

Modellierung der linearen Erosion und des Risikos von Partikeleinträgen in Gewässer

Entwicklung und Anwendung von entscheidungsbasierten Modellen zur flächenhaften
Prognose der linearen Erosionsaktivität und des Gewässeranschlusses von Ackerflächen
(Niedersachsen und Nordwestschweiz)

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Geogr. Jan Fabian Bug

Geboren am 31. Oktober 1980 in Hannover

Referent: Prof. Dr. Thomas Mosimann
Korreferent: Prof. Dr. Gerald Kuhnt

Tag der Promotion: 02.11.2011

Vorwort

Diese Arbeit entstand am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Thomas Mosimann für die intensive Betreuung. Mit großem Interesse verfolgte er stets den Fortgang und die Ergebnisse dieser Arbeit. Für die Übernahme des Koreferates danke ich Herrn Prof. Dr. Gerald Kuhnt ganz herzlich.

Dank gebührt dem Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und dort besonders Herrn Dr. Heinrich Höper sowie Herrn Dr. Walter Schäfer, die als Auftraggeber für die Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen immer mit Interesse das Projekt unterstützt und damit die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglicht haben. Herrn Dr. Roland Bono (Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft, Schweiz) und Herrn Pascal Simon (Landwirtschaftliches Zentrum Ebenrain, Kanton Basel-Landschaft) möchte ich für die Hilfestellungen bei der Erstellung der Boden- und Gewässergefährdungskarten in der Nordwestschweiz danken.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Frau Inga, die mir jederzeit hilfreich zur Seite stand und die umfassende Korrekturarbeiten durchgeführt hat. Meiner Familie möchte ich ganz herzlich für die Unterstützung danken.

Dank gilt auch Frau Dr. Sandra Sanders, die mein Interesse für das Thema Bodenerosion geweckt hat und mir viele Tipps nach der ersten Durchsicht dieser Arbeit geben konnte. Gedankt sei auch den vielen fleißigen Helfern bei der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen, vor allem den „Veteranen“ Heiko van Wensen und Frank Beisiegel. Für spannende Gespräche und für die vielen kleinen Hilfestellungen möchte ich meinen Kollegen Philipp Herbst, Dr. Jens Groß, Dr. Uwe Meer und Bastian Steinhoff danken.

Hannover, im Dezember 2011

Jan Fabian Bug

Kurzzusammenfassung

Bodenerosion durch Wasser führt zum Abtrag von Feinerde auf Ackerflächen und zum Eintrag von Partikeln in angrenzende Gewässer. Zur Abschätzung des Prozesses steht bereits eine Vielzahl von Modellen zur Verfügung. Diese weisen aber häufig eine komplizierte und nicht nachvollziehbare Struktur auf und benötigen eine große Anzahl von Eingangsdaten. Für bestimmte Prozesssteile, wie die lineare Erosion, stehen nur wenig überzeugende Lösungen zur Verfügung. Damit die Abschätzung von linearer Bodenerosion und Gewässereintrag vereinfacht wird und nur mit wenigen leicht verfügbaren Eingangsdaten durchführbar ist, werden in dieser Arbeit zwei Modelle konzipiert, eingesetzt und validiert.

Das Modell LINERO dient der Abschätzung der Intensität und Lage von **LIN**earen **ER**osionsformen. Die Prognose der unterschiedlichen Prozesskomponenten der linearen Erosion erfolgt mit gesonderten entscheidungsbaumbasierten GIS-gestützten Submodellen. Für die Erstellung des Modells LINERO entstehen durch eine umfangreiche, räumliche Auswertung von vorhandenen Daten aus der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen Schadenskarten der linearen Erosion. Aus einem Geländemodell und der Schlagstruktur werden Prädiktoren abgeleitet, die mit Hilfe von empirisch-statistischen und wissenschaftlichen Methoden mit den Messwerten verglichen werden. Zur Prognose der linearen Erosionsaktivität in Fahrspuren, in Vorgewenden und in Tiefenlinien werden Entscheidungsbäume erarbeitet und die Prädiktoren implementiert.

Die Validierung des Modells LINERO konnte in drei Gebieten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen durchgeführt werden. Sie zeigt einen insgesamt guten Zusammenhang zwischen der prognostizierten und der tatsächlich aufgenommenen Erosionsaktivität.

Das Modell MOGWAF (**MO**dell zur Bestimmung des **GeW**ässer**A**nchlusses erosionsaktiver **F**lächen) dient der Ausweisung von Ackerflächen, von denen das Risiko des Stoffeintrages durch Bodenerosion in Gewässer ausgeht. Grundlage des Modells sind empirische Daten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen. Für die Vorhersage des Gewässeranschlusses von Ackerflächen benötigt das GIS-Modell nur wenige, allgemein verfügbare Eingangsdaten. Durch die Integration der Ergebnisse können gängige Erosionsgefährdungskarten um den Aspekt der Gewässergefährdung erweitert werden. Diese Information ist im Hinblick auf die EU-Wasserrahmenrichtlinie und die Vorgaben der Cross Compliance-Richtlinien von hoher Bedeutung für den Gewässerschutz und die landwirtschaftliche Beratung.

Mit Hilfe der Ergebnisse von beiden Modellen können Maßnahmen zum Schutz des Bodens und der Gewässer effizient geplant werden. Durch die gezielte Verortung von Hotspots der linearen Erosionsaktivität lassen sich Maßnahmen in diesen Bereichen konzentrieren. MOGWAF zeigt Flächen, auf denen Präventionsmaßnahmen sowohl dem Schutz des Bodens als auch der Gewässer dienen. Damit lassen sich gezielt wirkungsvolle Maßnahmen ergreifen, die Kosten sparen und die Akzeptanz der Akteure erhöhen.

Stichworte: Bodenerosion, Rillenerosion, Gewässereintrag, Modellierung, Geographische Informationssysteme, Erosionsschutzmaßnahmen

Abstract

The redistribution of soil within the field and sediment yield has a major effect on soil erosion. A great number of models can predict soil loss, but they often have a complex and incomprehensible structure and require a large number of input data. For example, rill erosion cannot be predicted properly by any of these models. To simplify the prediction of rill erosion and sediment yield, two models have been designed and validated.

The model LINERO (**l**inear **e**rosion) predicts the location of erosion forms and the soil loss due to rill erosion. The model consists of five decision trees, which predict the different forms of rill erosion with GIS-based sub models. The empiric basis of LINERO is the long-term monitoring of erosion in Lower Saxony. With empirical-statistical and knowledge based methods, predictors are derived from a Digital Elevation Model (DEM) and a plot structure to estimate linear erosion. LINERO was validated in three independent long-term monitoring sites. The correlation between the predicated and measured soil erosion is good.

The introduced model MOGWAF locates field plots that have a risk of sediment yield through soil erosion. The empirical basis is derived from ten years of soil erosion monitoring in Lower Saxony. To predict the sediment yield risks, the GIS-based model requires just a few input datasets which are widely available. The integration of the results of MOGWAF in erosion risk maps could notably improve soil and water conservation planning. The results of MOGWAF could help fulfill the requirements of the EU-Water Framework Directive and the EU Cross Compliance Directive.

The results of both models can be used to plan soil erosion measures more efficiently. They can localize priority areas requiring measures to control rill erosion. MOGWAF locates areas where control measures can protect both soil and water. Both models can help cut costs and can improve soil conservation strategies.

Key Words: Soil erosion, rillerosion, sediment yield, Modelling, Geographic Information Systems, Conservation planning

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzzusammenfassung.....	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Verzeichnis der Abbildungen.....	VII
Verzeichnis der Tabellen.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Konzept der Arbeit.....	5
1.4 Untersuchungsgebiete	7
1.4.1 Die Untersuchungsgebiete der Erosionsdauerbeobachtung und die Gebiete für die Entwicklung und Validierung von LINERO	7
1.4.1.1 Lamspringe	8
1.4.1.2 Barum.....	8
1.4.1.3 Sonstige Gebiete der Dauerbeobachtung in Niedersachsen	9
1.4.2 Untersuchungsgebiete für die Erstellung und Anwendung von MOGWAF	10
1.4.2.1 Oberes Einzugsgebiet der Lamme.....	10
1.4.2.2 Untersuchungsgebiet Gronau – Alfeld – Sibbesse	10
1.4.2.3 Untersuchungsgebiet Nordwestschweiz	10
2 Modell zur Prognose von räumlicher Verbreitung und vom Ausmaß der linearen Erosion (LINERO).....	12
2.1 Übersicht zum Vorgehen.....	12
2.2 Stand der Forschung.....	12
2.3 Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen als empirische Grundlage von LINERO	24
2.3.1 Der Bodenabtrag durch lineare Erosion: schlagbezogene Betrachtung.....	25
2.3.1.1 Gesamtabträge	25
2.3.1.2 Abträge in den einzelnen Formtypen der linearen Erosion	27
2.3.2 Bodenabtrag durch lineare Erosion: Kleinräumig-differenzierte Analyse	31
2.3.2.1 Methodik der kleinräumig-differenzierten Analyse der linearen Erosion ..	31
2.3.2.2 Ergebnisse im UG Lamspringe	35
2.3.2.3 Ergebnisse im UG Barum	37
2.4 Methodische Grundlagen und Modellstruktur von LINERO.....	39
2.4.1 Grundkonzeption des Modells LINERO.....	39

2.4.2	Phase 1: Modellierung von Prädiktoren mit GIS.....	41
2.4.2.1	Hangneigung in Fahrtrichtung.....	41
2.4.2.2	Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien	44
2.4.2.3	Sonstige Prädiktoren für LINERO	46
2.4.3	Phase 2: Erstellung der Entscheidungsbäume von LINERO	46
2.4.3.1	Aussage der Submodelle von LINERO	47
2.4.3.2	Teilmodell zur Bestimmung von Flächen ohne lineare Erosion	47
2.4.3.3	Teilmodell „Erosion in Tiefenlinien“	49
2.4.3.4	Teilmodell „Erosion in Fahrspuren“	54
2.4.3.5	Teilmodell „Erosion im Vorgewende“	55
2.4.3.6	Teilmodell „Erosion durch Zuschusswasser“.....	57
2.4.4	Anwendungsmöglichkeiten der Teilmodelle	58
2.5	Ergebnisse der Erosionsmodellierung mit LINERO in Niedersachsen.....	60
2.5.1	Modellergebnisse für das Gebiet Lamspringe	60
2.5.1.1	Verbreitung der Erosion im UG Lamspringe	60
2.5.1.2	Prognose der Erosionsaktivität und Höhe der gemessenen Abträge.....	63
2.5.2	Modellergebnisse für das Gebiet Barum	66
2.5.2.1	Verbreitung der Erosion im UG Barum	66
2.5.2.2	Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen Abträge	68
2.6	Validierung der Modellierung mit Hilfe von Kartierungsdaten aus weiteren Gebieten der Erosionsdauerbeobachtung	71
2.6.1	Modellergebnisse für das Gebiet Klein Ilde	71
2.6.1.1	Verbreitung der Erosion im UG Klein Ilde	71
2.6.1.2	Prognose der Erosionsaktivität und Höhe der gemessenen der Abträge	72
2.6.2	Modellergebnisse für das Gebiet Nette	75
2.6.2.1	Verbreitung der Erosion im UG Nette.....	75
2.6.2.2	Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen	76
2.6.3	Modellergebnisse für das Gebiet Küingdorf	79
2.6.3.1	Verbreitung der Erosion im UG Küingdorf.....	79
2.6.3.2	Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen Abträge im UG Küingdorf.....	80
2.6.4	Zusammenfassende Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von LINERO	83
2.7	Ausblick: Maßnahmenplanung mit LINERO	86

3	Modell zur Bestimmung des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen (MOGWAF)	89
3.1	Einleitung.....	89
3.2	Stand der Forschung.....	91
3.3	Kartierschlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ als Grundlage von MOGWAF	95
3.3.1	Direkter Anschluss.....	97
3.3.2	Indirekter Anschluss	98
3.3.3	Kein Gewässeranschluss	99
3.4	Modellstruktur und Ablauf der GIS-gestützten Ableitung des Gewässeranschlusses mit dem Modell MOGWAF.....	100
3.4.1	Notwendige Eingangsdaten zur Modellierung des Gewässeranschlusses	100
3.4.2	Modellgestützte Lokalisierung von Grünlandflächen in landwirtschaftlichen Mischgebieten	101
3.4.3	Abschätzung der Erosionsaktivität von Ackerflächen mit Hilfe der ABAG.....	104
3.4.4	Modellierung von Vorflutern und Gräben in Niedersachsen.....	105
3.4.5	Vorhersage von Einlaufschächten in der Nordwestschweiz.....	105
3.5	Modellierungsschritte von MOGWAF	107
3.5.1	Schlagteilung durch Einsatz eines Konvergenzindexes	108
3.5.2	Modellierung von Fließentfernungen zwischen Acker und Vorfluter	109
3.5.3	Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien mit Gewässeranschluss.....	111
3.5.4	Kombination der Eingangsdaten und der Zwischenergebnisse zur Modellierung des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen.....	111
3.6	Ergebnisse der Modellierung mit MOGWAF	112
3.6.1	Gewässeranschlusskarte Oberes Einzugsgebiet der Lamme.....	112
3.6.2	Gewässeranschlusskarte im UG Gronau – Alfeld – Sibbesse	113
3.6.3	Information Gewässeranschluss als Bestandteil der Erosionsgefährdungskarte des Kantons Basel-Landschaft.....	115
3.7	Validierung der Modellergebnisse	117
3.7.1	Vergleich der Ergebnisse mit Detailkartierungen im Leinebergland.....	117
3.7.2	Validierung in der Nordwestschweiz.....	119
3.7.3	Validierung mit Daten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen	120
3.8	Ausblick, Übertragbarkeit und Weiterentwicklung von MOGWAF	122
4	Die Erosionsgefährdungs- und Gewässeranschlusskarte als Beispiel für den Einsatz von MOGWAF in der Praxis	123
5	Gesamtfazit und Ausblick	126
6	Literatur	128

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Konzeption und Ziel der Arbeit.....	6
Abb. 2:	Verschlämmte Oberflächen mit Fließspuren im UG Nette (links, Oktober 2009) und UG Barum (rechts, März 2008)	13
Abb. 3:	Formen der linearen Erosion, Fahrgassenerosion (UG Lamspringe, März 2007) und Erosion in Tiefenlinien (UG Barum, März 2010)	14
Abb. 4:	Schneeschnelzerosion im UG Barum (März 2009).....	14
Abb. 5:	Erosion in Saatrillen im UG Barum (März 2010)	15
Abb. 6:	Formen der linearen Erosion.....	16
Abb. 7:	Anteil der linearen Erosion am Gesamtabtrag bezogen auf ganze Schlagflächen.....	18
Abb. 8:	Faktoren der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung	19
Abb. 9:	Modellierter Bodenabtrag (ABAG, Schlagbasis) im Gebiet Lamspringe	19
Abb. 10:	Modellierter Bodenabtrag (ABAG, Pixelbasis) im Gebiet Lamspringe	20
Abb. 11:	Mit Erosion 3D modellierter Bodenabtrag (Oktober 2007) im Gebiet Lamspringe	22
Abb. 12:	Anzahl und Abträge durch lineare Erosionssysteme abhängig vom Formtyp.....	26
Abb. 13:	Karte der Erosions- und Akkumulationsformen im Gebiet Nette für ein Regenerereignis im Mai 2004	29
Abb. 14:	Schema der GIS-gestützten kleinräumlich differenzierten Auswertung der Bodenerosion	32
Abb. 15:	Kartierter Bodenabtrag im Untersuchungsgebiet Lamspringe	35
Abb. 16:	Flächendifferenzierte Bodenabträge für die Schläge 1/2 und 1/6 im UG Lamspringe	36
Abb. 17:	Kartierter Bodenabtrag im Untersuchungsgebiet Barum	37
Abb. 18:	Flächendifferenzierte Bodenabträge für die Schläge 1/1 und 3/1 im UG Barum ...	38
Abb. 19:	Phasen der Modellumsetzung von LINERO	40
Abb. 20:	Schema der Methodik zur Berechnung der Bearbeitungsrichtung eines Schlages in Bezug auf die Hangfallrichtung, sowie die Berechnung der Hangneigung in Bearbeitungsrichtung	42
Abb. 21:	Modellierte Richtung der Bewirtschaftung in Bezug auf die Hangfallrichtung im UG Lamspringe	43
Abb. 22:	Modellierte Hangneigung in Richtung der Bewirtschaftung im UG Lamspringe	43
Abb. 23:	Vergleich der zwei Algorithmen zur Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien.....	44
Abb. 24:	Vergleich von Ansätzen zur Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien anhand von Kartenausschnitten.....	45
Abb. 25:	Entscheidungsbaum zur Vorhersage von erosionsinaktiven Flächen.....	48
Abb. 26:	Zusammenhang von Erosionsaktivität und Einzugsgebietsgröße	50
Abb. 27:	Zusammenhang zwischen dem IETL und den mittleren jährlichen Bodenabträgen für Tiefenlinien mit mittelgroßen Einzugsgebieten.....	52
Abb. 28:	Entscheidungsbaum zur Prognose der Erosionsaktivität von Tiefenlinien.....	53
Abb. 29:	Wahrscheinlichkeit von Bodenabtrag in Tiefenlinien – Prädiktoren und Modellerggebnisse in Lamspringe	54
Abb. 30:	Entscheidungsbaum zur Einschätzung der Erosionsgefährdung in Fahrspuren ...	55

Abb. 31: Entscheidungsbaum zur Prognose der Erosionswahrscheinlichkeit im Vorgewende	56
Abb. 32: Vergleich der Kartier- und Modellergebnisse im UG Lamspringe	61
Abb. 33: Vergleich der kartierten und der modellierten linearen Erosion am Beispiel einzelner Schläge im UG Lamspringe.....	62
Abb. 34: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Lamspringe.....	63
Abb. 35: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im UG Lamspringe.....	65
Abb. 36: Vergleich der Kartier- mit den Modellergebnissen im UG Barum	67
Abb. 37: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Barum.....	68
Abb. 38: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im UG Barum.....	70
Abb. 39: Vergleich der Kartier- mit den Modellergebnissen im UG Klein Ilde	71
Abb. 40: Vergleich der Kartier- und Modellergebnisse auf Schlagbasis im UG Klein Ilde....	72
Abb. 41: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Klein Ilde.....	73
Abb. 42: Vergleich der gemessenen und der modellierten Erosion im UG Nette.....	75
Abb. 43: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Nette.....	76
Abb. 44: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im UG Nette	78
Abb. 45: Vergleich der gemessenen und der modellierten Erosion im UG Küingdorf.....	79
Abb. 46: Vergleich der Kartier- und der Modellergebnisse auf Schlagbasis im UG Küingdorf	80
Abb. 47: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Küingdorf	81
Abb. 48: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Küingdorf	82
Abb. 49: Kartierter und prognostizierter Bodenabtrag in Fahrspuren auf Schlag 5016 im Gebiet Lamspringe	84
Abb. 50: Ableitung von Maßnahmen zum Schutz vor linearer Erosion aus einer Modellierung mit LINERO	87
Abb. 51: Maßnahmenplanung im Gebiet Lamspringe zur Prävention von linearem Bodenabtrag.....	88
Abb. 52: Modellierter Gewässereintrag (Erosion 3D) bei einem Niederschlagsereignis im Mai 2007 im Gebiet Hölstein - Diegten (Kanton Basel-Landschaft, Schweiz)	93
Abb. 53: Vorgehen des Gewässeranschlussschlüssels	95
Abb. 54: Entscheidungsbaum zur Modellierung des Gewässeranschlusses	96
Abb. 55: Direkt und indirekt angeschlossener Schlag (Rothenfluh, Kanton Basel-Landschaft, Schweiz, Juni 2009)	97
Abb. 56: Indirekter Gewässeranschluss im Gebiet Rothenfluh (Kanton Basel-Landschaft, Schweiz, Juni 2009)	98

Abb. 57: Modell zur Bestimmung der Nutzung auf Landwirtschaftsflächen im Kanton Basel-Landschaft	101
Abb. 58: Ergebnis des Grünlandmodells im Gebiet Giebenach – Arisdorf	103
Abb. 59 ABAG-Berechnung für den Kanton Basel-Landschaft	104
Abb. 60: Modellierte und kartierte Einlaufschächte im Gebiet Arisdorf-Giebenach	106
Abb. 61: Modellstruktur von MOGWAF	108
Abb. 62: Schlagteilung mit Hilfe des Konvergenzindex nach O. Conrad (2006) im Oberen Einzugsgebiet der Lamme	109
Abb. 63: Fließentfernungen zu Gewässern im Oberen Einzugsgebiet der Lamme und selektierte Schläge mit weniger als 500 m Fließstrecke zum nächstliegenden Gewässerabschnitt	110
Abb. 64: Gewässeranschlusskarte des Oberen Einzugsgebietes der Lamme	112
Abb. 65: Gewässeranschlusskarte für das UG Gronau – Alfeld – Sibbesse	114
Abb. 66: Gewässeranschlusskarte für das Teilgebiet Arisdorf-Giebenach	116
Abb. 67: Kartierter und modellierter Gewässeranschluss im Gebiet Eddinghausen	118
Abb. 68: Praxiskarte Bodenerosion Kanton Basel-Landschaft. Ausschnitt	123
Abb. 69: Karte der Flächen, auf denen Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz erforderlich sind	125

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Empirische Modelle zur Prognose von Bodenabtrag	21
Tab. 2:	Physikalische Modelle zur Prognose von Bodenabtrag	21
Tab. 3:	Vergleich physikalischer und empirischer Modelle (nach Hebel 2003)	23
Tab. 4:	Mittlerer linearer Bodenabtrag abhängig von Anbaukultur und Bodenbearbeitung	25
Tab. 5:	Kategorisierung der Schläge nach Auftrittstypen der linearen Erosion	27
Tab. 6:	Verwendete Prädiktoren für die Modellierung der einzelnen Formen der linearen Erosion in den Submodellen von LINERO	46
Tab. 7:	Durch Zuschusswasser betroffene Schlagteile im Gebiet Lamspringe	57
Tab. 8:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in Lamspringe	63
Tab. 9:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in Barum	68
Tab. 10:	Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in Tiefenlinien im UG Barum	69
Tab. 11:	Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion im Vorgewende im UG Barum	69
Tab. 12:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells im UG Klein Ilde	73
Tab. 13:	Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion im Vorgewende im UG Klein Ilde	74
Tab. 14:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells im UG Nette	76
Tab. 15:	Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in Vorgewenden im UG Nette	77
Tab. 16:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in Küingdorf	81
Tab. 17:	Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in den Vorgewenden im UG Küingdorf	82
Tab. 18:	Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in allen Untersuchungsgebieten	84
Tab. 19:	Eingangsdaten für die Modellierung des Gewässeranschlusses	100
Tab. 20:	Die Prädiktoren von MOGWAF und ihre Modellierung	107
Tab. 21:	Ergebnisse von MOGWAF im Untersuchungsgebiet Lamme	113
Tab. 22:	Anteil der Varianten des Gewässeranschlusses im UG Gronau – Alfeld - Sibbesse	113
Tab. 23:	Anteil der Varianten des Gewässeranschlusses im Kanton Basel-Landschaft ...	115
Tab. 24:	Vergleich der Ergebnisse von MOGWAF mit Kartiererergebnissen im südlichen Niedersachsen	118
Tab. 25:	Validierungsergebnisse von MOGWAF im Kanton Basel-Landschaft	119
Tab. 26:	Ergebnisse der Erosionsdauerbobachtung im Vergleich zu den Modellierungen mit Hilfe von MOGWAF in Niedersachsen	121

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Gefährdung der Gewässer in Europa geht vornehmlich vom Eintrag von schädlichen Stoffen mit chemischer, physikalischer oder biologischer Wirkung und von der Veränderung der Gewässerstruktur aus. Besonders die diffuse Belastung der Gewässer durch Boden-erosion ist ein akutes Problem. Der diffuse Übertritt von Bodenmaterial vom Acker in angrenzende Flüsse oder Seen lässt sich, im Gegensatz zu punktuellen Quellen, nur schwer vermeiden. Um die Gewässer zielgerichtet schützen zu können, müssen mittels räumlicher Analysen Flächen ausgewiesen werden, durch die eine Gefährdung der Gewässer ausgeht. Der Gewässerschutz ist ein wichtiges Thema und in gesetzlichen Regelungen verankert. Unter anderem behandelt die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) der EU und das Gewässerschutzgesetz (GSchG 1991) in der Schweiz dieses Thema. Die Gesetze fordern die Erhaltung und Verbesserung der Qualität der Gewässer, insbesondere der chemischen Qualität. Zwar konnte diese in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert werden, da die Belastung durch Phosphat und Schwermetalle durch die Reduktion der Einträge aus urbanen und industriellen Quellen verringert werden konnte. Der Eintrag durch Erosion blieb jedoch in diesem Zeitraum gleich und ist nun eine der wichtigsten Quellen für diese Schadstoffe in den Fließgewässern (UBA 2009). Künftig muss davon ausgegangen werden, dass durch den Klimawandel die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen ansteigen wird (DOTTERWEICH 2008). Dadurch erhöht sich auch das Risiko von Oberflächenabfluss, Boden-erosion und Gewässereintrag (ENGEL & MÜLLER 2009).

Um die Qualität der Gewässer langfristig zu sichern und sie gegebenenfalls zu verbessern, muss die Bodenerosion auf den relevanten Flächen bekämpft werden. Dazu können verschiedene Schutzmaßnahmen geplant und durchgeführt werden, die in ihrer Wirkung größtenteils erforscht sind und auch in zunehmendem Maße von den Landwirten eingesetzt werden (SHARPLEY ET AL. 2000, DEUMLICH ET AL. 2006, MOSIMANN 2008, DE BAETS ET AL 2011). Gezielt eingesetzte Maßnahmen zum Schutz des Bodens führen mittelbar auch zu einer Verbesserung der Wasserqualität, wenn sie auf Flächen mit Anschluss zu einem Gewässer durchgeführt werden.

Grundsätzlich stellt sich damit die Frage, wo Erosionsschutzmaßnahmen mit hoher Effektivität durchgeführt werden können. Auf welchen Parzellen verringern Präventionsmaßnahmen den Bodenabtrag und den Eintrag von Feinerde in die Gewässer am effektivsten? Auf diesen Flächen können Schutzmaßnahmen konzentriert werden, wodurch die anfallenden Kosten verringert und die Akzeptanz der Akteure gesteigert werden kann. Deshalb wird in dieser Arbeit die Frage eingehend untersucht:

- Auf welchen Ackerflächen und wo auf diesen wird Feinerde mobilisiert, die in Gewässer eingetragen werden kann?

