinie. Um die Wirkung der Bearbeitungsspuren auf die lineare Erosion betrachten zu können, muss eine Verknüpfung mit der Bearbeitungsrichtung erfolgen. Dazu erfolgt eine Aufteilung der Hauptbewirtschaftungsrichtungen in die drei Klassen: Falllinie, Schräg- und Querbearbeitung.

1. Wirkung von Fahrspuren bei Bearbeitung in Falllinie

Diese Bewirtschaftungsart weist die größten Erosionsrisiken auf. Die verdichteten Fahrspuren leiten das sich schnell bildende Oberflächenwasser direkt hangabwärts ab. Die Bildung von Rinnen und Rillen kann dabei auch bei geringen Niederschlagsereignissen einsetzen. Das Wasser wird in der Bearbeitungsspur bis zum Vorgewende geführt. Hier findet, sofern Hangneigung und der Oberflächenabfluss gering sind, Sedimentation statt. Andererseits wird bei hohen Abflussmengen das Vorgewende trotz Querbearbeitung durchbrochen und Erosionsmaterial gelangt aus der Ackerparzelle. Obwohl sich schon bei geringen Niederschlägen kleine Rillen bilden können, vertiefen sich die Erosionsformen

langsamer als im gelockerten Bodenmaterial. Zudem fließt bei Bearbeitung in Falllinie nur direkt auf die Fahrspur gefallener Niederschlag, ergänzt durch Wasser und Bodenmaterial, das durch den „Splash“- Effekt eingetragen wird, ab. Die Bearbeitungsspur fungiert nur in geringem Maße als Sammler für das Wasser und erreicht nicht so große Abflussmengen wie in den beiden anderen Bearbeitungsmethoden. Diese Form war in den kartierten Zeiträumen im Untersuchungsgebiet am häufigsten zu beobachten.

2. Wirkung von Fahrspuren bei Bearbeitung schräg zur Falllinie

Der Verlauf der Fahrspuren schräg zur Falllinie kann, abhängig von dem Oberflächenabfluss, verschiedene Effekte auf die Lage und Bildung von Erosionsspuren haben. Kleine Niederschlagsereignisse mit geringen Abflussmengen leiten das Oberflächenwasser in den Fahrspuren bis zum Vorgewende. Dort fließt es in den Randbereich bzw. in die im rechten Winkel liegenden Bearbeitungsspuren bis zum Parzellenrand. Die Abflussmenge des Oberflächenwassers wird dabei durch Zulauf von den hangaufwärts liegenden Flächen erhöht.

Bei Starkregenereignissen fließt das Oberflächenwasser nur teilweise in den Fahrspurbereichen. Wird ein größeres Wasservolumen in die Bearbeitungsspur geleitet, als der Fahrspurquerschnitt fassen kann, überströmt es den Randbereich und bildet eine neue hangabwärts liegende Erosionsspur. Bei jedem weiteren Kreuzen einer Fahrspur erfolgt entweder ein direktes Überströmen und damit ein weiterer Abfluss in Falllinie, oder die Rinne folgt für unbestimmte Zeit der Bearbeitungsspur, bis ein weiterer Übertritt aus der Spur erfolgen kann.

3. Wirkung von Fahrspuren bei Bearbeitung quer zur Falllinie

Prinzipiell stellt die Querbearbeitung von landwirtschaftlichen Flächen die günstigste Bearbeitungsmethode dar, um Erosionsschäden möglichst gering zu halten. Doch muss auch hier die Wirkung zwischen geringen und großen Intensitäten von Niederschlagsereignissen unterschieden werden. So sammelt sich das Oberflächenwasser bei geringen Abflussmengen in der Fahrspur. Die Fahrspur wirkt als Retentionspeicher und kann die Bildung von Erosionsspuren vollständig vermeiden. Andererseits wirkt bei Starkregen die Bearbeitungsspur als Sammler des zufließenden Wassers. In Mulden bzw. leicht gewölbten Bereichen können die Wassermassen nicht mehr zurückgehalten werden und ein Durchbrechen der Fahrspurränder hangabwärts findet statt. Unter diesen Bedingungen können besonders große und tief einschneidende Erosionsformen wie Gräben entstehen ('Talwegerosion'). Im Untersuchungsgebiet wiesen entsprechende Formen Tiefen von bis zu 60 cm und Breiten bis 80 cm auf.

3.4 Wirkung von Vorgewende

Auf jeder Ackerparzelle befindet sich im Kopf- und Fußbereich das Vorgewende. Diese Bereiche entstehen, wenn nach der Bearbeitung der Hauptfläche die Wendebereiche des Schleppers eingesät werden. Die Ausdehnung dieser Fläche entspricht meistens der ein- bis zweifachen Bearbeitungsbreite (ca. 15-30 m). Das Vorgewende weist im Unterschied zur Hauptanbaufläche eine um 90 Grad versetzte Bearbeitungsrichtung auf. Zudem findet sich im Grenzbereich der Areale eine Furche, die durch die maschinelle Bewirtschaftung entstehen kann. Die Tiefe variiert je nach eingesetzten landwirtschaftlichen Gerät um ca. 2-10 cm.

Das Vorgewende hat, je nach Lage zum Gefälle, die gleiche erosive Wirkung wie die normal bearbeitete landwirtschaftliche Fläche. Das wichtigste Merkmal jedoch zeigt sich in der Eigenschaft als Sammler des von der Ackerparzelle ankommenden Oberflächenwassers (B. LUDWIG et. al. 1995). Hier können die in Saat- und Fahrspuren entstandenen Rillen zusammengeführt werden und eine Bildung von gebündeltem Abfluss ermöglichen, mit der Folge von erheblichem On-site als auch Off-site.

Bedingt durch die Lage des Vorgewendes quer zur Hauptanbaufläche können sich verschiedene Änderungen der Transportbahnen ergeben. Abhängig von der Bearbeitungsrichtung und der Menge des Oberflächenabflusses kann die Richtung der Erosionsleitbahnen an die des Vorgewendes angepasst werden, häufig erfolgt jedoch auch ein Durchbrechen des Vorgewendes in der Gefällerrichtung.

3.5 Wirkung von sonstigen Strukturelementen

Außer den zuvor beschriebenen Strukturelementen, die auf jeder bewirtschafteten Parzelle vorhanden sind, finden sich häufig Gräben (Entwässerungsspuren) und Barrieren, die vom landwirtschaftlichen Bearbeiter zur Vermeidung von Erosionsschäden erstellt werden. Des Weiteren fanden sich im Untersuchungsgebiet auf Ackerparzellen Gullys, Grünstreifen und kleinräumige Testflächen für Saatproben. Die Auswirkungen auf die Erosion bzw. die Veränderung der Erosionsrichtung hängt hauptsächlich vom Höhengradienten der Struktur zur umliegenden Fläche ab. Infolge der geringen Verbreitung dieser Strukturen auf den drei Testflächen waren die Auswirkungen hinsichtlich des Erosionsgeschehens als marginal einzustufen.

3.6 Einfluss von Raumstrukturelementen und Relief auf die lineare Erosion. Ein Vergleich

Die Entstehung und Bildung von linearen Erosionsspuren wird durch die Faktoren Relief und Oberflächenzustand der Ackerparzelle in erheblichem Maße geprägt. Die in einfachen hydrologischen Modellen anhand von morphometrischen Daten berechneten Abflussbahnen in Tiefenlinien können nur unzureichend die reale Situation nach einem Erosionsereignis wiedergeben (siehe reliefbedingte Abflussbahnen mit kartierten Erosionsspuren in Abb. 10). Hier zeigt sich, dass zur Zeit erhebliche Defizite bei der Parametrisierung des Landoberflächenzustandes für die Modellierung der Abflussentstehung vorhanden sind (A.BRONSTERT ET AL. 1998). Als ein wesentliches Problem sind hier die stark nichtlinearen Effekte kleinräumiger Oberflächenstrukturen auf den Oberflächenabfluss zu nennen. Daher ist eine Parametrisierung von Raumstrukturelementen unumgänglich. Nur so können abflussfördernde oder abflusshemmende Effekte dieser Strukturen in ein Modell eingehen. Tab. 2 zeigt die Wirkungsrelevanz von einzelnen Elementen auf die Veränderung von Erosionsrichtung, Überströmungspotential und abflusssammelnde Eigenschaften.

Die Informationen in Tab. 2 gehen wie folgt in das Modell ein:

1. Die mittlere Strukturtiefe wird als reale Höhendifferenz eines Raumstrukturelementes zur umgebenden Geländeoberfläche ermittelt. Die Ergebnisse in der Tabelle sind aus Messungen und Kartierung im Untersuchungsgebiet ermittelt worden. In Kombination mit der Berechnung des Oberflächenabflusses durch das Curve-Number Verfahren kann die Möglichkeit des Überströmens eines Elementes ermittelt werden.
2. In der zweiten Spalte wird der Einfluss von unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten auf die Wirkung von Strukturelementen zur Veränderung der Abflussrichtung angezeigt. Bei hohen Abflussmengen des Oberflächenwassers werden kleinere Strukturelemente wie z.B. Saatspuren und Fahrspuren überströmt. Die Wirkung der Formen wird deutlich reduziert. Das Wasser kann nahezu ungestört in Gefällerrichtung abfließen. In der Tabelle wird der Einfluss von einem Regenschauer normaler Intensität und einem Niederschlagsereignis mit großer erosiver Wirkung unterschieden.
3. Die Veränderung der Erosionsrichtung wird in der dritten Spalte aufgeführt. Darunter ist die Abweichung der Fließrichtung zur natürlichen Gefällerrichtung zu verstehen. Hierbei ist nicht nur die Größe eines Strukturelementes wichtig, sondern auch die Lage und Ausrichtung einer Form. Das Vorgewende z.B. zeigt trotz seiner geringen Höhendifferenz von ca. 3-5 cm eine große Wirkung auf die Veränderung der Erosionsrichtung. Dieses erstaunliche Phänomen begründet sich anhand folgender Effekte: Das Vorgewende liegt

größtenteils in den flacheren unteren Hangbereichen, so dass die Abflussgeschwindigkeit des Oberflächenwassers nicht so groß ist. Dadurch wird ein Überströmen des Strukturelementes häufig vermieden. Weiterhin liegt das Vorgewende immer quer zu der Hauptbearbeitungsrichtung und den Fahrspuren. Daraus ergibt sich eine Ablenkung der Erosionsrichtung um 90 Grad.

4. Die Bündelung des Oberflächenabflusses stellt ein großes Problem in Hinblick auf die Bildung linearer Erosionsformen dar. Die verschiedenen Strukturelemente fördern das Sammeln des abfließenden Wassers in unterschiedlicher Intensität. Besonders tiefe linienhafte Formen wie z.B. Ackerrandfurchen und Gräben können das Oberflächenwasser gut bündeln. In den Endbereichen ist vielfach mit großen Schäden zu rechnen (Bildung von Rinnen und Gräben).
5. Die vorletzte Spalte zeigt die Möglichkeit der Beeinflussung der Strukturelemente durch den landwirtschaftlichen Bearbeiter auf. Während bei Saatspuren und Vorgewende keine Veränderungsmöglichkeiten bestehen, können viele Bewirtschaftungsmethoden (z.B. Bearbeitungsrichtung u.a.) durch den Landwirt verändert und hinsichtlich des Bodenschutzes verbessert werden.
6. In der letzten Spalte befinden sich Angaben zur Form des Strukturelementes. Diese Angaben dienen zur internen Verarbeitung innerhalb des Modells.

Strukturelement	Mittlere Struktur-tiefe	Überströmung (normal/stark)	Veränderung der Erosionsrichtung (normal/stark)	Bündelung des Abflusses	Beeinflussung durch den Landwirt	Form
Saatspur	2-3 cm	Ja/ja	Nein/nein	Nein	Nein	Linie
Fahrspur	5-6 cm	Nein/ja	Ja/ja	Ja	Teilweise (Struktur-tiefe)	Linie
Ackerrand-furche	15-20 cm	Nein/nein	Ja/ja	Ja	Ja	Linie
Vorgewende	3-5 cm	Nein/ja	Ja/ja	Ja	Nein	Fläche
Bearbeitungs-richtung	-	Ja/ja	Nein/ja	Ja	Ja	Fläche
Gräben, Barrieren	15-30 cm	Nein/nein	Ja/ja	Ja	Ja	Linie
Gully	>100 cm	Nein	Ja/ja	Nein	Ja	Punkt
Kontourstreifen	4-8 cm	Nein/ja	Ja/ja	Nein	Ja	Linie/ Fläche
Schlaggrenze	5-12 cm	Nein/ja	Ja/ja	Nein	Ja	Linie
Grünstreifen	4-5 cm	Nein/ja	Nein/nein	Nein	Ja	Linie/ Fläche

Tab. 2: Relevanz von Raumstrukturen auf Überströmungsmöglichkeit der Elemente, Erosionsrichtung, Bündelung und Beeinflussungsmöglichkeit durch die Bodenbearbeitung. Normal: Niederschlag mittlerer Intensität; Stark: Starkregenereignis.

3.7 Einfluss von Relief und Nutzung auf die Ausbildung linearer Erosionsformen

3.7.1 Häufigkeitsverteilung von Rillen-Rinnenquerschnitten in Abhängigkeit von Relief und Nutzung

Zur Entwicklung einfacher empirischer Methoden zur Bestimmung von signifikanten Parametern zur Einschätzung des Erosionsausmaßes unter verschiedenen topographischen Verhältnissen und nutzungsbedingten Bewirtschaftungsmaßnahmen muss eine statistische Analyse von abhängigen Variablen erfolgen. Hierbei sollte beachtet werden, dass singuläre Abhängigkeiten verschiedener Parameter zunächst sinnvolle Aussagen bieten können, jedoch zum Großteil mehrere Faktoren in Kombination zur Charakterisierung linearer Abflussbahnen erforderlich sind.

Auf der Grundlage der 4-jährigen Kartieraufnahme soll eine Häufigkeitsanalyse und Typisierung von signifikanten Einflussfaktoren erfolgen. Hierbei werden **alle** Erosionsformen in die statistische Grundmenge eingebracht, unabhängig von der Art des auslösenden Ereignisses, d.h. sowohl die durch Starkregen als auch die durch Dauerniederschläge hervorgerufenen Schädigungen der Ackerparzellen. Abb. 12 zeigt die Häufigkeiten aller kartierten Formen im Untersuchungsgebiet auf.

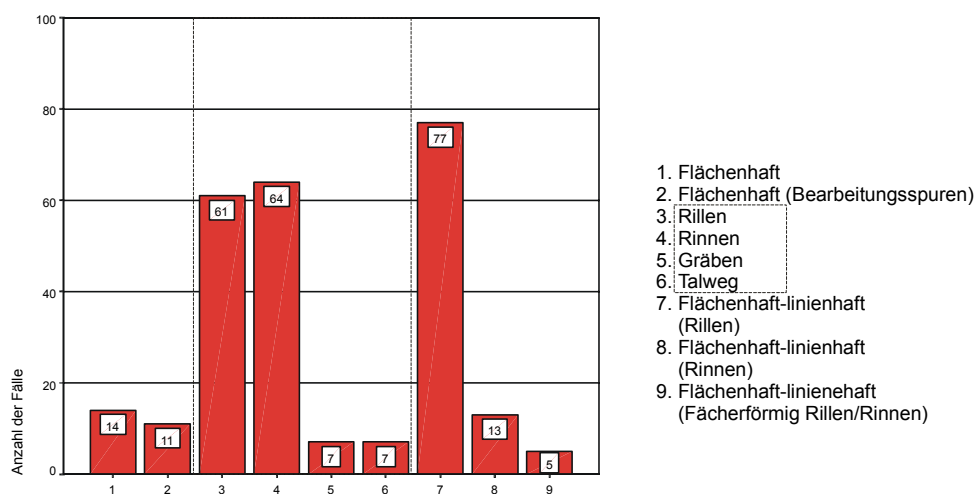


Abb. 12: Anzahl und Verteilung der Erosionsformen im Untersuchungsgebiet

Deutlich ist der hohe Anteil von Rinnen und Rillen am gesamten Erosionsgeschehen zu erkennen. Die häufigste Erosionserscheinung ist mit 77 Fällen dem flächenhaft-linienhaften Bodenabtrag zuzurechnen. 37% dieser Fälle haben im gesamten Verlauf maximale Tiefen

von über 10 cm erreicht. Mit 64 (Rinnen) bzw. 61 (Rillen) Fällen folgen die Einzelformen. Relativ gering zeigt sich der Anteil von Gräben und Talwegerosion, da die Eintiefung des Erosionsprozesses durch die sehr strukturfeste und komprimierte Pflugsohle auf den meisten Parzellen begrenzt wurde.

Die insgesamt geringe Anzahl der kartierten und vermessenen Erosionsformen erlaubt keine konkreten Aussagen über Abhängigkeiten und Einflüsse der nachfolgenden Parameter. Besonders die sehr heterogenen Bedingungen bei der Entstehung und während des Verlaufs des Erosionsprozesses erschweren die Entwicklung aussagekräftiger Abhängigkeiten und Relationen. Die folgenden Aussagen sind als **Tendenzen** zu verstehen. Erst eine Erweiterung des Untersuchungszeitraumes auf 8-10 Jahre könnte gesicherte Ergebnisse hinsichtlich des Erosionsgeschehen liefern.

3.7.2 Einfluss von Hangneigung auf die Entstehung unterschiedlicher Erosionsformen

Anhand des Datenpools soll der Einfluss von Neigung auf die Entstehung verschiedener Erosionsformen auf Parzellenebene überprüft werden. Dazu wurden alle kartierten linearen Elemente in zwei Verfahren auf ihre Hangneigung untersucht. Zum einen wurde der gesamte Verlauf der Erosionsspur in Bezug auf das Gefälle hin ausgewertet. Zum anderen wurde der Entstehungsbereich der Erosionsform untersucht. Hierbei wird die Hangneigung in einem Gebiet hangaufwärts des Entstehungspunktes ausgewertet, das einem Radius der zweifachen Auflösung des DGM5 entspricht (Originaldaten 12,5 m, das bedeutet ein Radius von 25 m). Diese Methode soll ausschließlich den Anfangsbereich der Entstehung linearer Formen untersuchen.

	Hangneigung (in °) der kompletten Erosionsform		
	Minimum	Maximum	Mittelwert
Rillen (2-10 cm)	0.17	10.75	3.73
Rinnen (10-40 cm)	1.33	7.39	3.47
Gräben (>40 cm)	1.14	4.84	3.35
	Hangneigung am Entstehungspunkt der Erosionsform		
Rillen (2-10 cm)	0.573	11.420	4.24
Rinnen (10-40 cm)	1.70	9.79	4.36
Gräben (>40 cm)	2.11	9.10	4.56

Tab. 3: Hangneigung der verschiedenen Erosionsformen

Tab. 3 zeigt die ermittelten Hangneigungen der im Untersuchungsgebiet kartierten Erosionsformen. Im Gegensatz zur allgemeinen Annahme, dass eine größere Hangneigung ausschlaggebend für die Bildung tieferer Abtragsformen verantwortlich sei, zeigt die Auswertung ein anderes Ergebnis. Gerade die kleineren Erosionsformen sind auf steileren Hangstücken zu finden. Dahingegen sind Gräben eher in flacheren Muldenbereichen zu finden (Talwegerosion). Nur hier ist eine ausreichende Menge an Oberflächenabfluss vorhanden um Formen zu schaffen, die bis zur Pflugsohle reichen.

Betrachtet man nur den Entstehungsbereich der Erosionsform, zeigen sich deutlich größere Hangneigungen (Zunahme um 0.51-1.21 Grad) als bei der restlichen Fläche. Dies zeigt sich sowohl bei den minimalen als auch bei den maximalen Werten. Besonders auffällig ist eine stärkere Vertiefung der Erosionsformen bei Zunahme des Gefälles. Durch die steilere Lage können größere Mengen von Oberflächenwasser der Erosionsform zugeführt werden; die erosive Kraft des schneller fließenden Wassers erodiert den Ackerboden .

Um den Einfluss der Einzugsgebietsgröße (EZG) auf die Erosionsformen untersuchen zu können, wurde in den Untersuchungsgebieten Lamspringe und Wöllersheim die EZG über hydrologische Abflussverfahren ermittelt. Hierbei zeigt sich, dass das Gefälle im Gegensatz zur Einzugsgebietsgröße nur eine untergeordnete Rolle spielt. Tab. 4 zeigt die deutlichen Unterschiede der einzelnen Erosionsformen in Bezug auf die Oberflächenwasser anliefernden Gebietsgrößen auf.

	Einzugsgebietsgröße von linearen Erosionsformen		
	Minimum	Maximum	Mittelwert
Rillen (2-10 cm)	4256 m ²	75124 m ²	42884 m ²
Rinnen (10-40 cm)	37820 m ²	1,01 km ²	0,26 km ²
Gräben	0,376 km ²	0,87 km ²	0,58 km ²

Tab. 4: Einzugsgebietsgröße unterschiedlicher Erosionsformen im Untersuchungsgebiet Lamspringe und Wöllersheim

Während der Unterschied der EZG zwischen Rillen und Rinnen noch sehr groß ist, wird bei Gräben der Spitzenwert der Rinnen (1,01 km²) nicht erreicht. Dies hängt größtenteils mit dem Erreichen der Pflugsohle zusammen. Die mittlere Tiefe der Pflugsohle beträgt im Raum Kloster ca. 40 cm. Dadurch wird durch den Erosionsprozess selten eine größere Tiefe zur Ausbildung von Gräben erreicht. Trotzdem zeigt die Tabelle in einigen Bereichen deutliche

Tendenzen auf und bestätigt den wichtigen Einfluss der Einzugsgebietsgröße auf die Entstehung unterschiedlich ausgeprägter Erosionsformen.

3.7.3 Die Tiefe der linienhaften Erosionsformen

Die Tiefe der linienhaften Erosionsformen unterliegt einer normalen Verteilung. Die vier wichtigsten maximalen Vorkommen sollen hier kurz erläutert werden (Abb. 13). Im Bereich bis 2 cm Tiefe befinden sich größtenteils Erosionsspuren, die eine verästelte Struktur aufweisen und dem flächenhaft-linienhaften Bodenabtrag zuzuordnen sind. Darauf folgt der zahlenmäßig größte Teil aller Abtragsformen, die Rinnen. Hier werden Tiefen von 8-12cm erreicht. Hierzu zählen vor allem Eintiefungen, die sich in Fahr- und Saatspuren gebildet haben. Viele Einzelformen auf Ackerparzellen ergänzen dabei den Übergang von der Rille zur Rinne. Der Formenschatz der Rinnen wird durch ein breites Spektrum zwischen 14 und 21 cm Tiefe geprägt. Die Länge einzelner Abtragspfade kann mehrere hundert Meter betragen. Die letzte große Gruppe von Einzelformen erreicht eine Tiefe von 30-40 cm. Im gesamten Untersuchungsgebiet stagnierte die Eintiefung der Abflusswege bei Erreichen der Pflugsohle. Der Bodenhorizont ist auf dieser Höhe so stark verfestigt und verhärtet, dass er als natürliche Tiefenbegrenzung des erosiven Prozesses gelten kann.

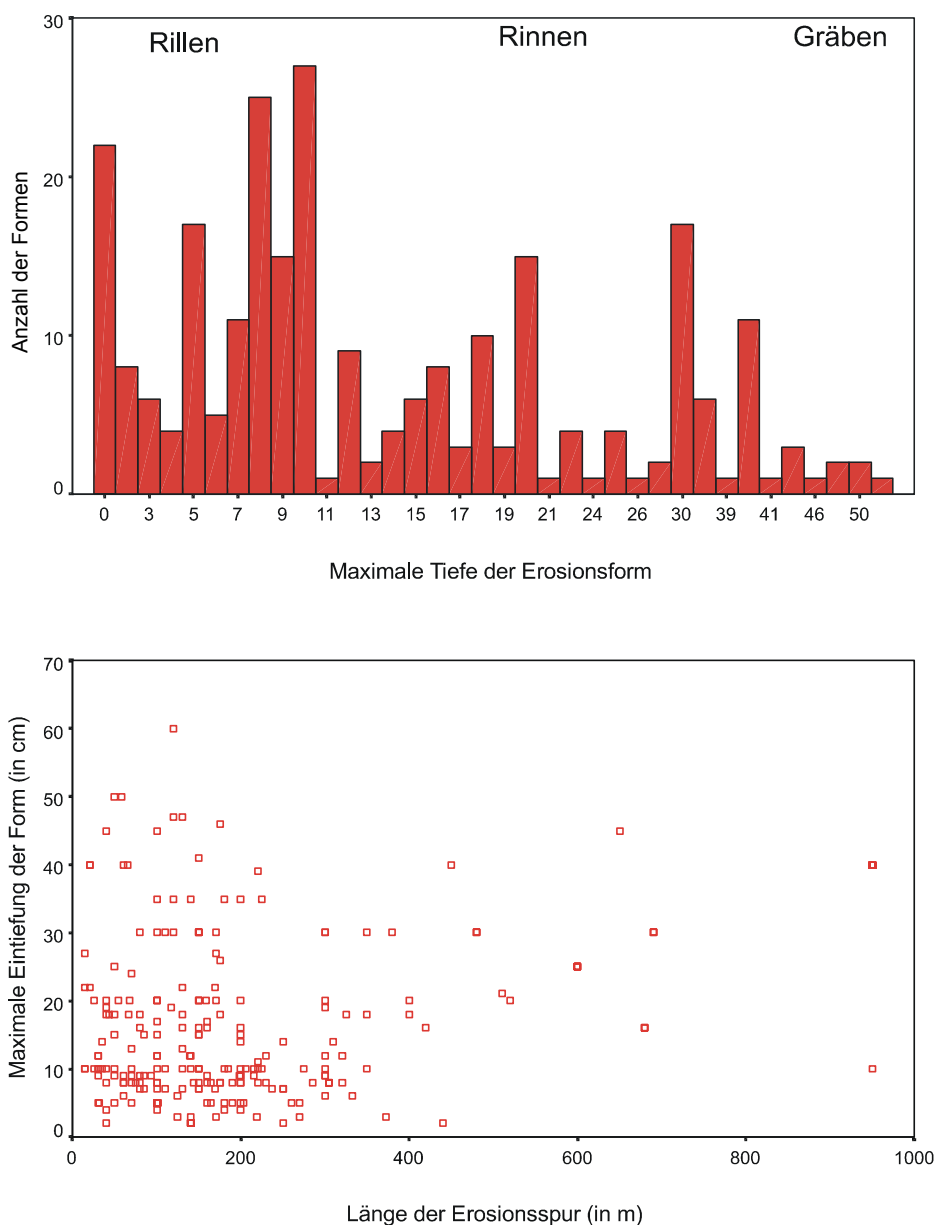


Abb. 13: Tiefe der linearen Erosionsform und der Zusammenhang zwischen Länge der linearen Erosionsformen und Eintiefung

Ein Vergleich der Länge von Abtragsformen zur ihrer Tiefe zeigt keine aussergewöhnliche Wirkungsgefüge. Die Ausbildung einer Erosionsspur wird außer von der Menge des Oberflächenabflusses auch von der Fließgeschwindigkeit, der Hangneigung, dem Zustand der Bodenoberfläche, der Bodenstruktur u.a. geprägt. Zudem wird auch hier die Eintiefung der Rinnen durch die Lagehöhe der Pflugsohle bestimmt. Ein singulärer Zusammenhang kann daher nur Tendenzen aufzeigen und ist für eine Parametrisierung ungeeignet.

3.7.4 Einfluss unterschiedlicher Kulturpflanzen und landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden auf die Entstehung von linearen Erosionsformen

Der Anbau unterschiedlicher Kulturpflanzen verursacht eine Veränderung verschiedener Parameter, die den Prozess der Bodenerosion beeinflussen. Zu den wichtigsten landwirtschaftlich beeinflussbaren Faktoren, die eine steuernde Wirkung auf das lineare Bodenabtragsgeschehen ausüben, gehören u.a. die Bodenbedeckung (Fruchtfolge), die Bodenbearbeitung und die wasserleitenden Oberflächenformen (MOSIMANN 1991).

Die im Untersuchungsgebiet vorwiegend betriebene Fruchtfolge ist Wintergetreide-Wintergetreide-Zuckerrüben. Hierbei dominiert Winterweizen den Getreideanbau, jedoch wird auch Wintergerste in der Fruchtfolge integriert. Diese Bewirtschaftungsmaßnahmen spiegeln sich auch in den Ergebnissen der Erosionsschadenskartierung wieder. Abb. 14 zeigt die über den gesamten Untersuchungszeitraum erfassten Erosionsformen aufgeteilt nach der Kulturart an. Deutlich zeigt sich ein Übergewicht der auf Wintergetreideparzellen angefallenen Schäden. Diese oben erwähnte Fruchtfolge bedingt eine zeitliche Variabilität der möglichen Erosionsanfälligkeit der Ackerparzellen auf zwei Zeiträume. Während bei Wintergetreide der für den Erosionsprozess wichtige Bodenbedeckungsgrad von Oktober - April selten über 10% ansteigt, verschiebt sich das Zeitintervall fehlender Pflanzenbedeckung bei dem Zuckerrübenanbau auf die Monate März – Mai (DUTTMANN 1999). Abb. 15 zeigt den Anteil der Erosionsformen, die im Jahresgang unter verschiedenen Kulturpflanzen aufgenommen wurden. Hier zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen Bodenbedeckungsgrad und Erosionsanfälligkeit der Parzellen. Während im März und April die Abtragsprozesse auf Winterweizenfeldern mit 64.0% bzw. 97.4% überwiegen, verschiebt sich dieses Verhältnis im Mai und Juni auf die Flächen mit Zuckerrübenanbau (76.5% und 58.3%). Der relativ hohe Anteil von 25.0% der Erosionsformen im Juni auf Winterweizenschlägen lässt sich wie folgt erklären: Zum einen ist ein hoher Anteil von 66.6% der Abtragsformen in Fahrspuren zu finden; Zum anderen ist die Gesamtmenge der aufgenommenen Erosionsformen im Juni in Bezug auf statistische Auswertungen mit 18 Fällen als sehr gering anzusehen. Für diesen Monat sind keine repräsentativen Aussagen zu treffen.

Die kritische Phase vor Pflanzbeginn ist in dem untersuchten Gebiet für den Abtragsprozess nicht von so großer Bedeutung, da über 80% der landwirtschaftlich genutzten Fläche mit Mulchsaat bestellt werden. Diese Bewirtschaftungsmethode verringert ein Abspülen der Bodenoberfläche durch Eintrag der Pflanzenreste in und auf den Oberboden während des Erntevorgangs.

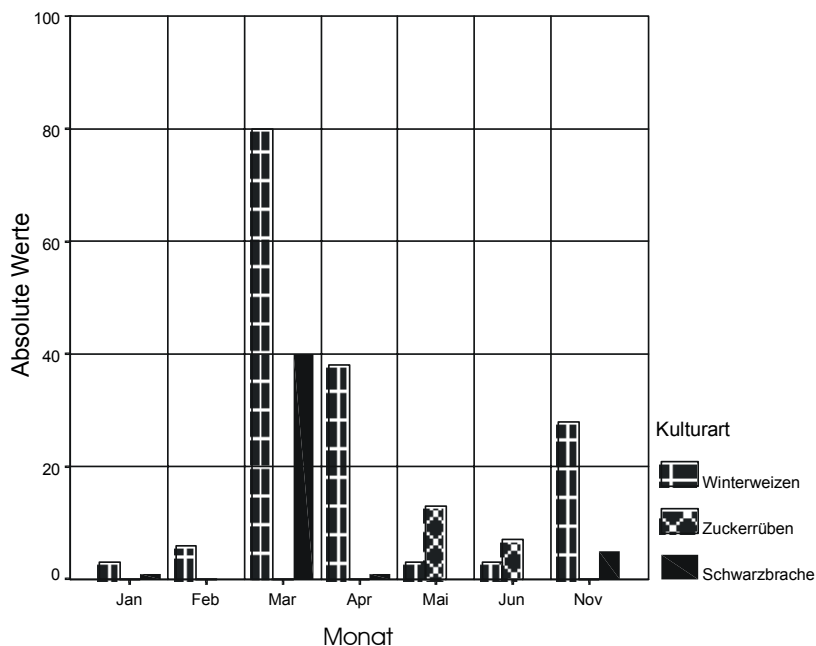


Abb. 14: Häufigkeiten aller kartierter Erosionsformen und deren monatliche Verteilung auf Parzellen mit den Hauptanbaukulturen Winterweizen, Zuckerrüben und Schwarzbrache

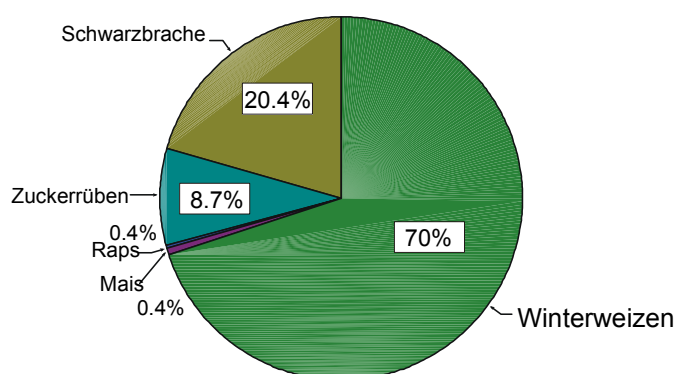


Abb. 15: Verteilung der kartierten Erosionsformen unter verschiedenen Nutzungen

3.7.5 Zusammenhang zwischen Bodenbedeckungsgrad und Ausbildung von Rillen und Rinnen

Der Bodenbedeckungsgrad ist ein zentraler Parameter für den Erosionsprozess (s. BORK 1988; MOSIMANN u.a.1991, SCHWERTMANN 1987). Besonders durch den direkten Aufprall der Wassertropfen auf die Bodenoberfläche (Splash-Effekt) werden Bodenpartikel gelöst und mit oberflächlich abfließendem Wasser fortgeführt. Eine Pflanzendecke mit

hohem Deckungsgrad vermindert die kinetische Energie der aufprallenden Regentropfen und verringert die Erosionsgefahr. Im allgemeinen zeigt sich dieser Zusammenhang auch im Untersuchungsgebiet (Abb. 16), jedoch werden auch einige besondere Ergebnisse aufgezeigt. Der Anteil der Rinnen und Gräben mit über 40% Bodenbedeckungsgrad liegt bei 28.57%. Dieser hohe Anteil lässt sich anhand folgender Voraussetzungen erklären: Auf der einen Seite erhalten 27.9% der vorliegenden Erosionsformen gebündelten Wasserzufluss aus benachbarten Parzellen. Damit steht, trotz des hohen Deckungsgrades der Vegetation, für den Bodenabtrag genug Oberflächenwasser zur Verfügung. Auf der anderen Seite können sich einige der Gräben in künstlichen Leitlinien bilden (z.B. Ackerrandfurchen), wobei viele Fahrspuren die Funktion als Sammler des oberflächlich abfließenden Wassers ausüben.

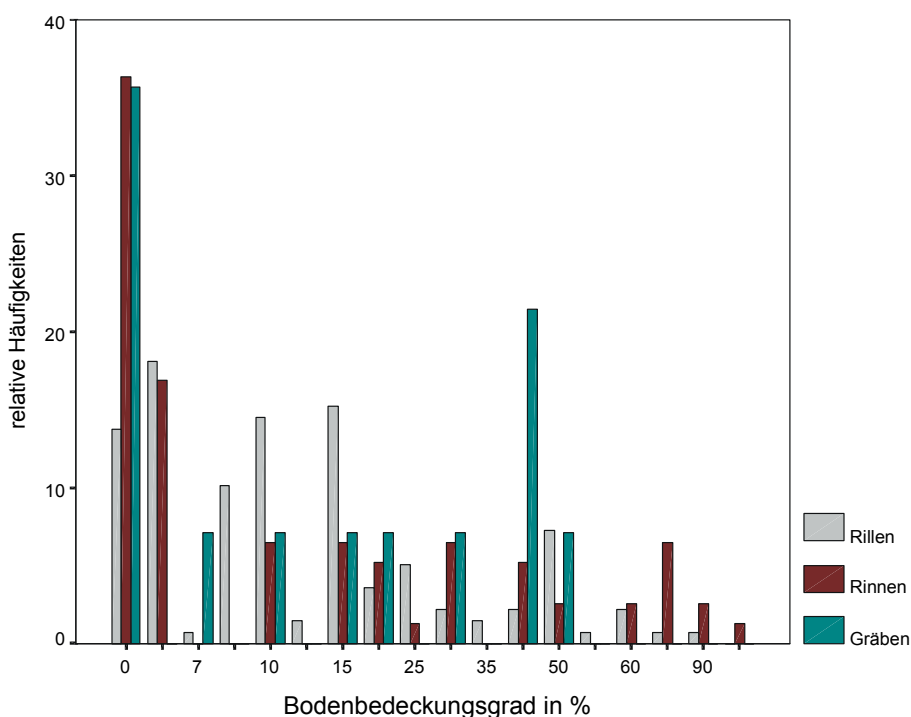


Abb. 16: Relative Häufigkeiten des Auftretens unterschiedlicher Erosionsformen unter verschiedenen Deckungsgraden der Kulturpflanzen

3.7.6 Zusammenhang zwischen Hanglänge und Tiefe von Erosionsformen

Die Hanglänge zählt zu den wichtigsten Einflussgrößen von Bodenerosionsprozessen. Mit zunehmender Ausdehnung der Ackerparzellen vergrößert sich die erosive Hanglänge und die Abtragsgefährdung steigt an (R. DIKAU 1986, SCHWERTMANN 1990). Nach MOSIMANN et. al. (1991) kann bei Hanglängen von mehr als 80 m in Gefällerrichtung zwei- bis dreimal so häufig Bodenerosion auf den landwirtschaftlichen Flächen beobachtet werden.

Die mittlere Längenausdehnung der Ackerflächen im Untersuchungsgebiet beträgt 286.2 m. Da bis auf einige Flächen im Talbereich (37,34%) die meisten Parzellen eine gestreckte bzw. konvexe Hangform besitzen, kann die erosive Hanglänge in diesem Fall sogar der Schlaglänge gleichgesetzt werden. Die durchschnittliche Hangneigung aller beobachteten Flächen im Untersuchungsgebiet entspricht 4.6%. Damit erreichen die meisten Parzellen eine LS-Faktor (ABAG) von über eins und erhöhen das Risiko der Erosionbildung.

Die sichtbare Ausbildung von linienhaften Abtragspfaden beginnt bei über der Hälfte aller vermessenen Formen im oberen Teil der Parzelle. Bei über 50% aller aufgenommenen Rillen und Rinnen beginnt die sichtbare erosive Eintiefung in den Boden innerhalb der ersten 10% der gesamten erosiven Hanglänge. Auf einigen Ackerschlägen konnten schon nach ca. 10-15 m bis zu 4 cm tiefe Rillen beobachtet werden. In allen kartierten Fällen konnte ein Fremdwasserzufluss von hangaufwärts liegenden Bereichen ausgeschlossen werden. Dies zeigt deutlich auf, dass die Bildung von Initialrillen nicht auf Parzellen mit großer Hanglänge angewiesen ist.

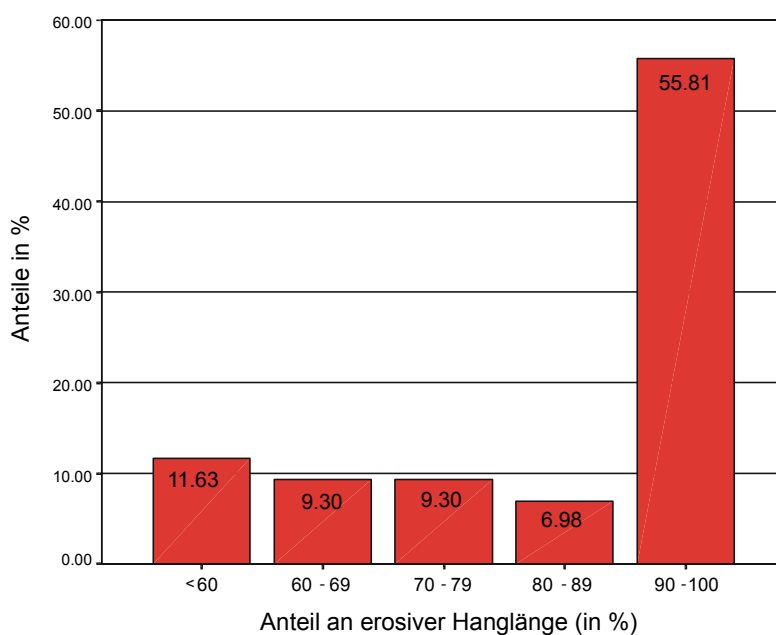


Abb. 17: Prozentualer Anteil der Erosionslänge von Rillen und Rinnen an gesamter erosiver Hanglänge

4. Vorhersage der räumlichen Verteilung linearer Erosionsformen auf Parzellenebene

4.1 Modellansatz

Die Verteilung von Erosionsformen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zeigt sich räumlich sehr variabel und instationär. Die Lage des konzentrierten Abflusses lässt sich nicht anhand einfacher hydrologischer Verfahren beschreiben, sondern verlangt eine komplexere Analyse der auf der Parzellenoberfläche vorhandenen Strukturelemente und ihres Einflusses auf die räumliche Verteilung von linearen Erosionsformen. Die Variabilität der Rillen- und Rinnenbildung kann nur erfasst werden, wenn unter Einbeziehung der Wechselwirkungen von topographischen und landwirtschaftlichen Merkmalsausprägungen ein hydrologisches Netzwerk gebildet werden kann (LUDWIG, B. 1992, LUDWIG, B. 1995). Daraus ergibt sich eine Aufteilung des Modells in zwei Teilmodule (Abb. 18). Auf der einen Seite wird als wichtigster Eingangsparameter ein digitales Höhenmodell (DHM) eingesetzt. Dieses wird nach den üblichen rasterbasierten Verfahren aufbereitet und auf eine ausgewählte Rasterauflösung interpoliert. Auf der anderen Seite werden die erfassten und prognostizierten Raumstrukturelemente, die noch vektoriell vorliegen, in das Rasterformat gleicher Auflösung wie das DHM konvertiert. Damit ist die Voraussetzung einer Integration beider Teilmodule über Verknüpfungsalgorithmen erfüllt.

Das Modell sollte folgenden Anforderungen entsprechen:

- Erfassung und Verarbeitung von Raumstrukturelementen **und** der Topographie im Modell, um die räumliche Verteilung von linearen Erosionsformen auf der Geländeoberfläche abbilden zu können (2D Modellierung).
- Modellierung von hydrologischen Prozessen anhand möglichst geringer empirischer Verfahren um eine Übertragbarkeit des Modells auf andere Einzugsgebiete zu ermöglichen.
- Entwicklung als operationelles Modell, um eine Anwendbarkeit für Aufgabenstellungen aus der Praxis mit nicht zu hohen Anforderungen an Modellanwender und Rechner zu gewährleisten.

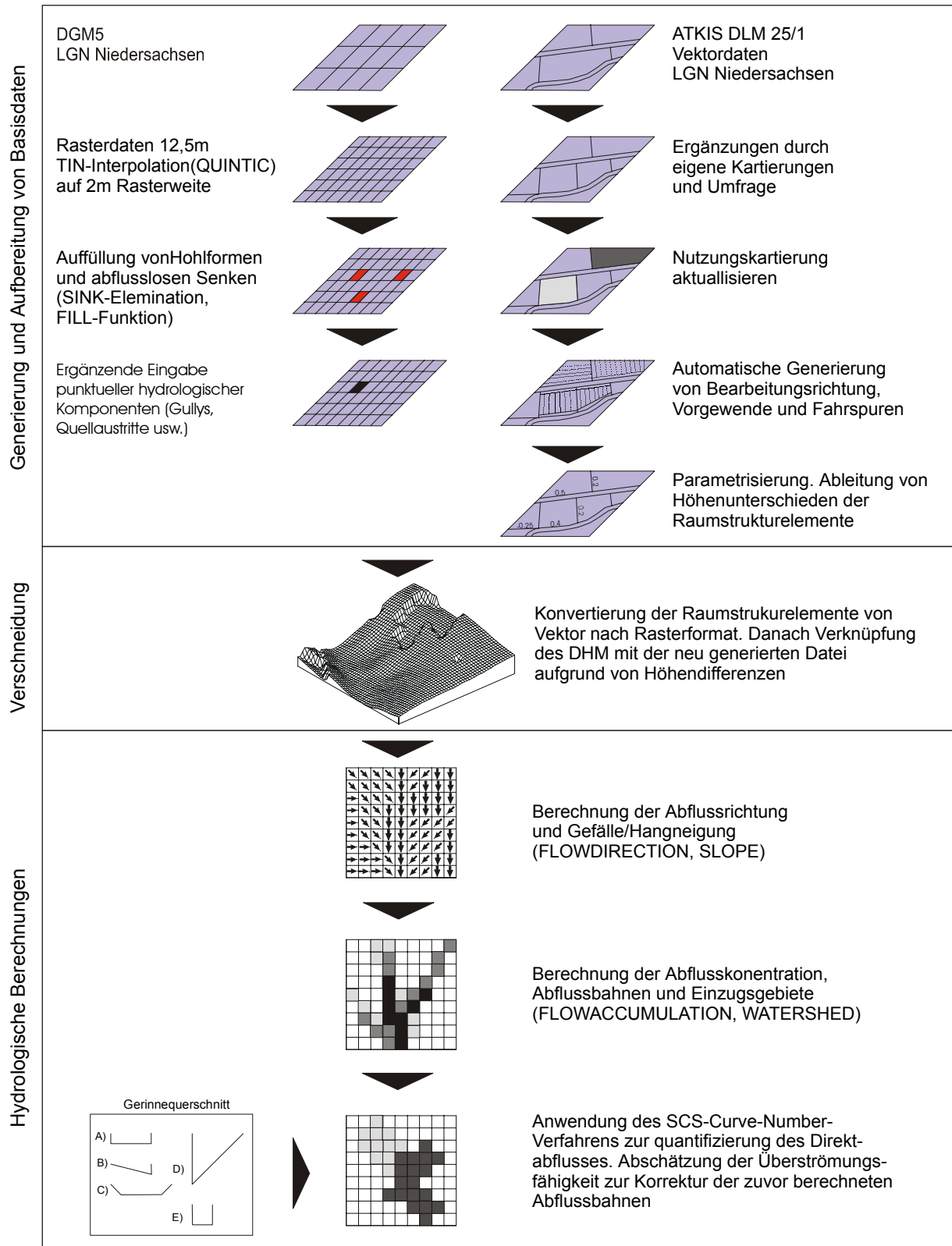


Abb. 18: Schema der einzelnen Daten- und Verknüpfungsebenen des Modells zur Ermittlung linearer Erosionsformen

- Geringe Anforderungen an die Eingangsdaten, d.h. eine gute Verfügbarkeit der Grunddaten und einfache Aufnahme und Generierung eigener Datensätze.

Das Modell sollte unter Ausnutzung bestehender GIS-Software umgesetzt werden. Jedoch zeigten sich erhebliche Schwierigkeiten, multiple Bedingungen und Prozeduren in einzelnen Befehlssequenzen in den Scriptsprachen von GIS-Systemen wie z.B. ARC/INFO® (<http://www.esri.com> 1999) bzw. GRASS (<http://www.geog.uni-hannover.de/grass/> 1999) umzusetzen. Aus diesem Grunde wurde das Programm mit der objektorientierten Programmiersprache Visual-Basic® (<http://www.microsoft.com> 1999) erstellt. Das Programm kann unter WIN9x/ NT auf jedem aktuellen PC eingesetzt werden und wird über eine Windows-konforme Oberfläche gesteuert. Um Redundanzprobleme zu umgehen, werden die Eingangsdaten in ARC/INFO aufbereitet und über einen Importfilter in das Hauptmodul eingelesen. Die Visualisierung und kartographische Bearbeitung erfolgt in ArcView® mit den Aufsätzen Spatial Data Analyst® und 3D-Analyst®.

4.1.1 Generierung und Aufbereitung der Basisdaten

Die Haupteingangsgrößen des Modells liegen in Raster- und Vektorform vor. Während auf der einen Seite das rasterbasierte Digitale Geländehöhen Modell (DGM) Eingang in die Berechnung von Reliefparametern findet, werden auf der anderen Seite Vektordaten zur Beschreibung von Raumstrukturelementen verwendet. Die beiden Datenblöcke werden in einem noch später zu erklärenden Verfahren zuerst auf ein einheitliches Rasterformat konvertiert und über ein einfaches Verknüpfungsverfahren zusammengeführt.

Das DGM 5 der Niedersächsischen Landesvermessung wird standardmäßig in einer Gitterweite von 12,5 m x 12,5 m geliefert. Die Geodaten werden durch das Laserscanner-Verfahren gewonnen, wobei zusätzliche Höheninformationen aus der analog vorliegenden DGK 5 ergänzt werden. Das DGM 5 liegt z.Zt. für mehr als 60% der Landesfläche vor. Die komplette Landesaufnahme soll im Jahre 2002 abgeschlossen werden. Die Genauigkeit beträgt durchschnittlich ± 0.5 m, wird aber in Bereichen, die aus wirtschaftlicher bzw. topographischer Sicht nicht relevant sind (z.B. Waldgebiet), auf ± 1.5 m verringert.

Die Auflösung des DGM 5 ist für die weitere Verarbeitung innerhalb des Modells mit 12,5 m nicht fein genug. Da im weiteren Verlauf einzelne Strukturelemente, wie z.B. Fahrspuren, vom Vektor- in das Rasterformat überführt werden müssen, bedarf es einer Anpassung der

Zellenbreite auf den Modellmaßstab. Aus diesem Grunde wurden verschiedene Rasterauflösungen (1 m, 2 m, 5 m und 10 m) in dem hydrologischen Teilmodul getestet. Für dieses Verfahren wurde aus praktikabler Sicht ein Diskretisierungswert von 2 m gewählt, so dass folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Raumstrukturelemente mit geringem realen Flächenanspruch, d.h. linienhafte Formen wie z.B. Fahrspuren (≈ 20 cm Breite), werden nach der Vektor-Raster-Konvertierung mit der ausgewählten Rasterbreite (z.B. 2 m) dargestellt. Damit kein überproportional hoher Flächenanteil auf die Strukturelemente im Verhältnis zur Gesamtfläche entfällt, muss die Gitterweite möglichst gering gewählt werden.
- Wegen der exponential anwachsenden Anzahl von Rasterelementen (Abb. 19) bei Halbierung der Gitterweite sollte in Anbetracht der zeitaufwändigen iterativen hydrologischen Berechnungen auf der anderen Seite eine möglichst große Rasterbreite gewählt werden.
- Die Ausgangsauflösung sollte maximal der 3-4-fachen Zellengröße entsprechen, um eine ausreichend genaue Reliefdarstellung zu erhalten (P. HUBER 1996).