Ein wichtiger Schritt zur Identifikation solcher Ackerflächen ist die Bestimmung der Erosionsaktivität. Da Bodenerosion durch Wasser seit langem als Umweltproblem bekannt ist (LANG & BORK 2006) und bereits seit den 1930er Jahren erforscht wird (BREBUDA & RICHTER 1998), stehen dafür verschiedene Modelle zur Verfügung (z.B. WISHMEYER & SMITH 1978,

KNISEL 1980, FLANAGAN & LAFLEN 1997, v. WERNER 1995), die zum Teil auch validiert sind (SUMMER ET AL 1998, MICHAEL 2002, NEARING ET AL. 2005). Das bekannteste und am häufigsten verwendete Modell zur Bestimmung der Erosionsaktivität ist die bereits 1978 formulierte Universal Soil Loss Equation (USLE, WISCHMEYER & SMITH 1978) bzw. die deutsche Anpassung, die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG, SCHWERTMANN ET AL. 1991). Sie schätzt den mittleren jährlichen Bodenabtrag einer Parzelle ab. Obwohl bei der Anwendung der USLE nach wie vor die Übertragbarkeit des Modellansatzes von den Kontinentalklimaten des Mittleren Westens der USA auf Mitteleuropa nicht geklärt ist (BREBUDA & RICHTER 1998, DETTLING 1989), wird das Modell aufgrund des Mangels an Alternativmodellen auch für die Erstellung von aktuellen Bodenerosionsgefährdungskarten eingesetzt (MOSIMANN ET AL. 2010). Aufgrund der aufwendigen und umfangreichen Berechnungsversuche, die zur Erstellung durchgeführt wurden, gilt das Modell für die USA als empirisch gut überprüft.

Für die Erstellung von Risikokarten zum Gewässereintrag, also der Information von welchen Ackerflächen Feinerde in Gewässer gelangen kann, ist der Einsatz der USLE nur durch Anpassung möglich. GRÜNING & PRASUHN (2001) sowie WURBS ET AL. (2007) stellen solche Anpassungen vor. Um plausible Ergebnisse mit diesen Modellen zu erhalten, werden aber viele Eingangsdaten benötigt, die nicht immer vorhanden sind. Des Weiteren ist der Einsatz der USLE für die Gewässereintragsmodellierung aus folgenden Gründen problematisch:

- Die USLE liefert Informationen für ganze Parzellen und nicht für Teilstücke.
- Mit der USLE wird der Abtrag durch flächenhafte Erosionsformen bestimmt, nicht aber der Abtrag durch lineare Erosion (HALBFASS & GRUNEWALD 2008).

Empirische Untersuchungen zeigen, dass es gerade durch lineare, also durch Abflusskonzentration entstandene, Erosion häufig zum Übertrag von Feinerde von Ackerflächen in die Gewässer kommt (MOSIMANN ET AL. 2009). Lineare Erosion tritt nicht gleichmäßig auf einer Parzelle auf, sondern in bestimmten Bereichen konzentriert. Für eine verbesserte Abschätzung des Gewässereintragsrisikos ist deshalb folgende Frage von hoher Bedeutung:

- Wie groß ist die Gefährdung einer Parzelle durch lineare Erosion und wo genau auf der Parzelle sind lineare Bodenabträge zu erwarten?

Diese Frage ist nicht nur für den Gewässerschutz bedeutend. Auch allgemein in der Erosionsforschung sieht BOARDMAN (2006) in diesem Bereich Handlungsbedarf. Obwohl der Prozess der Bodenerosion bereits sehr gut erforscht ist, und er in gesetzlichen Regelungen, wie dem Bundesbodenschutz-Gesetz (BBodSchG 1998) in Deutschland, der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBO 1998) in der Schweiz, auf EU-Ebene seit 2010 in den Vorgaben der Cross Compliance (CC) und in der noch nicht beschlossenen EU-Bodenrahmenrichtlinie (EU 2006), Berücksichtigung findet, sind immer noch wichtige Aspekte unklar. So liegen aus Sicht von BOARDMAN (2006) noch keine befriedigenden Antworten zu den Fragen vor, wo Bodenerosion eigentlich genau stattfindet, warum sie passiert und wer die Schuld trägt. Offen bleiben darüberhinaus die Fragen wie ernstzunehmend das Problem eigentlich ist, wen Bodenabtrag letztendlich betrifft, ob der Prozess zu stoppen ist und wie hoch die Folgekosten der Erosion sind.

Die in dieser Arbeit untersuchten Fragen nach der Höhe und der räumlichen Verteilung von linearer Bodenerosion sind demnach aktuell und finden sich im Katalog von BOARDMAN (2006) an mehreren Stellen wieder. Gerade durch die gesetzlichen Bestimmungen, wie dem BBodSchG oder der ab 2010 geltenden Regelungen der CC, wird die Beantwortung dringlich. Die bislang aufgestellten Grenzwerte und Maßstäbe berücksichtigen den Abtrag durch lineare Erosion nicht. Auch der Gewässereintrag spielt keine Rolle. Die Entwicklung neuer Modelle zur Verbesserung der Prognose führt zur Erstellung integrativer Strategien zum Schutz des Bodens, sowie des Grund- und Oberflächenwassers. Die Information, wo und wie viel Boden mobilisiert wird und wo dieser in die Gewässer eingetragen wird, ist demnach, sowohl für die Forschung, als auch für die Praktiker von hoher Bedeutung. Nur durch das Aufstellen und die Umsetzung dieser Strategien können die Ziele der WRRL erreicht werden.

1.2 Zielsetzung

Zu einer Verbesserung des Gewässer- und Bodenschutzes müssen neue Instrumente entwickelt werden, die der Lokalisierung von Flächen dienen, auf denen Feinerde mobilisiert wird, die daraufhin in die Gewässer gelangen kann. Deshalb ist das erste Ziel dieser Arbeit, mit Hilfe kleinräumig differenzierter Analysen, Ackerflächen auf ihre lineare Erosionsaktivität hin zu untersuchen. Darauf aufbauend wird das Ziel verfolgt, die räumlichen Zusammenhänge zwischen Ackerflächen und Gewässern zu erfassen, zu beschreiben und zu prognostizieren. Es sollen Werkzeuge für die Vorhersage des Gewässeranschlusses und der linearen Erosionsaktivität entwickelt, validiert und in anderen Landschaftsräumen eingesetzt werden. Als Ergebnis entstehen dabei räumlich differenzierte Pläne mit Vorschlägen zur Durchführung von spezifischen, auf die Gefährdung angepassten Erosionsschutzmaßnahmen. Diese Maßnahmen sollen sowohl die Aspekte des Bodens- als auch des Gewässerschutzes berücksichtigen. Die Prognose der linearen Erosionsaktivität und des Gewässeranschlusses soll mit Hilfe von einfachen, gut nachvollziehbaren Abschätzmodellen durchgeführt werden, die mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) flächenhafte Ergebnisse liefern. Dafür sollen neue Modelle erstellt werden, die auf für den Akteur nachvollziehbaren Entscheidungsbäumen basieren.

Die neuen Modelle entstehen auf einer empirischen Basis und sollen nur wenige Eingangsdaten benötigen. Viele bislang veröffentlichte Erosionsmodelle sind nach BOARDMAN (2006) dahingehend kritisch zu betrachten, da diese auf einer nur kleinen empirischen Datengrundlage basieren. Der Großteil der verwendeten Modelle geht nicht auf Feldbeobachtungen sondern auf Beregnungsversuche zurück (WISHMEYER & SMITH 1978, SCHMIDT 1996). Damit sind die Ergebnisse nur teilweise reproduzierbar und auf den normal bewirtschafteten und normal beregneten Ackerschlag nur begrenzt übertragbar. Ursachen dieser ungenügenden Validierung sind die hohen Kosten langer Messreihen und die zunehmende Kurzatmigkeit der Wissenschaft. Die Akzeptanz der Modellergebnisse leidet darunter, dass die Modelle unter Laborbedingungen, also mit künstlichem Regen erstellt worden sind.

BOARDMAN (2006) fordert deshalb, dass neue Erosionsmodelle entworfen werden, die

- für viele Aufgabe und in allen Maßstabsebenen eingesetzt werden können,
- die in der Welt der Akteure nutzbar sind und damit auf wenigen einfach zu beschaffenden Eingangsdaten basieren,
- die technisch einfach sind und auf Parzellenebene eingesetzt werden können,
- die Off-Site-Schäden beschreiben und Hilfestellungen für die Bestrebungen zum Bodenschutz liefern.

Diese Forderungen sollen bei der Erstellung der Modelle in dieser Arbeit berücksichtigt werden, indem Modelle erstellt werden, die technisch einfach umgesetzt werden können und für die Erstellung von Planungskarten in Parzellen, wie auch im kleineren Maßstab genutzt werden können. Ziel ist es möglichst wenige Eingangsdaten zu verwenden.

BOARDMAN (2006) betont weiterhin, dass ein einzelnes Modell alle Aufgaben nie alleine leisten werde. Nur mit einer Vielzahl von Modellen kann ein Wissenszuwachs erzielt werden kann, der in der Summe zu Beantwortungen der offenen Fragen einen Beitrag leisten kann. In diesem Sinne werden in dieser Arbeit auch mehrere Teilmodelle entworfen, die jeweils auf spezifische Probleme anwendbar sind. Durch die Kombination der Ergebnisse der Teil- bzw. Submodelle kann dann ein besseres Gesamtergebnis erzielt werden. Aus diesen Vorgaben zur Modellerstellung und aus dem aktuellen Forschungsbedarf lassen sich folgende konkrete Zielsetzungen für die Forschung ableiten.

Forschungsziele:

- Entwicklung eines empirischen Modells zur räumlich-differenzierten Prognose der linearen Erosionsaktivität im Großmaßstab

Teilziele:

- Empirische statistische Auswertung des linearen Erosionsgeschehens.
 - Erarbeitung von Prädiktoren zur Prognose der linearen Erosionsaktivität.
 - Erstellung von Entscheidungsbäumen zur Prognose von Erosionsabträgen in Tiefenlinien, Vorgewenden, Fahrspuren und durch Zuschusswasser.
- Entwicklung eines Modells zur Abschätzung des Gewässeranschlusses von Ackerparzellen.

Teilziele:

- Anpassung des Entscheidungsbaumes aus dem Schlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ für die Umsetzung in GIS.
- Erarbeitung von GIS-Methoden zur Erstellung von Prädiktoren für die Modellierung des Gewässeranschlusses.

BOARDMAN (2006) fordert zudem, dass neue Modelle nicht nur für die Forschung entwickelt werden sollen, sondern, dass sie auch Ergebnisse für die Akteure in der Praxis liefern sollen. Deshalb verfolgt diese Arbeit nicht nur Forschungsziele, sondern auch folgende Praxisziele:

- Identifikation von Parzellen und Geländebereichen, auf denen Erosionsschutzmaßnahmen erforderlich sind.
- Erstellung von Maßnahmenkarten zur Verminderung der Schäden durch lineare Erosion auf Ackerparzellen.
- Ausweisung von Flächen, auf denen Erosionsschutzmaßnahmen auch dem Gewässerschutz dienen und deshalb besonders effizient und dringlich sind.
- Erstellung von Maßnahmenplänen zur Verminderung des Risikos von Stofftransport in die Gewässer.

1.3 Konzept der Arbeit

In Anlehnung an die Zielsetzung umfasst das konzeptionelle Vorgehen dieser Arbeit die Erstellung von zwei empirischen Modellen. Beide Modelle basieren dabei auf der gleichen empirischen Basis, den Daten aus der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen (MOSIMANN ET AL 2009). Es steht eine elfjährige Messreihe zum Erosionsgeschehen unter normalen Bewirtschaftungsbedingungen zur Verfügung.

Die Auswertung dieser Datenreihe steht dementsprechend zu Beginn der Entwicklung beider Modelle. Dabei müssen die Daten abhängig vom Prognoseziel unter unterschiedlichen Gesichtspunkten analysiert werden. Für das Modell zur Prognose der linearen Erosionsaktivität steht die formspezifische Analyse der Daten der Erosionsdauerbeobachtung im Vordergrund. Für die Erstellung des Modells Gewässeranschluss müssen die Erkenntnisse zu Off-Site Schäden analysiert und zusammengefasst werden. Die weitere Modellentwicklung lässt sich in drei Phasen untergliedern, die sich abhängig vom Modell unterscheiden. Das grundlegende Vorgehen veranschaulicht Abbildung 1 (Abb. 1).

Auf Basis der Auswertung der empirischen Daten werden in beiden Fällen in der ersten Phase hierarchisch gegliederte Entscheidungsbäume erstellt. Als Prädiktoren in den Entscheidungsbäumen dienen spezifische Eingangsdaten, die in der zweiten Phase mit Hilfe von GIS flächenhaft modelliert werden. Die dritte Phase der Modellentwicklung besteht dann aus der Anwendung der Modelle in verschiedenen Untersuchungsgebieten, der Validierung und der räumlichen Übertragung.

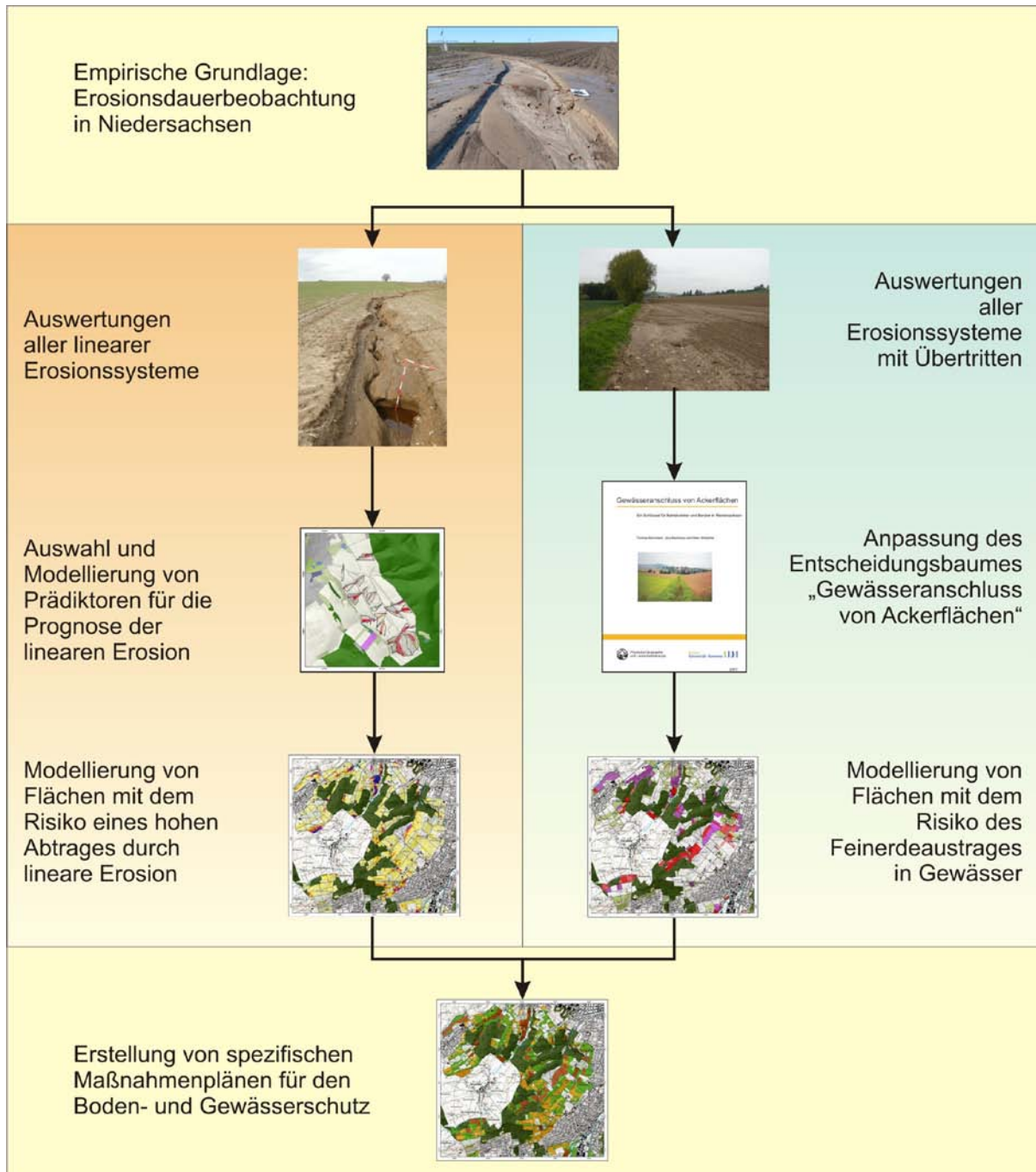


Abb. 1: Konzeption und Ziel der Arbeit

Das erste in dieser Arbeit vorgestellte Modell LINERO dient der Prognose der räumlichen Verteilung und Aktivität von **L**inearen **E**rosionsformen. LINERO grenzt Schlagbereiche ein auf denen lineare Erosionsformen auftreten und schätzt die Höhe des zu erwartenden Abtrages ein. Die Prognose erfolgt für die einzelnen Teilprozesse der linearen Erosion. Für die Prognose der Teilprozesse wird je ein eigener Entscheidungsbaum konzipiert. Die Ausweisung von Schlagbereichen, auf denen kein linearer Bodenabtrag auftritt, ist ein weiterer Modellschritt.

Das zweite in dieser Arbeit vorgestellte Modell MOGWAF, das **M**odell zur Prognose des **G**ewässeranschlusses erosionsaktiver **F**lächen, weist Flächen aus, auf denen Feinerde mobilisiert und in gefährdete Schutzgüter eingetragen werden kann. MOGWAF bestimmt

am Beispiel von Fließgewässern das Risiko einer erosionsaktiven Fläche Material auszutragen. Konzeptionell basiert MOGWAF auf dem Schlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ (MOSIMANN ET AL. 2007). Die Anpassung des Entscheidungsbaumes, die flächenhafte Ableitung und die Modellierung von fehlenden Eingangsdaten sowie die Überprüfung der Modellergebnisse sind wichtige Schritte bei der Modellentwicklung.

Grundsätzlich sollen beide Modelle möglichst gut übertragbar sein, damit sie auch tatsächlich in der Praxis eingesetzt werden können. Deshalb ist es wichtig, dass sie Rücksicht auf die Grundkritik BOARDMANN'S (2006) bezüglich der Datenbasis nehmen:

- Empirische Grundlage.
- Normale Bewirtschaftung der Flächen, keine „Laborbedingungen“.
- Verwendung von möglichst wenigen Eingangsdaten.

Die empirische Grundlage beider Modelle liefern Auswertungen von Daten aus der Dauerbeobachtung in Niedersachsen (MOSIMANN ET AL. 2009). Es stehen etwa 880 Parzellenmessjahre zur Verfügung, die die breite empirische Grundlage für die Modelle stellen.

Hinsichtlich der Verwendung von Eingangsdaten ist zu betonen, dass beide Modelle im Minimalfall lediglich auf einen Landnutzungs- und Reliefdatensatz zurückgreifen. Diese Daten sind für viele Flächen vorhanden. Zur Verbesserung des Prognoseergebnisses ist aber die Implementierung weiterer Daten möglich und vorgesehen. Durch die Verwendung einer stark begrenzten Anzahl von Eingangsdaten soll eine weite Verbreitung der Modelle ermöglicht werden. Der Einsatz der Modelle soll nicht durch Kosten für die Datenerhebung und -aufbereitung erschwert werden.

Zur Umsetzung der Praxisziele dieser Arbeit sollen die Ergebnisse beider Modelle kombiniert werden. Damit weisen Karten Flächen aus, auf denen Maßnahmen zum Schutz vor Bodenerosion doppelt sinnvoll sind. Auf diesen Flächen dienen Maßnahmen sowohl dem Boden-, als auch dem Gewässerschutz.

1.4 Untersuchungsgebiete

1.4.1 Die Untersuchungsgebiete der Erosionsdauerbeobachtung und die Gebiete für die Entwicklung und Validierung von LINERO

Das Ausmaß und die Ursachen der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzte Flächen in Niedersachsen werden seit 2000 im Rahmen der Erosionsdauerbeobachtung auf fünf zusammenhängenden Referenzflächen von jeweils 33 bis 106 ha Größe erfasst. Die Flächen repräsentieren die verschiedenen erosionsgefährdeten Gebiete mit Löss- und Sandlössbedeckung in Niedersachsen (CAPELLE & LÜDERS 1985, CAPELLE 1990).

Die Entwicklung des Modells LINERO basiert vornehmlich auf Ergebnissen im Untersuchungsgebiet (UG) Lamspringe. Hier liegt eine elfjährige Datenreihe vor, die Gebiete werden aber bereits seit den 1990er Jahren untersucht (DUTTMANN 1999). Eine Modellkalibrierung wird mit Hilfe der Ergebnisse aus dem UG Barum durchgeführt. Die beiden Gebiete repräsentieren bezüglich der erosionsbeeinflussenden Faktoren sehr unterschiedliche

Regionen. Die anderen drei Gebiete der Erosionsdauerbeobachtung mit elfjähriger Messreihe, Küingdorf, Klein Ilde und Nette, dienen der Erfolgskontrolle, Validierung und als Anwendungsgebiete für beide Modelle.

1.4.1.1 Lamspringe

Das UG Lamspringe liegt rund 25 km südlich von Hildesheim. Naturräumlich gesehen ist das UG dem Innerste Bergland bzw. dem Rhüdener Becken zuzuordnen. Im Südwesten grenzt das UG an den Heber, eine Schichtstufe aus dem unteren Muschelkalk. Das Relief ist durch eine Senkenlage im Zentrum geprägt, in der auch der Fluss Lamme entspringt. Die Schläge sind zum Teil muldenförmig ausgeprägt und weisen Tiefenlinien und Rücken auf. Ein einheitlicher Abfluss auf den Schlägen ist dementsprechend nicht vorzufinden. Die mittleren Hangneigungen der Ackerschläge erreichen zum Teil Werte von über 10 %.

Die Böden in Lamspringe entstanden aus Lösslehmen und weisen tonigen Schluff (Ut3) als Bodenart auf. Der Löss liegt über Mergeln des Mittleren Buntsandsteins. An den Oberhängen im Gebiet nimmt die Lössmächtigkeit ab, der Tongehalt der Böden steigt an. Die Böden haben sich größtenteils zu Braunerden und Pseudogley-Parabraunerden entwickelt. Im UG ist der Anbau von Wintergetreide, Zuckerrübe und Winterraps in dreijährigen Fruchtfolgen verbreitet. Seit dem Jahr 2004 spielt Mais eine wichtige Rolle. Durch die Novellierung des Gesetzes zum Vorrang der Erneuerbaren Energien (EEG 2000) im Jahr 2004 ist für viele Landwirte der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur Energieerzeugung lukrativ geworden. In Ackerbauregionen, wie dem Niedersächsischen Berg- und Hügelland muss Mais als nachwachsender Rohstoff zur Beschickung der Biogasanlagen angebaut werden, da Gülle oder andere Substrate nicht zur Verfügung stehen (WEIDANZ & MOSIMANN 2007). Zum Teil wird in Lamspringe auch Hafer angebaut, was den Anteil der Sommerfrüchte in den Fruchtfolgen weiter erhöht. Der Einsatz von Zwischenfrüchten ist verbreitet. Die Erosionsgefährdung des UG Lamspringe ist aufgrund des Reliefs und der Bodenart als hoch einzustufen.

1.4.1.2 Barum

Das UG Barum liegt rund 9 km nördlich von Uelzen, in der Lüneburger Heide zwischen dem Flecken Ebstorf und der Stadt Bad Bevensen. Naturräumlich gesehen gehört das Gebiet zu den Emmendorfer Moränen. Diese teilen das Uelzener vom Bevenser Becken. Im Norden wird das UG durch das Seedorfer Holz begrenzt. Im Süden schließt sich die Ortschaft Barum an. Das Relief des Untersuchungsgebietes ist nur wenig bewegt. Vereinzelt werden die Schläge in Barum durch flache muldenförmige Tiefenlinien unterteilt. Sie weisen im Maximum 8 % Hangneigung auf.

Die Böden im UG Barum sind durch sogenannte Flottsande geprägt. Dieses auch als Sandlöss bezeichnete Lössderivat, gilt als Sediment, das in der Nähe von Auswehungsgebieten der Kaltzeiten vorkommt. Das Sediment wurde mit dem Wind nur über kurze Entfernungen transportiert und hat einen relativ hohen Sandanteil. Es ist häufig ohne Schichtung und carbonatfrei (LESER 2005). Der Flottsand in Barum wurde aus dem Ilmenautal

ausgeblasen und weist Korngrößen zwischen 0,01 und 0,1 mm auf (SANDERS 2000). Dem entsprechend ist die Korngrößenverteilung auf allen Schlägen relativ homogen. Die dominante Bodenart ist Uls mit einer hohen Feinstsandkomponente. Als Bodentypen herrschen hier Parabraunerden und Pseudogley-Parabraunerden vor.

In Barum werden die Schläge zumeist in dreijährigen Fruchtfolgen bewirtschaftet. Wichtige Früchte sind Wintergetreide, Winterraps, Kartoffeln und Zuckerrübe. Zum Teil werden auf den beobachteten Schlägen auch Erdbeeren angebaut. Aufgrund der Böden, der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolgen ist das UG Barum trotz der geringen Hangneigungen als erosionsaktiv anzusehen.

1.4.1.3 Sonstige Gebiete der Dauerbeobachtung in Niedersachsen

Die Erosionsdauerbeobachtung wird in drei weiteren Gebieten seit dem Jahr 2000 durchgeführt. Das Westniedersächsische Gebiet Küingdorf liegt im Ravensberger Hügelland ca. 30 km südöstlich von Osnabrück. Das Untersuchungsgebiet wird von Plaggenböden geprägt, die im ausgehenden 18. Jahrhundert durch die menschliche Nutzung aus den im Naturraum vorherrschenden Sandlössböden hervorgehen (SANDERS 2000). Das Relief ist relativ gleichmäßig. Die Hänge im Gebiet fallen Richtung Osten zum Violenbach ab. Es herrscht eine kleinräumige Bewirtschaftung vor, die Fruchtfolgen sind zum Teil vielfältiger als in den anderen Gebieten. So spielt zum Beispiel auch Mais als Viehfutter in Küingdorf eine Rolle. Wintergetreide, Winterraps und gelegentlich auch Zuckerrübe sind die anderen Anbaufrüchte.

Die Gebiete Klein Ilde und Nette befinden sich im südniedersächsischen Berg- und Hügelland. Das Gebiet Nette liegt rund 14 km südöstlich von Hildesheim und gehört naturräumlich zum Salzdetfurther Bergland, das eine Untereinheit des Hildesheimer Berglandes darstellt. Das Untersuchungsgebiet Klein Ilde liegt rund 16 km südlich von Hildesheim im Randbereich des Ambergaus. Beide Gebiete weisen Lössböden aus Lösslehm über Ceratitenschichten auf. Die Bewirtschaftung ist der im Gebiet Lamspringe ähnlich. Zumeist werden Wintergetreide, Winterraps und Zuckerrüben angebaut. In den letzten Jahren kommt zusätzlich Mais zur Energiegewinnung dazu.

Alle drei Gebiete haben sehr erosionsanfällige Böden. Das Gebiet Küingdorf weist im Vergleich zu den südniedersächsischen Gebieten eher geringe Hangneigungen und eine wenig erosionsanfällige Bewirtschaftung auf allen Schlägen auf.