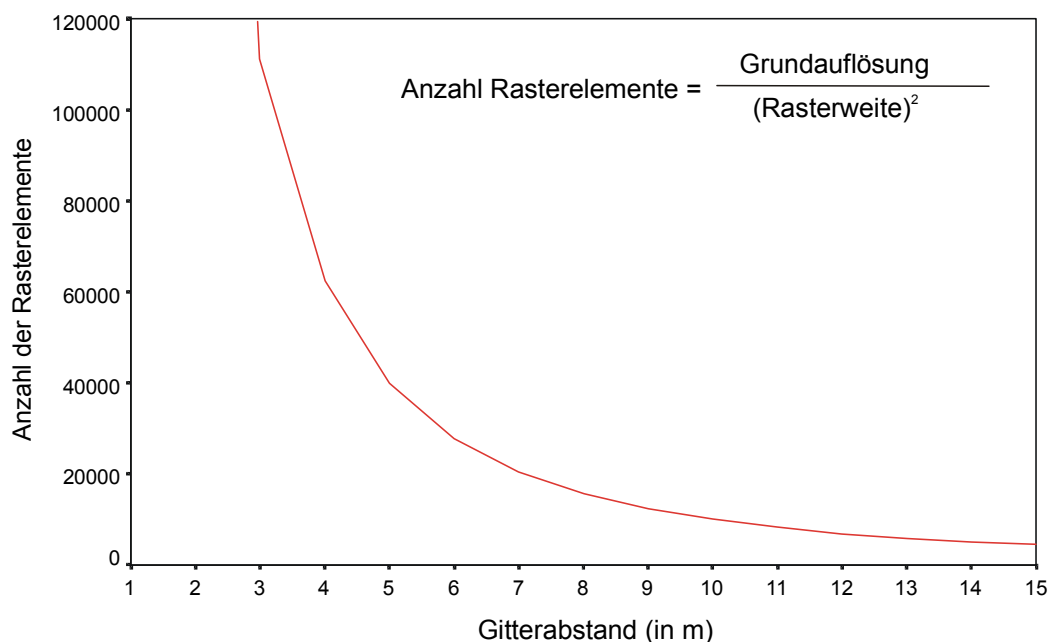


Abb. 19: Anzahl der Rasterzellen pro km^2 bei unterschiedlichen Gitterabständen

Die Basisdaten des LGN werden vom GIS ARC/INFO als TIN (**T**riangular **I**rrregular **N**etwork) eingelesen. Im darauffolgenden Schritt werden die Daten durch ein Interpolationsverfahren auf die gewünschte Rasterweite von 2 m berechnet. Im Modell wurde ein linearer Interpolationsalgorithmus verwendet, da die Basisdaten auf der Gesamtfläche homogen verteilt liegen. Ist das DHM nur unvollständig bzw. partiell vorhanden sollte ein bivariater Algorithmus zur Interpolation verwendet werden (MOORE, I.D. und K.J. BEVEN 1994).

Bedingt durch Fehler in den Basisdaten kann das digitale Geländemodell sogenannte 'sinks' enthalten, d.h. einzelne Rasterzellen, die tiefer als ihre acht Nachbarzellen liegen. Diese abflusslosen Punkte können auch häufig bei der Interpolation von Rasterdaten entstehen (O'CALLAGHAN, J.F. und D.M. MARK 1988, JENSON, S.K. und J.O. DOMINGUE 1988, MARTZ, L.W. und J.GARBRECHT 1992, MORRIS, D.G. und R.C. HEERDEGEN 1988). Ein weiteres Problem zeigt sich durch die Bildung von 'Barrieren', die hangaufwärts größere Senkenbereiche erzeugen. Diese Formen können sowohl durch ein sehr grobes DHM als auch durch eine künstliche Erhöhung von interpolierten Werten entstehen (QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P. und O. PLANCHON 1994). Für die weitere hydrologische Auswertung ist es unumgänglich diese Fehler zu eliminieren, da einige Algorithmen zur automatischen Generierung des Gewässernetzes nur fehlerfrei arbeiten, wenn die Hohlformen entfernt werden. Dies geschieht, indem der Höhenwert jenes Rasterelementes, das die Hohlform enthält, auf die Höhe des niedrigsten Nachbarn zuzüglich eines beliebig wählbaren Wertes gelegt wird (Abb. 20). Existieren größere abflusslose Senken, sind mehrere Iterationen notwendig, um einen durchgehenden Abfluss zu ermöglichen.

Im Gegensatz zu anderen hydrologischen Modellen, die Abflussverteilung und Abflusskonzentration berechnen können, besteht in diesem Modell die Möglichkeit, anthropogen verursachte Hohlformen mit in das Basisraster aufzunehmen. Dies können z.B. Gullys, Kanäle und Unterführungen sein. Zur Zeit können diese speziell gekennzeichneten Elemente die Abflusskonzentration in der Rasterzelle nur auf 0 reduzieren; eine mögliche unterirdische Fortführung (z.B. in einem Rohrsystem) ist nicht vorgesehen.

Zusätzlich können auch Bereiche mit Wasseraustritten in das Grid integriert werden. Hierbei wird additiv eine konkrete Abflussmenge der gewählten Rasterzelle zugeordnet. Folgende Einsatzmöglichkeiten können simuliert werden:

- Wasseraustritt eines hochgepflügten Drainrohres auf einer landwirtschaftlichen Parzelle,
- Hangquellen und
- sonstige Bereiche mit Wasserzufuhr (z.B. ausgespülte Gänge von Bodennagern).

Im Modell werden die Elemente mit einem speziellen Wert belegt (ähnlich dem NODATA-Wert diverser GIS-Software), der wiederum einen Zeiger auf die Attributtabelle enthält. Während des Programmablaufs der hydrologischen Komponenten werden bei Erreichen dieser Zellen gesonderte Subroutinen ausgeführt, die eine fehlerhafte Berechnung der Standardroutinen abfängt.

156,43	155,77	154,42
159,69	153,74	153,98
160,21	157,30	155,98

156,43	155,77	154,42
159,69	153,99 ←	153,98
160,21	157,30	155,98

Abb. 20: DHM mit abflussloser Senke; links vor und rechts nach Beseitigung der Hohlform mit zusätzlicher Addition von 0.01m Höhe

Die Basis des Vektor-Teilmoduls beruht auf den ATKIS DLM 25/1 Daten des LGN Niedersachsens. Dieses digitale Landschaftsmodell enthält geotopographische Informationen in digitaler Form. Die objektstrukturierten Daten des DLM liegen zweidimensional vor und beinhalten Angaben zu linienhaften Landschaftsstrukturen (z.B. Verkehrswege) und flächenhaften Landschaftsteilen (z.B. Siedlungen u.a.). Insgesamt existieren z. Zt. 70 Objektarten mit ihren jeweiligen Attributierungen.

Für den Einsatz im Modell müssen die Grunddaten um einige Informationen ergänzt werden. Dazu zählen:

- Ackerschlaggrenzen:
Die genauen Informationen über aktuelle Parzellengrenzen werden zum Teil aus der Deutschen Grundkarte 1:5000 sowie aus Kartierungen ergänzt.
- Nutzungskartierung:
Die Atkis-Daten enthalten keine Angaben zur speziellen Nutzung von Vegetationsflächen. Hier wird durch Kartierung und Umfragen bei den Landwirten (Angaben zur Fruchtfolge) der Basisdatensatz komplettiert.
- Raumstrukturelemente:

Die Raumstrukturelemente werden durch zwei Quellen erschlossen. Auf der einen Seite müssen unterstützende Kartierungen erfolgen, um unregelmäßig bzw. nicht parametrisierbar vorliegende Strukturen erfassen zu können (Ackerrandfurchen, Barrieren, Gräben, Unterführungen und Abflussrohre). Auf der anderen Seite werden reproduzierbare Strukturen (Fahrspuren, Vorgewende, Bearbeitungsrichtung) durch ein automatisches Teilmodul (s. Kapitel 4.3) hinzugefügt.

4.2 Parametrisierung der Strukturelemente

Wie im vorangehenden Kapitel ersichtlich wurde, muss vor dem Berechnungsalgorithmus der Verschneidung des Raster- mit dem Vektormoduls eine operationalisierbare Parametrisierung der Strukturelemente erfolgen. Da für die hydrologischen GIS-Methoden ein höhenabhängiges Ausgangsraster bestehen sollte, muss versucht werden, allen linienhaften Elementen einen bestimmten Höhendifferenzvektor zuzuordnen. Dieser strukturabhängige Wert erhöht bzw. vertieft das digitale Höhenmodell innerhalb eines räumlich spezifizierten Bereichs.

Die Parametrisierung der Raumstrukturelemente geschieht über eine Auswertung der im Untersuchungsgebiet vorgefundenen und ausgemessenen Elemente. Bedingt durch verschiedene Einflüsse, insbesondere der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bearbeitungsmethoden der Landwirte, streuen die ermittelten Parameter natürlich zum Teil. Dies gilt z.B. für Unterschiede bei der Fahrspurtiefe, die je nach Bodenfeuchte, Reifenbreite und Auflastdruck (Größe der Bearbeitungsmaschinen) erhebliche Differenzen (siehe Abb. 22) aufweisen können.

Einen weiteren wichtigen Parameter stellt der Gerinnequerschnitt der Strukturelemente dar. Im Falle eines erosiven Niederschlagsereignisses wird das oberflächlich abfließende Wasser zum Großteil in vorgegebene Leitbahnen transportiert (s. Th. MOSIMANN u.a., 1991). Besonders in den unteren Hangbereichen einer Ackerparzelle kann der Gerinnequerschnitt der Strukturelemente die ankommenden Wassermengen nicht mehr aufnehmen. Es kommt zu einem Überströmen der Leitbahn, verbunden mit einer möglichen Auffächerung des Oberflächenabflusses. Die Kartierungen im Testgebiet zeigten meistens ein Überströmen der Strukturelemente mit nachfolgender Eintiefung. Nur in 4% der Fälle erfolgte eine Aufteilung des Oberflächenabflusses in mehrere Abflussrichtungen. Im Modell gelangen aus rechentechnischen Gründen 100% des Abflusses in eine Erosionsspur.

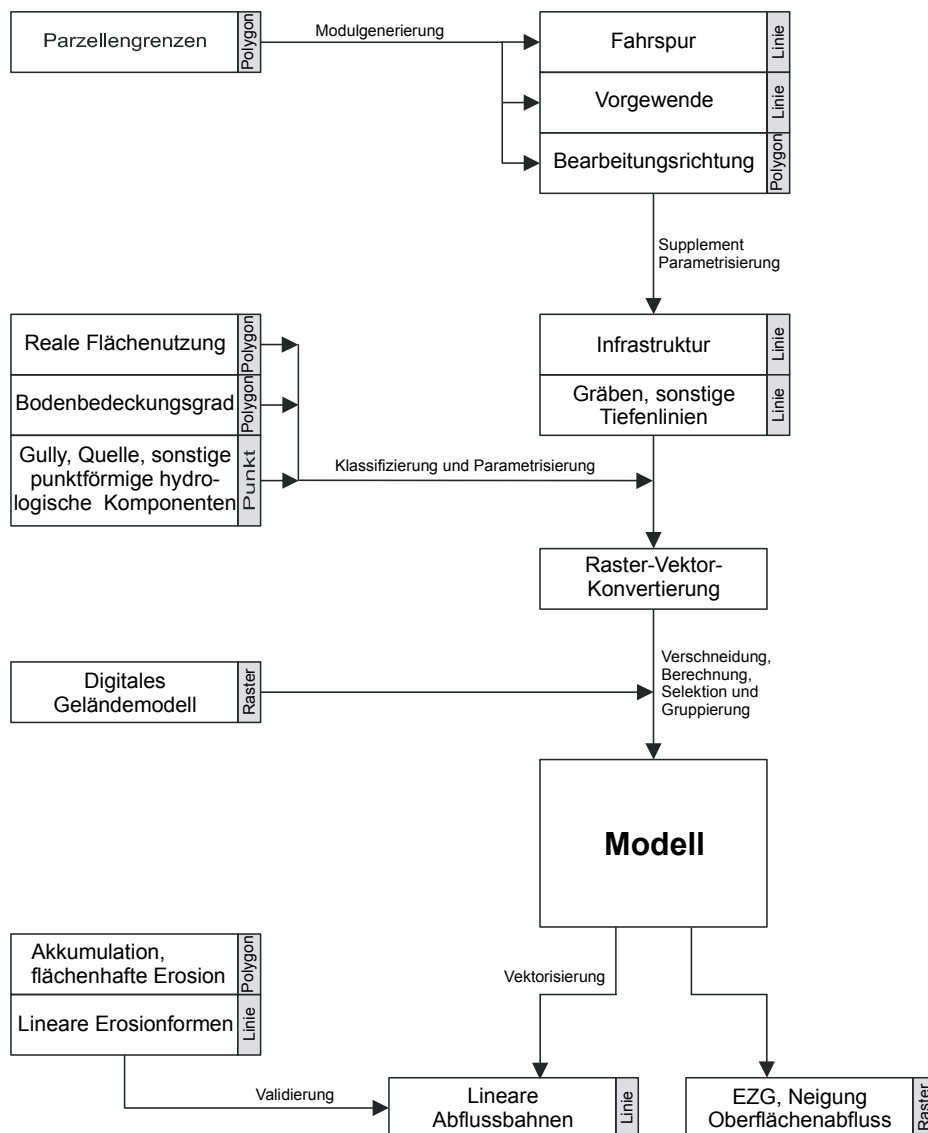


Abb. 21: Datenverknüpfung und -konzeption des Modells. Die grau unterlegten Felder zeigen die unterschiedlichen Formate während der Aufbereitung der Daten an

Um diesen Effekt in der Modellbildung mit einfließen zu lassen, muss der Gerinnequerschnitt und die Größe einer Strukturform bekannt sein. Abb. 22 zeigt die wichtigsten Raumstrukturelemente mit ihren zugehörigen Größen und Querschnitten auf.

Die Gerinnequerschnitte und Größen der einzelnen Raumstrukturelemente wurden während des gesamten Projektzeitraumes im Testgebiet begleitend untersucht und vermessen. Aus den gesamten Datenmengen wurden Mittelwerte für standardisierte Größen der verschiedenen Elementtypen festgelegt. Dies bedeutet z.B., dass jeder Fahrspur auf allen

Parzellen eine festgelegte Tiefe von 4,5 cm zugeordnet wird. Unterschiedliche Ausprägungen, die von den ermittelten Spurtiefen abweichen, werden nicht mit in das Modell aufgenommen. Dies gilt auch für Ackerrandfurchen und Gräben, obwohl gerade bei diesen Strukturelementen eine erhebliche Streuung der Strukturiefen vorhanden ist. Die Kartierungen im Untersuchungsgebiet haben gezeigt, dass trotz ihrer individuellen Tiefe keine Ackerrandfurche überströmt wurde. Insgesamt übernehmen, bis auf eine Ausnahmen im Gebiet Kloster, Strukturelemente mit mindestens 10 cm Tiefe ihre Rolle als Leitbahn des abfließenden Wassers.

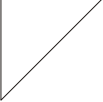



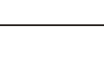
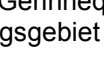
	Min. Tiefe	Max. Tiefe	Mittelwert
 Ackerrandfurche	14 cm	26 cm	18 cm
 Fahrspur	2,5 cm	13 cm	4,5 cm
 Saatspur	-	4 cm	1.5 cm
 Vorgewendegrenze	2cm	7,5 cm	5,2 cm
 Graben	25cm	1,2 m	50 cm
 Bankette		7 cm	3.5 cm

Abb. 22: Gerinnequerschnitt und Größe der wichtigsten Raumstrukturelemente im Untersuchungsgebiet

Im Modell werden den vektoriell vorliegenden Elementen die entsprechenden Strukturiefen und -formen zugeordnet. Die Attributierung zu dem Konvertierungsprozess in das Rasterformat beinhaltet dabei nur die Tiefenangaben. Diese Informationsebene wird mit dem DHM über ein einfaches additives Verfahren verknüpft. Dadurch erhält man eine neue Matrix, in der auf Grundlage des Höhenmodells Vertiefungen (Fahrspuren, Gräben usw.) bzw. Erhöhungen (Barriere, Schlaggrenzen) die weiteren hydrologischen Auswertungen der Abflussbahnen beeinflussen.

4.2.1 Hydrologische Berechnungen

Zur Berechnung von Abflussbahnen werden verschiedene hydrologische Verfahren angewendet. Auf der Ebene rasterbasierter Auswertungen haben sich besonders die Algorithmen zur Abflussrichtung von QUINN et. al. 1994 (D8-Algorithmus) und FREEMAN 1991 bzw. RIEGER 1993 (FD8-Algorithmus) durchgesetzt. Beide Verfahren bestimmen

anhand der Höhendifferenz einer zentralen Rasterzelle zu ihren 8 Nachbarzellen automatische eine Abflussrichtung.

1. D8-Algorithmus

Es werden die Höhenunterschiede aller acht Nachbarzellen zum zentralen Element berechnet. Das Element mit der größten Höhendifferenz wird als alleinige Abflussrichtung deklariert. Aufgrund der größeren Entfernung der diagonal liegenden Rasterelemente werden diese Strecken durch Division mit $\sqrt{2}$ angepasst (siehe Abb. 23)

2. FD8-Algorithmus

Die Vorgehensweise ist identisch mit der Berechnung des D8-Algorithmus. Jedoch wird über jeder tiefer gelegenen Rasterzelle ein Abflussanteil berechnet. Die Aufteilung erfolgt proportional laut folgender Gleichung (FREEMAN 1991):

$$f_i = \frac{\text{Max}\left(0, \text{Slope} \frac{p}{i}\right)}{\sum_{j=1}^8 \left(\text{Max}\left(0, \text{Slope} \frac{p}{j}\right)\right)}$$

Laut FREEMAN (1991) werden die besten Ergebnisse für den Parameter p mit $p=1.1$ erzielt. Hiermit wird der Berechnungsfehler ('worst case') auf unter 5% gesenkt. Der Wert jeder Zelle mit Abfluss wird in Prozent gespeichert und gelangt in die weiterführenden Berechnungen.

159.2		159.1		158.7
	-0.21	0.4	0.56	
160.6	-1.2	159.5	3.1 →	156.4
	-1.84	-1.8	2.26	
162.1		161.3		156.3

159.2		159.1		158.7
	-0.21	0.4 ↑ 6.33%	0.56 ↗ 8.86%	
160.6	-1.2	159.5	3.1 → 49.05%	156.4
	-1.84	-1.8	2.26 ↘ 35.76%	
162.1		161.3		156.3

Abb. 23: Unterschiede des D8- (links) und FD8-Algorithmus (rechts) zur Berechnung von Abflussrichtung in einem gleichmäßigen Raster

Der nächste Schritt nach der Bestimmung der Abflussrichtung besteht in der Ermittlung der Abflusskonzentration. Hier wird ein iteratives Verfahren nach O'CALLAGHAN & MARK 1984 angewandt. Der Algorithmus erlaubt zusätzlich die Berechnung von Fließweglängen und bildet das Basisraster zur Berechnung von Einzugsgebietsgrößen.

Der Bearbeitungsalgorithmus verlangt vom Eingaberaster, dass keine Hohlformen bzw. keine Konvergenzen der Abflussrichtungen zweier Elemente aufzufinden sind. Da der Sonderfall von Gullys im hier beschriebenen Modell auftreten kann, wurde der Algorithmus dahingehend modifiziert, dass keine Fehlberechnungen auftreten können. Der Hauptnachteil des Verfahrens ist die hohe Anzahl an Iteration. Bei einem $N \times N$ großen Raster können maximal N^2 Programmdurchläufe entstehen, im Mittel bewegt sich die Anzahl der Iterationen im Bereich von $N * \sqrt{2}$. Dies zeigt sich aus heutiger Sicht unproblematisch, da sowohl Geschwindigkeit als auch Speicherkapazität aktueller Rechnersysteme keinen beschränkenden Faktor mehr darstellen.

Die Bestimmung von Einzugsgebieten und ihrer Größe wird durch einen rekursiven Algorithmus gelöst. Dieses Verfahren wurde von S.K. JENSON (1988) und J. GARBRECHT (1998) übernommen und in das Modell implementiert.

Die Ermittlung von topographischen Berechnungen beschränkt sich auf die Berechnung der Hangneigung nach einem Verfahren von RITTER (1987) bzw. BURROUGH (1986). Dieser Algorithmus bestimmt die Neigung eines einzelnen Rasterelementes über seine acht Nachbarzellen. Dazu wird erst der mittlere Höhenunterschied in Ost-West-Richtung und in Nord-Süd-Richtung berechnet. Die Gleichungen sehen wie folgt aus:

$$\Delta Z_{ew} = \frac{\sum_{a=-1}^1 Z(x-1, y-a) - \sum_{a=-1}^1 Z(x+1, y-a)}{3} \quad (\text{Ost-West- Richtung})$$

$$\Delta Z_{ns} = \frac{\sum_{a=-1}^1 Z(x-a, y-1) - \sum_{a=-1}^1 Z(x-a, y+1)}{3} \quad (\text{Nord-Süd- Richtung})$$

Die Neigungsberechnung wird (doppelt) gewichtet über die beiden Haupt-Achsenrichtungen ermittelt. Danach ergibt sich für die Hangneigung folgende Gleichung:

$$\tan \varphi = \sqrt{\Delta Z_{ew}^2 + \Delta Z_{ns}^2}$$

4.2.2 Ermittlung potentieller Akkumulationsflächen

Der Bodenabtrag einer landwirtschaftlich genutzten Fläche wird hauptsächlich durch die Hangneigung und den Bodenbedeckungsgrad bestimmt. Mit abnehmendem Gefälle sinkt die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses, die Abscher- und Transportkapazität des Wassers verliert an Kraft. Wird ein bestimmter Wert unterschritten, verliert das Oberflächenwasser seine erosive Wirkung. Es können Akkumulationszonen entstehen, in denen das erodierte Bodenmaterial sich absetzen kann. Ein hoher Bodenbedeckungsgrad oder eine rauhe Oberfläche kann die Transportkapazität des Wasser zusätzlich erheblich verringern. Diese Zusammenhänge können auch anhand verschiedener landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden im Rahmen des Bodenschutzes verdeutlicht werden. Durch Ackerrandstreifen, Saatstreifen, Untersaat u.a. kann sowohl die Bildung als auch die Weiterführung von linearen Erosionsformen in hangabwärts liegende Bereiche vermindert bzw. gestoppt werden.

Im Modell werden die oben genannten Parameter zur Ausscheidung potentieller Akkumulationsflächen über ein einfaches empirisches Verfahren genutzt. Die Kombination von Hangneigung und Bodenbedeckungsgrad ermöglicht eine Prognose potentieller Akkumulationszonen.

1. Hangneigung

Zur Ermittlung eines Schwellenwertes wurde eine Analyse aller kartierten und aufgenommenen Akkumulationszonen in den drei Testgebieten durchgeführt. Hierbei wurde die Hangneigungsebene mit den realen Ablagerungsflächen verknüpft. Bei der Auswahl der Akkumulationsflächen wurde darauf geachtet, dass der Bodenbedeckungsgrad höchstens 5% aufweist. Hiermit sollte der Einfluss dieses Faktors ausgeschlossen werden. Alle Parzellen waren gegrubbert bzw. geeeggt und besaßen eine Rauigkeit (mittlerer Niveauunterschied auf der Ackerfläche) von 2-3 cm. Tab. 5 zeigt die Ergebnisse der Auswertung für den Beobachtungszeitraum 1995-1998. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnung über die 12,5 m Auflösung des DGK 5 erfolgte. Die kleinräumigen Akkumulationsflächen (zum Teil liegt die Größe der kartierten Sedimentationszonen nur bei

ca 4-8 m²) können die modellhaft berechneten Hangneigungsraster z.T. nur tangieren und führen in den Randbereichen zu fehlerhaften Werten.

	Min.	Max.	Mittelwert
Kloster	1.28 %	6.95 %	3.2 %
Wöllersheim	0.72 %	5.14 %	2.3 %
Ilde	1.04 %	9.30 %	3.8 %
			3.1 %

Tab. 5: Hangneigung der Akkumulationsflächen im gesamten Untersuchungsgebiet

Aus diesem Grunde wurde der durchschnittlich ermittelte Gefällewert (3.1 %) der potentiellen Akkumulationsflächen auf 2.5% (1.43° Grad) gesenkt, um Ungenauigkeiten durch das DGM zu verringern. Die Verringerung des Neigungswertes schafft zudem einen Sicherheitspuffer für die genauere Prognose der Akkumulationsflächen. Der ermittelte Hangneigungswert aus dem Testgebiet ähnelt der kritischen Grenze beginnender erosiver Wirkung von MOSIMANN et. al. 1991 (2 %). N. FELDWISCH (1995) hat in seinen Untersuchungen auf Lößböden unterhalb 3% Gefälle sehr geringe Abtragswerte festgestellt. Dies deckt sich auch mit den Modellvorstellungen der USLE bzw. RUSLE (S-Formel) von (WISHMEIER, W. UND D. SMITH 1978) und McCOOL et. al. (1987, 1989) und K.G. RENARD et. al (1991).

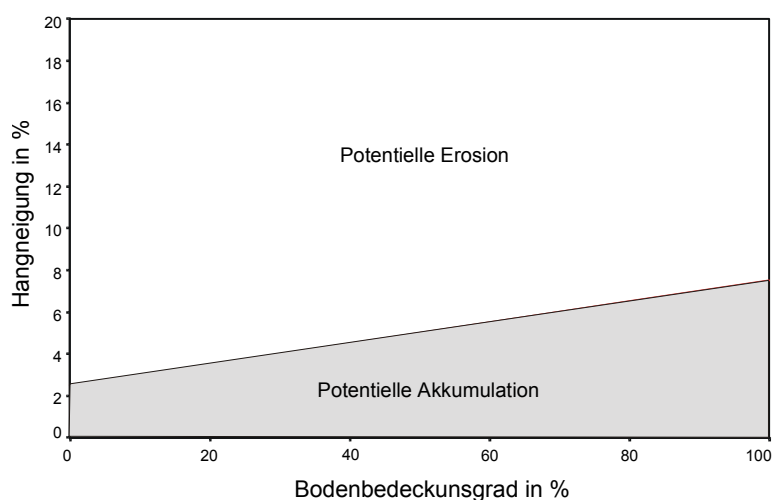
2. Bodenbedeckungsgrad

Der zweite wichtige Parameter zur Ausscheidung der potentiellen Ablagerungszone ist der Bodenbedeckungsgrad. Die Vegetationsdecke verhindert den Bodenabtrag durch Verringerung des ‚Splash‘-Effekts und Erhöhung der Bodenrauhigkeit. Die Regentropfen können nicht mehr direkt auf die Bodenoberfläche fallen, so dass sie ihre kinetische Energie zur Zerstörung von Bodenaggregaten weniger einsetzen können. Außerdem wird die Geschwindigkeit des Oberflächenwassers durch die Vegetation gebremst.

Schon ab 50 % Bodenbedeckung kann die erosive Kraft des Wassers erheblich vermindert werden. Bei vollständiger Bedeckung wird, sofern das Gelände nicht besonders stark geneigt ist, Bodenmaterial akkumuliert (u.a. BORK, H.R. 1988, SCHWERTMANN, U., VOGL, W. und M. KAINZ 1990).