1.4.2 Untersuchungsgebiete für die Erstellung und Anwendung von MOGWAF

1.4.2.1 Oberes Einzugsgebiet der Lamme

Als Kalibrierungsgebiet für MOGWAF dient das UG „Oberes Einzugsgebiet der Lamme“. Das Gebiet liegt rund 25 km südlich von Hildesheim. Es umfasst die ackerbaulich genutzten Flächen rund um die Ortschaften Wöllersheim, Neuhoof und Lamspringe. Die Größe beträgt etwa 1.260 ha, wovon ca. 1.026 ha ackerbaulich bewirtschaftet werden. Naturräumlich liegt das Gebiet im Innerste Bergland im Rhüdener Becken. Im Nordosten grenzt es an den Höhenzug Harplage und im Südwesten an den Heber (beides Muschelkalkschichtstufen). Das Relief ist bewegt, besonders am Fuße der Erhebungen, also am nördlichen, westlichen und südlichen Rand sind die Hangneigungen dementsprechend hoch. Knapp 90% des Gebietes werden durch Lössböden mit tonigem Schluff als Bodenart geprägt. Im UG werden die Flächen zumeist in einer dreijährigen Fruchtfolge bewirtschaftet. Hauptanbaufrüchte sind Wintergetreide, Zuckerrübe und Winterraps. Der südliche Teil des Untersuchungsgebietes ist das Untersuchungsgebiet Lamspringe, das bereits in Kapitel 1.4.1.1 vorgestellt wurde.

1.4.2.2 Untersuchungsgebiet Gronau – Alfeld – Sibbesse

Das Modell wird in einem Teileinzugsgebiet der Leine, in dem gut 11.300 ha großen UG zwischen den Ortschaften Gronau im Norden, Sibbesse im Osten, Alfeld im Süden und Banteln im Westen eingesetzt. Hier wurde in den Jahren 2005 - 2007 der Gewässeranschlusschlüssel entwickelt. Das UG liegt rund 15 km südwestlich von Hildesheim. Das Gebiet wird eingefasst durch die Sieben Berge im Osten und den Kulf im Westen. Im Gebiet herrschen vornehmlich Löss-, in tieferen Lagen auch Auenböden vor. Die am häufigsten vorkommende Bodenart ist mitteltoniger Schluff (Ut3, 55 % der Fläche) und mitteltoniger Lehm (Lt3, 15 % der Fläche). Das Gebiet wird größtenteils durch Ackerbau (55 % Flächenanteil) genutzt. An den Hängen der Sieben Berge und des Kulf wird Forstwirtschaft betrieben (18 % Flächenanteil), in der Leineaue werden die Böden als Grünland genutzt.

In Schwerpunktgebieten des UG Gronau – Alfeld – Sibbesse fanden Kartierungen des Gewässeranschlusses statt. Das Schwerpunktgebiet Eddinghausen ist abgegrenzt durch das Einzugsgebiet des Eddinghausener Bachs und des Nonnenbachs. Das Schwerpunktgebiet Brüggen liegt im Süden des UG am Abhang der Sieben Berge im immer enger werdenden Leinetal.

1.4.2.3 Untersuchungsgebiet Nordwestschweiz

Das Modellgebiet Nordwestschweiz umfasst den Kanton Basellandschaft mit einer Fläche von gut 518.000 ha, wovon 43 % landwirtschaftlich genutzt werden. Der Kanton liegt im Schnittpunkt des in Talebenen und Hügelländer (Lösshügelland) gegliederten Rheingrabens, des Tafeljura sowie des Faltenjura.

Im Sundgauer Lösshügelland herrschen lehmiger Schluff, toniger Schluff und Schluff als Bodenart vor. Der Skelettgehalt ist fast flächendeckend (95 % der Fläche) kleiner als 5 %.

Die Böden sind daher gut geeignet für den Ackerbau, sie haben eine hohe Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität sowie eine tiefe Gründigkeit (BONO 1985, MOSIMANN 1985). Das Relief ist durch niedrige flache Hügel, Dellen und Muldentäler geprägt und weist daher vorwiegend flache Neigungsverhältnisse auf (MOSIMANN 1985). Das Lösshügelland wird vornehmlich als Ackerland bewirtschaftet (70-80 % der Landwirtschaftsfläche). Wichtige Anbaufrüchte sind Wintergetreide, Körner- und Silomais, Gemüse, Kartoffeln und zum Teil auch Rüben.

Der Tafeljura ist geprägt von dem häufig kleinräumigen Wechsel von Reliefformtypen, wodurch die Hangneigungsverhältnisse sehr variabel sind. Ackerbau wird vor allem auf den Plateaus betreiben. Die tiefer gelegenen Talabhänge sind, abgesehen von den Talböden selbst, zu steil für eine ackerbauliche Nutzung. Auf den Tafeln werden die ackerbaulich genutzten Flächen in 30-50 % der Fälle als Kunstwiese genutzt. Sonstige wichtige Ackerfrüchte sind Wintergetreide und Silomais.

Im südlichen Teil des Kantons geht der Tafeljura im Bereich einer etwa 5 km breiten Schuppenbauzone in den Faltenjura über. Das Relief ist von kurzen länglichen Kuppen und längeren Bergleisten mit dazwischen liegenden Isoklinaltälern geprägt (GUTERSOHN 1969, LABHART 1992). Der Faltenjura wird nur in Ausnahmefällen ackerbaulich genutzt. Grünland- und Forstwirtschaft herrschen vor. Auf den ackerbaulich bewirtschafteten Flächen wird auf mehr als zwei Dritteln der Fläche Kunstwiesenwirtschaft betrieben.

Als Bodenart herrschen im Jura toniger Lehm und lehmiger Ton vor. Die Skelettgehalte der Böden sind wesentlich höher als im Lösshügelland. Nur bei etwa 15 % der Böden ist der Skelettgehalt kleiner als 5 %. Ansonsten erreichen die Skelettgehalte auch Werte von bis zu 40 % auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Die Erosionsgefährdung im Kanton Baselland ist regional variierend. Die Böden des Lösshügellandes und des Jurarandes sind wegen der Lössvorkommen viel stärker erosionsgefährdet als die Böden im Jura. Dem stehen dort aber mehr steile Parzellen und eine viel häufigere Gefährdung durch Fremdwasser und Hangwasseraustritte gegenüber. Mit Ausnahme der deutlich weniger gefährdeten Tafeljurahochflächen besteht deshalb gesamthaft keine wesentlichen Unterschiede in der natürlichen Erosionsdisposition in den beiden Regionen (MOSIMANN 1994). Dagegen ist die Bewirtschaftung im Jura aber wesentlich erosionshemmender als im Lösshügelland. Durch den hohen Anteil von Kunstwiesen in den Fruchtfolgen ist sowohl die Humusversorgung als auch die Bodenbedeckung der Böden höher, was Bodenerosion durch Wasser vorbeugt.

2 Modell zur Prognose von räumlicher Verbreitung und vom Ausmaß der linearen Erosion (LINERO)

2.1 Übersicht zum Vorgehen

Unter linearer Erosion (rill erosion) werden Einzelformen zusammengefasst, die überwiegend in Leitlinien für den Abfluss, wie etwa Hangmulden, Tiefenlinien oder Ackerrandfurchen entstehen. In dieser Arbeit wird unter dem Begriff lineare Erosion auch die flächenhaft-linienhafte Erosion verstanden. Dabei handelt es sich um Rillen und Rinnen, die netzwerkartig oder parallel auftreten. Eine häufige Form dieser Gruppe ist die Fahrspurerosion. (SANDERS & MOSIMANN 2006, SANDERS 2007).

Dieses Kapitel fasst die Erkenntnisse aus der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen zu Entstehung und Ausmaß linearer Erosion zusammen. Auf Basis dieser Auswertungen wird das Modell LINERO entwickelt und im Folgenden vorgestellt. Mit Hilfe von LINERO sollen Flächen prognostiziert werden, auf denen lineare Erosion mit hoher Wahrscheinlichkeit auftritt. Darauf basierend können Karten für die Planung von spezifischen Schutzmaßnahmen wie z.B. der Intervallbegrünung von Fahrgassen (MOSIMANN ET AL. 2007B) generiert werden.

Im ersten Schritt der Erstellung von LINERO erfolgt die Auswertung der Daten der Erosionsdauerbeobachtung, sowohl auf Maßstab der Parzellenebene als auch im größeren Maßstab. Mit Hilfe der regionalisierten linearen Abträge lassen sich Gebiete auf den Schlägen ausweisen auf denen bestimmte lineare Erosionsformen immer wieder auftreten und für Abträge sorgen. Der zweite Schritt beinhaltet die Erstellung von geomorphologische und hydrologische Prädiktoren für diese Bereiche und die Überprüfung von Zusammenhängen zwischen linearer Erosionsaktivität und Prädiktoren. Es folgt daraufhin die Konzeption von mehreren Submodellen, die die unterschiedlichen Formen der linearen Erosion beschreiben. Ein entscheidungsbaumbasiertes Verfahren prognostiziert die Erosionsaktivität in Fahrspuren, im Vorgewende, in Tiefenlinien und durch Zuschusswasser jeweils separat. Die Ergebnisse der Modellierung werden mit Hilfe von weiteren Daten aus der Dauerbeobachtung validiert.

2.2 Stand der Forschung

Entstehung und Formen der linearen Erosion

Bodenerosion durch Wasser untergliedert sich in unterschiedliche Teilprozesse, die im Folgenden erläutert werden. Diesen Teilprozessen lassen sich verschiedene Erosionstypen und auch Auftrittsformen zuordnen.

Der erste Prozessteil ist die Verschlämmung. Durch Luftsprengung, die Dispersion von Bodenpartikeln und den Plansch-Effekt der Regentropfen wird der Boden mehr oder weniger gleichmäßig abgelöst. Die abgelösten Partikel lagern sich auf der Bodenoberfläche ab und verschließen die Poren. Durch diese Verschlämmung wird die Infiltrationskapazität des Bodens herabgesetzt. Wenn die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationskapazität ist, setzt Oberflächenabfluss ein. Der Oberflächenabfluss führt zuerst zu Verspülungen und

später zu einer flächenhaften Abspülung (interrill erosion) von Feinmaterial (TOY ET AL. 2002). Das abgelöste Bodenmaterial wird mit dem oberflächlich abfließenden Wasser mittransportiert. Bei dieser Schichtererosion entstehen flächenhafte Erosionsformen (AUERSWALD 1998). Im Gelände werden solche Formen durch die verschlammte Oberfläche mit Fließspuren angezeigt. Abb. 2 veranschaulicht Flächenspülung anhand von zwei Beispielen. Die Abträge durch flächenhafte Erosion sind im Feld nicht zu bestimmen (DVWK 1996). Sie können mit Hilfe gängiger Schätzmethode wie der ABAG (WISHMEYER & SMITH 1978) berechnet werden.

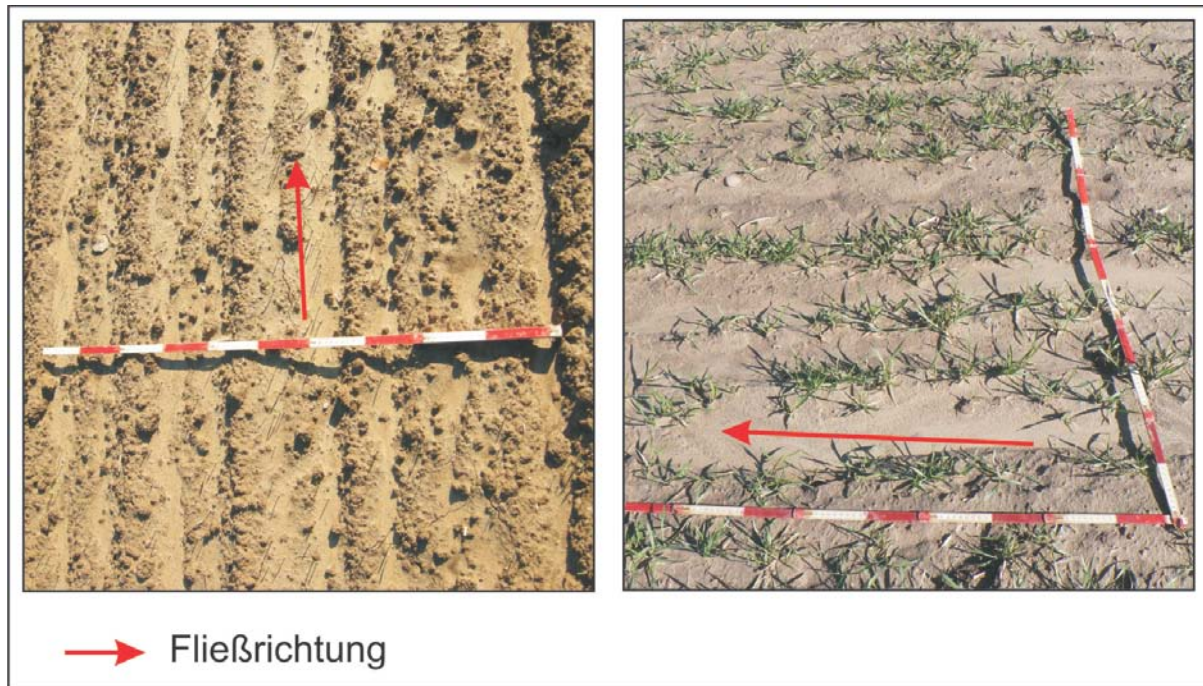


Abb. 2: Verschlämmte Oberflächen mit Fließspuren im UG Nette (links, Oktober 2009) und UG Barum (rechts, März 2008)

Das oberflächlich abfließende Wasser wird ab einer kritischen Entfernung hangabwärts kanalisiert (MOSS ET AL. 1982). Je stärker die Oberfläche geneigt ist und je größer die Fließlänge ist, desto schneller fließt das Wasser und desto größer ist die auf das Bodenpartikel einwirkende Kraft. Wenn das abfließende Wasser eine spezifisch kritische Schergeschwindigkeit überschreitet, setzt Rillenbildung ein (GOEVERS 1985). Abb. 3 zeigt beispielhaft zwei lineare Erosionsformen.

Das oberflächlich abfließende Wasser muss dabei nicht zwangsläufig aus Niederschlag kommen. Gerade durch Schneeschmelze entstehen überwiegend Rillen (AUERSWALD 1998). Das schnelle Abtauen der Schneedecke tritt zu einem Zeitpunkt hoher Bodenwassersättigung auf, wodurch viel Oberflächenwasser bereit steht, das nicht infiltrieren kann (RICHTER 1998B). Gerade in Kombination mit einem gefrorenen Unterboden können durch Schneeschmelzerosion und gleichzeitigen Niederschlägen sehr hohe Abträge verzeichnet werden (ØYGARDEN 2003). Es treten dabei fächerartige bzw. parallele verlaufende Rillen- und Rinnensysteme auf. Abb. 4 zeigt typische Rillensysteme der Schneeschmelzerosion.



Abb. 3: Formen der linearen Erosion, Fahrgassenerosion (UG Lamspringe, März 2007) und Erosion in Tiefenlinien (UG Barum, März 2010)



Abb. 4: Schneeschmelzerosion im UG Barum (März 2009)

Die Formen der linearen Erosion werden nach der DVWK-KARTIERANLEITUNG (1996) abhängig von ihrer Tiefe in Rillen- (2-10 cm), Rinnen- (10-40 cm) und Grabenerosion (>40 cm) unterteilt. In der englischsprachigen Literatur werden tiefe Rinnen und flache Gräben als Ephemeral Gully Erosion bezeichnet. Dies sind Formen, die im Gegensatz zu Gullies, jedes Jahr durch den Landwirt beseitigt werden können (NACHTERGAELE ET AL 1999).

Lineare Erosionsformen entstehen bestimmten Mustern folgend auf der Ackerfläche. Das oberflächlich abfließende Wasser wird zumeist in schon vorher bestehenden Bodenstrukturen kanalisiert. Ein Beispiel dafür ist die Erosion in Saatrillen, wie sie Abb. 5 zeigt. Ein weiteres Beispiel sind Fahrgassen, die zur Pflege der Kulturen angelegt werden. Durch das häufige Befahren wird der Boden unter den Fahrspuren verdichtet. Dadurch sinkt die Infiltrationskapazität (SCHICK 1991). Besonders häufig und verbreitet entstehen Erosionsrillen und -rinnen in Fahrgassen, die in oder schräg zur Fallrichtung des Hanges angelegt sind (FLEIGE ET AL. 1999, SCHAUB 1989). Die Bodenoberfläche der Fahrgassen ist während der gesamten Vegetationsperiode, abgesehen von Mulchresten, unbedeckt. Deshalb fungieren die Fahrspuren häufig als Leitlinien des linearen Abtrags (SANDERS 2007).



Abb. 5: Erosion in Saatrillen im UG Barum (März 2010)

Lineare Erosion auf der Fläche, unabhängig von den Fahrspuren, tritt vor allem durch Abflusskonzentration in Tiefenlinien, durch Wasseraustritte auf dem Schlag, durch Wasserzufluss von außen oder durch Abfließen von Wasser in durch die Bearbeitung geschaffenen Oberflächenstrukturen, wie Saatrillen auf (MOSIMANN ET AL. 2009). Im Gegensatz zur linearen Erosion in Fahrspuren, die wesentlich regelmäßiger und flächenhafter auftritt, konzentriert sich Erosion in Tiefenlinien und Erosion durch Zuschusswasser auf zum Teil kleine Teilbereiche von Schlägen.

Durch die Bündelung von oberflächlichem Wasser aufgrund der Hangkrümmung wird lineare Erosion verursacht, besonders in Tiefenlinien (TAKKE ET AL. 2001). In diesen Bereichen entstehen auch Gräben, die durch die landwirtschaftliche Bearbeitung nur unter großem Aufwand wieder zu beseitigen sind.

Abb. 6 gibt einen Überblick über die Formen, Entstehungsorte und Ursachen der linearen Erosion am Hang. Eine Sonderform der linearen Erosion ist die Erosion durch flächenhaften oder gebündelten Wasserzufluss, das so genannte Zuschusswasser. Das abfließende Wasser sammelt sich nicht auf dem Schlag selbst, sondern kommt aus einem oberhalb gelegenen Einzugsgebiet. Dort muss die Nutzung nicht zwangsläufig Ackerbau sein.

Bei linearer Erosion durch Zuschusswasser ist die Verknüpfung der linearen Erosion mit flächenhaften Erosionsformen keine Voraussetzung. Während ansonsten lineare Formen immer mit Flächenspülungen verbunden sind, können sich durch Wasserzufluss auch Formen ohne Verschlammung auf dem Schlag bilden. Auch Wasseraustritte auf der Fläche, zum Beispiel durch eine defekte Drainage oder durch an der Oberfläche austretenden Interflow, können lineare Erosionsformen ohne Verschlammung und Flächenspülung induzieren (FLEIGE & HORN 2000).

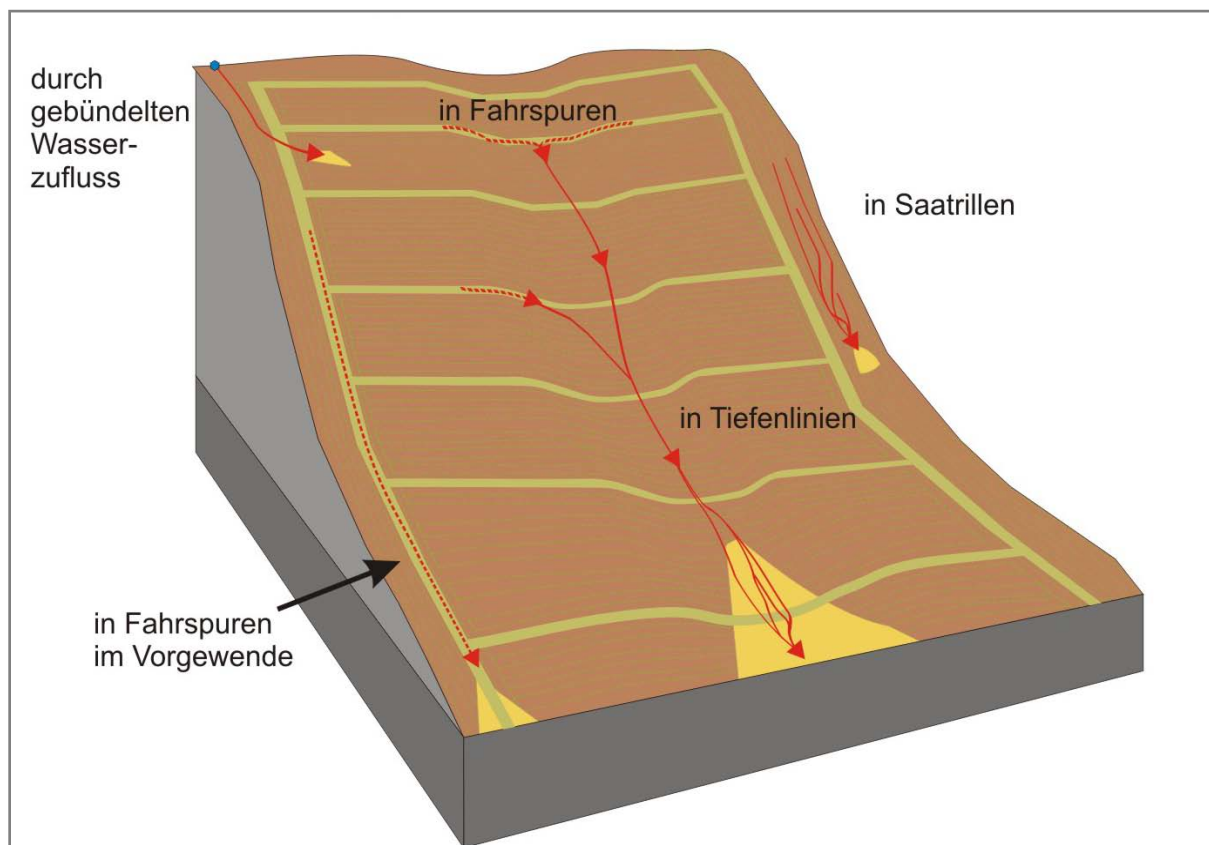


Abb. 6: Formen der linearen Erosion

Ausmaß des Abtrages durch Lineare Erosion

Die Diskussion über den Beitrag der linearen Erosion am Gesamtabtrag wird kontrovers geführt. AUERSWALD (1998) postuliert, dass zwischen den linearen Erosionsformen immer noch die Flächenerosion auftritt und diese vornehmlich zum Gesamtabtrag beiträgt. Nach AUERSWALD (2001) wird das Ausmaß des Abtrages durch flächenhafte Erosion bestimmt. Dagegen bewiesen GOVERS & POESEN (1988) mit einer Literaturzusammenstellung, dass der Anteil des linearen Abtrages am Gesamtabtrag stark variabel, aber keineswegs zu vernachlässigen ist. So variieren die Anteile der linearen Erosion am Gesamtabtrag von 14 -99 %. POESEN ET AL (2003) haben eine ähnliche Literaturaufstellung für den Bodenabtrag in Rinnen und Gräben (ephemeral gully erosion) erstellt. Auch hier reicht die Spannweite des Abtragsanteils durch Rinnen- und Grabenerosion am Gesamtabtrag von 10-94 %. Dabei beziehen sich die hohen Werte (> 65 %) zumeist auf Untersuchungsgebiete in subtropisch-

tropischen Klimazonen. Angaben für Deutschland schwanken zwischen 12-29 % (AUERSWALD 1998) und 0-76 % (FELDWISCH 1995). Aus den Untersuchungen von FELDWISCH (1995) wird deutlich, dass der Anteil der Rillenerosion mit steigendem Gefälle zunimmt. MEYER & HARMON (1985) stellen fest, dass auch mit steigender Hanglänge die Bedeutung der Rillenerosion zunimmt. Vor allem bei extremen Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelzerosion dominiert die Rillenerosion gegenüber der Flächenspülung. Auch die Bodeneigenschaften haben einen Einfluss auf den Anteil der Rillenerosion am Gesamtabtrag. TOY & FOSTER (1998) gehen davon aus, dass auf schluffdominierten Böden bis zu 85 %, auf Sandböden um die 50 % und auf Tonböden weniger als 35 % des Abtrages durch Rillenerosion verursacht wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es keine allgemeingültige Aussage zum Anteil der Rillenerosion gibt, dass aber die Bedeutung für den Abtrag und für den Stofftransport groß ist. Als Einflussfaktoren werden der Boden, die Bearbeitung, die Schlagstruktur und die Relieffaktoren genannt.

Die hohe Variabilität des Beitrages der linearen Erosion am Gesamtabtrag spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen wieder. Da bei der Erosionsschadkartierung, wie sie in Niedersachsen durchgeführt wird, die flächenhafte Erosion nicht quantifiziert werden kann, muss der Anteil der linearen Erosion am Gesamtabtrag durch einen Vergleich mit modellierten flächenhaften Bodenabträgen bestimmt werden. Dazu werden die beobachtete lineare Erosion, also die flächenhaft-lineare und die lineare Erosion mit Werten der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG, WISHMEYER & SMITH 1978, SCHWERTMANN ET AL. 1991), die vor allem die flächenhafte Erosion abschätzt, verglichen. Abb. 7 zeigt, dass auf über 50 % der Schläge die lineare Erosion weniger als 20 % des Gesamtabtrages beisteuert. Auf knapp 15 % der Schläge ist die lineare Erosion größer als die flächenhafte. Im Mittel sind ca. 25 % der Gesamterosion durch die lineare Erosion bedingt. Auf 5 % der Schläge tritt nur lineare Erosion auf. Hier prognostiziert die ABAG aufgrund der sehr geringen Hangneigungen keine flächenhafte Erosion. Auf 7,4 % der Schläge wurde bislang keine Erosion kartiert. In diesen Fällen gibt es nur flächenhaften Abtrag oder nahezu keine Erosion.

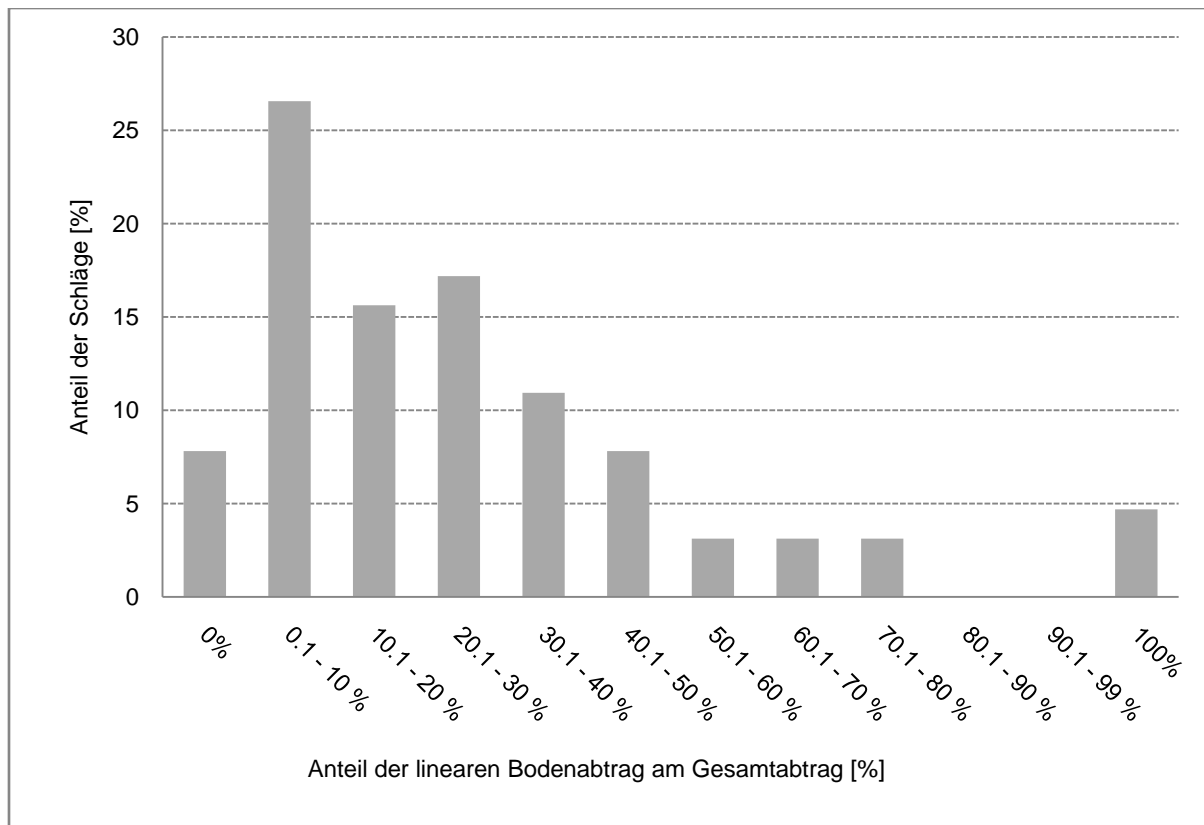


Abb. 7: Anteil der linearen Erosion am Gesamtabtrag bezogen auf ganze Schlagflächen

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die lineare Erosion einen bedeutsamen Teil an der Gesamterosion ausmacht. Im Mittel beläuft sie sich in Niedersachsen auf 25 %. Die Anteile der linearen Erosion unterscheiden sich von Region zu Region erheblich und auf verschiedenen Parzellen sehr stark.

Modelle und GIS-basierte Modelle zur Bestimmung von Bodenabtrag und linearer Erosion

Zur Bestimmung der Höhe des Bodenabtrages von ackerbaulich genutzten Flächen stehen eine Vielzahl von rein empirischen und prozessbasierten Modellen zur Prognose der Höhe und des räumlichen Auftretens von Bodenerosion zur Verfügung. Sie werden anhand ihres Ansatzes im Folgenden vorgestellt und kategorisiert.

Empirische Modelle werden auf Basis statistischer Zusammenhänge durch die Auswertung von Messdaten gewonnen. Das bekannteste und weitverbreitetste empirische Erosionsmodell ist die Universal Soil Loss Equation (USLE). Es prognostiziert die langjährigen mittleren Bodenabträge auf landwirtschaftlichen Flächen. Die Berechnung des Abtrages erfolgt auf der Grundlage von fünf Faktorenwerten, die in Abb. 8 vorgestellt werden (WISHMEYER & SMITH 1978, SCHWERTMANN ET AL. 1991, AUERSWALD & KAINZ 1998, HIRCHE 1990, DIN 19708 2005).

Eine genauere Beschreibung und die Anwendung des Modells werden in Kapitel 3.4.3 vorgestellt. Die ABAG wurde mehrfach mit Hilfe von GIS umgesetzt. Beispiele dafür sind im deutschsprachigen Raum das Modell LUMASS (HERZIG 2005) und PC-ABAG (AUERSWALD 1998).

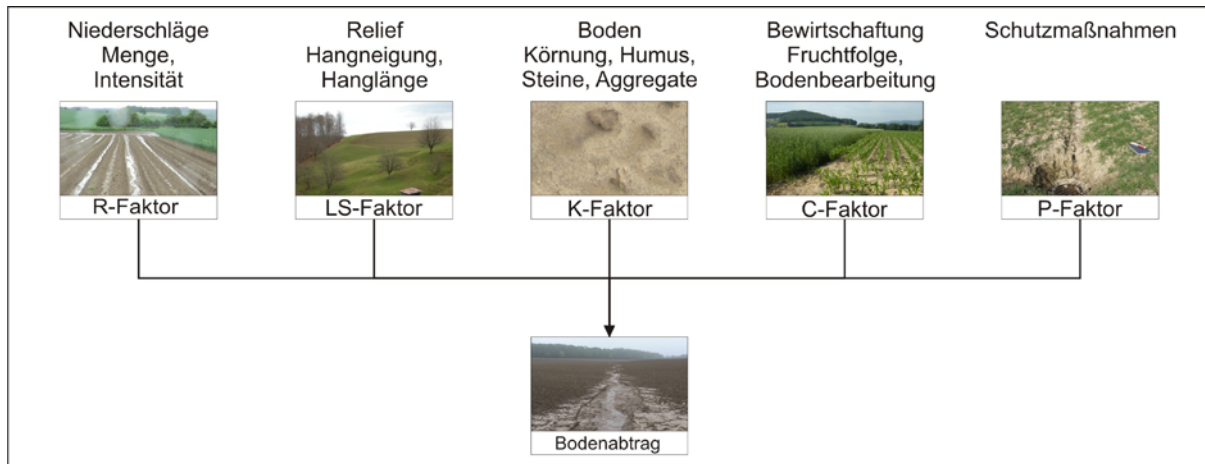


Abb. 8: Faktoren der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung

Die ABAG modelliert den Bodenabtrag durch flächenhafte Erosionsprozesse. Dazu gehören der Splash-Prozess und die flächenhafte Abspülung. Auch ein Teil der linearen Erosion wird durch die ABAG abgebildet, die Erosion in Bearbeitungsrillen. Die unregelmäßig und nicht flächenhaft auftretende lineare Erosion in Tiefenlinien, sowie allgemein die Erosion durch gebündelten Abfluss (Wasseraustritte, Wasserzufluss, quer zu den Bearbeitungsstrukturen fließendes Wasser, Fahrspurerosion) wird dagegen nicht prognostiziert.

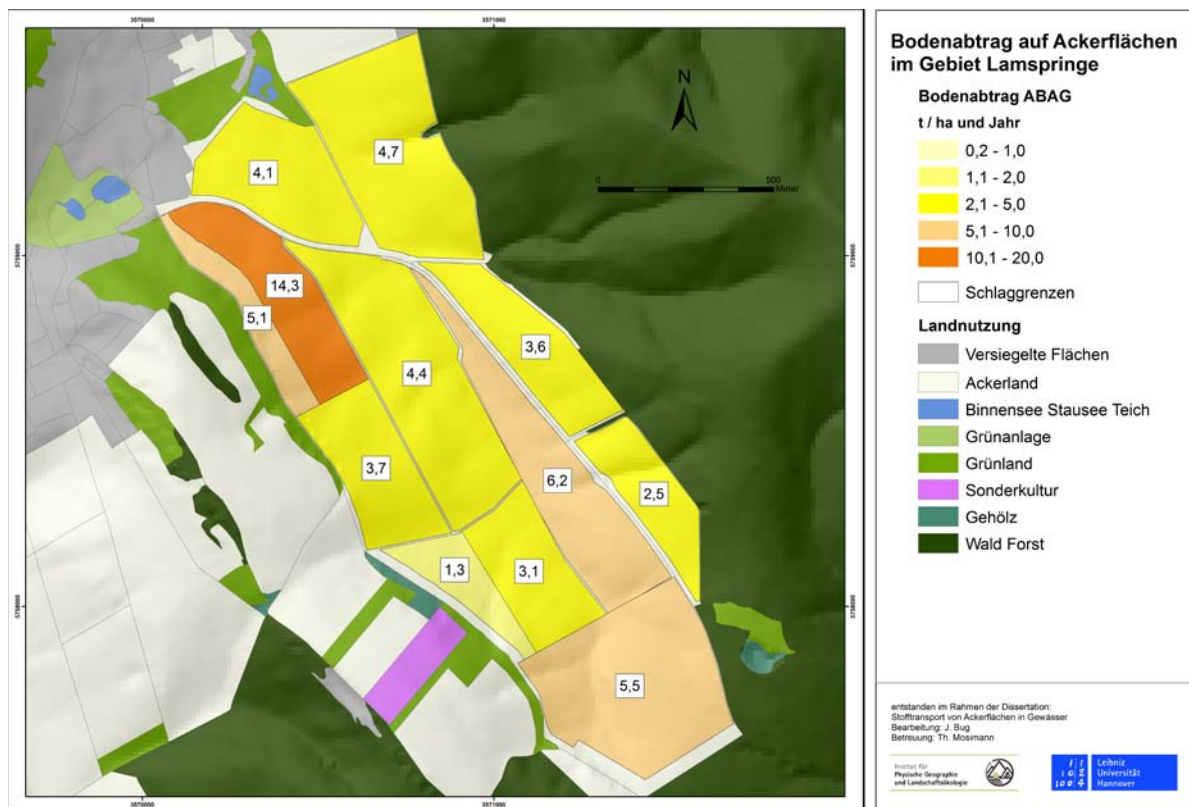


Abb. 9: Modellierter Bodenabtrag (ABAG, Schlagbasis) im Gebiet Lamspringe

Genauere Informationen auf einer höheren Maßstabsebene als dem Schlag sind mit der ABAG nur zu erzielen, wenn der LS-Faktor lokal-differenziert wird. Beispielhaft stellt Abb. 10 eine solche Differenzierung dar. Der LS-Faktor ist hierbei mit dem Algorithmus von KINNELL (2005) modelliert, der eine aktuelle Weiterentwicklung des LS-Faktors darstellt.

Rillenerosion und ihre Verbreitung wird durch die räumlich-differenzierte ABAG nicht oder nur bedingt wiedergegeben. Schlagbereiche mit Tiefenlinien haben meist einen höheren Bodenabtrag als gestreckte Hangteile. Die anderen Faktoren der ABAG sind jedoch dominant, so dass das lineare Erosionsgeschehen nicht besser erfasst wird, als mit der klassischen ABAG. Dies verwundert nicht, denn das Modell prognostiziert mittlere Jahresabträge. Weitere Ansätze zur Regionalisierung des LS-Faktors liefern MOORE ET AL (1991), DESMONT & GOVERS (1996) und BÖHNER & SELIGE (2006).

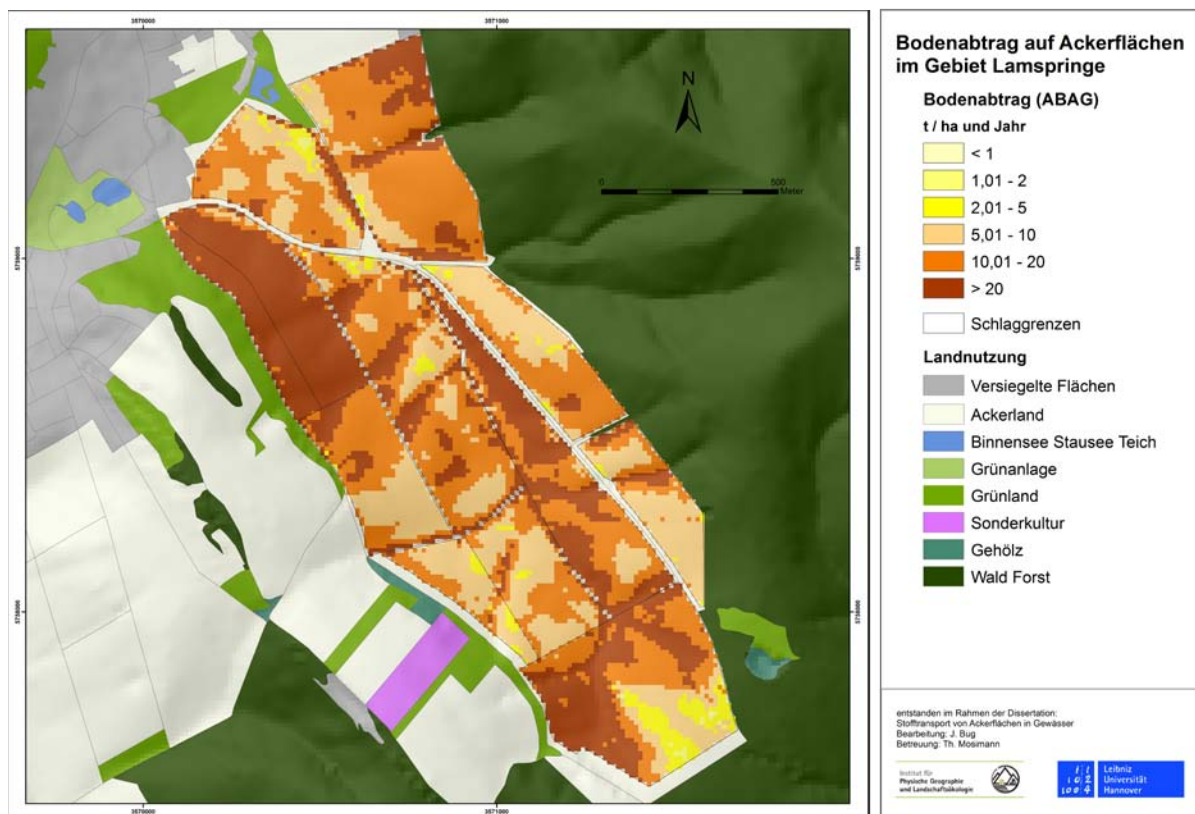


Abb. 10: Modellierter Bodenabtrag (ABAG, Pixelbasis) im Gebiet Lamspringe

Weitere empirische Erosionsmodelle sind SLEMSA (ELLWELL 1978), MMF (MORGAN 2001) und EPIC (WILLIAMS ET AL 1984). Auch diese Modelle schätzen das Risiko durch linearen Abtrag nicht ein. Sie beschränken sich darauf den flächenhaften Abtrag abzuschätzen (FAVIS-MOTLOCK ET AL 2001). Ansätze zu einem empirischen Modell zur Beschreibung der linearen Erosion liefert BIERBAUM (2001). Das Modell versucht auf Basis flächenhaft vorliegender Daten eine Prognose der Lage von linienhaften Erosionsformen auf Parzellen- und Einzugsgebietsebene zu ermitteln. Auf Grundlage von Reliefanalysen werden erosionswirksame Raumstrukturelemente ausgewiesen. Das Modell kann die Lage von linienhaften Erosionsformen vorhersagen, quantitative Aussagen werden aber nicht getroffen. Tabelle 1 (Tab. 1) fasst die wichtigsten empirischen Modelle zur Prognose des Bodenabtrages zusammen.

Akronym	Modell	Autoren	Jahr	Lineare Erosion
USLE	Universal Soil loss Equation	WISHMEYER & SMITH	1978	Nein
SLEMSA	Soil Loss estimation model for South Africa	ELLWELL	1978	Nein
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator	WILLIAMS, JONES & DYKE	1984	Nein
APEX	Agricultural Policy-Environmental eXtender	WILLIAMS, ARNOLD & SRINIVASAN	1996	Nein
MMF	Morgan-Morgan-Finley Model	MORGAN	2001	Nein
	Digitales Raumstrukturmodell zur Prognose von Bereichen mit linearer Erosion	BIERBAUM	2001	Lage

Tab. 1: Empirische Modelle zur Prognose von Bodenabtrag

Im Gegensatz zu den empirisch-statistischen Modellen simulieren physikalische Erosionsmodelle die einzelnen Prozesssteile des Bodenabtrages, also Infiltration, Abfluss, Loslösung, Transport und Deposition. Tab. 2 gibt eine Übersicht über gängige physikalisch basierte Erosionsmodelle. Dabei wird herausgestellt ob sie den Abtrag durch lineare Erosion beschreiben.

Akronym	Modell	Autoren	Jahr	Lineare Erosion
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System	YOUNG	1980	Rillenenstehung
CREAMS	Chemical Runoff and erosion from agriculture management system	KNISEL	1980	Nein
E3D	Erosion 3D	V. WERNER	1995	Eingeschränkt
EGEM	Ephemeral Gully Erosion Model	POESEN	1995	Rinnen und Gräben
EUROSEM	European Soil Erosion Model	MORGAN	1998	Ja
KINEROS	Kinematic runoff and erosion model	WOOLHISER	1990	Nein
LISEM	Limburg Soil Erosion Model	DE ROO	1996	Rinnen und Gräben
OPUS		FERREIRA & SMITH	1992	Nein
RillGrow	Rill initiation and development as a self-organizing system	FAVIS-MORTLOCK	1998	Rillenenstehung
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	ARNOLD	1994	Nein
WATEM	Water and Tillage Erosion model	VAN OOST ET AL.	2000	Nein
WEPP	Water Erosion Prediction Project	LANE & NEARING	1989	Ja

Tab. 2: Physikalische Modelle zur Prognose von Bodenabtrag

Die Zusammenstellung zeigt, dass physikalische Erosionsmodelle, welche die lineare Erosion berücksichtigen, entweder nur große Formen in Lage und Abtrag vorhersagen oder dass die Formen nicht verortet werden.

Ein im deutschsprachigen Raum weit verbreitetes empirisch-physikalisches Modell zur Prognose von Bodenerosion ist Erosion 3D (E 3D, SCHMIDT 1996). Das rasterbasierte Modell

berechnet die raumzeitliche Verteilung der Erosion und Deposition sowie den Sedimentaustrag aus einem Einzugsgebiet. Die Prognose erfordert eine Vielzahl von Eingangsdaten, wie Relief-, Boden-, Landnutzungs- und Niederschlagsdaten. Weitere Inputgrößen können mit Hilfe des PARAMETERKATALOGS SACHSEN (1996) aus den Eingangsdaten generiert werden. Als Ausgabegröße können sowohl der Sedimentumsatz auf der Fläche als auch der Gebietsaustrag (t/ha) aus dem Einzugsgebiet simuliert werden. Erosion 3D modelliert im Gegensatz zur ABAG Einzelereignisse. Ein Beispiel für das Ergebnis von Erosion 3D zeigt Abb. 11.

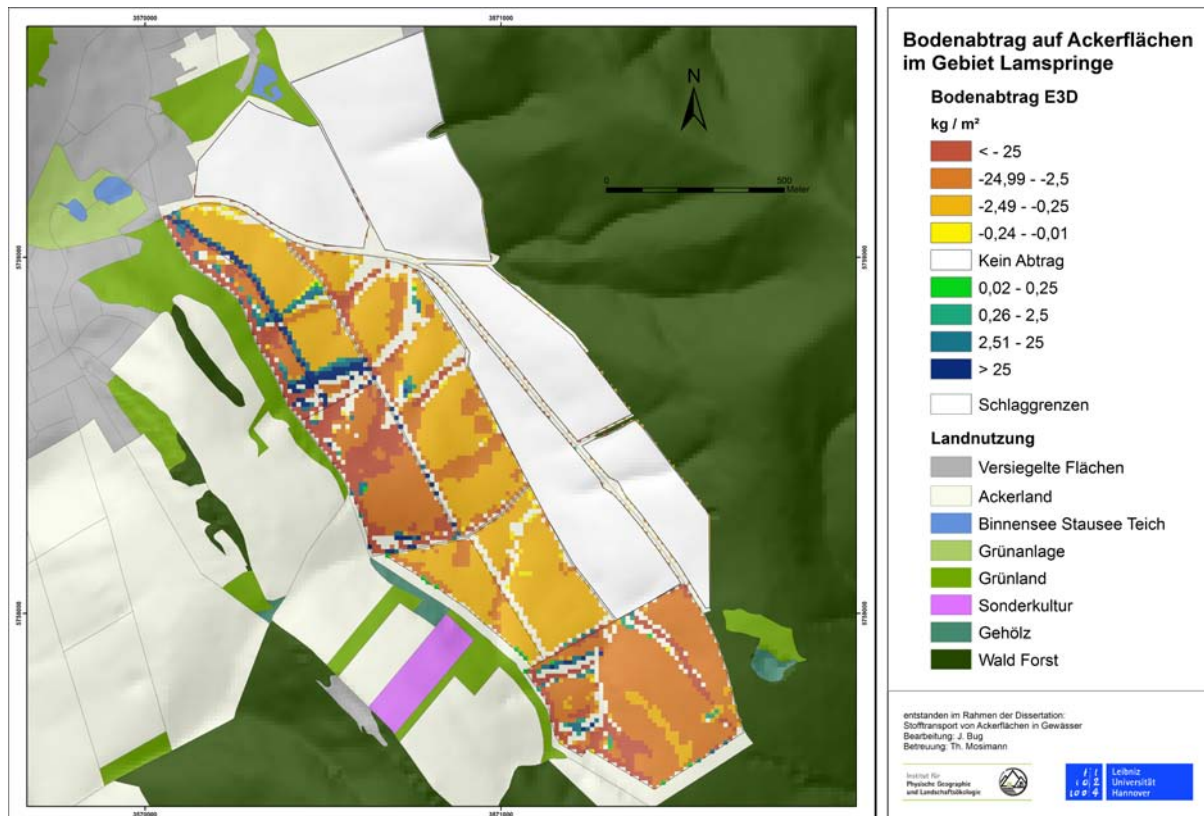


Abb. 11: Mit Erosion 3D modellierter Bodenabtrag (Oktober 2007) im Gebiet Lamspringe

Die Ergebnisse zeigen, dass lineare Erosionsformen durch Erosion 3D nur bedingt erfasst werden. Die linearen Abträge sind im Modellergebnis enthalten (SCHMIDT 1996). Die genaue Lage der Formen kann nur zum Teil wiedergegeben werden. Wie die Validierung durch WEIDANZ (2007) zeigt, ist durch Erosion 3D nur die Abbildung der Erosion in Tiefenlinien möglich. Das Beispiel in Abb. 11 zeigt, dass das Modell in den Bereichen der Tiefenlinien eine Veränderung der Erosionsaktivität vorhersagt. Es wird im Vergleich zum Hang eine Abnahme der Erosion prognostiziert. Bei Kartierungen im Rahmen der Dauerbeobachtung wurde aber das Gegenteil festgestellt. Im Bereich der Tiefenlinien fand ein hoher Abtrag in großen Rillen und Rinnen statt.

Sowohl empirische als auch physikalische Modelle weisen Vor- und Nachteile auf. Diese fasst Tab. 3 zusammen. Der große Vorteil empirischer Modelle liegt in der meist übersichtlichen Anzahl von Eingangsdaten. Kritiker wiederum halten dies für ein großes Problem, da ein so komplexer Prozess wie die Bodenerosion nicht durch einfache meist regressionsstatistische Analysen erklärt werden kann. Die Anwendbarkeit und die Verbreitung gängiger

empirischer Modelle, wie etwa der ABAG, zeigen aber, dass sie akzeptiert werden und hinreichend plausible Ergebnisse liefern. Die häufige Verwendung hat noch einen einfachen Grund: Viele Modellalternativen überzeugen nicht.

	Empirische Modelle	Physikalische Modelle
Eingangsdaten	Meist geringe Anzahl von leicht zugänglichen Daten notwendig	Große Anzahl notwendig
Auflösung	Eingeschränkte zeitliche Auflösung, keine Einzelfallanalyse	Hohe zeitliche und räumliche Auflösung
Handhabbarkeit	Meist einfach	Hohe Komplexität, sehr hoher rechentechnischer Aufwand
Übertragbarkeit	Eingeschränkt	Abhängig von Qualität der Eingangsdaten
Prozessverständnis	Geringer Beitrag	Hoher Beitrag
Anwendergruppe	Forschung, Berater, Landwirt	Forschung

Tab. 3: Vergleich physikalischer und empirischer Modelle (nach HEBEL 2003)

Bei der Validierung physikalischer Modelle zeigt sich, dass die Qualität der Ergebnisse erwartungsgemäß stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängt. Je genauer die Daten sind, desto besser ist das Ergebnis. Häufig benötigen die physikalischen Modelle, wie zum Beispiel Erosion 3D, ein digitales Geländemodell (DGM). Die Auflösung der Ergebnisdaten des Modells hängt dann von der Auflösung des DGMs ab. Effekte wie der Abtrag in Fahrspuren, die sehr kleinräumig auftreten, sind bei den gängigen Auflösungen zwischen 10 m und 20 m nicht reproduzierbar.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sowohl empirische als auch prozessbasierte physikalische Modelle zur Prognose der Erosion in der Forschung verbreitet und in der Praxis angewendet werden. Zum Verständnis des Prozesses in seinen einzelnen Komponenten liefern physikalische Modelle einen sehr wichtigen Beitrag. Gerade Subprozesse wie die Initialisierung von Rillen können hiermit gut beschrieben werden. Für eine flächendeckende Prognose von Gefährdungssituationen bieten sich jedoch empirische Modelle eher an. Die Anzahl der Eingangsdaten ist meist geringer, die Zusammenhänge sind meist gut erklär- und nachvollziehbar. Bei der Erstellung eines neuen Modells muss dementsprechend immer die Zielgruppe über die Art und Komplexität des Modells entscheiden.

2.3 Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen als empirische Grundlage von LINERO

Seit dem Jahr 2000 findet in Niedersachsen die Dauerbeobachtung der Bodenerosion durch Wasser statt (SANDERS 2000, MOSIMANN ET AL. 2009). Es handelt sich um die zeitlich und räumlich umfangreichste Erosionsmessreihe dieser Art in Deutschland (AUERSWALD ET AL. 2009). Die beobachtete Ackerfläche umfasst rund 400 ha, verteilt auf die drei Regionen Leinebergland, Uelzener Sandlössgebiet und Osnabrücker Land.

Die Aufgaben und Ziele der Erosionsdauerbeobachtung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Lieferung empirisch abgesicherter Werte zum Ausmaß der flächenhaft-linearen und linearen Bodenerosion unter verschiedenen Standortbedingungen und Bewirtschaftungsverfahren.
- Ermittlung von bewirtschaftungs- und langfristig auch klimaabhängigen Trends der Bodenerosionsgefährdung in den einzelnen Regionen.
- Analyse der Entwicklung der Bewirtschaftung unter dem Aspekt der Bodenerosionsgefährdung.
- Erfolgskontrolle von Schutzmaßnahmen und der allgemeinen Umsetzung der Bodenschutzvorschriften.
- Überprüfung der Gültigkeit von Modellierungen (zum Beispiel E 3D).

Die Grundlage für die Modellerstellung im Rahmen dieser Arbeit bilden die Erkenntnisse und Ergebnisse der Dauerbeobachtung. Ohne die empirischen Daten zur linearen Erosion und zum Übertritt von Feinerde in Gewässer sind die Entwicklung der Entscheidungsbäume und die Modellierung nicht möglich. Durch die Länge der Messreihe von elf Jahren hebt sich die empirische Basis von anderen, meist wesentlich kürzer angelegten Versuchsreihen ab. Gerade bei der Modellierung des Prozesses der Bodenerosion ist jedoch eine lange Messreihe von hoher Bedeutung, da der Prozess diskontinuierlich abläuft und von vielen im Jahresverlauf variablen Faktoren abhängt.

Bei der Dauerbeobachtung finden die Kartierungen unter normalen Bewirtschaftungsbedingungen statt. Damit ist die Reproduzierbarkeit im Vergleich zu Messreihen, die durch Beregnungsversuche erstellt worden sind, größer. Die natürliche Variabilität der Niederschläge und die verschiedenen Bewirtschaftungsformen werden berücksichtigt.