Die Vegetationsbedeckung geht in Kombination mit der Hangneigung in das Ausscheidungsverfahren ein. Eine Auswertung aller Akkumulationsflächen im Testgebiet in Bezug auf die oben genannten Parameter stellt folgender Zusammenhang näherungsweise

dar: Bei weniger als 5% Vegetationsbedeckung wird nur das Gefälle als beeinflussender Faktor bewertet; erosive Wirkung setzt bei unbedecktem Boden ab 2,5% Hangneigung ein. Ist das Gefälle größer, kann nur durch eine Erhöhung des Bodenbedeckungsgrades um 20% pro 1% steilerem Gefälle die einsetzende Erosion verzögert werden. Mit dieser empirischen Näherungsformel konnten 92.8% aller Akkumulationszonen im gesamten Untersuchungsgebiet lagegetreu erfasst werden. Die folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen Bodenbedeckungsgrad und Hangneigung zur Prognose potentieller Akkumulationsflächen:



Bodenbedeckungsgrad (in %)	0	20	40	60	80	100
Hangneigung (in %)	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5

Tab. 6: Kombination aus Hangneigung und Bedeckungsgrad zur Ermittlung potentieller Akkumulationsflächen

Mit dieser empirischen Näherungsformel konnten 92.8 % aller Akkumulationszonen im gesamten Untersuchungsgebiet lagegetreu ermittelt werden. Die Bedeckungsgrade können durch eine Geländeaufnahme sehr gut erfasst werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung jährlicher Bedeckungsgradkalender. Entsprechende Kalender für unterschiedliche Regionen gibt es bei MICHAEL, A. (1994), SCHMIDT, J. (1996), WICKENKAMP, V. (1995) und SCHMIDT, J., WERNER, M. und A. MICHAEL (1996), Die phänologische Entwicklung der Kulturpflanze variiert aber bedingt durch unterschiedliche Witterungsverhältnisse und standortspezifische Bedingungen über das Jahr, so dass die Werte nur als grobe Orientierung gelten können. Diese relativ gute Lageprognose könnte eventuell noch durch genauere Untersuchungen zur Rauigkeit der Geländeoberfläche wahrscheinlich verbessert werden. Jedoch würden dadurch der Erhebungsaufwand und die Menge der Eingangsdaten erheblich vergrößert.

4.2.3 Berechnung der direkten Abflussmenge nach dem Curve-Number-Verfahren des U.S. Soil Conservation Service

Zur Ermittlung der Überströmungsmöglichkeit von Raumstrukturen werden Angaben zur Form des Strukturelementes und der Menge des Direktabflusses benötigt. Während schon im Kapitel 4.2 auf die Gerinnequerschnitte einzelner Formen eingegangen wurde, soll hier das Berechnungsverfahren für den Direktabfluss erläutert werden.

Aus der Vielzahl der Niederschlag-Abfluss-Modelle wurde das Verfahren der SCS (SCS-USDA 1972) ausgewählt. Dieses Modell wird in der hydrologischen Praxis am häufigsten verwendet und berücksichtigt als wichtigste Kenngrößen das Niederschlagsereignis und die wesentlichen Gebietseigenschaften. Dieses Verfahren zur Berechnung des abflusswirksamen Niederschlages wird auch vom DVWK (1984) vorgeschlagen und hat sich in einer vergleichenden Studie (DVWK 1991) zu anderen Verfahren (W. LUTZ 1984, J.V. SUTCLIFFE 1978 und R.W. HARMS 1984) als weiterhin anwendbar erwiesen.

Das CN-Verfahren ermöglicht die Bestimmung des abflusswirksamen Anteils am Niederschlag N_D in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe N und einer Gebietskenngröße CN . Der CN -Wert ist ein Maß für das Speichervermögen des Bodens in Bezug auf Bodenart, Bodennutzung und Vorregen.

$$N_D = f(N, CN)$$

N_D : abflusswirksamer Niederschlag [mm]

N : Niederschlagsereignis [mm]

CN : Curve-Number, Gebietskenngröße

Die Bestimmung des abflusswirksamen Anteils des Niederschlages wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$Q = \frac{(N - 0.2S)^2}{N + 0.8S}$$

mit

Q : Oberflächenabfluss

CN : SCS Curve-Number Wert

S : Gebietsrückhalteparameter

N : Niederschlag [inch]

Der Gebietsrückhalteparameter S wird wie folgt berechnet:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ (S in inch)} \quad \text{bzw.} \quad S = \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \text{ (S in mm)}$$

Im Unterschied zu dem für amerikanische Verhältnisse angepassten Anfangsverlust $I_a=0.2 \cdot S$ wird für das Untersuchungsgebiet ein Wert von $I_a=0.05 \cdot S$ angenommen. Hiermit wird bei geringen Niederschlagsmengen die Höhe des Anfangsverlustes erheblich gesenkt. Besonders bei kleinen CN-Werten (z.B. $CN = 60$, $I_a \sim 33\text{mm}$) entsteht gemäß dem Curve-Number-Verfahren kein Abfluss. Für eine Anpassung an mitteleuropäische Verhältnisse ist daher eine Verringerung des Faktors notwendig (DVWK 1991, VOGES, J. 1999).

Die so ermittelten Abflusswerte werden für jedes Rasterelement berechnet und über eine Kaskadierung (Abflussrichtung und Abflusskonzentrierung) flächenbezogen ermittelt. Hierbei kann für Kleinstinzugsgebiete die hangaufwärts vor Raumstrukturelementen liegende, der Oberflächenabfluss quantifiziert und mit dem Fassungsvermögen der Einzelformen verglichen werden, um die Möglichkeit des Überströmens zu prognostizieren.

4.2.4 Einfluss der Bodenbedeckung auf den Oberflächenabfluss

Die Wirkung der Vegetationsbedeckung auf den Oberflächenabfluss zeigt sich in verschiedenen Bereichen. In Kapitel 4.2.2 wurden schon die Auswirkungen der Bodenbedeckung hinsichtlich der Niederschlagswirkung und der Akkumulation betrachtet. Aber auch bei dem oberflächlich abfließenden Wasser zeigen sich unterschiedliche Formen der Beeinflussung.

Bei höherer Bodenbedeckung wird die Geschwindigkeit des Wassers verringert, so dass die Bodenabträge vermindert werden bzw. sogar Akkumulation einsetzen kann. Insgesamt funktioniert die Vegetation als Zwischenspeicher, der das Oberflächenwasser staut, speichert und mit geringeren Intensitäten in hangabwärts liegende Parzellen strömen lässt.

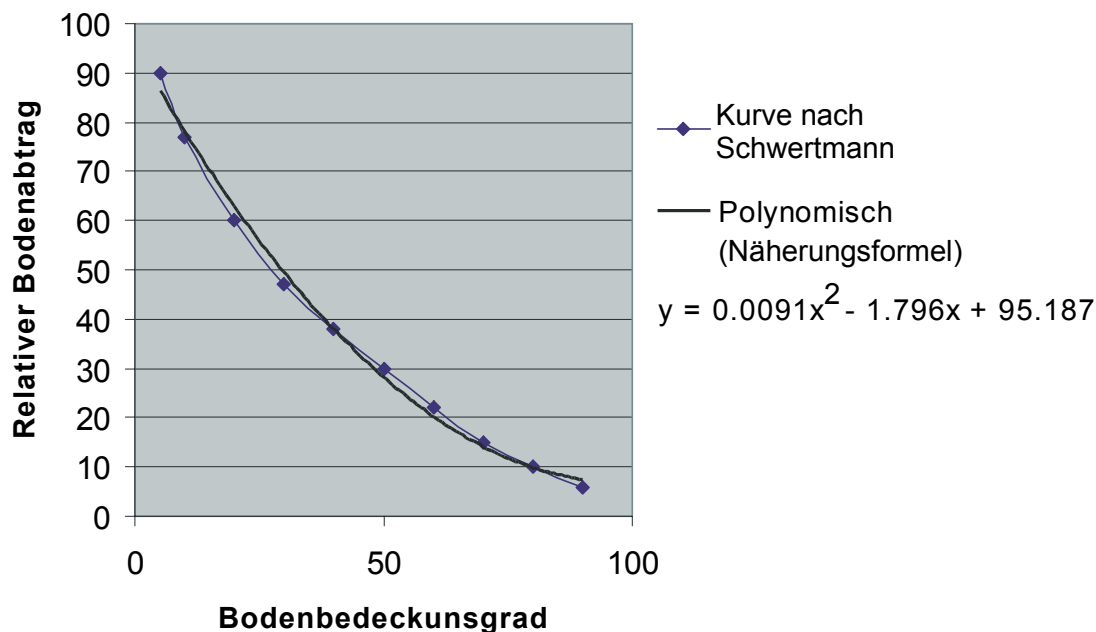


Abb. 24: Abhängigkeit des relativen Bodenabtrages (RBA) von der Bodenbedeckung durch Mulch nach SCHWERTMANN (1990). Durch ein Näherungsverfahren wurde die empirisch ermittelte Kurve einer Gleichung angepasst.

Diese Wirkungsweise muss in das Modell integriert werden, damit nicht durch erhöhte Abflusswerte Modellfehler hervorgerufen werden. Basierend auf der empirisch ermittelten Formel zur Wirkung der Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag von U. SCHWERTMANN et. al. (1990) wurde eine polynomische Näherungsformel entwickelt (siehe Abb. 24). Der relative Bodenabtrag (RBA) kennzeichnet die Erosionsanfälligkeit unter einer bestimmten Vegetationsbedeckung und Oberbodenzustand: Je höher der Bodenbedeckungsgrad ist, umso geringer wird der RBA. Zudem wird durch die Vegetation die Rauigkeit erhöht, die wiederum den Oberflächenabfluss steuert. Basierend auf den Rauigkeitswerten, die für Erosion2D/3D für das Bundesland Sachsen (siehe J. SCHMIDT u.a. 1996) berechnet wurden, lassen sich ähnliche Zusammenhänge für den Erosionsprozess erkennen wie für den RBA. Da die Rauigkeit nach Manning bzw. nach der Garbrecht-Formel in den meisten Erosionsmodellen Eingang gefunden hat, wird in diesem Modell die oben genannte einfache Näherungsformel für die Reduzierung des Oberflächenabflusses eingesetzt. Es werden nur 4 Klassen gebildet, die eine Prognose der Reduktion des abfließenden Wassers näherungsweise ermöglichen sollen. Die Klassenbildung kann nur für das ausgewählte Untersuchungsgebiet benutzt werden, da eine Überprüfung bisher nur an Erosionskartierungen auf den Testflächen stattfand.

Die Ergebnisse werden in 4 Klassen unterteilt. Dies bedeutet für die Reduktion der Abflussmenge folgende Aufteilung:

Bodenbedeckungsgrad	Reduktion der Abflussmenge
0 - 12 %	0 %
13 - 30 %	25 %
31 - 53 %	50 %
54 - 99 %	75 %

Tab. 7: Reduktion der Menge des Oberflächenwassers unter verschiedenen Bodenbedeckungsgraden

4.3 Automatische Erkennung von Fahrspuren, Vorgewende und Bearbeitungsrichtung

Drei der wichtigsten Raumstrukturelemente zur Beeinflussung der Fließwege werden vom landwirtschaftlichen Bearbeiter während der Bestellung des Ackerschlag erzeugt. Dazu zählen die Fahrspuren, das Vorgewende und die Bearbeitungsrichtung. Die Bewirtschaftung der Parzelle folgt einem gleichbleibenden Schema. Der Ackerschlag wird in der Richtung der längsten Ausdehnung bearbeitet. Dabei muss darauf geachtet werden, dass vom Vorgewende eine direkte Zufahrt zum nächsten Wirtschaftsweg besteht. Wie in Abb. 25 zu sehen ist, weist der Großteil der Ackerparzellen im Untersuchungsgebiet eine Ausrichtung zwischen den landwirtschaftlichen Wegen auf, die eine Längsbearbeitung sowie direkte Zufahrtswege zum Vorgewende erlauben.

Insgesamt zeigt sich das gesamte Testgelände als eine sehr homogene Fläche, die eine automatisierte Bearbeitung zur Erkennung von Fahrspuren, Vorgewende und Bearbeitungsrichtung erlaubt. Die wichtigsten Kriterien zur Überprüfung setzen sich aus folgenden zwei Parametern zusammen:

1. Längen-/Breitenverhältnis
2. Zufahrtsmöglichkeit vom Vorgewende zu Wirtschaftswegen

Hierdurch ist mit 98.29 % Wahrscheinlichkeit eine korrekte Aussage über die Anordnung der oben genannten Raumstrukturen zu erreichen. Die Auswertung stützt sich auf das



Abb. 25: Parzellierung von Ackerflächen in Bültum (Ilde). Die Bearbeitungsrichtung der einzelnen Ackerflächen wurde zur Validierung zu Projektbeginn kartiert.

Untersuchungsgebiet, in dem bei 411 landwirtschaftlichen Parzellen die Bearbeitungsrichtung automatisch und im Gelände identifiziert wurde.

4.3.1 Eingangsdaten und Aufbereitung des Datensatzes

Die Eingangsdaten zur automatischen Generierung der Bearbeitungsrichtung sollten zwei wichtige Grundvoraussetzungen erfüllen: Zum einen sollte der Datensatz die Flurgrenzen der Ackerflächen auf einem aktuellen Stand präsentieren, zum anderen sollte er ohne großen Aufwand von den Landesvermessungsämtern erhältlich sein. Die für das Untersuchungsgebiet benötigten digitalen Kartenwerke werden vom niedersächsischen Landesvermessungsamt durch die ATKIS/DLM Daten geliefert. Die objektstrukturierten Vektordaten des Basis-DLM erhalten ihre Quellinformation hauptsächlich aus der Deutschen Grundkarte (DGK 5). Die Lagegenauigkeit der Geometrie von Straßen, Gewässern, Vegetationsflächen usw. beträgt +/- 3 m (WWW.LGN.DE 1999).

Zusätzlich wurden im Untersuchungsgebiet im Rahmen der Nutzungskartierung Veränderungen und Ergänzungen der Parzellengrenzen in den Ausgangsdatensatz integriert (digitalisiert).

Das Basis-DLM wird im Datenformat der Einheitlichen Datenbankschnittstelle -EDBS- des ALK/ATKIS-Projektes abgegeben. Da die weitere GIS gestützte Verarbeitung in ARC/INFO stattfindet, müssen die Eingangsdaten konvertiert werden. Hier erfolgen dann die ergänzenden Digitalisierungen der Parzellengrenzen. Des Weiteren erfolgt eine Implementierung des Datenkataloges mit zusätzlichen Angaben zur Landnutzung. Die fehlenden Informationen wurden aus Kartierungen der Ackerflächen und einer Befragung der Landwirte (z.B. Angaben zur Fruchtfolge) ergänzt.

4.3.2 Methodik

Die automatische Generierung von Bearbeitungsrichtung, Vorgewende und Fahrspuren wird über ein Programmmodul gelöst, dessen Hauptteil sich in 5 Teilprogramme gliedert. Die einzelnen Arbeitsschritte lauten:

1. Ausscheidung von landwirtschaftlich nicht genutzten Flächen

In einem der ersten Berechnungsschritte werden alle ackerbaulich genutzten Flächen extrahiert. Dies bedeutet eine Elimination von Brache- und Grünlandflächen, Gärten und anderen Vegetationsflächen. Zudem wird das Datenaufkommen während der Berechnung auf ein akzeptables Maß verringert.

2. Elimination von Stützpunkten (Vertex) aus den Flächenpolygonen

Ein wichtiger Arbeitsschritt stellt das Entfernen von Stützpunkten da. Je mehr einzelne Stützpunkte in der Grenzlinienführung vorhanden sind, desto schwieriger gestaltet sich die Ermittlung der korrekten Bearbeitungsrichtung. Aus diesem Grund wird jedes Polygon auf die Nodes (Knotenpunkte) reduziert, d.h. alle Vertex werden entfernt. Im ursprünglichen Datensatz bestehen die einzelnen Polygone aus durchschnittlich 24.78 Teilstücken. Besonders die nachdigitalisierten Grenzverläufe weisen eine hohe Anzahl von einzelnen Verbindungsstrecken auf.

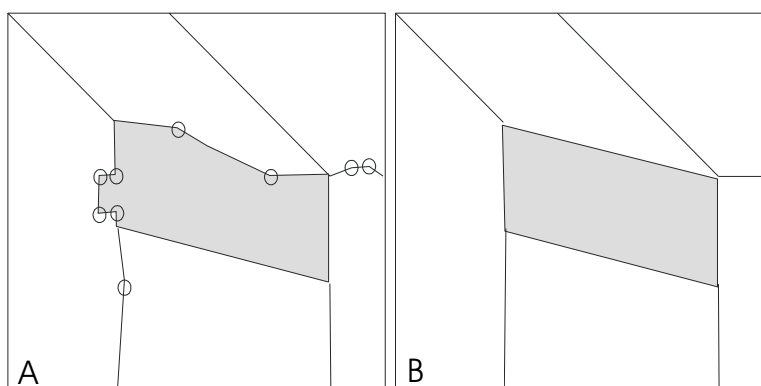
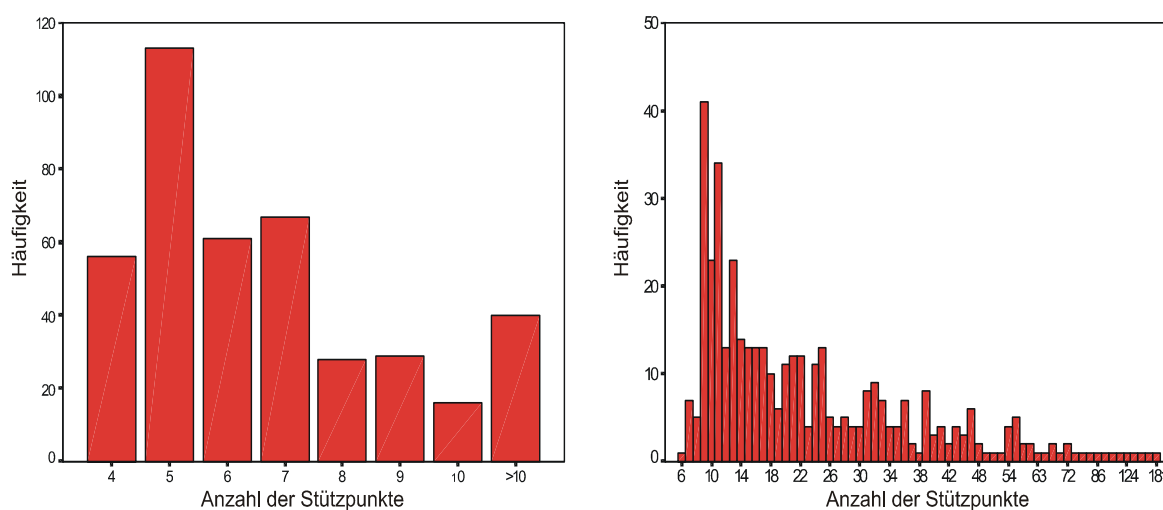


Abb. 26: Elimination von Vertex (umkreiste Stützpunkte in A) aus Flächenpolygonen. Die Geometrie der Parzelle (B) bleibt durch Beibehalten der Nodes bestehen.

Abb. 26 zeigt die Verteilung der Stützpunkte der einzelnen Ackerparzellen. Nach der Reduzierung werden im Mittel nur noch 6 Teilstrecken zur Beschreibung eines Polygons benötigt. Hiernach kann die genaue Form und Größe der Parzelle nicht mehr konstruiert werden, jedoch geben die Eckpunkte der Fläche genaue Angaben zur Geometrie der Ackerparzelle wieder, die zur automatischen Generierung der Bearbeitungsrichtung erforderlich ist.



	Min	Max	Mittelwert	Standardabweichung
Orginalcover	6	181	24.78	21.22
Bereinigtes Cover	4	18	6.6	2.14

Abb. 27: Verteilung und Statistik von Stützpunkten der Flächenpolygone: vor und nach Bereinigung der Hilfsstützpunkte (Vertex)

3. Ermittlung von Längen-/Breitenverhältnis

Das jetzt bereinigte Cover wird in einem geometrischen Verfahren auf Längen- und Breitenverhältnisse untersucht, d.h. die längste Parzellenstrecke wird mit der Breitenausdehnung verglichen. Das Diagramm zeigt das Verhältnis vom Längen zum Breitenverhältnis auf. Ein Wert von 100 entspricht gleicher Längen- wie Breitenausdehnung (ein Wert von 50 entspräche einer Parzelle, deren Breite halb so groß wie die Länge ist). Abb. 28 zeigt, dass der Großteil der Ackerschläge eine Rechteckige bis schmal-gestreckte Form aufweisen. Zum einen zeigt sich eine deutliche Ansammlung von Parzellen im Bereich von 10-30% (schmal-gestreckte Form). Dies sind vor allem kleinere Ackerschläge, die aus Gründen der Flurbereinigung bzw. als Saatgut-Testparzellen von Landwirten bewirtschaftet werden (siehe Abb. 29). Der andere auffällige Bereich zeigt sich in dem Längen-Breitenverhältnis von 40-80%. Hier weisen die landwirtschaftlichen Flächen sehr günstige Geometrien für die Bearbeitung auf, d.h. ein für die Flächengröße möglichst geringer Arbeits- und Zeitaufwand. Nur 9.4% der Parzellen weisen ein Längen-Breitenverhältnis von über 80% auf, d.h. nahezu gleiche Breiten- wie Längenausdehnung. Bis zu diesem Wert beträgt die Wahrscheinlichkeit der korrekten Lageberechnung über 98.3%, so dass keine weiteren Algorithmen in die Berechnung eingehen müssen.

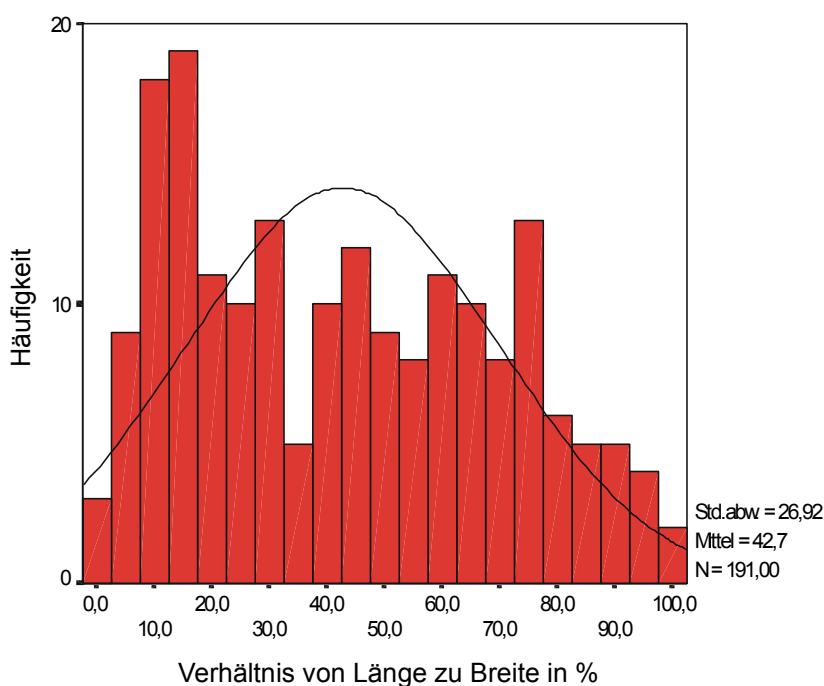


Abb. 28: Längen-Breitenverhältnis der im Untersuchungsgebiet vorgefundenen Parzellen. 100 bedeutet gleiche Länge wie Breite des Ackerschläges

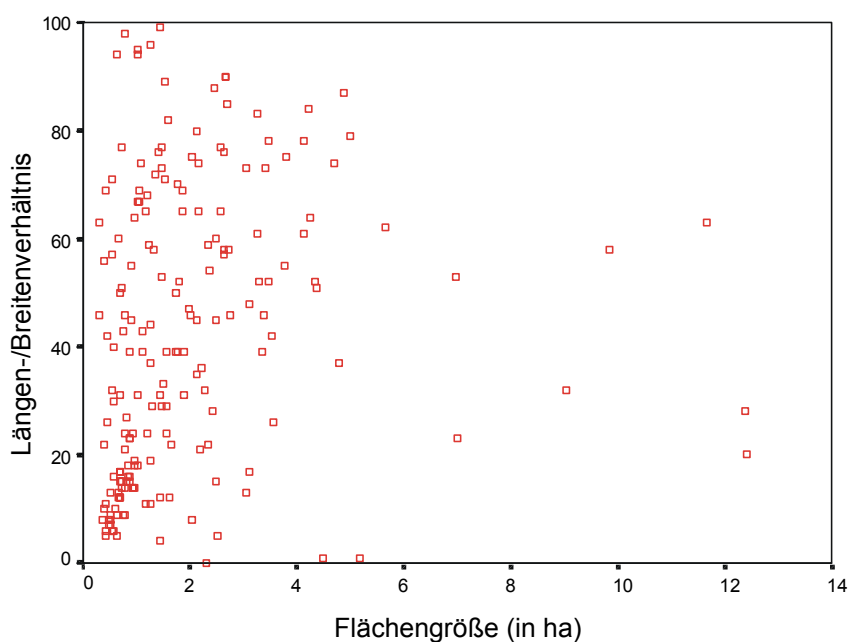


Abb. 29: Aufteilung der Parzellen nach Parzellengröße und Längen-Breitenverhältnis. Deutlich ist der höhere Anteil der sehr schmalen Ackerstreifen bei geringen Flächengrößen zu erkennen. Bei den Parzellen mit mehr als 2 ha ist die Flächenform zur automatischen Analyse wegen der gestreckten Form sehr gut geeignet.

4. Ergänzende Überprüfung des Anschlusses vom Vorgewende zum Wegesystem

Lassen obige Berechnungen keine sichere Zuordnung der Raumstrukturen zu, werden die Parzellen weiterhin auf Anbindung des Vorgewendes an einen landwirtschaftlichen Weg geprüft, damit eine sichere Bestimmung der Bearbeitungsrichtung erfolgen kann. Als Grundlage dient die Annahme, dass der Landwirt nach erfolgter Bewirtschaftung des Ackerschlag es direkten Zugang zum Wegesystem benötigt (Siehe Abb. 30). Insgesamt wurden im gesamten Untersuchungsgebiet 14 Fälle während des ersten Berechnungsschrittes als problematisch deklariert. Die Bearbeitungsrichtung wurde in diesen Situationen anhand der Ein- und Ausfahrten bestimmt.

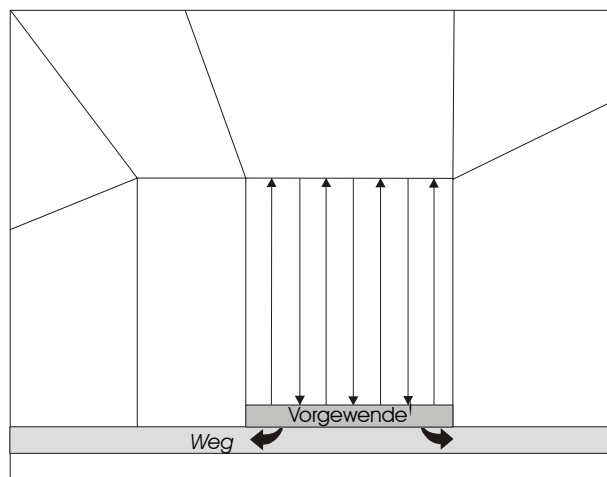


Abb. 30: Schematische Darstellung der Berechnung der Bearbeitungsrichtung anhand Anbindung des Vorgewendes an das landwirtschaftliche Wegenetz

5. Berechnung von Bearbeitungsrichtung, Vorgewende und Fahrspuren

Anhand der Bearbeitungsrichtung lassen sich für die Ackerparzellen Angaben zur Lage von Fahrspuren und Vorgewende generieren. Dieses Verfahren funktioniert auch auf Grundlage geometrischer Berechnungen. Für jede Ackerfläche kann eine spezifische Bearbeitungsbreite angegeben werden, die dann vom Programm zur Bildung von parallel verlaufenden Fahrspuren umgesetzt wird (siehe Karte 1 und Karte 3). In der Ausgabedatei liegen die Angaben zu den Raumstrukturen im Vektorformat vor und können zur weiteren Bearbeitung in jedes GIS eingelesen werden. Im Gegensatz zur Prognose der Bearbeitungsrichtung zeigen sich hier größere Probleme, da nur gerade Strecken als Fahrspuren ermittelt werden können, d.h. abgewinkelte bzw. gebogene Strecken können nicht erstellt werden. Dies zeigt sich im Untersuchungsgebiet besonders in Bereichen von Bächen, wo die Parzellengrenzen dem Gewässerverlauf folgen. Von den 411 landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Region Ambergau mussten aber nur 38 (9.24%) Einzelflächen nachbearbeitet werden. Der hohe Anteil der korrekt erfassten Strukturelemente beruht auf der homogenen Anordnung der Parzellengrenzen im Untersuchungsgebiet. Besonders in Gebieten mit stark differenzierten Oberflächenformen und damit unregelmäßigen Schlagformen kann eine so hohe Vorhersagegenauigkeit nicht eingehalten werden.

5. Modellergebnisse und Vergleich des Modellergebnisses mit den Beobachtungen

5.1 Übersicht zu den durchgeführten Berechnungen

Die Modellierung der linearen Abflussbahnen wurde in drei unterschiedlichen Untersuchungsgebieten (Ilde, Wöllersheim, Lamspringe) im Raum Ambergau/Innerste-Bergland umgesetzt. In jedem Teilgebiet wurden in der 4-jährigen Beobachtungsphase sämtliche für die Modellberechnung benötigten Basisdaten erfasst und in einem Geoökologischen Informationssystem bereitgestellt. Die alljährliche Aufnahme der relevanten Daten erfolgte sowohl über eine einmalige Grundkartierung (z.B. Landnutzung) als auch über eine kontinuierliche Begehung in einem regelmäßigen Zeitintervall (z.B. zu Ermittlung des Bodenbedeckungsgrad). Zusätzlich wurden noch ereignisbezogene Kartierungen nach erosiven Niederschlagsereignissen durchgeführt. Die Aufnahme erfolgte über einen Zeitraum von 4 Jahren (1995-1998).

Aufgrund starker Schwankungen der Niederschlagsmengen und -intensitäten im jahreszeitlichen Verlauf wurden in dem 4-jährigen Untersuchungszeitraum unterschiedliche Formen und Typen von Niederschlagsereignissen als Auslöser für Bodenerosionsschäden beobachtet.

Jahr	Zeitraum	Niederschlagsbedingungen	Anzahl der betroffenen Parzellen	Anteil linearer Formen
1995	Februar - April	Dauerregen	68	45
1996	Februar - März	Dauerregen während Schneeschmelze	132	114
1997	Februar	Dauerregen auf gefrorenem Boden	6	5
	Mai	Starkregen	13	13
1998	Oktober/November	Dauerregen	37	35

Tab. 8: Charakterisierung und Übersicht zu den Bodenerosionsereignissen 1995-1998

Tab. 8 zeigt für den gesamten Untersuchungszeitraum die Verteilung der Niederschlags-typen und ihre unterschiedlichen Erosionsformen. Bis auf den Mai-Termin 1997 entwickelten sich alle erosiven Niederschlagsereignisse aus langanhaltendem Dauerregen. Während bei dem einzigen Starkregenereignis ausschließlich lineare Abtragsformen zu erkennen waren, ist bei den anderen Niederschlagsformen auch ein Anteil an der flächenhaften Erosion zu

erkennen. Die Aufteilung der einzelnen Erosionsschäden in den drei Testgebieten zeigt keine besonders auffälligen Tendenzen. Insgesamt waren im Raum Wöllersheim weniger Schäden festzustellen als in Kloster und Ilde. Dieses lässt sich anhand folgender Besonderheiten erklären:

- Die Niederschlagsmengen in Wöllersheim waren lokal geringer als in den beiden anderen Testgebieten.
- Ein Großteil der Ackerflächen wurde bodenschonend bearbeitet.
- Die Bodeneigenschaften sind durch viele hochgepflügte Steine in Bezug auf den Erosionswiderstand verbessert worden.

Die nachfolgenden Erläuterungen zu den Einzelergebnissen werden für die Teilgebiete Kloster und Ilde vorgenommen. Eine ausführliche Dokumentation des Untersuchungsgebietes Wöllersheim soll wegen der geringeren Anzahl von Erosionsformen entfallen. Zudem wurden in diesem Raum keine besonderen Auffälligkeiten im Gegensatz zu den anderen Teilflächen festgestellt. Die Ergebnisse im Gebiet Ilde werden nur anhand eines Teilbereichs gezeigt. Dieser Ausschnitt ist stark von Erosion betroffen. Die anderen Bereiche weisen nur geringe Schäden auf.

Die folgenden Vergleichsergebnisse basieren auf der Kartieraufnahme der Gebiete Kloster und Ilde 1998. Die Auswahl der Erosionsereignisse auf diesen zwei Testflächen und die Auswahl des Jahres begründet sich wie folgt:

1. 1996 und 1997 waren beide erosiven Niederschlagsereignisse im Frühjahr direkt zum Zeitpunkt der Schneeschmelze (Tab. 8). Die Wirkungen des Erosionsprozesses auf gefrorenem Boden zeigt hinsichtlich der Schäden ein differenziertes Bild im Vergleich zu den sonstigen Abtragsformen. Der Oberflächenabfluss setzt sich aus Niederschlagswasser und geschmolzenem Schnee bzw. Eis zusammen. Dadurch erhöht sich die Menge des abfließenden Wassers, zudem fehlte durch die gefrorene Bodenoberfläche die Möglichkeit der Infiltration. Jedoch konnte gleichzeitig durch die Vereisung des Bodens eine starke Eintiefung der linienhaften Erosionsformen vermindert werden. So wurden mehrfach im Testgebiet relativ breite aber flache Abtragsformen bei der Kartierung aufgenommen. Besonders problematisch zeigt sich die Modellierung der Abflussrichtung des Oberflächenwassers. Durch Aufstau von Schneeresten und Eis, Verstopfung von Gräben und zugefrorenen Rohren usw. ist eine Prognose nur eingeschränkt möglich.

2. Im Mai 1997 konnten nur dreizehn Erosionsformen kartiert werden. Die Intensität des Niederschlages bewirkte nur geringe Schäden auf den Parzellen. Das Modell konnte diese wenigen Bereiche der linearen Erosion prognostizieren, jedoch zeigte sich die Anzahl der Rinnen und Rillen für eine statistische Auswertung als zu gering.
3. Die Erosionsereignisse 1995 und 1998 unterscheiden sich in der Lage der kartierten Formen nur geringfügig. Während sich 1998 eine Niederschlagsperiode für die Schäden verantwortlich zeigte, führten 1995 von Ende Februar bis Anfang April über mehrere Wochen verteilt einzelne Regenschauer zu den kartierten Ergebnissen. Die Kartieraufnahme zeigt vor allem nur kleine lineare Formen (Rillen) und flächenhaft-linienhafte Schäden. 1998 konnte hingegen das gesamte Spektrum der Abtragsformen aufgenommen werden.

Die Ergebnisse der Kartierungen und der Vergleich mit den modellierten Prognosekarten sind nach einem bestimmten Schema aufgebaut; für jedes Untersuchungsgebiet besteht ein Kartensatz aus drei Blättern. Die Inhalte der Karten sind folgende:

1. Die erste Karte zeigt alle in dem jeweiligen Testgebiet vorkommenden Raumstrukturelemente auf. Dies umfasst alle linienhaften und punktuellen Formen. Die Fahrspuren und das Vorgewende werden aus dem automatisierten Teilmodul übernommen. Alle anderen Strukturelemente sind aus den Kartierungen übertragen worden. Zusätzlich werden im Bildhintergrund der Karte (graue Pfeile) die durch die Reliefanalyse ermittelten Abflussrichtungen angezeigt.
2. Die nächste Karte zeigt alle kartierten Erosionsformen. Dies schließt sowohl die flächenhaften, flächenhaft-linienhaften und linienhaften Abtragsformen ein. Auch Bereiche mit Akkumulation bzw. Sedimentation werden dargestellt. Zusätzlich wird noch die Realnutzung der landwirtschaftlichen Flächen angezeigt.
3. Auf der dritten Karte werden die kartierten mit den modellierten linearen Erosionsformen verglichen. Um einen besseren Überblick über die Lagegenauigkeit der prognostizierten Rillen und Rinnen zu erhalten, wurden die im Feld aufgenommenen Erosionsschadenskartierungen grau hinterlegt. Zusätzlich wird der Bodenbedeckungsgrad während des Erosionsereignisses angezeigt. Einige Markierungen auf den Karten verweisen auf Besonderheiten, die ausführlich im Text erklärt werden.

Der Vergleich der modellierten- mit den kartierten Erosionsformen erfolgte unter Verwendung des Geographischen Informationssystem ARC/INFO. Auf Vektorebene werden die beiden Cover miteinander auf Überlappung bzw. Überschneidungen überprüft. Der mittlere Abstand

einzelner Erosionsformen wird über die ‚Buffer‘-Funktion ermittelt. Hiermit lässt sich eine durchschnittliche Abweichung der prognostizierten Abflussbahnen mit den kartierten Rillen und Rinnen berechnen.

5.2 Modellergebnisse für das Gebiet Kloster (Lamspringe)

Das gesamte Untersuchungsgebiet Kloster bildet ein vollständiges Einzugsgebiet. Die Parzellengrenzen an den Randbereichen des Gebietes werden durch Wälder bzw. Straßen und Wege abgegrenzt. Dadurch sind diese Flächen keinem Zufluss von Fremdwasser ausgesetzt und bieten sehr gute Möglichkeiten im Hinblick auf die Erosionsuntersuchungen. Das hier behandelte Niederschlagsereignis 1998 fand im Gegensatz zu den vorhergehenden Jahren im Herbst statt. Die Niederschlagsmengen, die von Ende Oktober bis Anfang November die erosiven Prozesse auslösten, fielen über mehrere Tage mit geringen Intensitäten (siehe Abb. 31). Ausnahmen bildeten der 28.10. (42.3 mm/d) bzw. der 1.11. (32.6 mm/d).

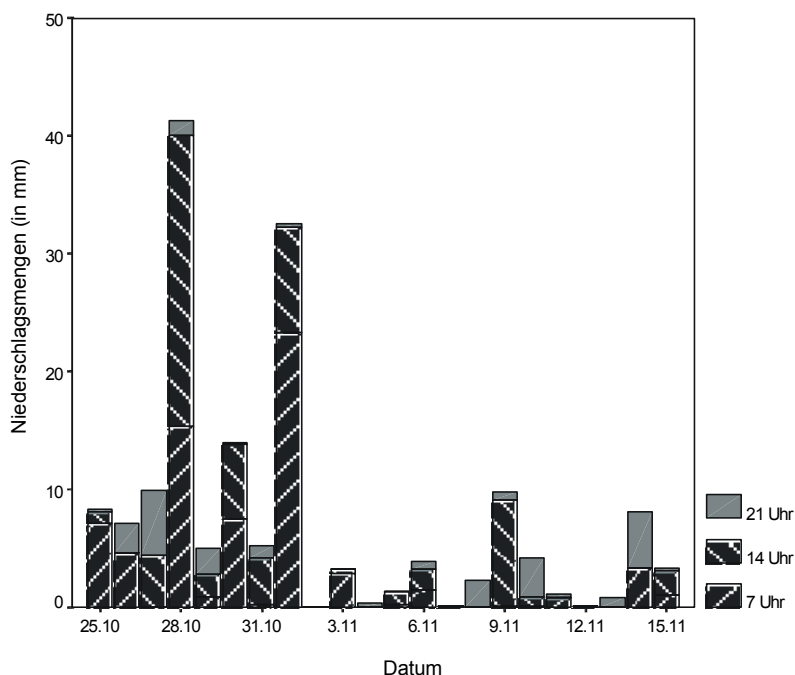


Abb. 31: Niederschlagsmengen in mm/d der Referenzstation Seesen 1998. Deutlich sind die ergiebigen Niederschläge vom 28.10.-1.11.1998 zu erkennen. Die Klimadaten konnten zu diesem Zeitpunkt nicht von der im Untersuchungsgebiet betriebenen eigenen Station gewonnen werden. Die Niederschlagsmengen in Seesen sind durch die Lage höher als im Testgebiet.

5.2.1 Die Raumstruktursituation im Gebiet Kloster

Karte 1 zeigt die linearen und punktuellen Raumstrukturelemente im Untersuchungsgebiet Kloster (Lamspringe). Als besonders relevant für das Abflussverhalten erweisen sich hierbei die Fahrspuren, Vorgewende und Ackerrandfurchen. Deutlich zeigt sich die Herausbildung unterschiedlicher Erosionsformen in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsmethoden. Auf Karte 2 sind östlich vom Clausberg die typischen parallel verlaufenden Rillen zu erkennen, die sich unter Bearbeitung in Gefällerrichtung ausbilden. Hier fließt das Wasser in den Fahrspuren hangabwärts bis zu der Tiefenlinie des Ackerschläges, worauf eine Bündelung und Fortführung bis zum Parzellenrand erfolgt ('Talwegerosion').

Ein großer Teil der landwirtschaftlich genutzten Flächen wird quer zum Gefälle bearbeitet (siehe grau unterlegte Pfeile in Karte 1). Nur im Südwesten und Süden des Einzugsgebietes werden einige Parzellen teilweise oder vollständig in Richtung der Hangneigung bearbeitet. Die Realnutzung der Ackerschläge im Südwesten besteht vorwiegend aus Grünbrache und Grassansaat. Die Flächen erreichen somit meist einen Bodenbedeckungsgrad von annähernd 100%. Dadurch traten 1998 trotz der Bearbeitung in Gefällerrichtung keine erosiven Schäden in diesen Bereichen auf. Deutlich wird das Schadenausmaß hingegen auf der südlichen Ackerparzelle östlich vom Clausberg (s.o). Dieser Schlag zeigt die größten erosiven Schäden auf. Im unteren Hangbereich ist ein Übertritt zur nächsten Parzelle zu sehen. Zwischen den beiden Ackerschlägen befinden sich weder eine Ackerrandfurche noch eine andere leitende Form, die das Oberflächenwasser in den Vorfluter hätten leiten können. Dadurch ist es zu einer schweren Schädigung der nachfolgenden Parzelle gekommen. Auf ca. 50 m Länge entstanden Rinnen und Gräben mit bis zu 60 cm Breite. Die vertikale Ausdehnung der Erosionsformen wurde durch die Pflugsohle (40 – 60 cm) vorgegeben.

Gegensätzlich dazu ist die Bildung erosiver Schäden auf dem Großteil der restlichen Fläche zu beobachten. Hier erfolgt die Bearbeitung des Schläges quer zum Gefälle. Die Fahrspuren erfüllen ihre Funktion zwar weiterhin als Sammler des abfließenden Wassers, jedoch entstehen hier keine Rillen, da sowohl die zusammenfließende Menge des Oberflächenwassers als auch die herabgesetzte Fließgeschwindigkeit innerhalb der Fahrspuren durch das Gefälle (hangparallele Bearbeitung) sehr gering ist. Erst in den Senken- und Muldenbereichen erlangen sowohl Abflussmenge als auch -geschwindigkeit des hangabwärts fließenden Wassers eine Kraft, die zur Entstehung von Rillen bzw. Rinnen führt.

Das Untersuchungsgebiet besitzt 3 punktuelle Strukturelemente. Im Bereich der Landstraße L466 wurden zwei Abflussrohre in die Gräben gebaut. Diese entwässern die beiden Ackerparzellen im Osten der Straße. Das Wasser wird direkt in die Lamme geleitet, so dass die weiter hangabwärts liegenden landwirtschaftlichen Flächen keinen Fremdwasserzufluss erhalten können. Die dritte Markierung beschreibt den Standort eines Gullys. In diesem Bereich wird der Oberflächenabfluss aus weiter südwestlich gelegenen Parzellen entwässert. Die Funktion des Bauwerks stellt einen direkten Schutz der weiter hangabwärts liegenden Ackerflächen gegen Fremdwasserzufluß dar. Während des gesamten Untersuchungszeitraumes gelangten erhebliche Mengen an Bodenmaterial durch erosive Prozesse in den Gully. Dies stellt zwar keine präventive Maßnahme zum Schutz des Bodens dar, jedoch wurden größere Schäden auf den tiefer gelegenen Parzellen vermieden.

5.2.2 Vergleich der modellierten mit den prognostizierten Erosionsformen

Vergleicht man die Ergebnisse der modellierten Abflussbahnen mit den kartierten Erosionsformen, zeigt sich bis auf wenige Ausnahmen eine gute Übereinstimmung der Lage von Rillen und Rinnen (Karte 3). Zur Visualisierung des Ergebnisses wurden die kartierten Erosionsformen auf 4 m Breite gepuffert und mit grauer Farbe den modellierten Abflussbahnen unterlegt. Nur in drei Bereichen treten ungenaue bzw. fehlerhafte Modellergebnisse auf. Im Norden des Untersuchungsgebietes (Markierung ②) verlaufen die modellierten Erosionsspuren in der Mitte der Parzelle. Dieses hat sich, nach Begehung und Überprüfung im Gelände, als Folge eines Fehlers im DHM herausgestellt. Markierung ① zeigt einen Übertritt von einer Parzelle über die Straße in den hangabwärts liegenden Ackerschlag an. Dies ist die Folge der fehlenden Kartierung eines Grabens, der diese Erosionsform am Weg unterbrochen und in einem Rohrsystem aus dem Gebiet entwässert hätte. Die letzte Ungenauigkeit befindet sich südöstlich der Markierung ② an der Landesstraße L466. Obwohl weiter südlich ein Abflussrohr das Oberflächenwasser unterirdisch in den Vorfluter leitet, wird ein Teil des Abflusses über die Straße geleitet. Dieser Fehler hängt mit der ungenauen Erfassung der aufgeschütteten Trassenführung der L466 im DHM zusammen. Sinnvoll wäre hier eine noch genauere Aufnahme und Integration der topographischen Elemente in das DHM durch die Landesvermessungsämter.

Die durchschnittliche Lageungenauigkeit der prognostizierten Abflussbahnen mit den kartierten Erosionsformen beträgt ca. 8-10 m. Trotz einer Basisauflösung des eingesetzten digitalen Geländemodells von 12,5 m zeigt sich vielfach eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Da die maximale Auflösung eines DGM5 aus einer Messpunktverteilung von

25 m disaggregiert wird, kann die Ungenauigkeit der Reliefeingangsdaten schwer abgeschätzt werden. Die geringe Abweichung der Abflussrichtung bei Markierung ③ hat zwei verschiedene Ursachen. Zum einen wurde die Kartierung nicht durch GPS-Einsatz unterstützt, so dass der Bearbeiter die Verortung nur über ein Abschreiten der Erosionsformen erreichen konnte. Hierdurch ergaben sich mögliche Lageungenauigkeiten der Kartierung im Bereich einiger Meter. Die modernen GPS-Systeme ermöglichen heutzutage eine Messgenauigkeit im Meterbereich. Zum anderen kann das Modul zur automatischen Erkennung der Fahrspuren geringe Abweichungen der Bearbeitungsspuren zur realen Situation nicht vermeiden. Es zeigt sich jedoch, dass das Ergebnis des Modells durch die Problematik der exakten Aufnahme nur unbedeutend beeinflusst wird.

Die Definition einer geeigneten Einzugsgebietsgröße zur Bestimmung der beginnenden Rillenbildung gestaltet sich relativ schwierig. Die Diversität von Bodeneigenschaften, Feuchtegehalt, Niederschlagsintensität und vieler anderer Faktoren gestattet nur eine grobe Prognose des Startpunktes linearer Abtragspfade. Im direkten Vergleich der Modellergebnisse mit der realen Situation zeigen sich trotzdem gute Ergebnisse (Karte 3). Im Mittel variiert die Länge einzelner Abtragsformen im Gegensatz zu den kartierten Rinnen und Rillen um +/- 30 m . Der Einsatz von Sensitivitätsanalysen bietet die Möglichkeit, individuell für jedes Untersuchungsgebiet angepasste Einzugsgebietsgrößen zu erhalten. Die in Kapitel 3.7.6 ermittelte hohe Diversität der Länge der Abtragsformen im Verhältnis zur erosiven Hanglänge zeigt ohnehin die Schwierigkeiten einer genauen Prognose auf.