Die Qualität der erstellten Modelle kann durch Validierungen in anderen Beobachtungsgebieten überprüft werden. Die Übertragung der Modelle und die Anwendung in anderen Regionen ist ein weiteres wichtiges Ziel. Durch die im Jahr 2011 begonnene Erosionsdauerbeobachtung in Baden-Württemberg stehen demnächst weitere Daten zur Validierung und Verbesserung der Modelle zur Verfügung.

2.3.1 Der Bodenabtrag durch lineare Erosion: schlagbezogene Betrachtung

2.3.1.1 Gesamtabträge

Lineare Erosion führt auf den Schlägen der Erosionsdauerbeobachtung im Mittel zu 1,2 t/ha Bodenabtrag pro Jahr. Dabei unterliegen die Bodenabträge einer großen zeitlichen Varianz. Lineare Erosionssysteme treten nur in 41 % der Messjahre auf. Der Bodenabtrag, bezogen auf die Jahre mit linearer Erosion, liegt mit gut 2,9 t/ha*a dementsprechend deutlich höher. Auf Jahre mit sehr hohen, folgen aber häufig Jahre mit sehr geringen Abträgen. Diese Varianz resultiert aus der Verteilung der erosiven Niederschläge und der Fruchtfolge. Nicht jedes Jahr fallen zum Zeitpunkt geringer Bodenbedeckung Starkniederschläge. Ein weiterer Aspekt ist die unterschiedliche Verteilung der Abträge im Jahresverlauf. Etwa 55 % der linearen Bodenabträge treten im Winterhalbjahr (Oktober – März) auf. Zwischen der absoluten Höhe der Abträge und der jahreszeitlichen Verteilung besteht nur ein Zusammenhang: In Jahren mit geringer Erosionsaktivität ist in der Regel der Anteil der Wintererosion hoch. Die Varianzen der jährlichen linearen Bodenabträge beruhen unter anderem auf der Fruchtfolge und der Bodenbearbeitung Tab. 4 stellt die Bodenabträge für verschiedene Hauptkulturen und Bodenbearbeitungssysteme zusammen. Die höchsten mittleren Bodenabträge treten auf Parzellen mit Kartoffeln auf. Kartoffeln werden nur noch im nordniedersächsischen Gebiet Barum angebaut. Die Dammkultur begünstigt die Bildung von linearen Erosionsformen, da die meisten Schläge in Barum in Hangfallrichtung bewirtschaftet werden. Eine konservierende Bewirtschaftung funktioniert im Kartoffelanbau noch nicht richtig. Der Anbau erfolgt größtenteils konventionell. Damit führt der Anbau von Kartoffeln im Norden Niedersachsens zu dreifach höheren Bodenabträgen als der Anbau von Getreide (Mittelwert 1,5 t/ha*a im Gebiet Barum) oder der Zuckerrübe (Mittelwert 1,3 t/ha*a im Gebiet Barum).

Hauptfrucht	Mittlerer Bodenabtrag [t/ha * a]	Parzellenmessjahre [a]	Anteil Pfluglose Bodenbearbeitung [%]	Mittlerer Bodenabtrag Pfluglos [t/ha * a]	Mittlerer Bodenabtrag Pflug [t/ha * a]
Winterweizen	0,9	385	39	0,6	1,2
Zuckerrübe	0,9	127	54	1,1	0,8
Wintergerste	1,0	116	6	0,1	1,1
Winterraps	0,5	73	26	0,3	0,5
<i>Kartoffel</i>	4,2	33	0	<i>k.A.</i>	4,2
<i>Futtermais (Silomais)</i>	0,6	23	43	0,2	1,0
Sonstiges	1,0	44	7	0	0,3

Tab. 4: Mittlerer linearer Bodenabtrag in Abhängigkeit von Anbaukultur und Bodenbearbeitung (in kursiv sind die Hauptfrüchte dargestellt, die nur in einzelnen Gebieten angebaut werden)

Ähnliche mittlere Bodenabträge (0,9 -1 t/ha*a) treten auf Parzellen mit Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste auf. Dieses Ergebnis überrascht hinsichtlich der Zuckerrübe. Sie gilt als besonders erosionsfördernde Anbaufrucht, da sie im beginnenden Zeitraum intensiver Starkregen den Boden wenig schützt. Wie bereits in Abschnitt 3.1 dargestellt blieben diese Niederschläge im Frühjahr und Frühsommer in Niedersachsen jedoch häufig aus. Die Abträge in den Wintermonaten und durch Schneeschmelze treten dadurch in der Datenreihe in den

Vordergrund. Die Parzellen der Dauerbeobachtung mit der Hauptfrucht Zuckerrübe sind im Winter zu 85 % durch eine Zwischenfrucht oder durch Mulch geschützt. Im Winter tritt auf diesen Parzellen nur sehr vereinzelt lineare Erosion auf. 83 % der jedoch auffallend geringen Bodenabträge bei der Zuckerrübe können auf Sommerniederschläge zurückgeführt werden. Im Gegensatz dazu treten auf Parzellen mit Wintergetreide etwa zwei Drittel der Erosionsereignisse in den Wintermonaten auf. Diese führen zu 74 % der Bodenabträge auf Getreideparzellen. Für Nordwestdeutschland gilt also: Wintergetreide ist aufgrund der hohen Abträge in den Wintermonaten wesentlich erosionsfördernder als bislang angenommen.

Bei fast allen Feldfrüchten führt eine konservierende Bodenbearbeitung zu einer Verringerung des Bodenabtrags. Die um 10 -30 % höhere Bodenbedeckung bei konservierender Bodenbearbeitung verringert also die lineare Erosion. Besonders effektiv zeigt sich diese Bearbeitungsvariante beim Anbau von Wintergerste und beim Winterweizen. Die Werte für die Zuckerrübe dürfen dagegen nicht als Effekt des Bodenbearbeitungssystems interpretiert werden. Auf den besonders erosionsgefährdeten Flächen der Dauerbeobachtung wird nämlich die Zuckerrübe nur ohne Pflug angebaut, während auf den wenig gefährdeten Flächen der Pflug häufiger zum Einsatz kommt. Insgesamt ist der Einsatz konservierender Bearbeitungssysteme beim Zuckerrübenanbau weiter verbreitet als bei den anderen Feldfrüchten. Dies ist ein weiterer Grund für die vergleichsweise niedrigen Bodenabträge bei der Zuckerrübe.

Abb. 12 illustriert die Bedeutung der verschiedenen Formtypen anhand ihrer Häufigkeit und ihrem Anteil am Gesamtbodenabtrag durch lineare Erosion

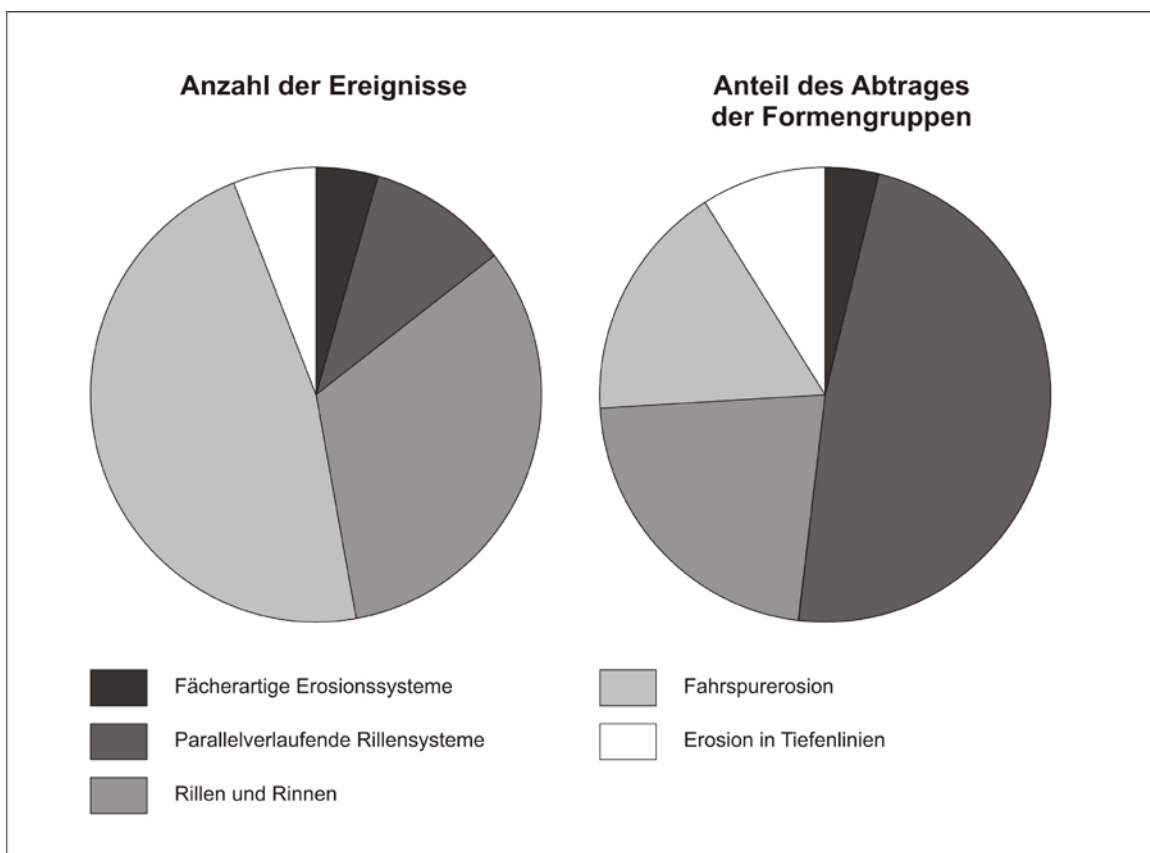


Abb. 12: Anzahl und Abträge durch lineare Erosionssysteme abhängig vom Formtyp

Am häufigsten wurden bei der Dauerbeobachtung bislang Erosionsformen in Fahrspuren aufgenommen. Die höchsten Abträge entstehen durch parallelverlaufende Rillensysteme. Auf Basis dieser Auswertung lassen sich die einzelnen Schläge der Dauerbeobachtung nach dem vorherrschenden Formtyp der linearen Erosion gruppieren (Tab. 5). Ein Schlag wird dabei in eine Klasse eingestuft, wenn über 75 % der gesamten linearen Abträge des Schlages durch den spezifischen Formtyp entstanden sind. Bei einigen Schlägen ist eine Einstufung in Doppelkategorien notwendig, da mehrere Formtypen wichtig sind.

Schläge auf denen folgende(r) Formtyp(en) > 75 % des Gesamtabtrages ausmachen	Anzahl Schläge	Anteil Schläge [%]	Mittlerer Abtrag
	[n]	[%]	[t/ ha *a]
Erosion in Tiefenlinien	3	3,75	1,86
Fahrspurerosion	17	21,25	0,42
Fahrspurerosion und Erosion in Saatrillen	25	31,25	3,34
Erosion im Vorgewende	12	15,00	0,85
Fahrspurerosion und Erosion im Vorgewende	15	18,75	0,18
Indifferent	8	10,00	0,55
Gesamt	80	100,00	1,20

Tab. 5: Kategorisierung der Schläge nach Auftrittstypen der linearen Erosion

Es zeigt sich, dass der gesamte lineare Bodenabtrag fast aller Schläge auf Erosion in Tiefenlinien, Fahrspurerosion, Erosion in Saatrillen und Erosion im Vorgewende zurückzuführen ist. Der lineare Bodenabtrag von 90 % der Schläge der Dauerbeobachtung lässt sich sogar nur durch einen oder zwei Formtypen beschreiben. Bei 10 % der Schläge kann keine eindeutige Kategorisierung durchgeführt werden (indifferent). In dieser Gruppe liefern entweder mehr als zwei Formtypen einen Beitrag oder ein Großteil des Abtrages ist durch Zuschusswasser oder Schneeschmelzerosion (Fächerartige Erosionssysteme) entstanden. Die Schläge in der Kategorie *Indifferent* weisen eine geringe Erosionsaktivität auf.

Insgesamt ist es sinnvoll den linearen Bodenabtrag in die Gruppen Tiefenlinienerosion, Fahrspurerosion, Saatrillenerosion und Erosion im Vorgewende zu unterteilen. Durch diese fünf Formengruppen lassen sich insgesamt 79 % der linearen Abträge in Niedersachsen beschreiben. Die Bedeutung der einzelnen Formtypen ist jedoch sehr unterschiedlich, wie im Folgenden weiter differenziert wird.

2.3.1.2 Abträge in den einzelnen Formtypen der linearen Erosion

Bodenabtrag in Tiefenlinien

Auf Ackerflächen kommt es in Tiefenlinien oft zum Zusammenfluss von Oberflächenwasser. In den elf Jahren der Erosionsdauerbeobachtung wurden 166 Rillen und Rinnen in Tiefenlinien kartiert. Durch diese wurden im Durchschnitt rund 5,4 t Feinerde von den Schlägen abgetragen. Das sind 3,2 t mehr als der durchschnittliche Abtrag aller 1279 bisher erfassten linearen Erosionsformen. Das heißt, dass der Abtrag durch Formen in Tiefenlinien mehr als

doppelt so groß ist, als der Abtrag aller Formen. Der maximale Abtrag durch eine einzelne Form betrug 84,1 t. Von den zehn Formen mit den höchsten Abträgen, die bei der Dauerbeobachtung aufgenommen wurden, traten sechs in Tiefenlinien auf, obwohl lediglich knapp 13 % als Formen in Tiefenlinien charakterisiert wurden. Formen in Tiefenlinien führen zu sehr hohen Abträgen und spielen auch für den Übertritt von Boden in die Gewässer eine wichtige Rolle.

Auf insgesamt 16 der 85 Schläge der Dauerbeobachtung tritt Erosion in Tiefenlinien auf. In Lamspringe sind zwei Drittel und in Barum ein Drittel der Schläge betroffen. Die anderen Gebiete weisen bislang keinen Bodenabtrag in Tiefenlinien auf. Die Ausnahme stellt ein Schlag in Küingdorf dar. Der Anteil der Tiefenlinienerosion am gesamten linearen Bodenabtrag variiert bei den 16 betroffenen Schlägen. Auf drei Schlägen trägt die Tiefenlinienerosion mehr als 75 % des Gesamtabtrages bei, auf den anderen Schlägen ist der Beitrag geringer. Zusammenfassend lässt sich feststellen: der Bodenabtrag in Tiefenlinien ist auf wenigen zumeist großen Schlägen bedeutend, da er hohe Abträge verursacht.

Fahrspurerosion

Aufgrund der nicht vorhandenen Bodenbedeckung durch Anbaufrüchte sind Fahrspuren häufig von Bodenabtrag betroffen. Auf etwa 85 % der Schläge konnten bislang Erosionsformen in Fahrspuren nachgewiesen werden. Damit ist diese Form flächendeckend verbreitet. Der maximale Bodenabtrag durch Fahrspurerosion trat im Gebiet Klein Ilde im Jahr 2008 mit 12,7 t/ha auf. Im Mittel führte diese Erosionsform aber nur zu 0,3 t/ha Bodenabtrag pro Ereignis. Es zeigt sich also, dass Erosion in Fahrspuren häufig auftritt, zumeist aber zu eher geringen Abträgen führt. Die Bedeutung der Fahrspurerosion für den gesamten linearen Bodenabtrag ist auf über 20 % der Schläge sehr hoch. Mehr als 75 % des gemessenen linearen Bodenabtrages sind auf diesen Schlägen auf Fahrspurerosion zurückzuführen.

Bodenabtrag in Saatrillen

Die Erhebungen der Dauerbeobachtung zeigen, dass auf mehr als 25 % der Schläge der Abtrag in Saatrillen (Dammkulturen inklusive) mehr als 50 % des gesamten linearen Bodenabtrages ausmacht. Diese Form tritt typischerweise dann auf, wenn der Schlag in Hangfallrichtung bewirtschaftet wird. Prozessual kann eine Verwandtschaft zu der Fahrspurerosion festgestellt werden. Auch hier spielt die Bearbeitungsrichtung eine wichtige Rolle.

Der größte Abtrag in einem solchen System wurde in Barum gemessen. In insgesamt 225 Rillen konnte ein Abtrag von 350 t festgestellt werden. Das entspricht einem Bodenabtrag von knapp 50 t/ha durch ein Ereignis.

Bodenabtrag im Vorgewende

Als Vorgewende wird im Ackerbau der randliche Bereich eines Schlages bezeichnet, auf dem bei der Bearbeitung gewendet wird. Durch das wiederholte Wenden mit zum Teil schweren Maschinen entsteht im Vorgewende im Laufe der Zeit eine Bodenschadverdichtung. Einhergehend mit der Verdichtung sinkt die Infiltrationskapazität des Bodens in diesem Bereich des

Schläges. In der Folge tritt hier verstärkt Erosion auf, besonders bei Bearbeitungsrichtung des Vorgewendes in Hangfallrichtung.

Die Erhebungen in Niedersachsen bestätigen dies. Die Vorgewende nehmen zwar nur etwa 13 % der Gesamtfläche ein, doch rund 28 % aller kartierten Ereignisse dort satt. Das heißt, dass im Vorgewende proportional mehr Erosion auftritt, als auf der Hauptfläche. Ein Grund für die hohe Erosionsaktivität ist die Bearbeitungsrichtung. Etwa 60 % der Vorgewende der Dauerbeobachtung werden in Hangfalllinie bearbeitet.

Ein typisches Beispiel für das Auftreten von Bodenerosion im Vorgewende zeigt Abb. 13. Beim Ereignis am 12.05.2004 entstand als Folge von 15 mm Niederschlag in 60 Minuten im Gebiet auf sechs Schlägen Bodenabtrag. Lediglich auf einem Schlag war die Hauptfläche durch Bodenerosion betroffen, allerdings nur durch eine flächenhafte Abspülung. Lineare und flächenhaft-lineare Erosion trat nur in den Vorgewenden auf. Dabei waren diese nicht ausschließlich an Fahrspuren gebunden, sondern entstanden auch in Bearbeitungsspuren, wie Saatrillen.

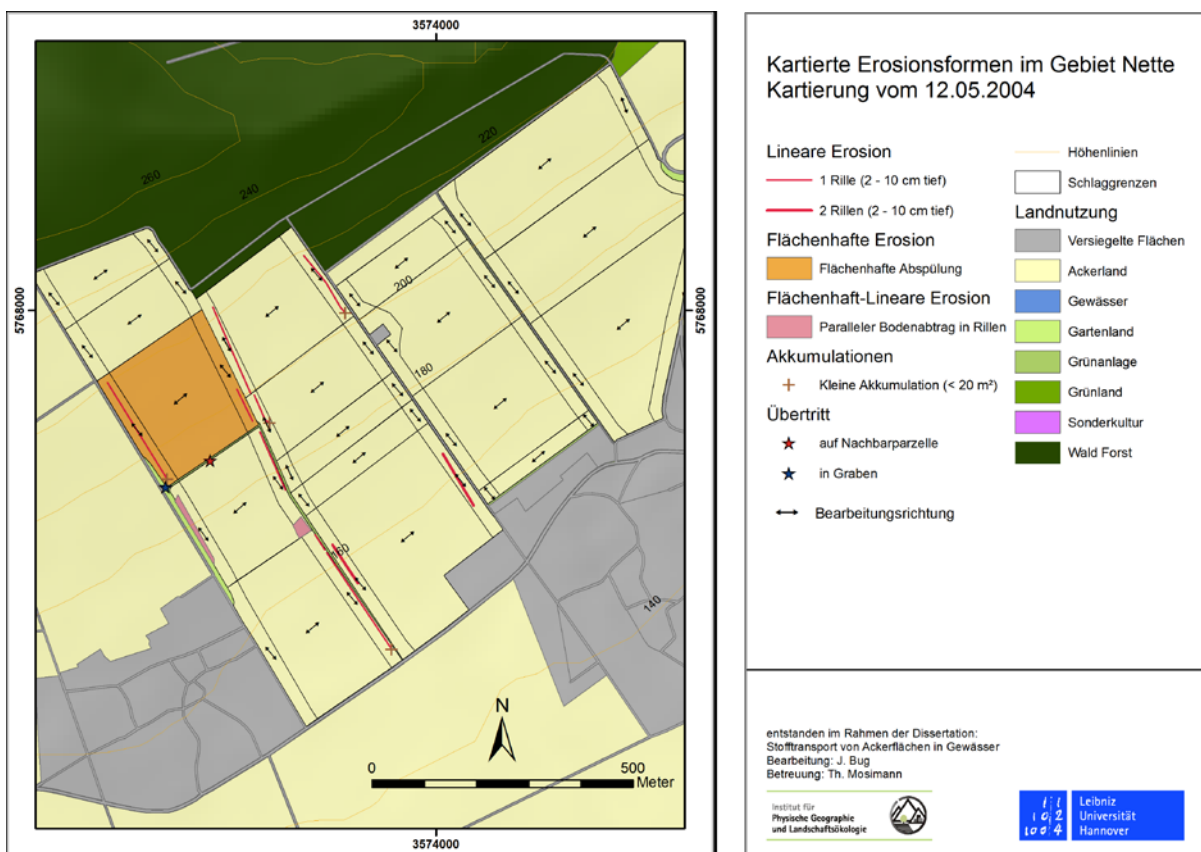


Abb. 13: Karte der Erosions- und Akkumulationsformen im Gebiet Nette für ein Regenereignis im Mai 2004

Der Abtrag im Vorgewende ist für einen Teil der Schläge der Erosionsdauerbeobachtung von hoher Bedeutung. Wie das Beispiel Nette zeigt, entstehen Erosionsformen im Vorgewende dort, wo die Bearbeitungsrichtung der Hauptfläche quer zur Fallrichtung des Hanges ist.

Lineare Erosion durch Zuschusswasser

Das Zuschusswasser ist ein wichtiger Faktor, der den Auftritt und die Höhe von Bodenabträgen steuert. Oberflächlich abfließendes Wasser sammelt sich dabei oberhalb eines Schlages und tritt entweder flächenhaft oder gebündelt über. Das Einzugsgebiet oberhalb des Schlages muss nicht zwangsläufig landwirtschaftlich genutzt sein. Auch auf versiegelten Flächen wie Straßen oder Siedlungen kann sich bei einer nicht funktionierenden Kanalisation und starkem Regen Wasser sammeln und übertreten. Die meisten Modelle zur Prognose von Bodenabtrag haben große Probleme mit der Quantifizierung dieses Effektes.

Die Bedeutung des Zuschusswassers für die einzelnen Schläge der Dauerbeobachtung ist sehr unterschiedlich. Auf 40 % der Schläge war Zuschusswasser ein mehr oder minder wichtiger Faktor für den Prozess der Bodenerosion. Auf knapp 15 % der Schläge entstand mehr als 40 % des gesamten Abtrages durch Zuschusswasser. Auf zwei Schlägen, die laut den Ergebnissen der ABAG als wenig bzw. nicht erosionsgefährdet eingestuft wurden, fand bislang nur Abtrag durch Zuschusswasser statt.

Der maximale Abtrag durch Zuschusswasser wurde auf einem Schlag in Barum beobachtet. Durch das Ereignis wurden 7,9 t/ha abgetragen. Auch in Lamspringe entstand auf einem Schlag durch ein solch initiiertes System ein Bodenabtrag von 5,3 t/ha.

Über die gesamte Messreihe haben die Zuschusswassersysteme für einige Schläge einen großen Einfluss. Auf einem Schlag in Barum verursachen diese im jährlichen Mittel einen Abtrag von 3,0 t/ha, auf einem Schlag in Lamspringe 0,8 t/ha*a. Auch in den anderen Gebieten der Dauerbeobachtung gibt es Schläge mit hohen jährlichen Abträgen durch Zuschusswasser (Küingdorf 1,8 t/ha*a, Klein Ilde 1,2 t/ha*a). Das heißt, dass Zuschusswasser regelmäßig auftritt und einen großen Einfluss auf den Bodenabtrag hat. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Betrachtung der linearen Erosion über die Schlaggrenzen hinaus in die Einzugsgebiete geschehen muss.

2.3.2 Bodenabtrag durch lineare Erosion: Kleinräumig-differenzierte Analyse

Neben den schlagbezogenen Daten zu linearen Abträgen liefert die Erosionsdauerbeobachtung wichtige Informationen zur genauen Lage von Erosionsschäden auf den einzelnen Ackerparzellen. Durch eine lokale, GIS-basierte Auswertung der linearen Erosion lassen sich wichtige Aufschlüsse zur Entstehung dieser Formen gewinnen.

Diese Auswertungen bilden die Basis der Modellentwicklung von LINERO. Zuerst erfolgt die Analyse der Lage der einzelnen Formen auf den Schlag. Daraufhin wird die Form mit dem spezifischen Bodenabtrag verknüpft. Eine nach dem Formtyp differenzierte Analyse des linearen Bodenabtrages bildet die empirische Grundlage für die Erstellung der verschiedenen Entscheidungsbäume zur Prognose der linearen Erosionsaktivität.

Nur durch die kleinräumig-differenzierte Analyse lassen sich Prädiktoren zur Prognose der linearen Erosionsaktivität ermitteln. Durch die nach Formtyp differenziert ausgewiesenen Bodenabträge ist eine Gewichtung der Prädiktoren in den verschiedenen Entscheidungsbäumen möglich. Damit ist die räumlich-differenzierte Analyse der linearen Bodenabträge der zentrale Schritt bei der Vorbereitung der Prognose der linearen Bodenabträge.

2.3.2.1 Methodik der kleinräumig-differenzierten Analyse der linearen Erosion

Zur räumlichen Auswertung des Erosionsgeschehens wird im Rahmen dieser Arbeit die für die Erosionsdauerbeobachtung angelegte Datenbank NERODAT von einer Sachdatenbank in eine Sach- und Geodatenbank umgewandelt. Diese Umwandlung ist notwendig, um die Abträge im Rahmen der Messungengenauigkeit der Methode lagetreu auf den Schlägen zu verorten. Anhand dieser Auswertungen lassen sich nun Lageparameter bestimmen, die den linearen Bodenabtrag steuern. Es können damit Zusammenhänge zwischen dem Auftreten einzelner Erosionsformen und Schlag- sowie Reliefparametern untersucht werden. Die kleinräumig-differenzierte Analyse untersucht ebenfalls das Auftreten von flächenhaften Erosionsformen für spätere Forschungsvorhaben. Die Ergebnisse dieses Teils der Analyse gehen nicht in die Modellerstellung dieser Arbeit ein.

Zur lagetreuen Auswertung innerhalb der Schlagflächen werden mit Hilfe von ArcGIS Modelle erstellt, die:

- die elfjährige Messreihe lagetreu zusammenfassen,
- den Abtrag zusammenfassend berechnen,
- die Messungengenauigkeiten und die flächenhafte Verteilung der Bodenabträge durch die Bearbeitung des Landwirtes berücksichtigen,
- den Abtrag einzelner Formengruppen gesondert ausweisen und
- die Häufigkeit des Auftrittes aller Erosionsformen bestimmen.

Ziel der Auswertung ist die Erstellung von Schadenskarten, die die Abträge durch lineare Bodenerosion zeigen. Mit Hilfe dieser Karten lassen sich Zonen mit hoher Erosionsaktivität ausmachen. Die Struktur dieser Modelle ist in Abb. 14 dargestellt. Als Eingangsdaten stehen die zusammengefassten Kartierdatensätze der Dauerbeobachtung bereit. Die Formen liegen

unterteilt in lineare, flächenhaft-lineare und flächenhafte Formen vor. Die Auswertung der Formen unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Formentyp.



Abb. 14: Schema der GIS-gestützten kleinräumlich differenzierten Auswertung der Bodenerosion

Bei linearen Formen besteht das Problem des Flächenbezuges. Die Formen liegen als Linien-Vektordatei vor. Bislang wurde der Bodenabtrag von linearen Formen immer auf Gesamtschlagbasis ausgewertet. Für eine differenzierte Analyse des Prozesses ist eine

genauere Basis notwendig. Lineare Formen haben im Durchschnitt eine Breite von ca. 16 cm und sind dementsprechend nicht flächenhaft in einer Karte im Maßstab 1 : 5.000 darstellbar. Der Bodenabtrag, der durch lineare Erosion entsteht, bleibt jedoch nicht auf die 16 cm Breite beschränkt. Durch die jährliche Bodenbearbeitung, sei es mit oder ohne Pflug, werden die Erosionsformen „aufgefüllt“. Ansonsten würden sich die Spuren immer weiter vertiefen und über die Jahre die Bearbeitung stark einschränken. Bei Aussagen auf Parzellenbasis wird der Feinerdeverlust auf den Gesamtfläche bezogen. Diese bilanzierende Annahme entspricht nicht der Realität. Vielmehr kommt das Material zur Auffüllung der Formen zumeist aus der unmittelbaren Umgebung der Form. Lineare Erosionsformen führen also zu einer Verringerung der Mächtigkeit des Bodens in der unmittelbaren Umgebung der Form. Auf dieser Tatsache basiert die hier vorliegende Auswertung: Es wird angenommen, dass der Bodenverlust sich durch die Bodenbearbeitung auf die umliegenden 16 m der Form gleichmäßig verteilt. Größere Rillen- und Rinnensysteme werden nach der Ernte durch den Einsatz des Grubbers (seltener durch den Pflug) beseitigt. Die Bezugsbreite von 16 m entspricht etwa 3 Bearbeitungsbreiten der in den Dauerbeobachtungsgebieten gängigen Grubber. Bei der Bearbeitung überlappen sich die Grubberspuren, so dass der Bodenverlust nicht nur dort auftritt wo die Form ist, sondern auch in den beiden benachbarten Spuren. Die Bezugsfläche von 16 m ist damit im Durchschnitt 100-mal breiter als die tatsächlich betroffene Fläche. Die 16 m Breite der Bezugsfläche entspricht zudem der Messungengenauigkeit der für den Großteil der Kartierungen genutzten GPS-Geräte.

Für die gepufferten Erosionsformen wird das abgetragene Bodenvolumen anhand der im Feld erhobenen Parameter Tiefe, Breite, Querschnitt und Länge der Form berechnet. Die Ermittlung der abgetragenen Masse findet durch Multiplikation des Austragsvolumens mit der Dichte des Bodens statt. Die mittlere Dichte des Oberbodens auf Ackerflächen beträgt 1,45 t/m³ (MICHAEL 2000). Folgende Gleichung fasst die Berechnung zusammen:

$$A = \frac{\varnothing T * \varnothing B * L * \rho}{F}$$

A	Bodenabtrag (t/ha)
∅T	Durchschnittliche Tiefe der Erosionsform (m)
∅B	Durchschnittliche Breite der Erosionsform (m)
L	Länge der Erosionsform (m)
ρ	Dichte des Bodens (t/m ³)
F	Betroffene Fläche (ha)

Ein Problem der Auswertung ist, dass für jede einzelne Form nur die mittlere Tiefe und Breite bekannt sind. Dabei verändert sich das Ausräumvolumen jeder Form in Abhängigkeit von der Neigung, der Einzugsgebietsgröße und auch von bewirtschaftungsbedingten Faktoren wie der Bearbeitungsrichtung, der Überrollhäufigkeit und der Schlaggröße. Es lassen sich zwei Typen von linearen Erosionsformen unterscheiden:

- Der erste Typ hat am Oberhang ein geringes Ausräumvolumen, das sich mit steigender Fließlänge vergrößert. Am Hangfuß läuft die Form aus, das Volumen nimmt wieder ab und Akkumulation setzt ein.
- Der zweite Typ hat einen zunehmenden Fließquerschnitt mit steigender Fließlänge. Der Querschnitt wird am Ende des Systems nicht wieder kleiner, sondern bleibt gleich groß oder wird noch größer. Das liegt daran, dass die Erosionssysteme laut Kartiermethodik am Schlagende enden, die Formen sich aber dann entweder als neues System im nächsten Schlag fortsetzen oder Eintrag in ein benachbartes Ökosystem stattfindet.

Für die Auswertung in dieser Arbeit werden die mittleren Tiefen, Breiten bzw. Querschnittsflächen, herangezogen. Eine genaue Verortung der Ausräumvolumina, ist mit den elf Jahre alten Daten nicht möglich, da diese Daten nicht lagegetreu verzeichnet sind. Dies bedeutet:

- Die Erosion am Oberhang wird in den meisten Fällen überschätzt, da hier die Volumina kleiner sind als die mittleren Ausräumvolumina.
- Am Mittelhang wird die Erosion eher unterschätzt.
- Am Hangfuß ist sowohl eine Unter- als auch Überschätzung möglich, abhängig von der Hangstruktur und dem Verlauf des Erosionssystems.

Bewirtschaftungsbedingte Faktoren wie Saatrillen, Fahrspuren und ähnliches können dazu führen, dass sich die Formen anders als die zwei beschriebenen Typen verhalten. Formen können spontan in einer Fahrspur enden. Deswegen ist eine Anpassung der Ausräumvolumina mit Hilfe von GIS-gestützten Reliefparametern nicht sinnvoll, da im Zweifelsfall nicht klar ist, wie die einzelnen Formen anzupassen sind.

Daraus folgt, dass die Daten, auf denen die Auswertungen für das Modell LINERO basieren, mit Unsicherheiten belegt sind, die in Abschnitt 2.6.4 diskutiert werden. Trotzdem lassen sich durch die Länge der Messreihe von elf Jahren deutliche Unterschiede in Auftrittshäufigkeit und Intensität ausmachen, die den Effekt durch die Mittelwerte des Ausräumvolumens kompensieren.

In einem weiteren Schritt erfolgt die Zusammenfassung der Einzelereignisse. Durch die Verschneidung der betroffenen Bereiche miteinander können die Abträge für diese Zonen aufsummiert und ihre Anzahl dokumentiert werden. Die Ergebnisse für die Einzelformen werden wiederum zum Gesamtabtrag zusammengefasst. Abb. 14 zeigt schematisch das Vorgehen der Auswertungssystematik.

Für die Erstellung der Teilmodule von LINERO müssen zudem die Bodenabträge für die Einzelformengruppen Fahrspurerosion, Erosion im Vorgewende, Erosion in den Tiefenlinien und Erosion durch Zuschusswasser differenziert ausgewertet werden. Die GIS-Modelle berechnen nicht nur die Gesamterosion, sondern auch den Abtrag im Vorgewende, durch Zuschusswasser, in Fahrspuren und in Tiefenlinien.

2.3.2.2 Ergebnisse im UG Lamspringe

Abb. 15 hält das Ergebnis der räumlichen Analyse für das Untersuchungsgebiet Lamspringe kartographisch fest. Die Ergebnisse zeigen, dass in Lamspringe Bereiche mit linearer Erosion klar von denen ohne lineare Erosion zu differenzieren sind:

- 78 % der Fläche des UG sind bislang nicht von linearem Bodenabtrag betroffen.
- Auf 12 % der Fläche war die Erosionsaktivität mit unter 50 t/ha gering.
- 10 % der Flächen waren mit über 50 t/ha in elf Jahren ($> 4,5 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$) stark von Erosion betroffen.

Der sehr geringe Anteil der betroffenen Fläche ist auch damit zu begründen, dass fünf Schläge erst seit dem Jahr 2008 Teil der Dauerbeobachtungsfläche sind. Die Analysen für diese Schläge im Nordosten des Gebietes basieren deshalb auf nur drei Messjahren.

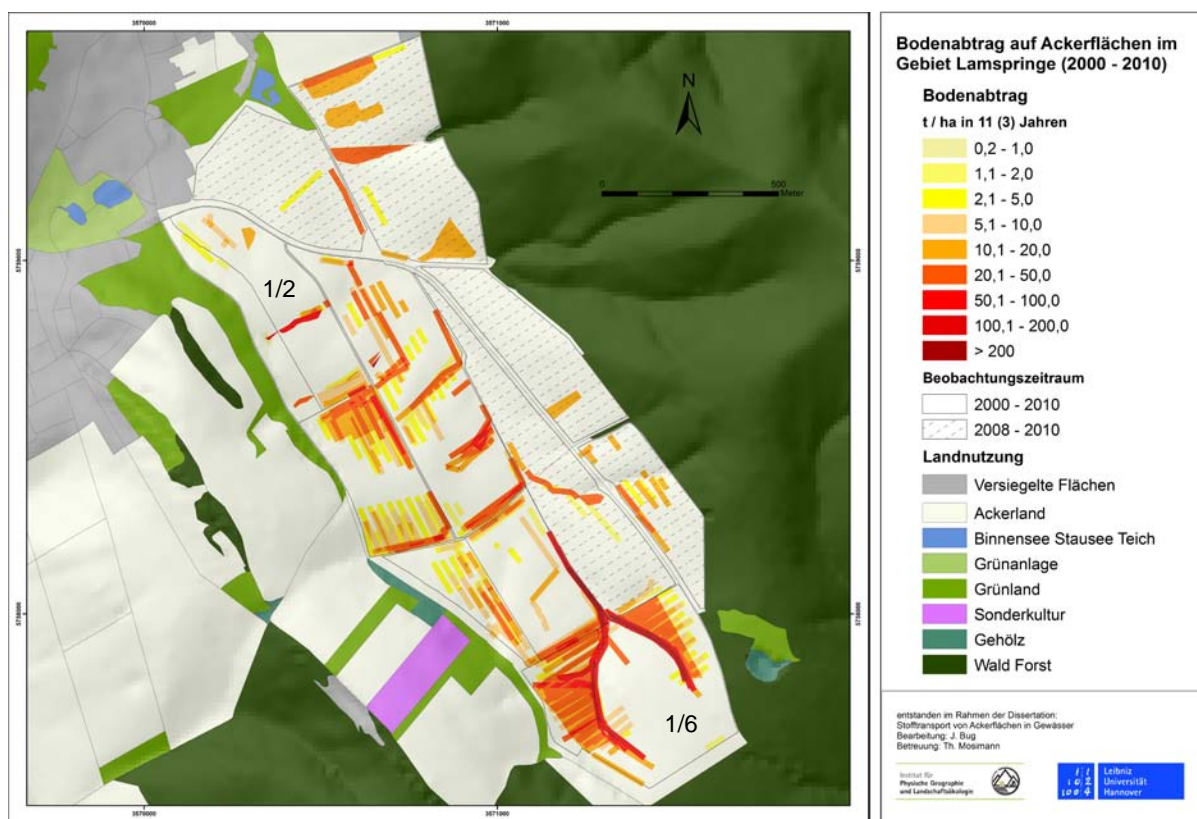


Abb. 15: Kartierter Bodenabtrag im Untersuchungsgebiet Lamspringe

Deutlich zu erkennen ist, dass einige Schläge aufgrund ihrer Struktur und Bearbeitung wesentlich häufiger und flächendeckender von linearer Erosion betroffen sind als andere. Beispielhaft zeigt dies der Vergleich zwischen den Schlägen 1/2 im Norden und 1/6 im Süden des Gebietes. Auf dem nördlichen Schlag trat bislang lineare Erosion vor allem im südlichen Vorgewende und in einer Tiefenlinie im Zentrum der Parzelle auf. Da das Hauptfeld parallel zu den Höhenlinien bewirtschaftet wird, entstehen in den Fahrspuren nur in Ausnahmefällen Erosionsspuren. So ist der Schlag insgesamt nur gering von linearem Bodenabtrag betroffen.

Abb. 16 zeigt, dass über 80 % der Schlagfläche nicht von Bodenerosion betroffen sind. In einem kleinen Bereich wurden aber auch hier hohe Bodenabträge von bis zu 125 t/ha in elf Jahren gemessen.

Im Süden des UG Lamspringe befindet sich ein besonders stark von linearem Bodenabtrag betroffener Schlag (1/6). Auf 57,5 % der Fläche trat lineare Erosion auf. Bislang ohne lineare Erosion blieben ein Rücken im Zentrum der Parzelle sowie flache Bereiche im äußersten Süden. Ansonsten tritt auf dem Schlag häufig und flächendeckend lineare Erosion auf. Durch die komplexe Reliefstruktur des Schlages mit Kuppen und Tiefenlinien werden einige Bereiche direkt in Hangfalllinie bewirtschaftet. Dort treten regelmäßig Abträge in Fahrspuren und Saatrillen auf. Zusätzlich wird der Schlag von zwei Tiefenlinien durchzogen, in denen sich regelmäßig Erosionsformen bilden. Deshalb sind auch, wie Abb. 16 zeigt, insgesamt 25 % des Schlages stark von linearer Erosion betroffen. Hier übersteigen die Abträge 4,5 t/ha*a.

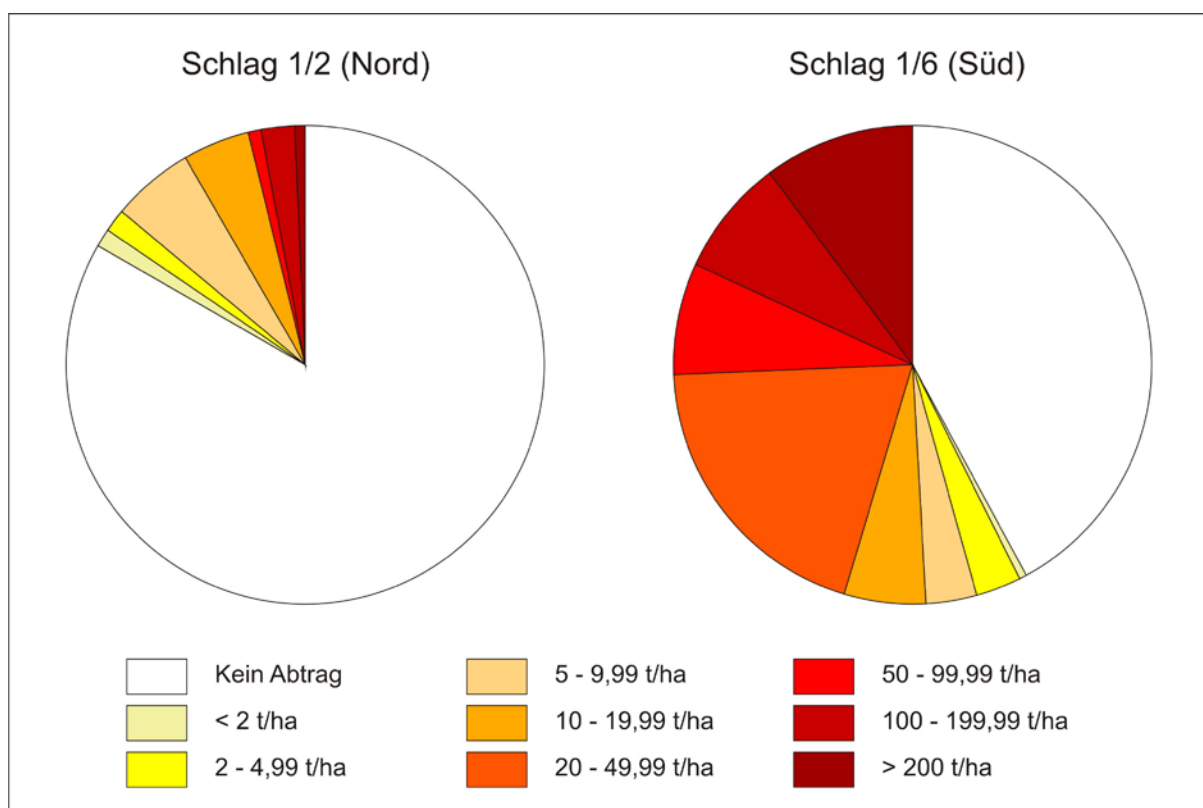


Abb. 16: Flächendifferenzierte Bodenabträge für die Schläge 1/2 und 1/6 im UG Lamspringe

Die räumlich-differenzierte Analyse der linearen Erosion zeigt, dass im Gebiet Lamspringe bislang nur 22 % der Fläche durch lineare Erosion betroffen sind. Durch die verbreitet höhenlinienparallele Bearbeitung tritt nur auf wenigen Schlägen Fahrspur- und Saatrillenerosion auf. Sehr hohe Abträge sind in Tiefenlinien und in einigen Vorgewenden zu verzeichnen. Es zeigen sich aber deutliche Unterschiede in der Erosionsaktivität zwischen den Tiefenlinienbereichen und den Vorgewenden.

2.3.2.3 Ergebnisse im UG Barum

Abb. 17 zeigt die Ergebnisse der räumlich-differenzierten Analyse der linearen Bodenerosion für das UG Barum. Auch in diesem Gebiet ist die Beobachtungsreihe unterschiedlich lang. Der größere Teil im Nordosten des UG verfügt über eine elfjährige Messreihe. Aufgrund eines weiteren Projektes werden seit dem Jahr 2002 fünf weitere Schläge im Südwesten untersucht.

Der von linearem Bodenabtrag betroffene Flächenanteil ist hier mit 33 % größer als im UG Lamspringe. Vor allem das regelmäßige Auftreten von flächenhaft-linienhaften Systemen führt in Barum zu einem höheren Anteil an erosionsaktiven Flächen und das trotz im Mittel wesentlich geringeren Hangneigungen. In Barum befinden sich Schläge mit zum Teil sehr hoher und zum Teil auch sehr hoher flächendeckender Erosionsaktivität in direkter Nachbarschaft von wenig betroffenen Schlägen.

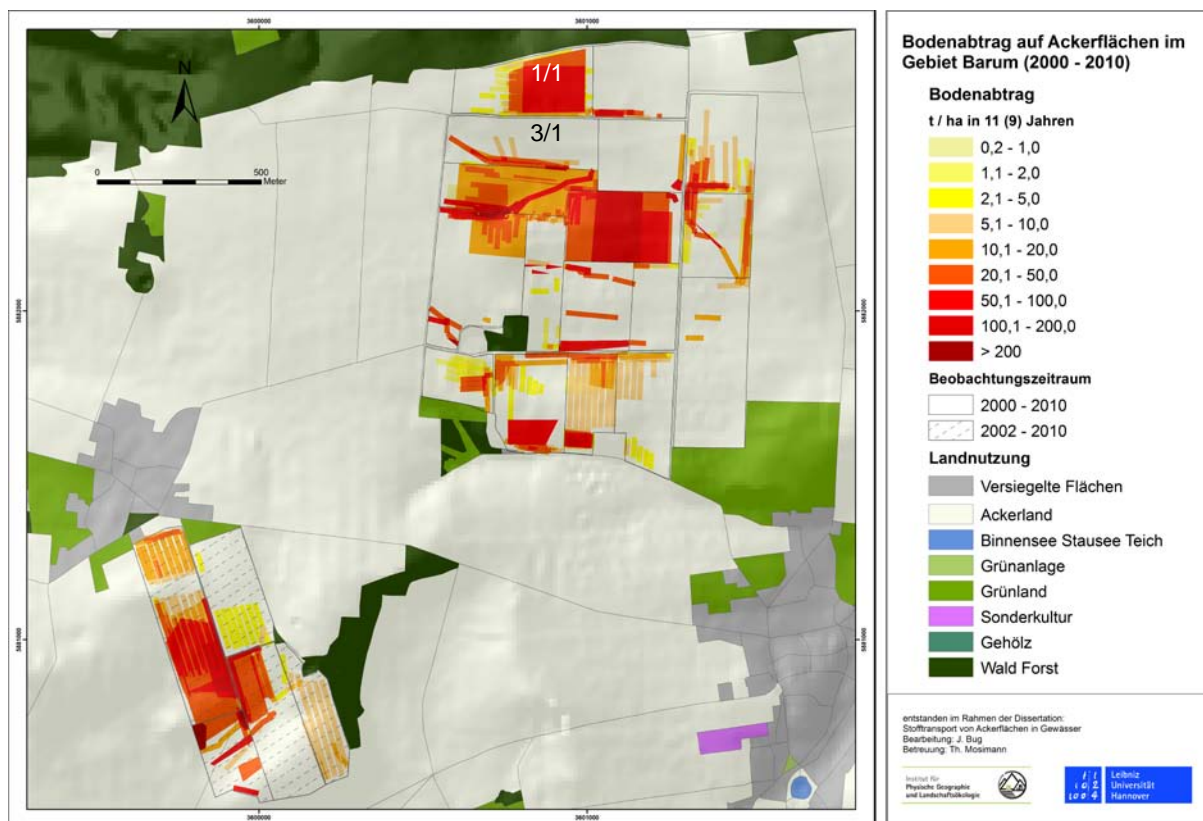


Abb. 17: Kartierter Bodenabtrag im Untersuchungsgebiet Barum

Beispielhaft für diese Differenzen stehen die beiden nordöstlichen Schläge im Kerngebiet von Barum. Auf dem nördlichsten Schlag (1/1) tritt lineare Erosion flächendeckend auf. Über 65 % der Fläche des Schlages ist von linearem Bodenabtrag betroffen. Lediglich der östliche Teil ist so flach, dass hier kein Abtrag gemessen wurde. Ansonsten dominieren im Westen Fahrspurerosion und Saatrillenerosion.

Der direkt südlich angrenzende Schlag (3/1) ist weniger stark von linearem Abtrag betroffen. Auf nur 15 % der Fläche konnte linearer Bodenabtrag nachgewiesen werden. Allein eine Tiefenlinie, die sich von Nordosten nach Südwesten erstreckt, sorgt immer wieder für Bodenabträge auf diesem Schlag. Der restliche Teil der Parzelle ist relativ flach und wird mehr oder minder schräg zur Falllinie bewirtschaftet. Dadurch traten Erosionsformen in

Fahrspuren und Saatrillen bislang nicht auf. Das flächenhafte Auftreten verschiedener linearerer Erosionsaktivitätsstufen auf den Schlägen zeigt Abb. 18.

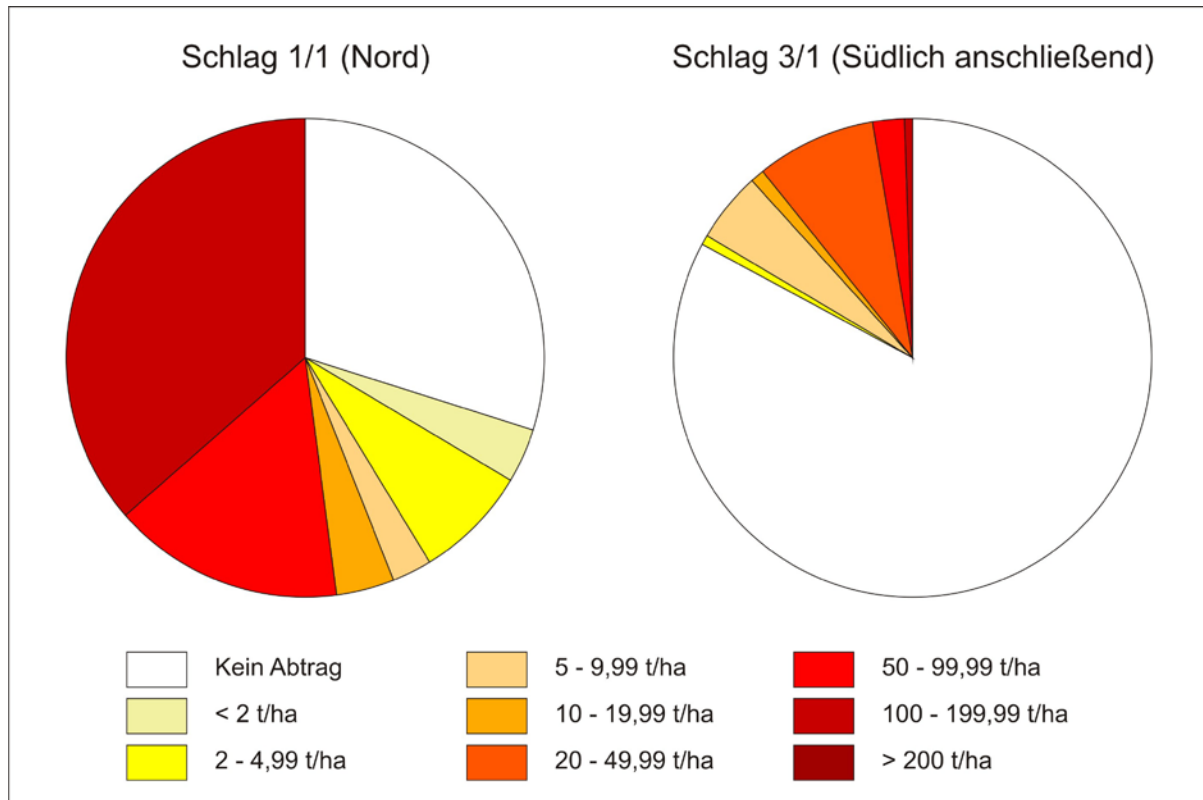


Abb. 18: Flächendifferenzierte Bodenabträge für die Schläge 1/1 und 3/1 im UG Barum

Das UG Barum zeichnet sich durch eine sehr hohe flächendeckende lineare Erosionsaktivität aus. Vor allem durch den Anbau von Kartoffeln in der Dammkultur und durch die Bewirtschaftung in Hangfallrichtung auf vielen Schlägen treten häufig Erosionsformen in Fahrspuren, Saatrillen und zwischen den Kartoffeldämmen auf. Damit zeigt sich, dass gerade die Bewirtschaftungsrichtung ein wichtiger Faktor für die lineare Erosionsaktivität ist.

2.4 Methodische Grundlagen und Modellstruktur von LINERO

2.4.1 Grundkonzeption des Modells LINERO

Ein Grundziel der Modellentwicklung von LINERO ist, dass das Modell mit möglichst wenigen, gut verfügbaren Eingangsdaten auskommen soll. Damit soll erreicht werden, dass die Modelle gut nachvollzogen und flächendeckend angewandt werden können. Diese Vorgabe hat wichtige Konsequenzen für die Gestaltung und Konzeption des Modells und seine Aussagefähigkeit.

Als zentrale Eingangsdaten soll das Modell lediglich ein Digitales Gelände Modell (DGM) und die Schlagstruktur benötigen. Aus diesen Daten lassen sich weitere Prädiktoren ableiten, wie im Folgenden weiter beschrieben. Andere erosionsauslösende Faktoren, wie die Fruchtfolgen, Bodeneigenschaften oder die Erosivität der Niederschläge gehen nicht in das Modell ein. Zwar beeinflussen auch diese Faktoren die lineare Bodenerosion, jedoch wird zugunsten der Vereinfachung des Modellansatzes auf ein Implizieren verzichtet. Der Verzicht auf weitere Eingangsdaten hat Konsequenzen für die Modellaussage:

- Die Ergebnisse zeigen die langjährige lineare Erosionsaktivität an und nicht den Abtrag von Einzelereignissen.
- Die Ergebnisse haben einen qualitativen Charakter.
- Bei entsprechender Kalibrierung sind semi-quantitative Aussagen zulässig.
- Eine quantitative Aussage zur Höhe der linearen Erosion ist nur nach eingehender Kalibrierung möglich.