Raumstrukturelemente im Untersuchungsgebiet Kloster (Lamspringe) im November 1998

Karte 1

Lineare Strukturelemente

- Grenze
- Fahrspuren
- Vorgewende
- Ackerrandfurche

Punktuale Strukturelemente

- Abflussrohr
- Gully

Datenquellen:

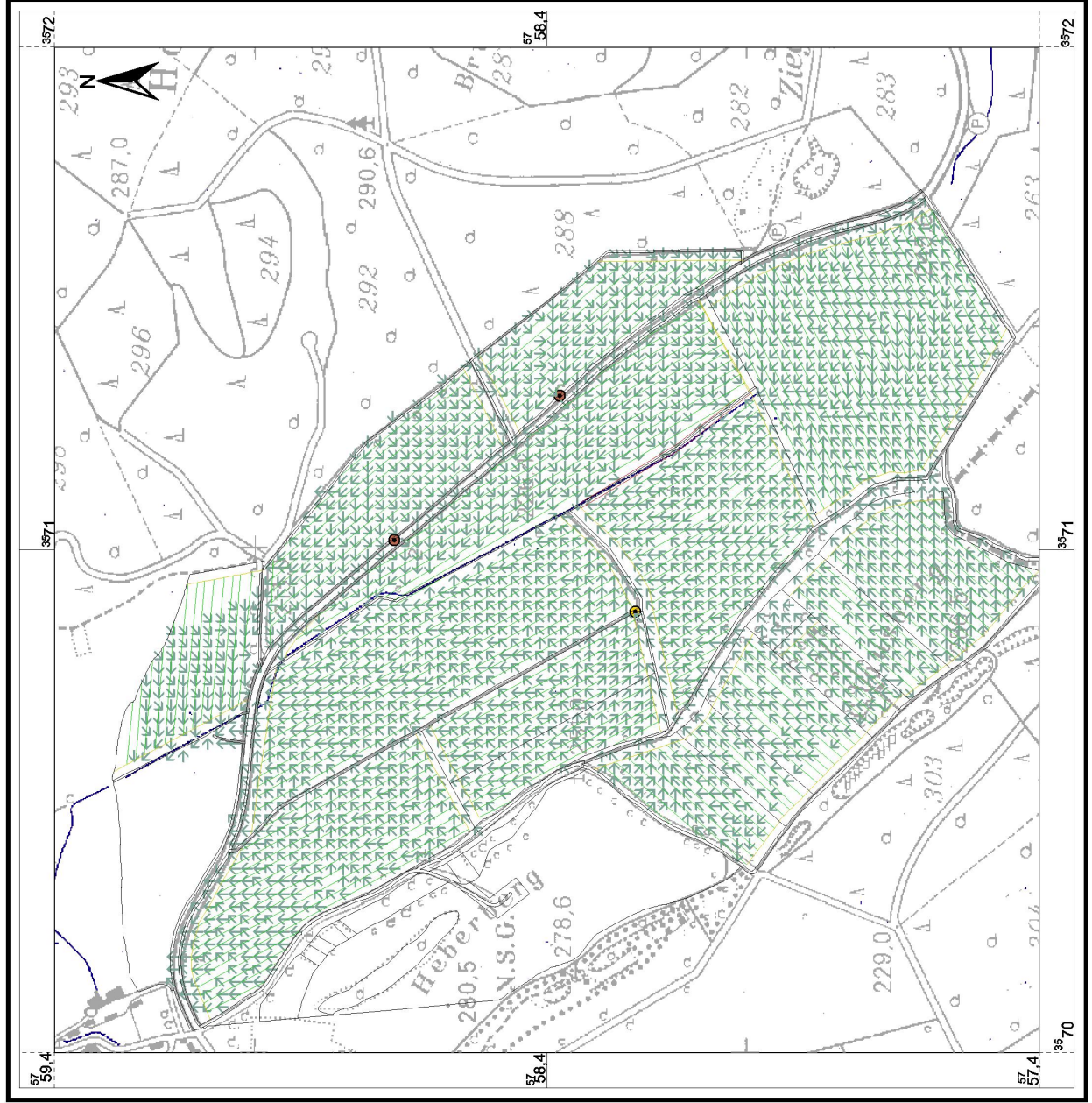
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Bierbaum



**Geographisches Institut
Universität Hannover**
Physische Geographie und
Landschaftsökologie



Ergebnisse der Erosions- schadenskartierung im November 1998 im Untersuchungsgebiet Kloster (Lamspringe)

Karte 2

Erosionsformen

- ★ Übertritt in Nachbarparzelle
- ★ Übertritt auf Straßen und Wege
- ★ Übertritt in Gewässer
- ★ Übertritt in Gräben

- Flächenhaft-Parallel (Rinnen)
- Akkumulation (< 3cm tief)
- Akkumulation (3-10cm tief)
- Rillen (2-10cm tief)
- Rinnen (10-40cm tief)

Reinanznutzung

- Obstwiese
- Grasensaat
- Winterweizen
- Wintergerste
- Zuckerrüben
- Raps
- Grünbrache
- Klee

Datenquellen:

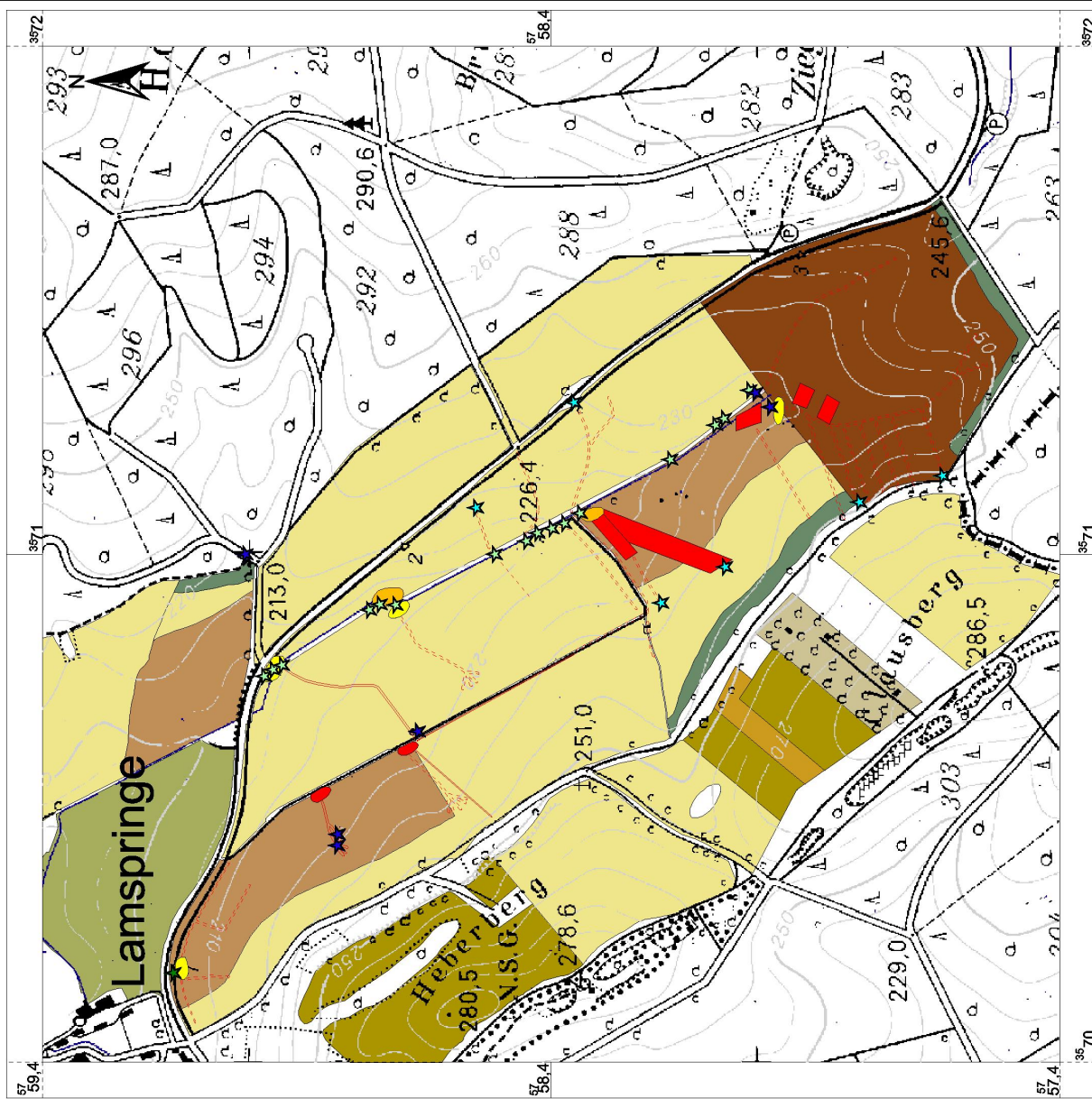
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Bierbaum



Geographisches Institut
Universität Hannover
Physische Geographie und
Landschaftsökologie



Prognostizierte Abflussbahnen des Erosionsereignisses vom November 1998 im Untersuchungsgebiet Kloster (Lamspringe)




Karte 3

Modellierte Abflussbahnen

-  Prognostizierte Abflussbahnen
-  Kartierte Erosionsformen

-  Markierung siehe Text

Bodenbedeckungsgrad

-  0%
-  10-20%
-  100%

Datenquellen:

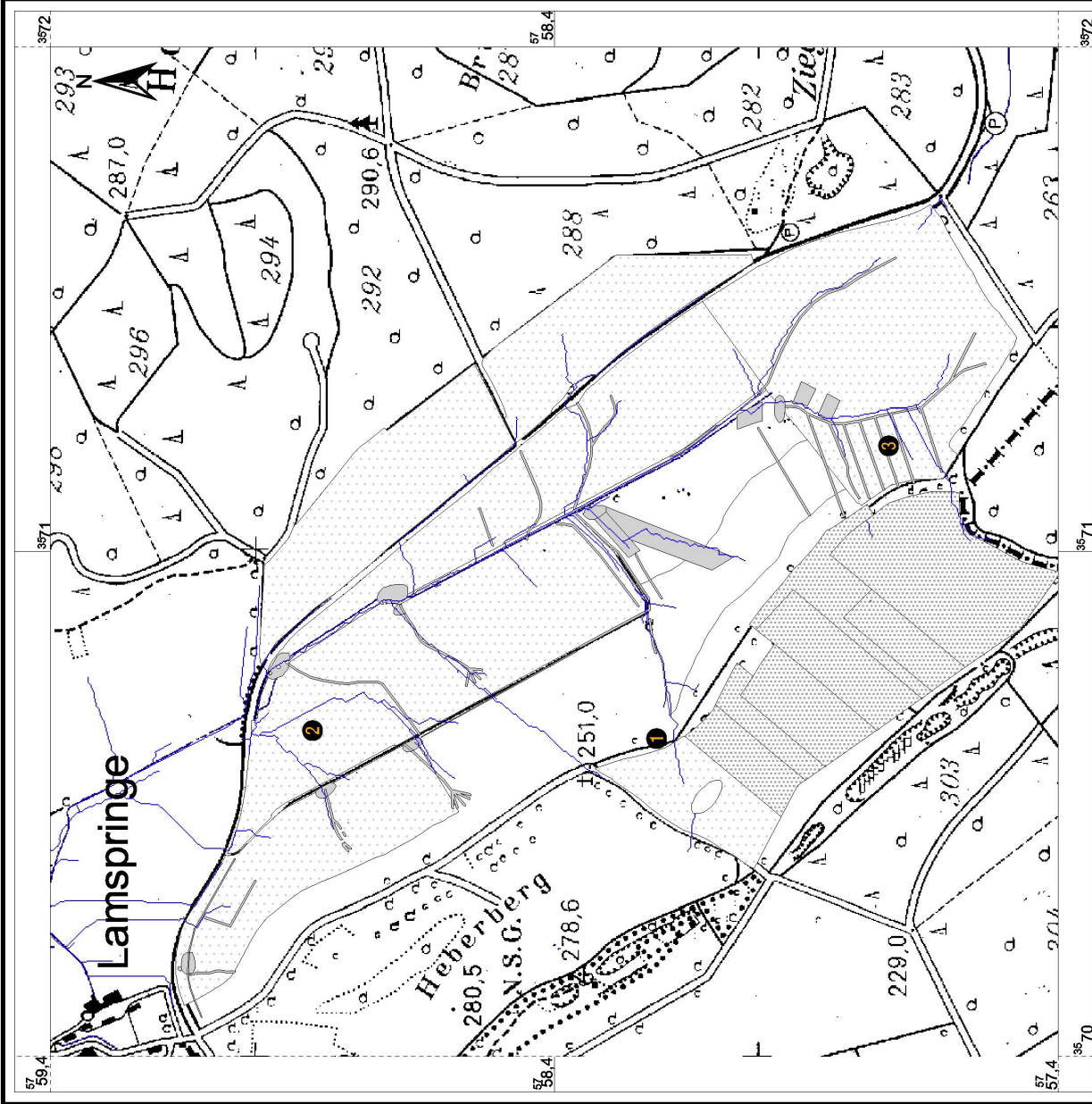
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
 ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
 Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Bierbaum



**Geographisches Institut
 Universität Hannover**
 Physische Geographie und
 Landschaftsökologie



5.3 Exemplarische Darstellung der Modellergebnisse am Beispiel des Gebietes Ilde

Auf den Karten 4-6 sind die Ergebnisse der Erosionsschadenskartierung und Modellierung im Untersuchungsgebiet Ilde 1998 dargestellt. Im Gegensatz zu dem in Kapitel 5.2 genannten Gebiet Kloster zeigt der Bereich Ilde nur einen Ausschnitt aus dem Gesamtgebiet. Das Gebiet besitzt große landwirtschaftliche Parzellen (im Mittel ca. 5 ha), die meistens in Gefällrichtung bearbeitet werden. Diese Ausgangsvoraussetzung ist grundsätzlich der Erosion förderlich; dennoch wurden in dem gesamten Untersuchungszeitraum nur wenige Erosionsschäden beobachtet. Der Gründe liegen vor allem in der erosionshemmenden Beschaffenheit der Bodenstruktur und der bodenschonenden Bewirtschaftung.

Die Auswahl dieses Teilstücks resultiert hauptsächlich aus der relativ hohen Anzahl der kartierten linienhaften Abtragsformen im Vergleich zu den anderen Bereichen. Bei dem Niederschlagsereignis 1998 traten insgesamt nur wenig lineare Erosionsschäden auf, obwohl viele Parzellen durch starke Verschlämmung betroffen waren. Da diese Form in der Kartierung nicht als eigentlicher Schaden interpretiert wird, wurden die flächenhaft-linienhaften Erosionsspuren des Vorjahres mit dargestellt. Die Niederschlagssituation im Ilder Raum entsprach der des Testgebietes Kloster. (siehe Abb. 31). Zur Zeit des Erosionsereignisses waren bis auf eine Ackerfläche (Grünbrache) alle anderen Parzellen mit Wintergetreide bestellt (Karte 5). Für den Erosionsprozess stellte dies bei einem geringen Bodenbedeckungsgrad von unter 5% eine sehr förderliche Situation dar.

5.3.1 Die Raumstruktursituation im Gebiet Ilde

Karte 4 zeigt alle linearen und punktuellen Strukturelemente im Testgebiet. Ähnlich wie im Lamspringer Gebiet werden die meisten Ackerparzellen nur noch geeggt, so dass die typischen Ackerrandfurchen, die beim Pflügen entstehen, nur auf zwei Schlägen zu finden sind. Deutlich ist auch der hohe Anteil an Flächen zu erkennen, die in Gefällrichtung bzw. quer bearbeitet werden. Die Folgen dieser landwirtschaftlichen Bearbeitungsmethode werden auf Karte 5 dargestellt. 1997 sind während eines ergiebigen Niederschlagsereignisses große Bereiche der Getreidefelder durch flächenhaft-linienhaften Bodenabtrag betroffen. Hier sind vor allem Erosionsformen in Fahr- und Saatspuren zu finden. Besonders die Ackerschläge im Norden des Testgebietes sind zum Teil bis zu 90% durch Erosion geschädigt.

Die punktuellen Strukturelemente (Abflussrohre) befinden sich gesamten Testgebiet verteilt hauptsächlich an Straßen und Wegen. Sie dienen dem Schutz der Verkehrswege und verbinden die Gräben untereinander. Zur Zeit kann das Modell nur die Funktion von Gullys simulieren, indem der gesamte Abfluss ab dieser Zelle auf Null gesetzt wird. Eine Unterführung müsste folgenderweise umgesetzt werden:

- Der gesamte Abfluss an der Stelle der Eintrittsstelle wird gespeichert
- Im definierten Abstand müsste eine weitere Zelle als ‚Quelle‘ den Zufluss aus der vorherigen Zelle übernehmen.

Bedingt durch die geringen Abstände der Unterführungen müsste eine sehr genaue Kartiergrundlage vorliegen. Zudem dürfte die Zelle nicht unterhalb der Geländeoberfläche liegen, da sonst eine abflusslose Zelle entstehen würde. Die Schwierigkeit der genauen Plazierung der Zellbereiche wird auf Karte 6 östlich der Markierung ② deutlich. Der Oberflächenabfluss wird über den Weg geführt, trifft aber in der Austrittsstelle nicht genau den Graben und wird damit auf der Ackerparzelle fortgeführt.

5.3.2 Vergleich der modellierten mit den prognostizierten Erosionsformen

Das Erosionsgeschehen 1997 war geprägt durch den flächenhaft-linienhaften Bodenabtrag. Kleinere Erosionsformen wie z.B. Rillen mit einer Tiefe von ca. 2-3 cm konnten sich nur in Fahr- und Saatspuren entwickeln. Im Gegensatz dazu zeigt das Erosionsereignis von 1998 ein differenziertes Erosionsausmaß. Ein niederschlagsintensiver Dauerregen löste hier hauptsächlich lineare Erosion auf einzelnen Parzellen aus. Besonders betroffen waren zwei Ackerschläge, die durch Fremdwasserzufluss von einem hangaufwärts liegenden Weg durch bis zu 35 cm tiefe Rinnen geschädigt wurden. Obwohl die Erosionsspuren sich auf einem Schlag bündelten, wurde die erosive Wirkung durch eine größere Akkumulationszone in der Feldmitte gebremst. Dies wird auf Karte 6 (Markierung ① und ②) klar aufgezeigt. Hier sind potentielle Akkumulationsflächen dargestellt, die durch den Grad der Neigung und Höhe des Bodenbedeckungsgrades ermittelt wurden. Da im Modell keine natürlichen Tiefenformen (s. Kapitel 4.1) simuliert werden können, wird auf der Karte weiterhin eine Abflussbahn aus dem Akkumulationsbereich herausgeführt.

Die flächenhaft-linienhaften Erosionsformen von 1997 konnten im Modell nicht erfasst werden (Markierung ③). Das Niederschlagsereignis hat im gesamten Verlauf relativ geringe Intensitäten aufgewiesen. Das Oberflächenwasser ist hangabwärts in Fahrspuren und

Saatreihen geflossen ohne sich bündeln zu können. Dadurch wird im Modell (SCS-Verfahren) die erosive Wirkung unterschätzt, da in Fahrspuren die Menge des Oberflächenwassers und die Größe des Einzugsgebietes zur Ausbildung von Erosionsspuren zu gering berechnet wird. Eine spezielle Parametrisierung für diese Bereiche könnte die Vorhersagegenauigkeit beträchtlich erhöhen, würde aber auch den Umfang der Eingangsdaten erhöhen.

Insgesamt betrachtet ist die Lagegenauigkeit der Hauptabflussbahnen im Gebiet Ilde sehr gut erfasst worden. Der mittlere Abstand der modellierten und der kartierten Erosionformen beträgt ca. 8 m. Alle wichtigen Rillen- und Rinnenbereich sind korrekt erfasst worden. Trotzdem werden im Ilder Raum einige Grenzen der Prognosemöglichkeiten aufgezeigt:

- Erreichen lineare Erosionformen einen Bereich, in dem Akkumulation bzw. Sedimentation stattfindet, kann nur über eine Feldbegehung geklärt werden, ob das Oberflächenwasser am Ort verbleibt und versickert, oder ob ein Großteil des Wasservolumens in hangabwärts liegende Bereiche gelangen kann, um dort weiter seine erosive Wirkung entfalten zu können. Zudem zeigt sich die Prognose der Abflussrichtung in sehr flachen Parzellenbereichen als problematisch, da in der Reliefanalyse durch Ungenauigkeiten im DHM schon geringe Höhendifferenzen von wenigen Zentimetern Lageungenauigkeiten von 10 – 50 m ergeben können.
- Der Einfluss von ‚Chaotischen‘ Faktoren - d.h. nicht prognostizierbaren Einflüssen wie z.B. der Aufstau von Wasser im Graben mit anschließendem Übertritt auf Ackerparzellen - kann neue Leitbahnen schaffen, die durch eine Modellberechnung nicht erfasst werden können.

Eine Verbesserung der Ergebnisse wäre durch einen erhöhten Kartieraufwand zu erreichen. Dies betrifft vor allem die zusätzliche Erfassung des Zustandes einzelner Raumstrukturelemente. Des Weiteren könnte eine Erhöhung der Datenqualität des DHM die Lagegenauigkeit verbessern. Da die Landesämter zur Zeit keine Verbesserung der vorhandenen DGM5 Daten planen, müssten aufwändige Eigenmessungen den Datenpool ergänzen.

Ergebnisse der Erosions- schadenskartierung im Herbst 1998 im Untersuchungsgebiet Ilde

Karte 5

Erosionsformen

- ★ Übertritt von Straßen
- Akkumulation (3-10cm tief)
- ⋯ Rillen (2-10cm tief)
- Rinnen (10-40cm tief)
- Erosionsfläche 1997

Realnutzung

- Winterweizen
- Wintergerste
- Zuckerrüben
- Grünbrache
- Klee

Datenquellen:

Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Eberbaum







**Geographisches Institut
Universität Hannover**
Physische Geographie und
Landschaftsökologie



Prognostizierte Abflussbahnen des Erosionsereignisses von 1997 und 1998 im Untersuchungsgebiet Ilde

Karte 6

Modellierte Abflussbahnen

-  Prognostizierte Abflussbahnen
-  Kartierte Erosionsformen
-  Markierung siehe Text
-  Potentielle Akkumulationsflächen

Datenquellen:

Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
 ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
 Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Bierbaum



Geographisches Institut
Universität Hannover
 Physische Geographie und
 Landschaftsökologie



5.4 Ursachen der Fehleinschätzung von modellierten linearen Leitbahnen

In Tab. 9 werden die Ergebnisse der Modellierung linearer Erosionsformen mit denen kartierter Schäden verglichen. Neben den korrekt erfassten Formen erfolgt eine genaue Aufzählung der fehlerhaften Prognosen mit möglichen Ursachen der Fehleinschätzung. Bei einem kleinen Teil der nicht erfassten Erosionsleitbahnen konnte keine sichere Begründung gefunden werden. In diesen Fällen verursacht vermutlich eine Kombination aus mehreren Faktoren und Parametern in der Modellberechnung ein fehlerhaftes Ergebnis. Eine sehr sensitive Prozessvariable stellen beispielsweise die Bodeneigenschaften dar. Die zum Teil sehr heterogene Verteilung unterschiedlicher Bodentypen im Untersuchungsgebiet kann über das Curve-Number Verfahren teilweise nicht ausreichend erfasst werden. So führt die ungenaue quantitative Bestimmung des Oberflächenabflusses häufig zu ungenauen Resultaten. Auch die fehlende Integration des Bearbeitungszustandes der Ackerparzellen während der Berechnung des Direktabflusses geht nicht genug in die Berechnung ein. Als Folge ergeben sich unterschiedliche Schwellenwerte bei der Bestimmung des Anfangspunktes der linearen Erosionsformen. Hier müsste noch eine genauere Analyse des Einflusses der Bodenparameter auf den Oberflächenabfluss zusätzlich zu dem Niederschlags-Abfluss-Modell durchgeführt werden. Durchaus geeignet erscheint auch der Einsatz von Sensitivitätsanalysen, da die Variabilität vieler Parameter in den einzelnen Testgebieten recht groß ist.

Ein weiteres Problem stellen die schon in Kapitel 5.3.2 erwähnten nicht prognostizierbaren Faktoren dar. Dazu zählen vor allem Zustandsänderungen von Strukturelementen (z.B. verstopfte Gräben und Abflussrohre, Quellaustritte usw.), die nicht über vorhandene Kartengrundlagen erfasst werden können bzw. durch zeitlich kurzfristige Veränderungen nicht von Feldbegehungen und Kartierungen aufgenommen werden. Ein kleiner Teil dieser Faktoren könnte über eine Befragung der ortsansässigen Landwirte ermittelt werden. Vielfach bilden sich Wasseraustritte, Übertritte von Wegen und Straßen u.a. in bestimmten potentiellen Gefährdungsbereichen. Eine Aufnahme der Lage dieser Punkte zusammen mit der Berechnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit könnte eine bessere Integration der Unsicherheitsfaktoren in der Modellrechnung erzielen.

Im Untersuchungsgebiet Ilde wurden 2 Strukturelemente gar nicht erfasst. In der Nähe von Markierung ② auf Karte 6 wurde eine Rohrleitung nicht kartiert. Dadurch wirkte der quer zur Abflussrichtung liegende Weg als wasserstauende Barriere. Das Modell berechnete zur Überwindung der Höhendifferenz der Struktur eine 40 m lange Erosionsform parallel zum Weg, bevor der Oberflächenabfluss den Weg überströmen konnte. Das Fehlen einer Furche,

die zum Schutz vor Erosion in einer Parzelle im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes gezogen worden war, entwässerte einen Großteil des herangeführten Oberflächenwassers in einem Graben. Dadurch führte ein prognostizierter Übertritt nicht zu den befürchteten Schäden auf dem hangabwärts liegenden Schlag. Die Aufnahme der eben genannten Raumstrukturelemente hätte zu einer verbesserten Vorhersage des Modellergebnisses geführt. Insgesamt zeigt sich, dass eine Befragung bzw. Zusammenarbeit mit dem landwirtschaftlichen Bearbeiter viele wichtige Informationen zu der aktuellen Raumstruktursituation liefern kann. Daher sollte im Vorfeld jeder Untersuchung auf jeden Fall eine Kooperation zwischen Betriebsleiter und Sachbearbeiter angestrebt werden.

	Ilde (Anzahl)	Lamspringe (Anzahl)	Ursachen der fehlerhaften Prognose
Korrekt erfasste Formen	14	27	
Überbewertete, zusätzlich erfasste Formen	3	2 1	<ul style="list-style-type: none"> • Ungenaue Bestimmung des Oberflächenabflusses • Sedimentationszone wurde nicht erfasst
Nicht erfasste Formen	2 3 2 1 2	3 1 - 1 1	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsform in Fahrspuren • Übertritt aus Tiefenlinie durch Aufstau, Verstopfung von Gräben usw. • Fehlende Aufnahme von Strukturelementen • Nicht prognostizierbare Ereignisse (Defekt eines Drainrohres) • Ursache konnte nicht ermittelt werden

Tab. 9: Bilanz der korrekt und falsch abgebildeten Erosionsformen mit Angabe der Ursachen für fehlerhafte Prognosen

6. Einschätzung der linearen Erosion durch die Landwirte

Zur besseren Beurteilung und Einschätzung der linearen Erosion müssen langfristige Beobachtungen in den Testgebieten erfolgen. Durch den auf 4 Jahre begrenzten Untersuchungszeitraum, der durch sehr unterschiedliche Niederschlagsereignisse geprägt war, ließ sich die lineare Erosion noch nicht vollständig erfassen. Um hier trotz des eingeschränkten Zeitraums umfassendere Ergebnisse zu erhalten, wurde eine Befragung der Landwirte zu dem Erosionsgeschehen in den Gebieten Ilde und Kloster durchgeführt.

Der Inhalt des Auswertebogens (siehe Anhang) besteht aus Fragen zu den Teilbereichen Bodeneigenschaften, Nutzung und Bearbeitung, Einschätzung des Erosionsgeschehens und Gegenmaßnahmen. Zusätzlich sollten die Betriebsleiter auf einer beigelegten Grundkarte möglichst ortsgetreu die Lage von Erosionsformen einzeichnen. Die Angaben der Landwirte können unter folgenden Voraussetzungen als zuverlässig angesehen werden:

- Die linearen Erosionsrinnen und -rillen entstehen periodisch jedes Jahr bei intensiven Regenereignissen.
- Die Bildung von Abtragsformen ist anhand von optisch auffälligen Merkmalen erkennbar. Dazu zählen Quell- und Feuchtebereiche, große Ackerschläge mit ausgeprägten Tiefenlinien und anthropogen verursachten Schäden (schadhafte Dränung, Übertritte aus aufgefüllten Gräben bzw. von Banketten u.a.).
- Die lineare Erosion weist nach einem extremen Niederschlagsereignis große Formen auf. Die Gräben müssen vom landwirtschaftlichen Bearbeiter wieder mit Ackerboden aufgefüllt werden. Zum Teil muss eine neue Aussaat in Erosions- und Akkumulationsbereichen erfolgen.

6.1 Kenntnisstand zur Verbreitung der Erosion

Ein Vergleich der von den Landwirten aufgezeichneten Erosionsformen mit den kartierten Schadensbereichen zeigt eine gute Übereinstimmung der Lage (Karte 7). Alle Bereiche waren in den Jahren 1997 und 1998 auch von Erosion betroffen. Auffällig zeigt sich, dass die flächenhaften Abtragsformen nur unzureichend erfaßt worden sind. Dies betrifft vor allem Parzellen, die keine ausgeprägten linearen Erosionsformen aufweisen, obwohl deutlich Bereiche mit Akkumulationsflächen und Rillen in den Fahrspuren zu erkennen waren. Die Ergebnisse der Auswertung bestätigen die Vermutung, dass die flächenhafte Erosion unterschätzt wird. So waren 1995 nur 47.1% der geschädigten Parzellen durch lineare

Erosion betroffen. Trotzdem wurden in der Befragung über 60% der aufgetretenen Schäden der linearen Erosion zugewiesen.