LINERO prognostiziert die lineare Erosionsaktivität in qualitativen Stufen (keine, geringe, mittlere und hohe lineare Erosionsaktivität). Bei homogen bewirtschafteten Gebieten mit ähnlichen Böden können durch eine Kalibrierung des Modells auch semi-quantitative Aussagen zur Höhe der linearen Bodenabträge getroffen werden. Wenn die Bewirtschaftung oder der Boden im Untersuchungsgebiet stark variieren, ist von einer semi-quantitativen Auswertung abzusehen.

Das Modell beschreibt die relativen Unterschiede der Erosionsaktivität innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Wenn die Landwirte im Gebiet bereits Maßnahmen zur Erosionsverminderung durchführen, sind die Bodenabträge insgesamt geringer. Die Differenzierung der Schlagbereiche bleibt aber auch dann bestehen. Die Entwicklung des Modells LINERO erfolgt in drei Phasen, die Abb. 19 detailliert vorstellt:

LINERO		
Vorbereitung	Modellschritte	Validierung und Bewertung
<p>Auswertung der vorhandenen Erosionsdaten (NERODAT)</p> <p>Erstellung von Reliefparametern für alle (Teil-) Schläge mit und ohne lineare Erosion</p> <p>Modellanpassung zur Prognose der Fahrtrichtung</p> <p>Identifizierung der wichtigen Prädiktoren durch Regressionsanalysen</p>	<p>Erstellung von Entscheidungsbäumen zur Beantwortung der Fragen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Wo tritt keine Erosion auf? 2. Wo tritt Fahrspurerosion auf? 3. Wo tritt Erosion in Tiefenlinien auf? 4. Wo tritt Erosion im Vorgewende auf? 5. Wo tritt Erosion durch Zuschusswasser auf? 6. Wie hoch sind die Abträge? 	<p>Prüfung der Übertragbarkeit in andere Regionen / Skalengebiete</p> <p>Validierung mit Hilfe von nicht für die Modellerstellung verwendeten Daten.</p>

Abb. 19: Phasen der Modellumsetzung von LINERO

Phase 1: Vorbereitung

- Die räumlich differenzierte Auswertung der Daten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen (vgl. Kapitel 2.3.2).
- Modellierung von Relief- und Bewirtschaftungsfaktoren mit Hilfe von GIS.
- Weiterentwicklung des Bearbeitungsrichtungsmodells nach BIERBAUM (2001).

Phase 2: Modellierung

- Teilmodelle, die die Teilprozesse des linearen Erosionsgeschehens prognostizieren werden auf Basis der Ergebnisse in den UG Lamspringe und Barum entwickelt.

Phase 3: Modellprüfung, Validierung und Bewertung

- mit Ergebnisse der Erosionsdauerbeobachtung aus den Gebieten Klein Ilde, Nette und Küingdorf mittels statistischer und räumlicher Analysen durchgeführt.

Die Arbeit stellt im Folgenden die drei Phasen der Modellentwicklung vor.

2.4.2 Phase 1: Modellierung von Prädiktoren mit GIS

Das Modell LINERO verwendet Prädiktoren zur Prognose des linearen Erosionsgeschehens, die mit Hilfe von GIS-Analysen aus dem DGM und der Schlagstruktur gewonnen werden. LINERO greift sowohl auf Analyse-Werkzeuge aus SAGA als auch auf ARC-GIS zurück. Im Folgenden folgt die Vorstellung der verwendeten Prozeduren.

2.4.2.1 Hangneigung in Fahrtrichtung

Zur Beschreibung der linearen Erosion ist die Kenntnis der Fahrt- bzw. Bearbeitungsrichtung des Schlages von hoher Bedeutung. Wenn die Fahrtrichtung mit der Hangfallrichtung übereinstimmt, ist z.B. der Auftritt von Fahrspurerosion wesentlich wahrscheinlicher als bei einer Querbearbeitung.

Zur Prognose der Fahrtrichtung auf Ackerschlägen hat BIERBAUM (2001) ein Verfahren entwickelt, das diese Größe anhand der Schlagstruktur erzeugen kann. Es basiert auf drei Teilschritten:

- 1. Schritt: Entfernen von Stützpunkten, Schlaggeometrien vereinfachen.
- 2. Schritt: Berechnung der Längen- und Breitenverhältnisse der vereinfachten Schläge. Bei Schlägen, die um mindestens 20 % länger als breit sind, kann BIERBAUM, anhand der Geometrie, die Fahrtrichtung mit einer Genauigkeit von 95 % vorhersagen.
- 3. Schritt: Erzeugung eines Ellipsoiden aus dem Schlag. Berechnung der Hauptachsenrichtung des Ellipsoiden. Zuweisung dieser Richtung für den Schlag. Diese Hauptachsenrichtung entspricht der Bearbeitungsrichtung (Gradzahl zwischen 0 und 180, 0° bzw. 180° = Ost-West-Richtung, 90° = Nord-Süd-Richtung).
- Bearbeitungsrichtung der Vorgewende entspricht einer 90°-Winkelabweichung des Hauptfeldes.

Für diese Arbeit muss diese Methodik weiterentwickelt werden (Abb. 20). Die Information der Bearbeitungsrichtung wird mit der Hangfallrichtung gekoppelt, die aus dem DGM berechnet wird. Mit Hilfe des ArcGIS Spatial Analyst kann die Exposition jedes Pixels berechnet werden. Das vorliegende Modul beinhaltet die Reklassifizierung der Exposition des Pixels und die Kombination dieser beiden mit der reklassifizierten Bearbeitungsrichtung. Damit lässt sich eine Karte erzeugen, die die Bearbeitungsrichtung in Bezug auf die Gefällrichtung beschreibt. Drei Fälle lassen sich dabei unterscheiden:

- Bearbeitung in Hangfalllinie (0 – 25° Abweichung).
- Bearbeitung schräg zur Falllinie (26-75° Abweichung).
- Die Bearbeitung ist mehr oder minder quer zur Falllinie (76 – 90° Abweichung).

Abb. 21 stellt die Bearbeitungsrichtung in Bezug auf die Hangfallrichtung für das UG Lamspringe dar.

In einem zweiten Schritt wird das Modell Bierbaum um die automatisierte Berechnung der Hangneigung in Bearbeitungsrichtung ergänzt. Dazu dient die Erstellung eines SAGA – GIS Moduls, das die Hangneigung spezifisch für eine bestimmte Richtung berechnen kann.

Das Modul gibt auch diese Richtung in Grad an. So kann die von Bierbaum errechnete Größe direkt in das Modell einfließen. Die Hangneigung in Bearbeitungsrichtung ist ein wichtiger Prädiktor für die Vorhersage des Bodenabtrages in Fahrspuren.

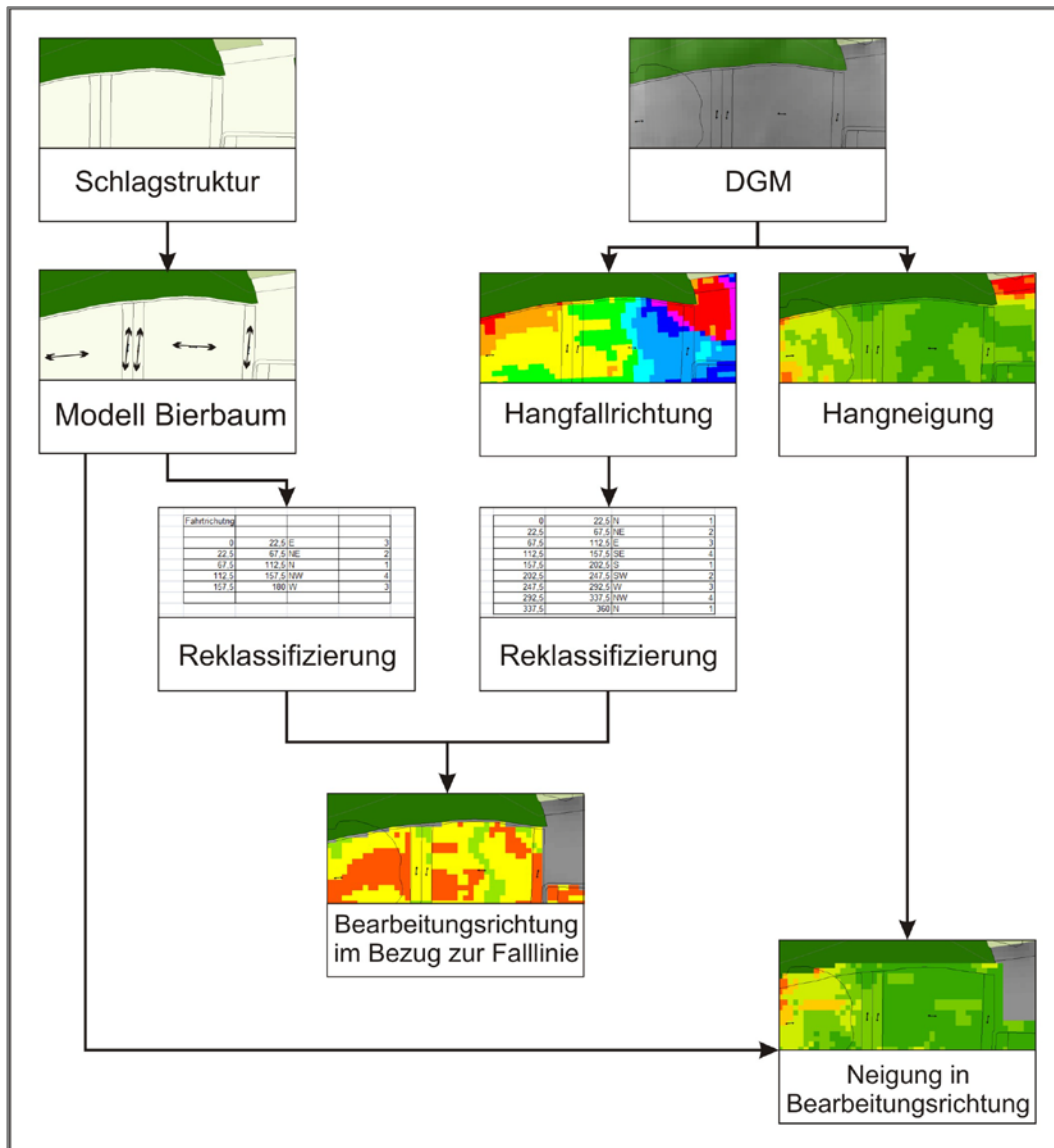


Abb. 20: Schema der Methodik zur Berechnung der Bearbeitungsrichtung eines Schrages in Bezug auf die Hangfallrichtung, sowie die Berechnung der Hangneigung in Bearbeitungsrichtung

Abb. 22 stellt die Ergebnisse dieses Modells für das UG Lamspringe dar. Es zeigt im direkten Vergleich zur Modellierung der Bearbeitungsrichtung in Bezug auf die Hangfallrichtung ein wesentlich differenzierteres Bild. So können auch Bereiche mit schräger Bearbeitung hohe Neigungen aufweisen und somit eine hohe Erosionsaktivität fördern.



Abb. 21: Modellierte Richtung der Bewirtschaftung in Bezug auf die Hangfallrichtung im UG Lamspringe

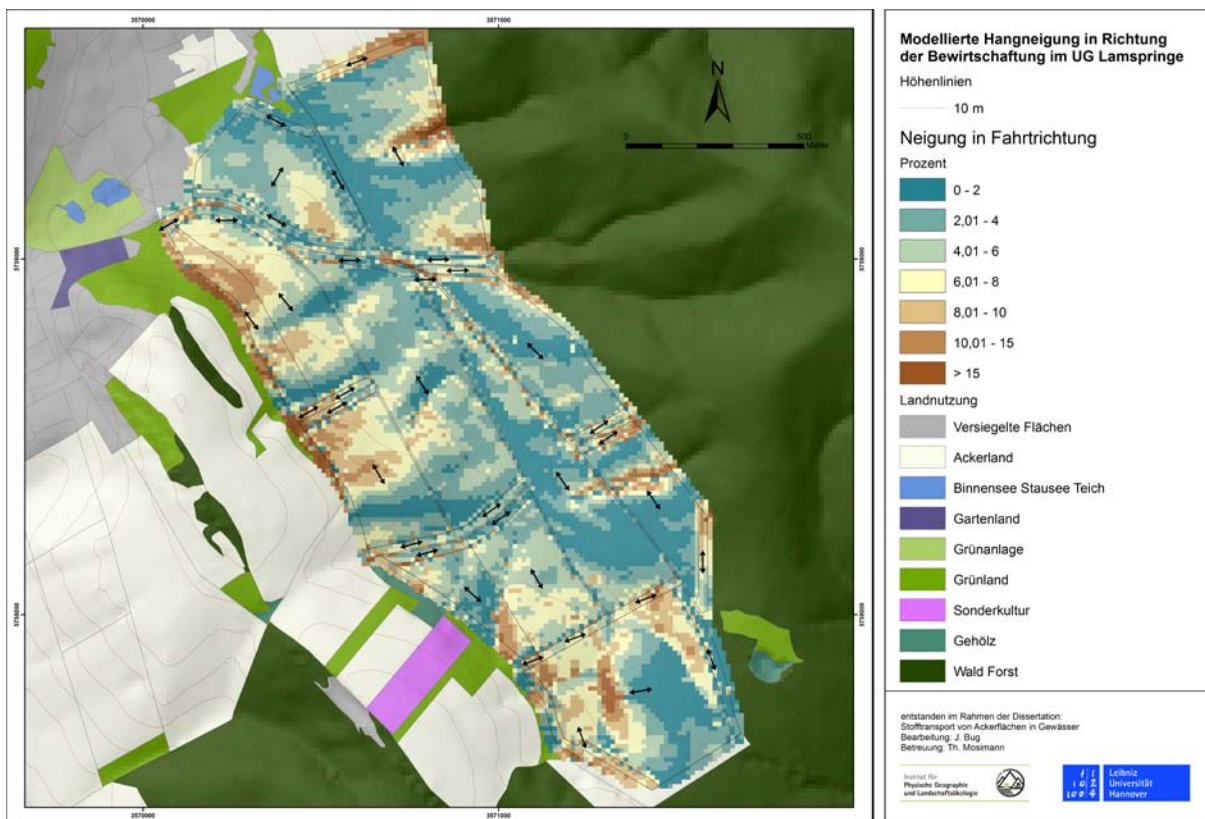


Abb. 22: Modellierte Hangneigung in Richtung der Bewirtschaftung im UG Lamspringe

2.4.2.2 Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien

Zur GIS-gestützten Modellierung von Tiefenlinien dienen in den meisten Fällen die Methoden der Hydrologischen Modellierungen, wie sie unter anderem von REUTER & NELSON (2009) für ArcGis vorgestellt wird. Die Hydrologische Modellierung erstellt auf Basis des DGM eine Fließrichtung für jeden untersuchten Pixel. Auf Basis dieses Fließrichtungsgrids berechnet GIS die Größe des Einzugsgebietes einer Zelle, bzw. wie viele Zellen in jede einzelne Zelle entwässern (Flow Accumulation). Mit Hilfe von Schwellenwerten können dann Vorfluter, Gewässer und Bäche differenziert dargestellt werden. Diese modellierten Gewässer stimmen nicht immer mit der tatsächlichen Lage von Flüssen überein, sie geben die regional tiefsten Punkte der Umgebung an. Durch Flussbegradigungen oder auch durch die Anlage von Grabenstrukturen im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren kommen aktuell auch Gewässer an Positionen im Gelände vor, die nicht der hydrologischen Modellierung entsprechen. Mit Hilfe von kleineren Schwellenwerten für das Einzugsgebiet bzw. für das Flow Accumulation Grid können auch Bereiche auf Ackerschlägen ermittelt werden, wo Oberflächenabfluss zusammenläuft. Die Größe des Schwellenwertes bestimmt ob mehr oder weniger Zellen als Tiefenlinie ausgewiesen werden. Beispielhaft ist dies in der linken Detailkarte von Abb. 23 zu finden.

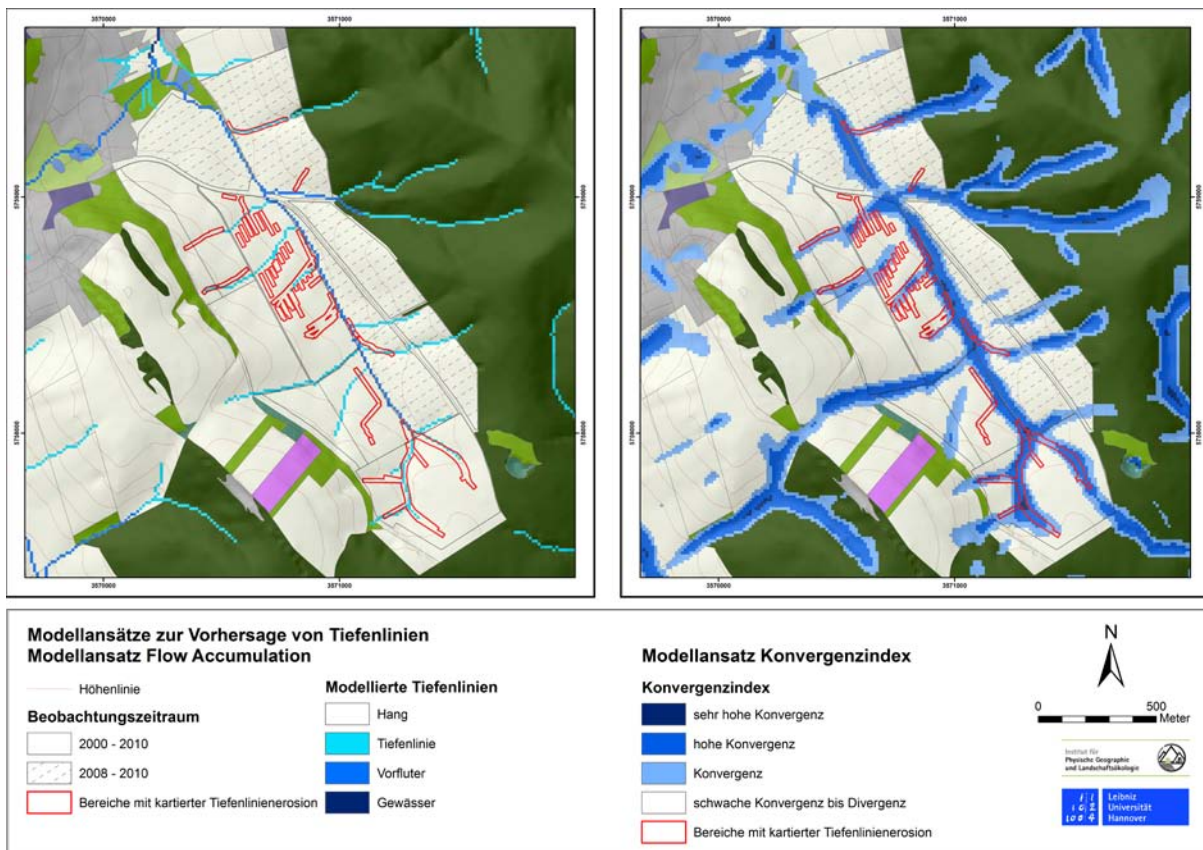


Abb. 23: Vergleich der zwei Algorithmen zur Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien

Der linke Teil der Abb. 23 zeigt neben den modellierten Tiefenlinien auf Basis der Hydrologischen Modellierung auch die Bereiche mit Tiefenlinienerosion an. Der rechte Teil der Abb. stellt die Methode der Tiefenlinienmodellierung nach OLAYA & CONRAD (2009) vor. Auf Basis des in SAGA berechneten Konvergenzindexes können Bereiche bestimmt werden, wo

aufgrund der Hangwölbung das oberflächlich abfließende Wasser zusammenfließt. Es zeigt sich, dass diese Herangehensweise einen deutlich besseren Zusammenhang zu der kartierten Erosion aufweist als die Modellierung auf Basis der Flow Accumulation (siehe Abb. 24).




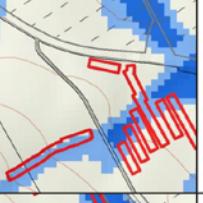

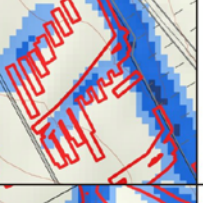

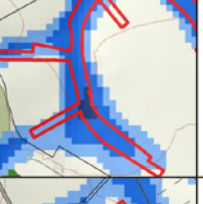


Flow Accumulation	Konvergenzindex	Kommentar
		Hier eine typisch ausgeprägte Tiefenlinie (TL), in der Erosion auftritt. Sie wird durch beide Modelle gut wiedergegeben. Der Konvergenzindex (KI) zeigt an, dass es am Hangfuss zu einer Verflachung kommt.
		Das zweite Beispiel zeigt eine erosionsaktive TL, die sich über zwei Schläge erstreckt. Mit dem Modell Flow Accumulation (FA) wird diese auf dem oberhalb gelegenen Schlag nicht vorhergesagt. Der KI stellt die TL korrekt und komplett dar. Im unteren Schlag fand in der TL Akkumulation statt. Die Erosionsformen enden hier.
		Der Ausschnitt zeigt gleich drei erosionsaktive TL. Während die FA Modellierung zwei zum Gewässer durchgehende TL ausweist, zeigt der KI an, dass der Tiefenliniencharakter der nördlichen TL am Hangfuss abnimmt. Dies stimmt mit den Beobachtungen überein.
		Dieser Ausschnitt zeigt ein komplexes System aus erosionsaktiven TL. Hier fanden bislang die höchsten bislang gemessenen Abträge in TL statt. Das FA Modell bildet nicht die kompletten TL ab. Am Oberhang fehlen Bereiche. Der KI erreicht eine höhere räumliche Korrelation zu dem empirischen Befund.
		Beide Modelle sagen hier jeweils zwei Bereiche mit wahrscheinlich erosionsaktiven TL voraus. Empirisch konnten diese nicht nachgewiesen werden. Die nördliche TL liegt im Grenzbereich der Schläge. Hier verläuft ein Weg. Die Vorgewende in diesem Bereich sind aber sehr erosionsaktiv. In der südlichen TL wurde bislang kein Abtrag festgestellt.

Abb. 24: Vergleich von Ansätzen zur Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien anhand von Kartenausschnitten

Schlussfolgerungen:

Die Prognosegüte des Konvergenzindexes ist deutlich besser. Gerade kleinere erosionsaktive Tiefenlinien können hierdurch besser vorhergesagt werden als durch den Flow Accumulation Algorithmus. Auch Hangverflachungen und abnehmende Konvergenz bildet der Konvergenzindex ab. Bei der Flow Accumulation erreichen die Tiefenlinien immer das Gewässernetz. Gerade bei der Prognose von erosionsaktiven Tiefenlinien, die zu Gewässeranschluss führen, ist demnach der Ansatz auf Basis des Konvergenzindexes geeigneter, da hier nicht automatisch alle Tiefenlinien zum Gewässernetz führen.

2.4.2.3 Sonstige Prädiktoren für LINERO

Neben der Vorhersage von Bearbeitungsrichtung und erosionsaktiven Tiefenlinien wurden weitere hydrologische und morphographische Prädiktoren für die Vorhersage der linearen Erosion mit Hilfe von GIS berechnet:

- Hangneigung
- Fließlänge
- Divergenz-Konvergenz-Index
- Teileinzugsgebiete
- Bearbeitungsrichtung
- Hangneigung in Bearbeitungsrichtung

Die Entscheidungsbäume der Submodelle von LINERO nutzen die Prädiktoren in unterschiedlicher Kombination und Gewichtung. Für die verschiedenen Formentypen sind meist einzelne Faktoren von besonders großer Bedeutung. Beispielsweise ist für die Erosion in Fahrspuren die Neigung in Bearbeitungsrichtung wichtiger als die Konvergenz. Andere Prädiktoren haben auf diese Form der Erosion nur geringen oder sogar gar keinen Einfluss.

Submodell	Hang- neigung	Fließlänge	Divergenz- Konvergenz- Index	Teileinzugs- gebiete	Bearb.- richtung	Hang- neigung in Bearb.- richtung
	[%]	[m]		[m ²]		
Fläche ohne lineare Erosion	X	X	X			
Erosion in Tiefenlinien	X		X	X		
Erosion in Fahrspuren					X	X
Erosion im Vorgewende			X		X	X
Erosion durch Zuschusswasser	X	X		X		

Tab. 6: Verwendete Prädiktoren für die Modellierung der einzelnen Formen der linearen Erosion in den Submodellen von LINERO

2.4.3 Phase 2: Erstellung der Entscheidungsbäume von LINERO

Das Modell LINERO besteht aus fünf Submodellen, die unterschiedliche Prozessteile der linearen Erosion beschreiben. Die Modellteile basieren jeweils auf einem hierarchisch aufgebauten Entscheidungsbaum. Dieses Kapitel stellt die Entscheidungsbäume vor und beschreibt die Auswahl und Gewichtung der Prädiktoren. Die Schwellenwerte der einzelnen Prädiktoren stützen sich auf regressionsstatistische Analysen. Die Gewichtung der Prädiktoren in den einzelnen Entscheidungsbäumen von LINERO entstammt wissensbasierte Analysen und der Auswertungen der Kartiererergebnisse.

Das erste Submodell weist Flächen aus, auf denen kein linearer Bodenabtrag auftritt. Es erfolgt damit eine Eingrenzung der Betrachtungsfläche der anderen Submodelle.

Die anderen vier Modelle prognostizieren jeweils die Erosionsaktivität einer der vier Gruppen der beschreibbaren linearen Erosionsformen (Tiefenlinienerosion, Fahrspurerosion, Erosion im Vorgewende, Erosion durch Zuschusswasser).

2.4.3.1 Aussage der Submodelle von LINERO

Das erste Submodell von LINERO weist Flächen aus, auf denen kein linearer Bodenabtrag zu erwarten ist. Es unterteilt den Raum in erosionsaktive und erosionsinaktive Bereiche. Die Aussage dieses Submodells ist dementsprechend einfach: Linienhafte Erosion ist entweder unwahrscheinlich oder möglich. Das Submodell sagt dabei aber nicht aus, ob auf der erosionsaktiven Fläche auch tatsächlich Bodenabtrag stattfindet, oder wie hoch der Bodenabtrag ausfällt. Dazu dienen die vier Submodelle. Das Ziel der Submodelle ist Höhe des Bodenabtrages qualitativ einzuschätzen. Für die Schlagteile wird jeweils die Stufe keine, geringe, mittlere und hohe Erosionsaktivität zugeteilt. Die Bedeutung der Stufen sind:

- Keine Erosionsaktivität: Der Auftritt von linearen Systemen des untersuchten Formtyps ist sehr unwahrscheinlich.
- Geringe Erosionsaktivität: Der Formtyp tritt selten auf. Die Bodenabträge durch diese Form sind im Gebiet vergleichsweise gering.
- Mittlere Erosionsaktivität: Auftritt ist regelmäßig (alle 2 – 3 Jahre). Die Bodenabträge durch diese Form sind im Gebiet vergleichsweise gering.
- Hohe Erosionsaktivität: Auftritt ist häufig (mehrmals im Jahr – alle 2 Jahre). Es sind hohe Abträge durch diese Form zu erwarten.