Auch die Einschätzung der Zeiträume, in denen die Testgebiete stark durch Erosion betroffenen waren, wurde von den Landwirten gut eingeschätzt. Besonders im Februar zum Zeitpunkt der Schneeschmelze und im Mai wurden häufig erosive Niederschläge beobachtet. Für einzelne Parzellen wurde auch noch der November für häufige Abtragsituationen genannt. Diese Zeitfenster decken sich mit der Bracheperiode bzw. dem Saattermin auf den betroffenen Ackerflächen (Mais im Mai, Raps im November und Wintergetreide im Februar). Als maßgebliche Niederschlagsformen für den Erosionsprozess wurden ausschließlich Starkniederschläge genannt. Diese Beobachtungen decken sich nicht mit den ermittelten Werten der Klimastationen. In dem gesamten Untersuchungszeitraum wurde nur durch 2 Starkregenereignisse sichtbare Erosion ausgelöst. Als Hauptauslöser der Abtragsprozesse sind dauerhafte Niederschläge über mehrere Tage zu nennen. Diese Niederschlagsform führte zu den großen Schädigungen auf den Ackerflächen. Da die Landwirte auf einen langjährigen Beobachtungszeitraum zurückschauen können, müssen die eigenen Aussagen der nur 4-jährigen Projektdauer hinsichtlich des Auftretens erosiver Niederschlagsereignisse relativiert werden.

6.2 Beurteilung des Schadensausmaßes

Die Einschätzung der Schäden erfolgt anhand einer 4-stufigen Skala (gering, mittel, stark, sehr stark). Insgesamt wird das Schadensausmaß durch erosive Prozesse von den Landwirten allgemein als gering eingestuft. Die Ernteauffälle werden maximal auf bis zu 2% beziffert, obwohl eine großflächige Akkumulation (bis zu 300m²) an tiefere Abtragsformen anschließt. Mehrfach wurden in den Testgebieten nach Starkniederschlägen landwirtschaftliche Wege mit bis zu 30 cm hohen Bodenschichten überdeckt. Die höchste Abtragsmenge, die durch lineare Erosion auf einem Ackerschlag 1995 verursacht wurde, betrug 52 m³ (Parzellengröße 0,46 km²). Hier wurde jedoch der linienhafte Bodenabtrag immerhin als mittelschwer bewertet.

Über 67% aller Landwirte haben, sofern Erosionsschäden festgestellt wurden, Off-site Schäden beobachtet (Feinmaterialaustrag über die Parzellengrenze hinaus). Das Bodenmaterial gelangte dabei auf Straßen, in Gräben und auf anderen Parzellen. Umso erstaunlicher ist, dass nur wenige Landwirte die Frage nach Ertragseinbußen bestätigt haben. Als Wert der Schädigungen wurde ‚minimal‘ bis ‚<2%‘ angegeben. Gerade der

parzellenübergreifende Erosionsprozess führt häufig zu mächtigen Erosionsformen und großen Akkumulationsflächen. Allein in den Testgebieten wurden durch Sedimentationsbereiche größere Flächen nachhaltig geschädigt. Daher kann vermutet werden, dass die Landwirte die Schäden durch Off-site Effekte als zu gering bewerten.

Ein erstaunliches Ergebnis brachte die Umfrage bezüglich der Ursachen und Gegenmaßnahmen der Bodenerosion. Bei 93% aller betroffenen Parzellen wurden von den Landwirten konkrete Gründe benannt die zu dem Bodenabtrag führten. Als häufigste Ursache für die Erosion wurden von den Betriebswirten das Gefälle und die große Hanglänge genannt. Darauf folgen geringer Bodenbedeckungsgrad, Bearbeitung in Gefällerrichtung, geringer pH-Wert, ungünstige Bodenstruktur und Oberflächenzufluss aus anderen Bereichen. Daran anschließend wurden Maßnahmen dargelegt um der Erosion entgegenzuwirken. Insgesamt wurden 9 verschiedene Verfahren zur Bodenbearbeitung bzw. des Bodenschutzes von den Landwirten genannt worden. Die einzelnen Maßnahmen sind:

- Konservierende Bodenbearbeitung
- Zwischenfruchtanbau
- Untersaat
- Kalkung
- Ableitung von überschüssigem Wasser
- Ackerrandstreifen
- Drainung
- Reduzierung der Hanglänge
- Bearbeitung quer zum Gefälle

Eine genauere Erläuterung zu den einzelnen Maßnahmen der Erosionsbekämpfung sind in MOSIMANN, Th. et. al. (1991), FRIELINGHAUS, M. (1997) und KTBL (1998) zu finden. Insgesamt zeigt sich, dass die Betriebsleiter im Testgebiet eine aktive Rolle zum Bodenschutz übernommen haben. Die Ursachen der Bodenerosion sind größtenteils bekannt und werden durch entsprechende Maßnahmen bekämpft. Dieses verdeutlicht auch der hohe Anteil von Landwirten, die durch konservierende Bodenbearbeitung den Verlust von Bodensubstrat auf ihren Ackerparzellen minimieren wollen. Der kostenintensive Kauf und Einsatz geeigneter landwirtschaftlicher Maschinen wird mehr aus ökonomischen Gründen als durch ökologische begründet, jedoch kann dem Bodenschutz dadurch geholfen werden.

Ergebnisse der Befragung der Landwirte zu dem Erosionsgeschehen im Untersuchungsgebiet Ilde (1997-1998)

Karte 7

Modellierte Abflussbahnen

- Prognostizierte Abflussbahnen
- Kartierte Erosionsformen
- Ausgewiesene Erosionsflächen durch die Befragung der Landwirte

Datenquellen:

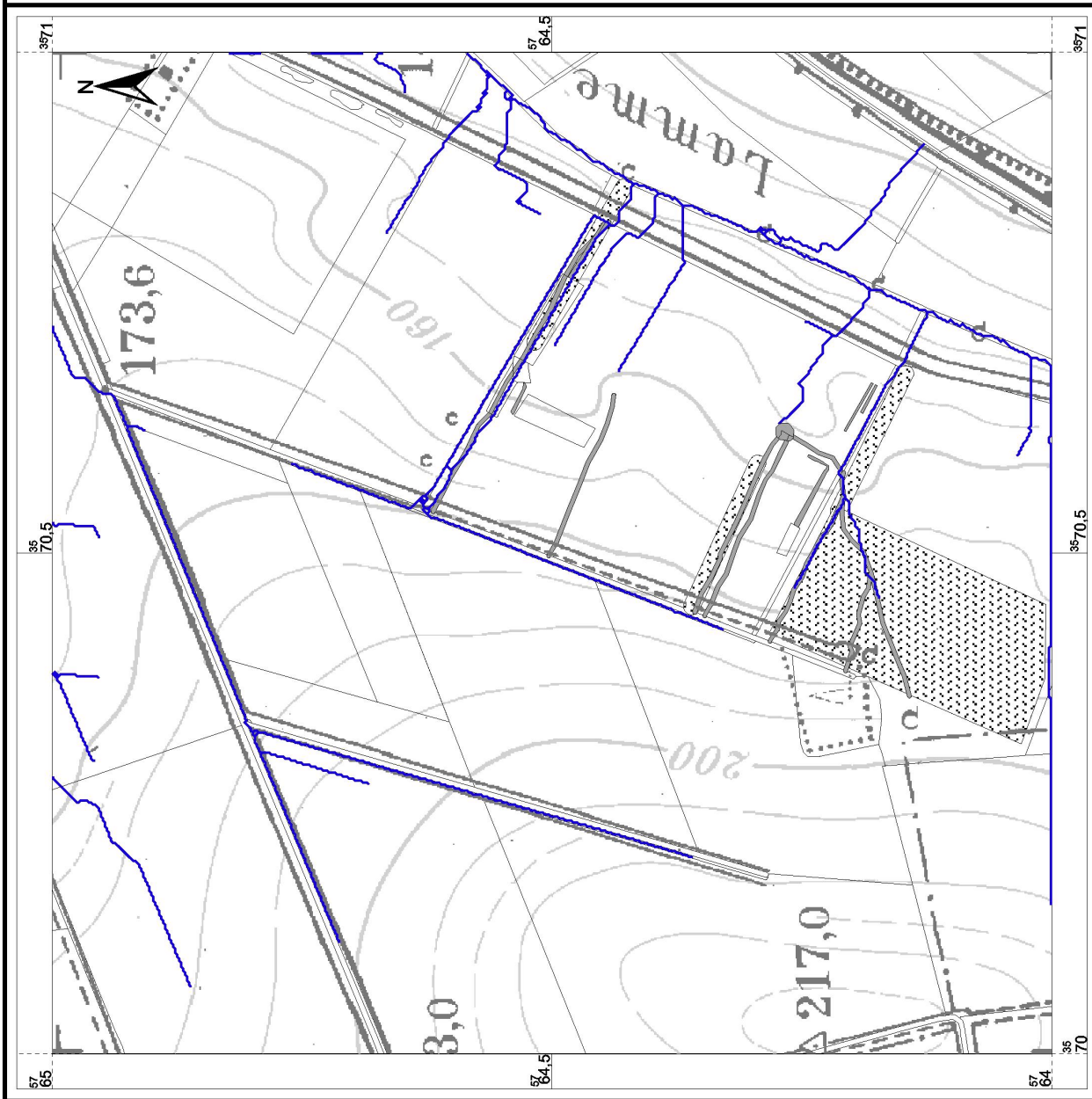
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
ATKIS DLM 25/1 Blatt Lamspringe
Kartierungen des Geographischen Instituts



(C) 1999 J. Bierbaum



**Geographisches Institut
Universität Hannover**
Physische Geographie und
Landschaftsökologie



7. Fazit und Perspektiven

7.1 Modellqualität und Parametrisierung des Bodenerosionsprozesses

Die vorangegangenen Ausführungen haben einen Überblick über die Möglichkeiten der Modellierung und der Verbreitung linearer Erosionsformen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen gegeben. Ziel war es ein hydrologisches Komponentenmodell zu entwickeln, das aufgrund der geringen Anzahl der benötigten Basisdaten auf Parzellen und Einzugsgebietsebene auf breiter Basis anwendbar ist.

Das Modell zeigt in der jetzigen Entwicklungsphase sehr gute Ergebnisse. Es ermöglicht dem landwirtschaftlichen Bearbeiter präventiv die gefährdeten Bereiche linearer Erosion zu erkennen und mit geeigneten Schutzmaßnahmen dem Abtragsprozess entgegen zu wirken. Eine weitere Funktion des Modells ist die Lokalisierung von Bereichen mit Übertrittsstellen (Off-site Schäden) auf der Grundlage der Prognose des hydrologischen Abflusssystems eines Einzugsgebietes. In den Einzugsgebieten werden sowohl allgemeine d.h. flächendeckende Schutzmaßnahmen der Bodenerosion, als auch direkte Eingriffe in den Erosionsprozess umgesetzt. Dazu zählen u.a. das Anlegen von Banketten und die Ableitung von überschüssigem Oberflächenwasser. Die Symptombekämpfung sollte dabei durch den Bau von Auffangbecken, Entwässerungsgräben und Dämmen an letzter Stelle in einem Maßnahmenpaket erfolgen.

Die Ergebnisse des Modells wurden innerhalb eines 4-jährigen Untersuchungszeitraums auf Testflächen im Lammeeinzugsgebiet validiert. Als problematisch erwies sich die Verifizierung der modellierten Abflussbahnen anhand kartierter Aufnahmen des realen Erosionsprozesses, da im gesamten Untersuchungszeitraum nur wenige erosive Niederschlagsereignisse mit Schadensfolgen für die Ackerparzellen beobachtet wurden. Die Anzahl der aufzunehmenden Erosionsschäden wurde zusätzlich durch den Zeitpunkt des Niederschlags begrenzt: Wegen der hohen Bodenbedeckung in den Sommermonaten wurden nur geringe Schäden auf den Ackerparzellen aufgenommen. Insgesamt zeigten die Niederschlagsmengen und Regenintensitäten hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung eine hohe Variabilität. Die gemessenen Niederschlagssummen unterschieden sich z.T. um den Faktor 2 bei einem Abstand zwischen den Klimastationen von nur 800 m: 23.5.95, Station 1: 7,3 mm – Station 2: 3,8 mm. Um ein repräsentatives Ergebnis aller untersuchten Flächen zu erhalten, müsste der Beobachtungszeitraum erheblich verlängert werden. Eine Ausdehnung der Kartier- und Aufnahmephase auf 10 Jahre würde dem Beobachtungsgegenstand des Bodenerosionsprozesses erheblich abgesichertere statistische Basisdaten liefern.

Wie schon in Kapitel 4.2 dargestellt wurde, ist eine genaue Parametrisierung der Bodenerosionsprozesse nahezu unmöglich. Im zeitlichen Verlauf eines Abtragsereignisses können viele Faktoren den Abtragsvorgang stark beeinflussen bzw. verändern. Dazu gehören z.B. folgende Effekte, die im Laufe des Untersuchungszeitraumes im Testgebiet beobachtet wurden:

- Aufstauung durch Schnee und Eis, Verstopfung von Abflussrohren durch Bodenmaterial und Pflanzenreste, fehlende Infiltrationsmöglichkeit des Wassers während der Schneeschmelze begleitet von langanhaltenden Niederschlägen
- Nicht prognostizierbarer Zufluss von Oberflächenwasser aus benachbarten landwirtschaftlichen Parzellen und Straßen infolge Aufstauung in Gräben
- Austritt von Wasser aus defekten Drainrohren auf Ackerschlägen

Diese Aufzählung beinhaltet einige wichtige, das Abflussverhalten modifizierende Effekte. Damit werden deutlich die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt, die bei der Modellierung des Erosionsprozesses entstehen. Diese nicht-parametrisierbaren Größen können nur über einen statistisch-empirischen Lösungsansatz verknüpft mit einer Kartierung im Gelände erfasst werden (vgl. LEWIS u.a. 1994, PLATE, E.J. und L. DUCKSTEIN 1990), jedoch dürfte dadurch das Modellergebnis in Bezug auf die Lagegenauigkeit der linienhaften Erosionsformen keine nennenswerten Verbesserungen erhalten.

Im Rahmen der statistischen Auswertung von erosionsabhängigen Parametern wurden die Ergebnisse eines 4-jährigen Untersuchungszeitraums verwendet. Bedingt durch die hohe Anzahl von Erosionsformen, deren Verlauf und Ausprägung durch „chaotische“ Einflussfaktoren (s. oben) beeinflusst wurde, kann die Aussagekraft quantitativer und qualitativer Prozessparameter nur als Tendenz wiedergegeben werden. Auch hier wird eine Verlängerung der Beobachtungsperiode auf 10 Jahre gesichertere Erkenntnisse liefern, da dann die zur Verfügung stehende Grundgesamtheit der beobachteten und kartierten Abtragsformen der statistischen Analyse einen hinreichend großen Datenpool liefern könnte. Zudem könnte eine Bewertung der zeitlichen Diversität und der räumlichen Verteilung dieser zur Zeit nicht extrapolierbaren erosiven Wirkungszusammenhänge erfolgen und damit der Bodenerosionsforschung gute Ansätze für eine umfassendere Bewertung liefern.

7.2 Datenverfügbarkeit von Modelleingangsgrößen

In den letzten Jahren gewann die Frage nach der Verfügbarkeit von Basisdaten zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz von physikalisch-deterministischen Modellen im Rahmen landschaftsökologischer Untersuchungen erfordert einen immer größeren Aufwand bei der Beschaffung der benötigten Eingangsdaten. Besonders problematisch zeigt sich hierbei die fehlende Verfügbarkeit von flächenhaft zeitlich variablen Eingangsgrößen. In dem vorliegenden Modell wurde versucht, die eingehenden Strukturelemente weitgehend automatisiert dem Modell zur Verfügung zu stellen. Die Generierung von Fahrspuren, Bearbeitungsrichtung und Vorgewende kann mit einer sehr hohen Sicherheit (98% lagerichtige Vorhersage) prognostiziert werden. Wesentlich unsicherer ist dagegen die Berechnung von Abflussmengen nach dem SCS Curve-Number Verfahren: Dieses Modell weist, bedingt durch seinen einfachen empirischen Charakter, einen größeren nicht genau abschätzbaren Fehler bei der Bestimmung des potentiell abfließenden Oberflächenwassers auf. Besonders bei Betrachtungen auf der Parzellenebene können flächenhafte Basisdaten nur unzureichend für das Curve-Number-Verfahren bereitgestellt werden. Da die Berechnung über rasterbasierte Algorithmen erfolgt, könnten folgende Ansätze eine Verbesserung des Ergebnisses ermöglichen:

1. Erhöhung der Auflösung der Rasterweite

Das Ziel dieses Lösungsansatzes liegt in der Verfeinerung der vorliegenden Grunddaten. Eine Verbesserung der Eingangsdaten des DHM auf weniger als 5 m könnte viele Ungenauigkeiten des Modellergebnisses verhindern. Die Umsetzung dieses Verfahrens ist aus wissenschaftlicher Sicht relativ leicht in das aktuelle Modell zu integrieren. Jedoch bestehen erhebliche Defizite darin, die Eingangsgrößen flächenhaft dem Modell zuzuführen. Nur der Einsatz von Disaggregierungsverfahren (s. L.-O. WENKEL und A. SCHULTZ, 1998) könnte eine praxisgerechte Methode zur Bildung der Eingangsgrößen ermöglichen. Zur Zeit existieren noch keine anwendbaren Modellbausteine, jedoch werden entsprechende wissenschaftliche Untersuchungen zur Zeit vom Geographischen Institut der Universität Hannover entwickelt.

Ein weiteres Problem stellt die Verarbeitung großer Datenmengen dar. Bei einer Verdopplung der Rasterauflösung wird die Anzahl der Rasterzellen exponential erhöht. Auch aktuelle Computersysteme können nur bedingt entsprechend fein aufgelöste Strukturen in akzeptabler Zeit berechnen. Ein Lösungsweg wäre die Verwendung von Vektorstrukturen oder Quadtree-Verfahren.

2. Anwendung von Quadtree-Verfahren

Das Quadtree-Verfahren besteht aus einer rasterbasierten Struktur, die variable Zellengrößen verwendet. Die minimale Rastergröße wird vom Anwender vorgegeben und kann beliebig kleine Flächen abbilden. Hierbei kommt es nicht zur einer „Generalisierung“ der Grenzverläufe und Kleinstflächen, sondern die Rastergröße wird den kleinsten Strukturen angepasst (s. YANG 1992, SUTSKOVER 1998). Quadtree-Verfahren zeichnen sich durch geringen Speicherverbrauch und schnelle Zugriffsmöglichkeiten aus, ohne dass Informationsverluste auftreten. Trotzdem birgt dieses Modell auch einige Nachteile. Der Aufwand für die Erstellung und Pflege der einzelnen Informationsebenen ist erheblich größer als bei den einfachen Rastermodellen. Dies betrifft vor allem die Attribut- und Verweistabellen, deren Aufbau sehr rechenintensiv ist. Zudem sind zur Zeit keine Implementierungen von Quadtree-Verfahren in bestehenden GIS-Systemen und Datenbanken vorhanden. Solange keine geeigneten objektorientierten Datenbanken verwendbar sind, kann das Quadtree-Verfahren nur eigenständig umgesetzt werden.

Die Möglichkeiten einer Verbesserung des Modells durch die eben erläuterten Methoden und Verfahren sind nur über einen erheblichen Arbeits- und Kostenaufwand zu realisieren. Solange nicht auf bereits vorhandene Softwareprodukte zurückgegriffen werden kann, lohnt sich eine Veränderung der bestehenden Struktur nicht.

7.3 Anwendungsperspektiven des Modells auf unterschiedlichen Maßstabsebenen

Das hier vorgestellte Modell wurde zur Prognose von Bereichen mit linearer Erosion entwickelt. Der Einsatz findet zur Zeit auf Parzellen und Einzugsgebietsebenen statt. Die Modellergebnisse können zur Zeit für Maßnahmen zum Erosionsschutz genutzt werden und markieren kritische Bereiche, in denen linienhafte Abtragsformen Off-site Schäden verursachen. Das erodierte Bodenmaterial gelangt aber nicht sofort in den nächsten Vorfluter, sondern wird über ein Netzwerk von Gräben, Bächen und anderen Tiefenlinien zu weiter entfernten Plätzen transportiert. Auf diesem Weg kann ein Großteil des mitgeführten Bodensubstrates sedimentieren, vielfach wird aber auch auf der Strecke zum nächsten Vorfluter weiteres Material erodiert. Eine sehr interessante Perspektive für das Modell wäre die vollständige Rekonstruktion des Erosionspfades von der Parzelle bis zum Vorfluter. Da die Modellberechnungen auf der Reliefanalyse und deren Verknüpfung mit Raumstrukturelementen beruhen, ist eine Erosionssimulation auch auf mittlerer Maßstabsebene denkbar. Hierzu wäre eine Parametrisierung der natürlichen und

anthropogenen Raumelemente notwendig. Statt Ackerrandfurchen und Fahrspuren würden Gräben, Dämme und andere Bauwerke den Abfluss beeinflussen. Eine Anpassung des aktuellen Sourcecodes an die unterschiedlichen Dimensionsebenen kann relativ leicht über die Parameterdateien umgesetzt werden. Eine Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten des Programms hat noch nicht stattgefunden.

8. Zusammenfassung

Der diffuse Eintrag von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln in Gewässer ist ein aktuelles Problem. Zu den Hauptverursachern gehören neben der Industrie und den privaten Verbrauchern vor allem die Landwirtschaft. Das Bodenmaterial gelangt hierbei von Ackerparzellen direkt bzw. über Gräben und andere Fließwege in die Vorfluter. Wie Beobachtungen im Untersuchungsgebiet gezeigt haben, kann der Bodenabtrag in zwei verschiedene Prozessformen unterteilt werden: Auf der einen Seite wird hauptsächlich durch flächenhafte Erosion innerhalb einer Ackerparzelle Bodenmaterial verlagert, auf der anderen Seite gelangen durch die lineare Erosion größere Mengen von gelösten und partikelgebundenen Nährstoffen über den Parzellenrand hinaus in die Gewässer. Für die Planung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung des Bodenabtrags durch Wasser sollten daher folgende Mindestziele erfüllt werden:

1. Ausweisung potentiell erosionsgefährdeter Flächen
2. Lokalisierung von linearen Erosionsformen auf landwirtschaftlichen Flächen
3. Räumliche Erfassung von Übertrittsstellen des Feinerdetransports (Off-site Schäden)

Die Entwicklung von Bodenerosionsmodellen hat in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht; hierzu zählt z.B. die Übertragung der physikalischen Prozesse auf Modellbausteine (HAGEN, N. und H.-B. KLEEBERG 1993). Für den praxistauglichen Einsatz haben sich einfache empirische Modelle (z.B. ABAG) durchgesetzt. Weitergehende physikalisch-deterministische Wasser- und Stofftransportmodelle sind im wissenschaftlichen Bereich entwickelt worden, haben aber bisher noch keinen Eingang in die Anwendungspraxis gefunden, da die Basisdaten für die Prozesssimulation nur über intensive Feld- und Kartierarbeiten geliefert werden können. Angesichts dieser Einschränkungen kann auch weiterhin mit einem Einsatz der empirischen Verfahren gerechnet werden.

Ein viel größeres Problem stellt hingegen die räumliche Prognose linearer Abtragsformen dar. Nur einige wenige Bodenerosionsmodelle (u.a. CREAMS, EPIC, WEPP) stellen erste Ansätze zur Integration von Modellbausteinen zur Erfassung von Leitbahnen des gebündelten Oberflächenabflusses zu Verfügung. Jedoch können für diese Modelle die benötigten Daten nur sehr aufwändig ermittelt werden. Für die Maßnahmenplanung im Erosionsschutzbereich ist es aber unumgänglich, basiertes Wissen über lineare Abflussbahnen und Übertrittsstellen zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde ein digitales Raumstrukturmodell zur großmaßstäblichen Prognose von Bereichen mit linearer Erosion entwickelt. Das Modell wurde für den Einsatz in der topischen Dimension (Schlag, Parzelle)

konzipiert. Es kann aber auch auf Einzugsgebietsebene seine Verwendung finden. Diese Möglichkeit des dimensionsübergreifenden Einsatzes gelingt durch die Modellierung eines hydrologischen Netzwerkes anhand von Raumstrukturelementen.

Grundlage der Modellmethodik bildet ein Verknüpfungsverfahren von Raster- und Vektordaten. Die Eingangsdaten auf Rasterebene wurden aus den flächenhaft vorliegenden digitalen Höhendaten der Landesämter gewonnen. In Niedersachsen liegen die DGM5 Daten (entspricht einer Rasterweite von 12.5 m) nahezu flächendeckend vor. Nach der Aufbereitung und Interpolation auf eine kleinere Zellengröße erfolgt eine Verknüpfung mit den Strukturelementdaten. Der Begriff ‚Raumstrukturelemente‘ beschreibt alle auf der entsprechenden Maßstabsebene anzutreffenden Strukturen, die den Verlauf des Oberflächenabflusses verändern können. Dazu zählen u.a. wasserleitende Strukturen wie z.B. Fahr- und Saatspuren, Ackerrandfurchen und Vorgewende. Verlagert sich der Betrachtungsgegenstand auf die chorische Dimensionsebene, bewirken eher größere Strukturformen das Abflussverhalten des Oberflächenwassers. Vorrangig sind hier Gräben, Bankette und Straßen-/ Wegesysteme zu nennen.

Jedem dieser topographischen Elemente wird eine realitätsnahe Strukturform und -tiefe zugeordnet. Anhand eines Verknüpfungsalgorithmus werden die Vektor- in Rasterdaten konvertiert, bevor sie zusammen mit dem digitalen Höhenmodell in ein kombiniertes Strukturelementraster übertragen werden.

Grundlage für die Berechnung des Oberflächenabflusses ist das Curve-Number-Verfahren des U.S. Soil Conservation Service. Dieses empirisch-statistische NA-Modell gilt als Standardverfahren zur Bemessung von Direktabfluss. Laut DVWK (1984) kann es trotz unsicherer Anpassung des CN-Wertes für mitteleuropäische Verhältnisse empfohlen werden. Die Abflussmengen werden räumlich und zeitlich variant ermittelt und über Kaskadierungsverfahren dem Verlauf eines Niederschlagsereignisses angepasst. Das Ergebnis einer Modellrechnung besteht aus einem hydrologischen Netzwerk von Leitbahnen des konzentrierten Oberflächenabflusses. Sofern die linearen Erosionsformen über Parzellengrenzen hinaus gelangen, werden diese Stellen als Übertrittsstellen lokalisiert (Off-site Effekte).

Eine wichtige Grundvoraussetzung des Modells ist die praxisgerechte Ermittlung der Basisdaten. Alle Daten sollen allgemein verfügbar sein bzw. die Aufbereitung soll unter einer angepassten Kosten-/Nutzen-Relation stehen. Daher wurde u.a. ein Modellbaustein konzipiert, der die Strukturelemente einer Ackerfläche (Vorgewende, Fahrspuren und

Bearbeitungsrichtung) anhand eines geometriebasierten Verfahrens ermittelt. Als Eingangsdaten können von den Landesämtern digital vorliegende DGK 5 Vektordaten genutzt werden. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt als Vektor (linienhafte Strukturelemente: Fahrspuren und Vorgewende) und als Raster (Bearbeitungsrichtung). Das Programmmodul liefert sehr gute Ergebnisse bei der Lagegenauigkeit und Anordnung der Raumstrukturelemente (etwa 95% Genauigkeit), sofern durch Flurbereinigungsverfahren relativ homogene Parzellengrenzen vorliegen. In Bereichen mit sehr feiner Zergliederung der landwirtschaftlichen Flächen sinkt dieser Wert auf 50-60%.

Die in Kapitel 5 gezeigten Ergebnisse der Modellsimulation demonstrieren die gute Aussagequalität des Verfahrens zur Ermittlung linearer Abflussbahnen. Die ermittelten Erosionsformen wurden lagerichtig erkannt und mit den vorhandenen Übertrittsstellen angezeigt. Der Vergleich der erosiven Leitbahnen mit den Modellergebnissen zeigt zum Teil nur geringfügige Abweichungen von wenigen Metern, obwohl die Eingangsdaten des Höhenmodells auf einer Rasterauflösung von 12,5 m basieren. Die Fehler bei der Vorhersage von nicht oder falsch erfassten Formen beruhen meistens auf der schwierigen Prognose von ‚chaotischen‘ Zuständen während eines Niederschlagsereignisses. Dazu zählen u.a. defekte Drainung, zugeschüttete Gräben und Überströmung von Leitbahnen durch aufgestautes Bodensubstrat und Pflanzenreste. Diese Ausprägungen des Erosionsprozesses sind weder qualitativ noch quantitativ genau zu bewerten.

Während des gesamten Untersuchungszeitraumes wurden begleitende Untersuchungen und Kartierungen auf drei verschiedenen Testflächen südwestlich von Hildesheim durchgeführt. Die Aufnahme von Erosionsschäden erfolgte kontinuierlich alle 4 Wochen und wurde durch ereignisbezogene Einsätze nach erosiven Niederschlägen ergänzt. Die statistische Gesamtauswertung der Abtragsschäden kann nur Tendenzen wiedergeben, da der Stichprobenumfang häufig die Mindestmenge einer repräsentativen Aussage unterschritten hat. Eine Verlängerung der Beobachtungsphase auf insgesamt 10 Jahre könnte für abgesicherte Fragestellungen im Bereich der Erosionsforschung wichtige Erkenntnisse liefern.

Das Modell wurde als eigenständiges Programm in C und VB umgesetzt. Als Schnittstelle für die Aufbereitung von Basisdaten wird ein Import-/Exportmodul zu einem gängigen GIS-System (ARC/INFO) geliefert. Der Einsatz des Modells in der Praxis kann durch geringe Vorgaben in der Soft- und Hardware erfüllt werden.

Das Modell stellt zur Zeit als einziges Verfahren die Möglichkeit dar, anhand eines hydrologischen Netzwerks Kenntnisse über die Lage von Erosionsleitbahnen und Übertrittsstellen zu erhalten. Der Einsatz empirischer Verfahren zur Ermittlung des Oberflächenabflusses sowie die Nutzung von Methoden zur automatischen Generierung von topographischen Merkmalen ermöglichen eine genaue Vorhersage, ohne dass zeitaufwändige und teure Basisdaten bereitgestellt werden müssen.

Summary

The diffuse influx of nutrients and pesticides in lakes and rivers is a present-day problem. The main causes are industry, private households and, in the first line, agriculture. Here, the polluted soil is carried away from the arable land directly or via ditches and trenches and other channels into the draining canal. Observations in the area under study have shown that the soil erosion can be subdivided into two different processes. One is the superficial erosion and transport of soil material within the plot of land; the other is linear erosion and transport of considerable amounts of dissolved and particle-bound nutrients over the field's borders into the lakes and rivers. For the planning and implementation of suitable measures for reducing soil erosion caused by water it is therefore necessary to observe the following minimum standards:

1. Determination of land potentially endangered by erosion
2. Localisation of linear forms of erosion on agricultural land
3. Spacial identification of points of cross-over of fine (silt) soil material (off-site-damages)

During the last decades, the evolution of models for soil erosion has made enormous progress; just to mention the application of physical processes to model units (HAGEN, N and H.-B KLEEBERG 1993). For practice-oriented applications, simple empirical models have found widespread use (eg ABAG). Detailed physically-deterministic models of water- and mass transport have been developed for scientific applications, but have not found practical use because the basic data needed for the simulation of such processes can only be collected by field studies involving a high proportion of cost and time. Due to these limitations, the empirical models will continue to be in use.

A much bigger problem is the three-dimensional forecast of linear forms of erosion. Only a few soil erosion models (including CREAMS, EPIC, WEPP) can provide first approaches for integrating the unit models so as to account for the combined channels of the surface water

draining. However, the data needed for these models can be collected only with great expenditure. To design and plan measures for preventing erosion it is, however, mandatory to gain well-founded knowledge of linear water draining and points of cross-over. Therefore, a digital three-dimensional structure model for large-scale forecast of areas of linear erosion has been developed. The model was designed for use in the topic dimension (plots of land); however, it can be applied to whole areas of water collection as a well. The applicability of this model to both dimension is due to the creation of a model for hydrological network using three-dimensional structure elements.

The model is based on a process for combining grid and vector data. The grid data input is provided by digital elevation data from the provincial offices (Landesämter). For the federal land of lower saxony, DGM5 data (corresponding to a grid width of 12.5 m) are available almost over the whole area. After data processing and interpolation to a smaller grid width, these data are brought into relationship with the structure element data. The term "spacial structure elements" describes all structures encountered on the specific scale which could influence the surface water drainage. These are for instance water-draining structures such as tractor imprints, field border trenches and wheeling. When the object is studied on a choric dimensional scale, it is rather the bigger structures which determine the water drainage. To mention here are ditches, road shoulders and the roads themselves.

Each of these topographical elements is characterized by a realistic structural depth and form. A mathematical algorithm converts vector data into grid data which are then entered, together with the elevation model, into a combined structure element grid.

The basis for calculating the surface water drainage is the Curve-Number-method of the US Soil Conservation Service. This empirical-statistical NA model is considered as a standard model for determining the direct drainage. According to DVWK (1984) it can be recommended for central European condition in spite of the uncertain adaptation of the CN-value. The water drain is determined variable over time and area and, in a cascading process, fit to the observed rain event. If linear form of erosion go beyond the borders of the plot of land, the points of cross-over are located (off-site effects).

An important prerequisite of the model is to collect basis data which are fit for the practical use. All data should be publicly available and / or processable in a cost-effective manner. For this purpose, a model subunit was designed which determines the structure elements of an agricultural piece of land (wheeling, tractor imprints, direction of ploughing) in a process based on geometric considerations. Input data are digital DGK 5 vector data available from

the Landesämter. Data output is in vector form (linear structure elements, tractor ruts and wheeling) as well as in grid data form (ploughing directions). The unit program proves very accurate results (approx. 95 % accuracy) in terms of position and mutual relationship of the structure elements, provided the fields are relatively homogenous in size thanks to a consolidation of farmland. In areas with a fine subdivision of fields, accuracy is reduced to 50 - 60 %.

The results of the simulation model as shown in Chapter 5 demonstrate the quality of the process in determining linear drainage. The forms of erosion and points of cross-over are revealed in their correct positions. When comparing the erosion canals with the results of the model, only insignificant deviations of a few meters are found, in spite of the input elevation data having a resolution of 12.5 m only. Errors, in either not predicting or incorrectly predicting actual forms, are mainly due to the difficulty in predicting chaotic conditions during a rain event. These are, inter alia, faulty draining ditches, partly filled-up trenches and overflowing of drain canals caused by piled-up ground substrate and plant material. These modifications of an erosion process cannot be taken into account with any precision, neither in a quantitative nor qualitative way.

During the entire study, accompanying investigations and mappings have been carried out in three test areas south west of Hildesheim. Damage by erosion was continuously evaluated every 4 weeks, supplemented by additional investigations after rain events with erosion damage. Statistical evaluation of the erosion damages reveals only trends, because the sample size was often less than the minimum required for a qualified statement. Increasing the observation time to 10 years would provide valuable results for obtaining well-founded evidence in the field of soil erosion.

The model was implemented as an independent program in C and VB. An interface for processing base data with a universal GIS-System (ARC/INFO) is provided in the form of an import/export module. The model's use in practice requires only minor software and hardware prerequisites.

At this time, the model is the only process capable of gaining insight into the location of erosion canals and cross-over points based on a hydrological network. The use of empirical methods in determining surface drainage and the use of automatic processes for generating topographical characteristics allows precise predictions without the need for expensive and time-consuming collection of base data.

9. Literatur:

AUERSWALD, K. (1993): Bodeneigenschaften und Bodenrerosion. Wirkungswege bei unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben. Relief, Boden, Paläoklima, Bd.8, Berlin, Stuttgart.

AUZET, A.V., BOIFFIN, J, PAPHY, B., LUDWIG, B. und J. MAUCORPS (1993): Rill Erosion as a Function of the Characteristics of Cultivated Catchments in the North of France. IN: CATENA, Bd.20, S. 41-62.

BAFFAUT, C., NEARING, M.A. und G. GOVERS (1998): Statistical Distributions of Soil Loss from Runoff Plots and WEPP Model Simulations. Soil Science Society American Journal, Bd. 62, S. 756-763.

BELLAL, M., SILLEN, X. und Y. ZECH (1996): Coupling GIS with a distributed hydrological model for studying the effect of variuos urban planning options on rainfall-runoff relationship in urbanized watersheds. IN KOVAR, K und H.P.NACHTNEBEL [Hrsg]: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, S. 99-106.

BEVEN, K. (1991): Spatially distributed modeling. Conceptual approach to runoff prediction. In: BOWELS, D.S. und P.E. O'CONNEL [Hrsg.], Recent advances in the modeling of hydrologic systems. Dordrecht: Kluwer, S. 373-387.

BINLEY, A., BEVEN, K., CALVER, A. und L.G. WATTS (1991): Changing respones in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions. Water Resources Research, Bd. 27, H. 6, S. 1253-1261.

BINLEY, A., und K. BEVEN (1992): The future of distributed models. Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, Bd. 6, S. 279-298.

BORK, H.R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion. Bodenerosionsprozesse. Modelle und Simulationen. In: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie. Heft 10, Braunschweig, 249 S.

BRUNOTTE, J. (1990): Landtechnische Maßnahmen zum bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 183, 205 S.

BURROUGH, P. A.(1986): Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford University Press : Clarendon Press. 1986. 193 S.

CASALI, J., LABURU, A., LOPEZ, J. und R. GARCIA (1999): Digital Terrain Modelling of Drainage Channel Erosion. Journal of Engang. Res., Bd 74, S. 421-426.

CHEN, ZI-TAN (1987): Quadtree and quadtree spatial spectra in large scale geographic information systems. The hierachical handling of spatial data. UMI, 1987.

DOYTSHER, Y. und J.K. HALL (1997): Interpolation of DTM using bi-directional third-degree parabolic equatations with fortran subroutines. Computer & Geosciences, Bd. 23, H. 9, S. 1013-1020.

DRÄYER, D. (1996): GIS-gestützte Bodenerosionsmodellierung im Nordwestschweizerischen Tafeljura – Erosionsschadenskartierung und Modellergebnisse. Basler Beiträge zur Physiogeographie, Bd 22. Basel.

DUTTMANN, R. D. (1999): Partikuläre Stoffverlagerung in Landschaften. Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden auf verschiedenen Maßstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Änderungen der Bodenfeuchte. Hannover. Geosynthesis. Heft 10.

DVWK (1991): Beitrag zur Bestimmung des effektiven Niederschlags für Bemessungshochwasser aus Gebietskenngrößen. Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung durch den DVWK-Fachausschuss "Niederschlags-Abfluss-Modelle". DVWK 1991.

ERDMANN, K.H. (1998): Untersuchungen zur Bodenerosion im südlichen Nordrhein-Westfalen. Bundesamt für Naturschutz. Bonn.

EVERS, W. (1964): Der Landkreis Hildesheim – Marienburg. Die Landkreise in Niedersachsen, Bd. 21, Bremen-Horn.

FELDWISCH, N. (1995): Hangneigung und Bodenerosion. Boden und Landschaft. In: Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie. Bd. 3, Gießen.

FLANAGAN, G.R. und M.A. NEARING (1995): USDA-Water Erosion Prediction Projekt: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. Indiana.

FREEMAN, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computer & Geosciences*, Bd. 17, Nr. 3, S. 413-422.

FRIELINGHAUS, M. (1997): Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg. ZALF – Bericht Nr. 27. Müncheberg 1997.

FRIELINGHAUS, M., PETELKAU, H. und C.H. ROTH (1992): Wassererosion im norddeutschen Jungmoränengebiet. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 33, S.22-33.

GARBRECHT, J. und L.W.MARTZ (1996): Digital landscape parameterization for hydrological applications. IN: KOVAR, K und H.P.NACHTNEBEL [Hrsg]: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, S. 169-174.

GARBRECHT, J. und L.W. MARTZ (1998): Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks. - *Computers & Geosciences*, Bd. 23, Nr. 9, S. 961-966.

Gesetz zum Schutz des Bodens (1998): *Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998 Teil 1 Nr. 16*, S. 502-510.

GONDOLFI, C. und F. SAVI (1999): A Mathematical Model for the Coupled Simulation of Surface Runoff and Infiltration. *Journal of agricultural Engang. Res.*, Bd. 75, S. 49-55.

HAGEN, N und H.B. KLEEBERG (1993): Möglichkeiten der Modellierung des großräumigen Stofftransportes auf Landflächen. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwesen*. München.

HARMS, R.W. (1984): Synthese maßgebender Abflußdaten für kleine, teilbebaute Einzugsgebiete. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau*. H. 55, 1984.

JENSON, S.K. und J.O. DOMINGUE (1988): Extractiing topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, - Phogrammetric Engeneering and Remote Sensing, Bd. 54, H. 11, S. 1593-1600. Falls Church.

JOHNSON, D.L. und A.C. MILLER (1997): A spatially distributed hydrological model utilizing raster data structures. - Computer & geosciences. Bd. 23, H.3, S. 267-272.

KINNEL, P.I. und L.M. RISSE (1998): USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. Soil Science Society American Journal, Bd. 62, S. 1667-1672.

KIRKBY, M (1990): A one-dimensional model for ril inter-rill interactions. In: Brayn, R.B. [Hrsg]: Soil erosion – experimets and models. Catena Supplement 17: Cremlingen-Destedt.

KLAUBE, M. (1984): Bibliographie des heimatischen Schriftentums über den Ambergau – Stadtteil Bockenem. Bockenem.

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Schlußfolgerungen für gute fachliche Praxis. KTBL-Schriften-Vertrieb. Darmstadt.

LEHMANN, H. und H.-O. ZINTZ (1993): Modellierung diffuser Nährstoffeinträge und deren Rückhalt für ganze Flusseinzugsgebiete. In: Wasser und Boden 45, H.8, S. 629-632.

LEWIS, S.M., BARFIELD, B.J., STORM, D.E. und L.E. ORMSBEE (1994): PRORIL-an erosion model using probability distributions for rill flow and density model development. I. Model development. Transaction of the ASAE, Bd. 37, S-115-123.

LEWIS, S.M., BARFIELD, B.J., STORM, D.E. und L.E. ORMSBEE (1994): PRORIL-an erosion model using probability distributions for rill flow and density model development. II. Model validation. Transaction of the ASAE, Bd. 37, S-125-133.

LUDWIG, B., DAROUSSIN, J., KING, D. und V. SOUCHÈRE (1996): Using GIS to predict concentrated flow erosion in cultivated catchments. In: KOVAR, K und H.P. NACHTNEBEL [Hrsg]: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, S. 429-436.

LUDWIG, B., BOIFFFIN, J., CHADOUEF, J. und A-V. AUZET (1995): Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. IN: CATENA, Bd. 25, S.227-252.

LUTZ, W. (1984): Berechnungen von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, H. 24, 1984.

MARTZ, L.W und J. GARBRECHT (1992): Numerical definition of drainage network und subcatchment ares from digital elevation models. - Computer & geosciences, Bd. 18, H. 6, S. 747-761.

McCool, D.K., FOSTER, G.R., MUTCHLER, C.K. und L.D. Meyer (1987): Revised slope stepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. Am. Sci. Agr. Eng. Bd. 30, Heft 5., S. 1387-1396.

McCool, D.K., FOSTER, G.R., MUTCHLER, C.K. und L.D. Meyer (1989): Revised slope stepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. Am. Sci. Agr. Eng. Bd. 32, Heft 5., S. 1571-1576.

MICHAEL, A. (1994): Anwendung des Bodenerosionsmodells „Erosion 2D“ unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität bodenphysikalischer, meteorologischer und nutzungsbedingter Modellparameter in einem kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet. Diplomarbeit TU Dresden.

MOLNAR, D.K. und P.Y. JULIEN (1997): Estimation of upland erosion using GIS. Computers & Geosciences, Bd 24, Nr. 2, S.183-192.

MORRIS, D.G. und HEERDEGEN, R.C. (1988): A digital terrain model for hydrology. - Proc. 4th Int. Symp. on Spatial Data Handling, Bd. 1, S 250-262. Zürich.

MORTLOCK, D.F (1997): A self-organized dynamic system approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes. Computers & Geosciences, Bd. 24, H. 4, S. 353-372.

MOSIMANN, Th, MAILLARD, A., MUSY, A., NEYROUD, J.-A., RÜTTIMANN, M. und P. WEISSKOPF (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Prozesse und Ursachen

der Bodenerosion - Bodenerhaltungsziel - Gefährdungsmaßnahmen - Schutzmaßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb und im Einzugsgebiet. Liebfeld-Bern.

MUZIK, I. (1996): A GIS-derived distributed unit hydrograph. IN: KOVAR, K und H.P.NACHTNEBEL [Hrsg]: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, S. 453-460.

O'CALLAGHAN, J.F. und D.M. MARK (1984): The extraction of drainage network from digital elevation data. - Computer, Vision and Image Processing, Bd. 28, H.323. San Diego, New York, Boston, London.

OLLESCH, G: (1997): Niederschlag – Bodenerosion – Gewässereutrophierung. Untersuchungen zum Phosphatumsatz am Beispiel des Gutturu-Mannu Einzugsgebietes. Göttingen.

PLATE, E.J. und L. DUCKSTEIN (1990): Stochastic aspects of water quality modelling for non point sources. Proceedings of the International Conference on Water Quality Modelling of Agriculture Non-Point Sources. ARS-81, Pt.2 S. 631-654.

de PLOEY, J. (1990): Threshold conditions for Thalweg gullying with special reference to loess areas. In: Brayn, R.B. [Hrsg]: Soil erosion – experimets and models. Catena Supplement 17: Cremlingen-Destedt.

PRIESTNALL, G. und P.W. DOWNS (1996): Automated parameter estimation for catchment scale river channel studies. The benefits of raster-vector integration. In: HydroGIS 96. Application of Geographic Information Systems in Hydrology ans Water Resources Managment, Bd. 235, S. 215-223.

QUINN,P. BEVEN, K.J. CHEVALLIER, P. und O. PLANCHON (1994): The prediction of hillslope flow path for distributed hydrological modelling using digital terrain models. - In: BEVEN, K.J. & MOORE, I.D. [Hrsg]: Terrain analysis and distributed modelling in hydrology, S.63-83. Chichester, N.Y., Brisbane.

Renard, K.G., Foster, G.A., Weesies, D.K. und McCool (1991): Predicting Soil Erosion by Water - A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture, ARS – 1991.

RIEGER, W. (1993): Hydrological terrain features derived from a pyramid raster structure. In: KOVAR, K. und H.P. NACHTNEBEL [HRSG]: HydroGis 93. IAHS, Vienna, Austria, S. 201-210.

De ROO, P.J., WESSELING, C.G. und V.G. JETTEN (1996): LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in GIS. IAHS, Bd. 235, S. 395-403.

ROSTAGNO, C., CORONATO, F. DEL VALLE, H. und D. PUEBLA (1999): Runoff and Erosion in Five Land Units of a Closed Basin of Northeastern Patagonia. Arid Soil Research and Rehabilitation, Bd. 13, S. 281-292.

RITTER, P. (1987): A vector-based slope and aspect generation algorithmen. - Photogrammetric engineering and remote sensing, Bd. 53 H.8, S. 1109-1111.

SAUERBORN, P. (1996): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland. Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 13, Diss. 190 S.

SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. Berliner Geographische Abhandlungen. Berlin, Heft 61. S 1-148.

SCHMIDT, J., WERNER, M. und A. MICHAEL (1996): EROSION 2D/3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft [HRSG.]. Dresden.

SCHMIDT, R. (1991): Anthropogene Veränderung und Degradation landwirtschaftlich genutzter Böden in den neuen Bundesländern Deutschlands. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, H.32, S.282-290.

SUTCLIFFE, J.V. (1978): Methods of Flood Estimation: A Guide to the Flood Studies Report. Institute of Hydrology, Wallingford. Report Nr. 49, 1978.

SUTSKOVER, ILAN (1998): Hierarchical fast decoding of fractal image representing using quadtree partitioning. Haifa, 1998.

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

TARBOTON, D.G., BRAS, R.L., und I.RODRIGUEZ-ITURBE (1994): On the extraction of channel networks from digital elevation data. In BEVEN, K.J. und I.D. MOORE [HRSG]: Terrain analyses and distributed modelling in hydrology. Chichster. N.Y. Brisbane. Toronto. Singapore.

TEMME, C. (1997): Linearer Bodenabtrag. Kartierung, Bewertung und Klassifikation erosionsbeeinflussender Raumstrukturelemente, der Bodenrauhigkeit und durch die Bodenbearbeitung geschaffener Leitbahnen. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Physische Geographie und Landschaftsökologie. Hannover.

URI, N.D., ATWOOD, J.D. und J. SANABRIA (1999): The Environmental benefits and costs of conservation tillage. Environmental Geology, Bd. 38, H. 2, S 111-119.

VOGES, J. (1999): Empirisches Modell für die mittlere Maßstabsebene zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer. Hannover. Dissertation.

WALTHER, J (1989): Naturwissenschaftliche Grundlagen, Entwicklungsstand und Anwendungsmöglichkeiten eines rechnergestützten Ansatzes zur Planung und Kontrolle der landwirtschaftlichen Flächenutzung in Gewässereinzugsgebieten. Diss. A, Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden.

WEPP (2000): Technical Documentation, Projects, Examples, Programs and FAQ. [HTTP://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb](http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb).

WENKEL, L.O. und A.SCHULTZ (1998): Vom Punkt zur Fläche – das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Fachtagung 1998. Zusammenfassung der Tagungsbeiträge. UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle.

WERNER, W., OLFS, H.-W., AUERSWALD, K. und K. ISERMANN (1991): Stickstoff- und Phosphoreinträge in Fließgewässer über „diffuse Quellen“. In: HAMM, A. [Hrsg.]: Studie über die Wirkung und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Academia Verlag, S. 665-764.

WERNER, W. und WODSACK, H.-P. (1994): Stickstoff und Phosphoreintrag in Fließgewässer Deutschlands unter besonderer Berücksichtigung des Eintragsgeschehens im Lockersteinbereich der ehemaligen DDR. Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 22, S. 48-49.

WICKENKAMP, V. (1995): Flächendifferenzierte Erosions- Akkumulationsmodellierung im Gebiet Mehle (Niedersachsen) unter Einsatz des Geoökologischen Informationssystems GOEKIS. Unveröffentlichte Diplomarbeit des Geographischen Institutes in Hannover.

WILLIAMS, J.R. (1995): The EPIC model. In: V.P.SINGH [Hrsg.]: Computer Models of Watershed Hydrology. Bd. 25, S. 909-1000.

WISHMEIER, W. und D. SMITH (1965): Predicting soil erosion losses east of the Rocky Mountains – Guide for selection of practices for soil and water conservation. USDA, Bd. 282.

WISCHMEIER, W. und D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. US Dep. Agr., Agr. Handbook No. 537.

WREDE, S. (1996): Ausmaß und Ursachen der linearen Bodenerosion im Gebiet der Lamme (Süd-niedersachsen) mit besonderer Berücksichtigung determinierbarer und nicht determinierbarer Faktoren. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Physische Geographie und Landschaftsökologie. Hannover.

YANG, HONGGUANG (1992): Zur Integration von Vektor- und Rasterdaten in Geo-Informationssystemen: theoretische und praktische Aspekte der Quadtree-Struktur für Geometrie-Daten. Verl. Der Bayrischen Akademie der Wissenschaften. München 1992.

YULIANTI, J.S., LENCE, B.J., JOHNSON, G.V. und A.K. Takyi (1999). Non-point source water quality management under input information uncertainty. In: Journal of Environmental Management, Bd. 55, S. 199-217.

ZEVENBERG, L.W. und C.R. THORNE (1987): Quantitative analysis of land surface topography. In: Earth Surface Process and Landforms, Bd. 12, S. 47-56.

ZHANG, X.C., NEARING, M.A., MILLER, W.P., NORTON, L.D. und L.T.WEST (1998): Modeling Interill Sediment Delivery. Soil Science Society American Journal, Bd. 62, S. 438-444