Da auch weitere Faktoren, wie die Bodenbearbeitung, der Regen und die Fruchtfolge die Höhe der Bodenabträge steuern, sind die Aussagen von LINERO relativ. Durch Kalibrierung im Gebiet selbst, oder auch auf dem Einzelschlag können auch mittlere jährliche Bodenabträge prognostiziert werden.

2.4.3.2 Teilmodell zur Bestimmung von Flächen ohne lineare Erosion

Lineare Erosion ist zumeist ein lokal begrenzter Prozess. Das Auftrittsmuster ist abhängig von natürlichen und bewirtschaftungsspezifischen Faktoren auf dem Schlag. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich die Fläche, auf der lineare Erosion auftritt, eingrenzen lässt. Die erosionsinaktive Fläche kann mit Hilfe von topologischen Prädiktoren ausgewiesen werden. Anhand der Kartierergebnisse in den UG Lamspringe und Barum ist zu diesem Zweck ein Entscheidungsbaum entwickelt worden, der

- die Fläche, auf der lineare Bodenabtrag stattfindet, eingrenzt,
- sich auf wenige naturräumliche Faktoren stützt und
- mit Hilfe einfacher GIS-Routinen umsetzbar ist.

Als Prädiktoren dienen diesem Entscheidungsbaum ausschließlich Relieffaktoren. Aus dem DGM werden für dieses Submodell der Konvergenzindex nach CONRAD (1998), die Hangneigung und die Fließlänge abgeleitet. Abb. 25 stellt den Entscheidungsbaum zur Prognose der erosionsaktiven Fläche vor. Als Eingangsdaten werden für das GIS-basierte Modell ein DGM zur Berechnung der Prädiktoren Konvergenz, Hangneigung und Fließlänge benötigt, sowie die Landnutzung zur Begrenzung der Fließlänge.

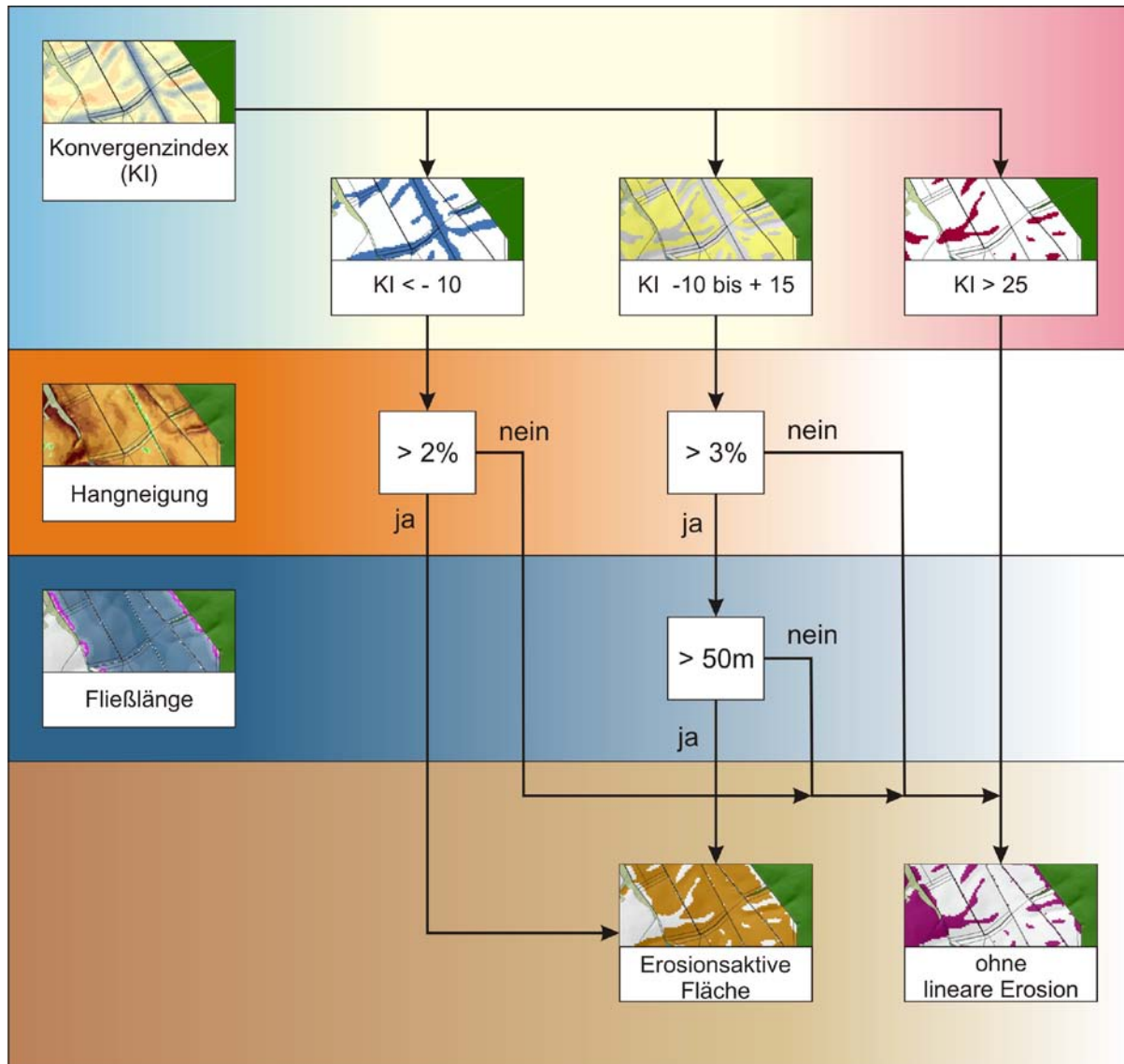


Abb. 25: Entscheidungsbaum zur Vorhersage von erosionsinaktiven Flächen

Als erster Prädiktor geht der Konvergenzindex in den Entscheidungsbaum ein. Mit Hilfe dieses Indexes wird die landwirtschaftlich genutzte Fläche in drei Bereiche unterteilt.

- Bereiche mit hoher Konvergenz. Hier ist mit Erosionsaktivität durch die Bündelung von Oberflächenwasser in Tiefenlinien zu rechnen.
- Normal gestreckte Hänge: Keine Erosion in Tiefenlinien, aber potentiell gefährdet durch lineare Erosion.
- Bereiche mit hoher Divergenz. Hier tritt keine lineare Erosion auf.

Bereiche mit hoher Konvergenz weisen eine besonders hohe Erosionsaktivität auf. Eine Hangneigung von 2 % reicht aus, um lineare Erosionsformen zu induzieren. Auf normal gestreckten Hängen muss die Hangneigung 3 % übersteigen, um die Fläche als erosionsaktiv zu bezeichnen.

Auf den gestreckten Hängen gelten Hangbereiche als nicht erosionsaktiv, deren Fließstrecke kürzer als 50 m ist. In diesen Bereichen tritt zwar flächenhafte Erosion auf, durch die kurze Fließstrecke bzw. dem kleinen Einzugsgebiet, kommt es in der Regel aber nicht zur Bündelung des Oberflächenwassers und damit zur Ausbildung von Erosionsrillen und -rinnen. Ohne lineare Erosion bleiben auch Schlagbereiche mit hoher Divergenz. Eine hohe Divergenz weisen Scheitelbereiche auf, an denen es zu einem Wechsel der Fließrichtung kommt. Von diesen Scheitelbereichen fließt das Oberflächenwasser in unterschiedliche Richtungen ab. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sammelt sich dadurch zu wenig Oberflächenwasser zur Ausbildung von linearen Erosionsformen.

Das Teilmodell unterteilt den Schlag sinnvoll in eine erosionsaktive Teilfläche und Teilbereich ohne lineare Erosion. Es dient damit als Vorbereitung für die anderen Teilmodelle, indem es den Raum für die Beurteilung der Erosionsaktivität eingrenzt. Es steht deshalb auch an erster Stelle der Modellhierarchie von LINERO. Die Höhe der Erosionsaktivität schätzt das Teilmodell nicht ein. Aber auch ohne eine Quantifizierung liefert das Teilmodell wichtige Aufschlüsse zum Prozessgeschehen der linearen Erosion, indem es Flächen ausweist für die eine weitere Modellierung zur Erosionsaktivität notwendig ist. Auch in Gebieten mit allgemein geringer Erosionsgefährdung kann mittels des Submodells eingeschätzt werden, ob überhaupt eine Gefährdung der Böden durch lineare Erosionsformen stattfindet. Es kann damit auch ohne die Folge Modelle eingesetzt werden und damit eine grundsätzliche und einfache Information zum linearen Erosionsgeschehen liefern.

2.4.3.3 Teilmodell „Erosion in Tiefenlinien“

Wie in Kapitel 2.4.1.2 bereits dargestellt, eignet sich zur Begrenzung von Gebieten mit Erosionsaktivität in Tiefenlinien der Konvergenzindex nach CONRAD (1998) am besten. Überall, wo Erosionsformen in Tiefenlinien kartiert wurden, hat dieser Prädiktor Werte, die kleiner als -10 sind.

Die Analyse der in Tiefenlinienerosion im UG Lamspringe zeigt, dass hier insgesamt 21 Tiefenlinienbereiche mit sehr unterschiedlicher Erosionsaktivität vorkommen. Für 14 Tiefenlinien steht eine elfjährige, für sieben eine dreijährige Messreihe zur Auswertung zur Verfügung. Die Analysen umfassen sowohl die unmittelbare Umgebung als auch das Einzugsgebiet der Tiefenlinien. Die Untersuchung dient der Ableitung von Prädiktoren, die in den Entscheidungsbaum zur Prognose der linearen Erosion in Tiefenlinien einfließen. Die Erosionsaktivität der Tiefenlinien, die sich im Vorgewende befinden, wird durch dieses Modell nicht beschrieben. Da bei der Kartierung der Abtrag nicht als Abtrag in Tiefenlinien, sondern als Abtrag im Vorgewende kategorisiert wurde, liegen keine empirischen Daten zur Verifizierung des Modells vor. Die Erosionsaktivität im Vorgewende beschreibt ein eigener Entscheidungsbaum (Kap.2.4.3.5). Dabei fließen die Ergebnisse aus der Analyse der Tiefenlinien mit ein. Vorgewende mit Tiefenliniencharakter werden gesondert behandelt.

Ein wichtiger Prädiktor zur Bestimmung der Erosionsaktivität in Tiefenlinien stellt die Größe des Einzugsgebietes dar. Je größer das Einzugsgebiet ist, desto höher ist auch das Erosionspotential. Als Einzugsgebiet gilt in diesem Fall nur das ackerbaulich bewirtschaftete Land. Es wird davon ausgegangen, dass auf Grünland und versiegelten Flächen kein Oberflächenabfluss entsteht, der auf Ackerflächen übertritt. Abb. 26 zeigt den Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsgröße und der Erosionsaktivität für die 21 Tiefenlinien in Lamspringe. Dabei werden die Tiefenlinien mit drei- bzw. elfjähriger Beobachtungreihe getrennt analysiert.

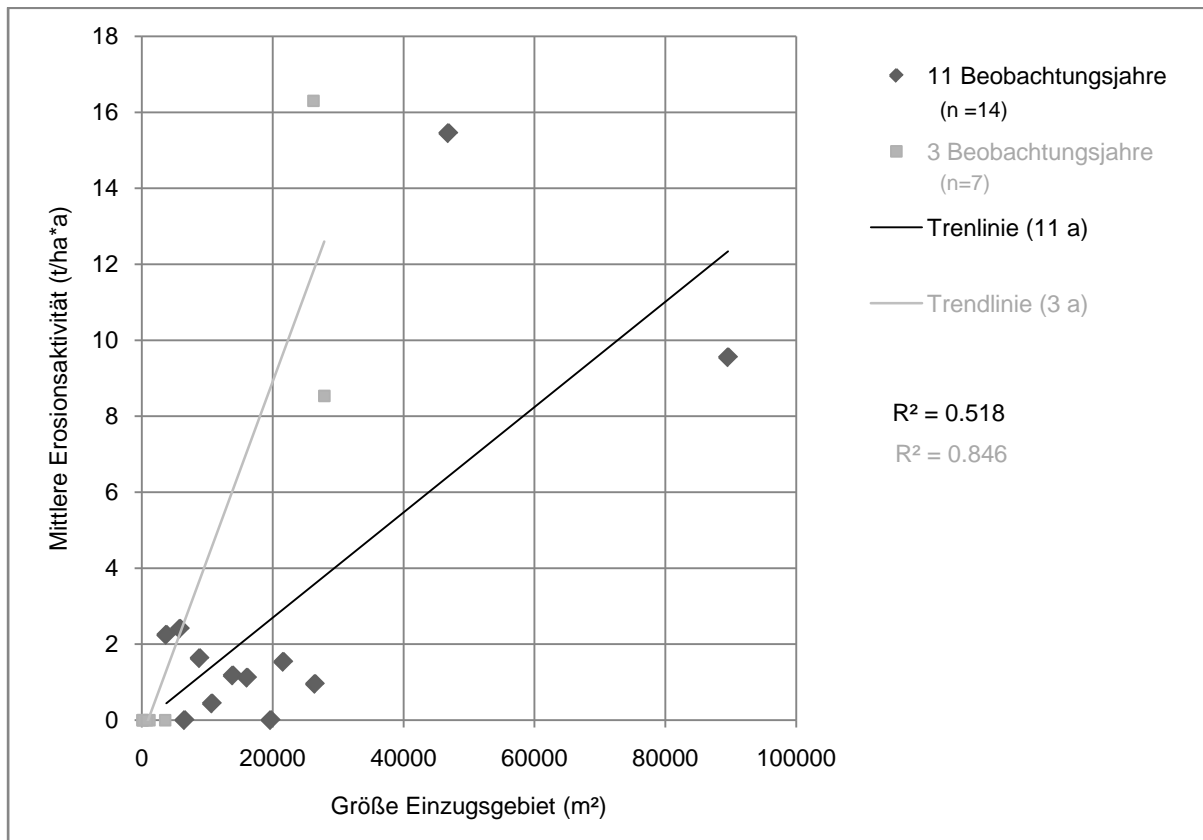


Abb. 26: Zusammenhang von Erosionsaktivität und Einzugsgebietsgröße

Die Stichproben sind ungleich verteilt. Dadurch ist eine regressionsstatistische Auswertung genau genommen nicht durchführbar. Da jedoch keine weiteren Stichproben zur Verfügung stehen, wird trotzdem auf diese Methode zurückgegriffen. Aufgrund dieser methodischen Einschränkung dürfen die Regressionsgleichungen nicht als Ergebnis verwendet werden. Vielmehr dienen sie lediglich zur Generierung von Schwellenwerte für den Entscheidungsbaum.

Die Analysen zeigen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsgröße und der Erosionsaktivität der Tiefenlinien besteht. Das Bestimmtheitsmaß deutet für die 14 Tiefenlinien mit elfjähriger Messreihe einen mittleren, für die 7 Tiefenlinien mit dreijähriger Messreihe einen sehr hohen Zusammenhang an. Die Regressionsgleichungen unterscheiden sich aber stark voneinander. Auf den Schlägen mit dreijähriger Messreihe kommt es aufgrund der Ballung eher erosionsaktiver Jahre zu einer Überschätzung der Aktivität. Es ist davon auszugehen, dass bei einer längeren Messreihe die Trendlinie abflachen würde.

Der Zusammenhang zwischen dem Prädiktor und der Erosionsaktivität muss kritisch betrach-

tet werden, da beide Korrelations-Regressionsanalysen vor allem durch jeweils zwei Tiefenlinien mit großen Einzugsgebieten und hoher Erosionsaktivität beeinflusst werden. Es zeigt sich bei diesen deutlich, dass Tiefenlinien mit sehr großen Einzugsgebieten auch sehr große Erosionsaktivität aufweisen. Bei den Tiefenlinien mit kleinen und mittleren Einzugsgebieten ergibt sich kein Zusammenhang zwischen der Größe des Einzugsgebietes und der Erosionsaktivität. Anscheinend spielen andere Faktoren in diesen Tiefenlinien eine wichtigere Rolle für die Ausprägung der Erosionsaktivität.

Der Prädiktor Einzugsgebietsgröße geht daher als Differenzierungskriterium in den Entscheidungsbaum ein. Aus den Analysen lassen sich folgende Schwellenwerte und Kriterien festlegen:

- Tiefenlinien mit Einzugsgebietsgrößen < 3.500 m²: keine Erosionsaktivität.
- Tiefenlinien mit Einzugsgebietsgrößen zwischen 3.500 und 25.000 m²: keine, geringe oder mittlere Erosionsaktivität (< 10 t/ha*a).
- Tiefenlinien mit Einzugsgebietsgrößen > 25.000 m²: hohe Erosionsaktivität (> 10 t/ha*a).

Diese Schwellenwerte fließen direkt in den Entscheidungsbaum (Abb. 35) ein.

Die regressions-statistischen Analysen zeigen, dass für die Zuweisung der Erosionsaktivität der Tiefenlinien mit mittlerer Einzugsgebietsgröße der Prädiktor Einzugsgebietsgröße nicht ausreicht. Weitergehende Analysen offenbaren, dass Einzelprädiktoren, wie die Hangneigung oder die Fließlänge allein keinen Beitrag zur Prognose der Aktivität liefern können.

Einen Lösungsansatz stellt die Berechnung eines komplexen Indikators für die acht Tiefenlinien in Lamspringe mit mittlerer Erosionsaktivität dar. Er beinhaltet die Größen Konvergenz und Hangneigung. Die Konvergenz weist auf die Größe des Einzugsgebietes hin und gibt damit an, wie viel oberflächlich abfließendes Wasser sich in der Tiefenlinie sammelt. Die Hangneigung gibt einen Hinweis auf die erosive Kraft des Wassers. Damit werden die wichtigsten Einflussfaktoren durch die Berechnung des *Index der Erosionsaktivität von Tiefenlinien* verknüpft:

$$IETL = (KI * HN) * -1$$

IETL	=	Index der Erosionsaktivität von Tiefenlinien
KI	=	Konvergenzindex nach Conrad (%)
HN	=	Hangneigung (%)

Der Index sagt aus, dass die Erosionsaktivität mit steigender Hangneigung und Konvergenz zunimmt. Werte kleiner 100 weisen auf fehlende lineare Erosionsaktivität hin. Der Zusammenhang zwischen dem Index und der Erosionsaktivität ist hoch. Bei einer Korrelationsanalyse wird dieses mit dem Wert $r^2 = 0,8$ bestätigt (Abb. 27).

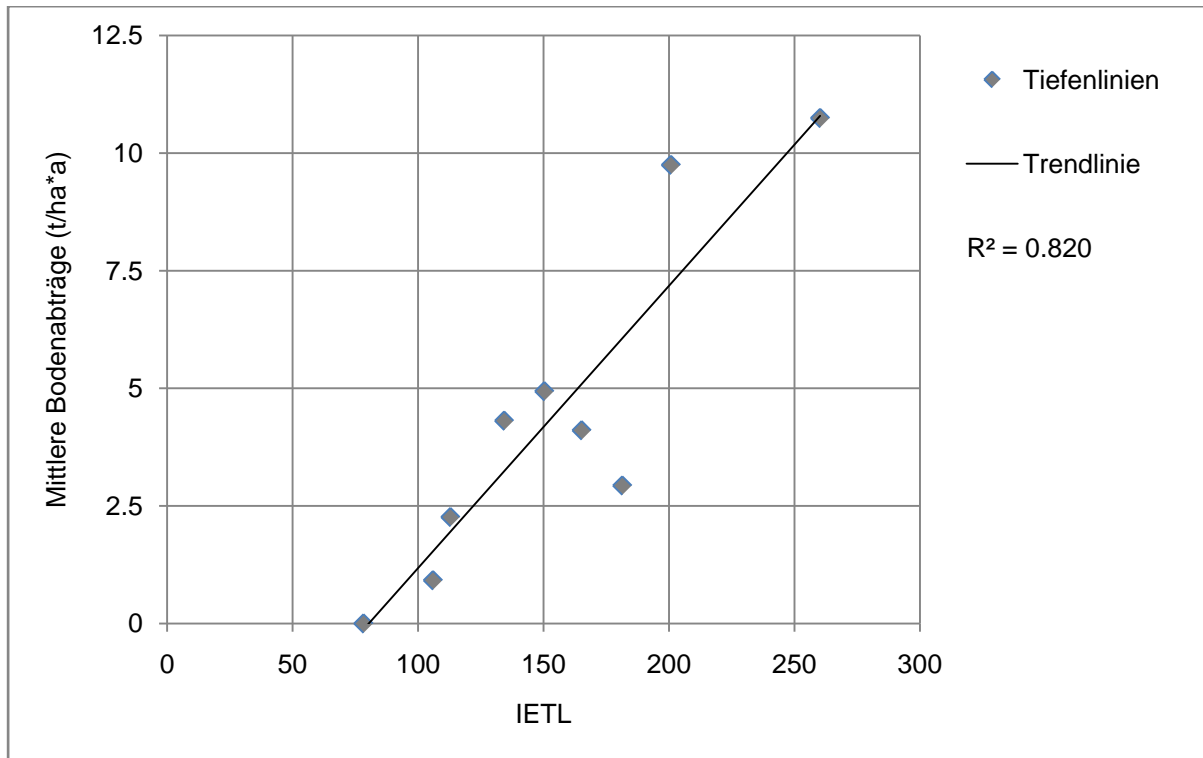


Abb. 27: Zusammenhang zwischen dem IETL und den mittleren jährlichen Bodenabträgen für Tiefenlinien mit mittelgroßen Einzugsgebieten

Mit Hilfe der drei Prädiktoren Konvergenzindex, Größe des Einzugsgebietes der Tiefenlinie und des Index zur Einschätzung der Erosionsaktivität (IETL) ist es möglich einen Entscheidungsbaum zu erstellen, der die Erosionsaktivität von Tiefenlinien abschätzt und klassifiziert (Abb. 28). Der Konvergenzindex fließt doppelt in den Entscheidungsbaum ein. Zunächst können mit seiner Hilfe Schlagbereiche ausgewählt werden, die einen Tiefenliniencharakter haben. Durch den Prädiktor Einzugsgebietsgröße lassen sich Tiefenlinien mit hoher und mit keiner Erosionsaktivität identifizieren. Auf Basis des Prädiktors IETL lässt sich die Erosionsaktivität in Tiefenlinien mit mittelgroßen Einzugsgebieten in die Klassen mittlere, geringe und keine Aktivität unterteilen.

Damit kann zum ersten Mal das Potential der Bodenabträge in Tiefenlinien empirisch abgeschätzt werden. Viele Modelle prognostizieren entweder, aufgrund der geringeren Hangneigung in Tiefenlinien, eine Verringerung der Bodenabträge oder diese Bereiche werden wie bei der ABAG ausgeklammert.

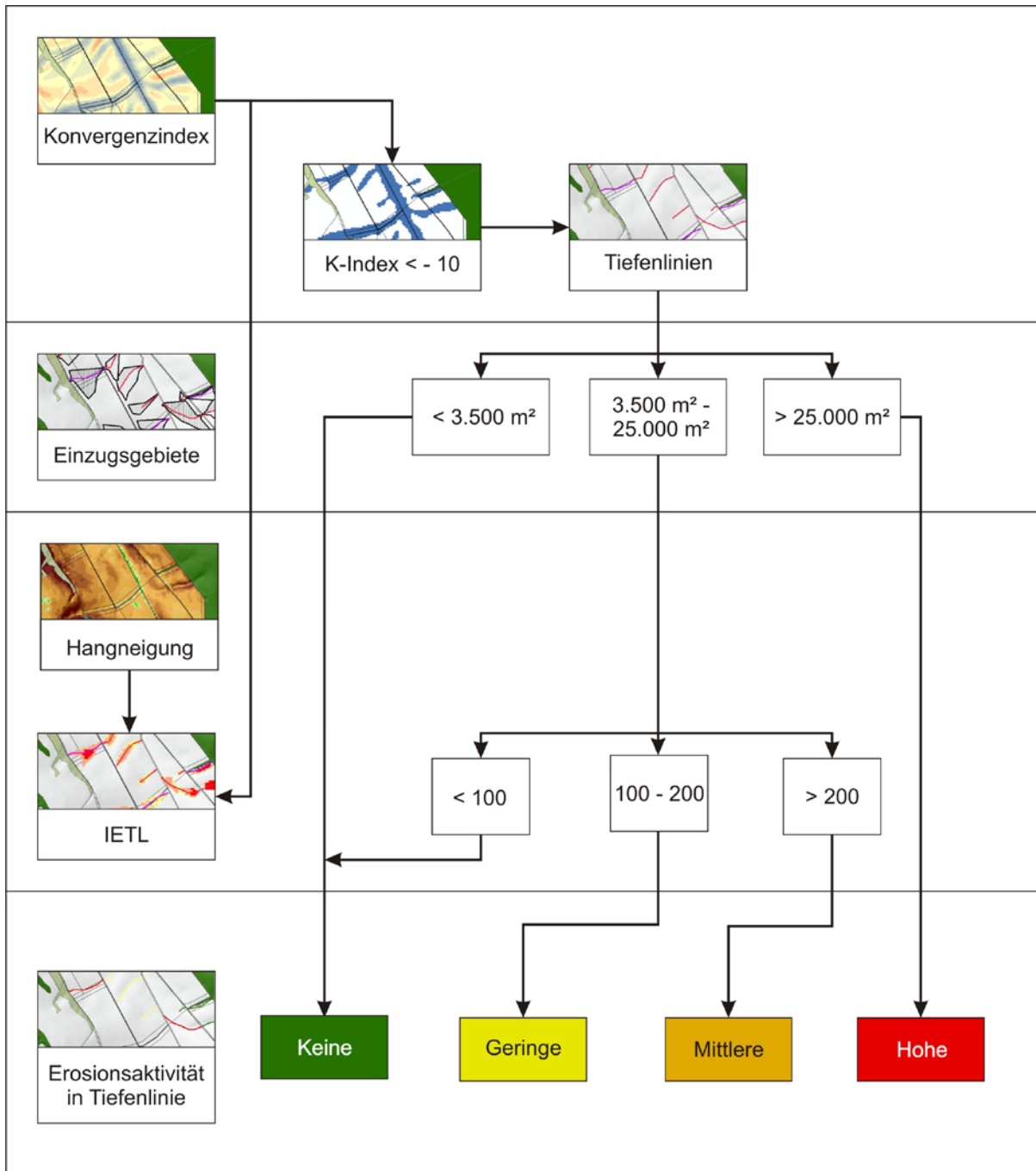


Abb. 28: Entscheidungsbaum zur Prognose der Erosionsaktivität von Tiefenlinien

Das Ergebnis der Einschätzung der Erosionsaktivität in Tiefenlinien für das Gebiet Lamspringe zeigt Abb. 29. In der Doppelkarte werden sowohl die Prädiktoren als auch die Einstufungen der Tiefenlinien dargestellt.

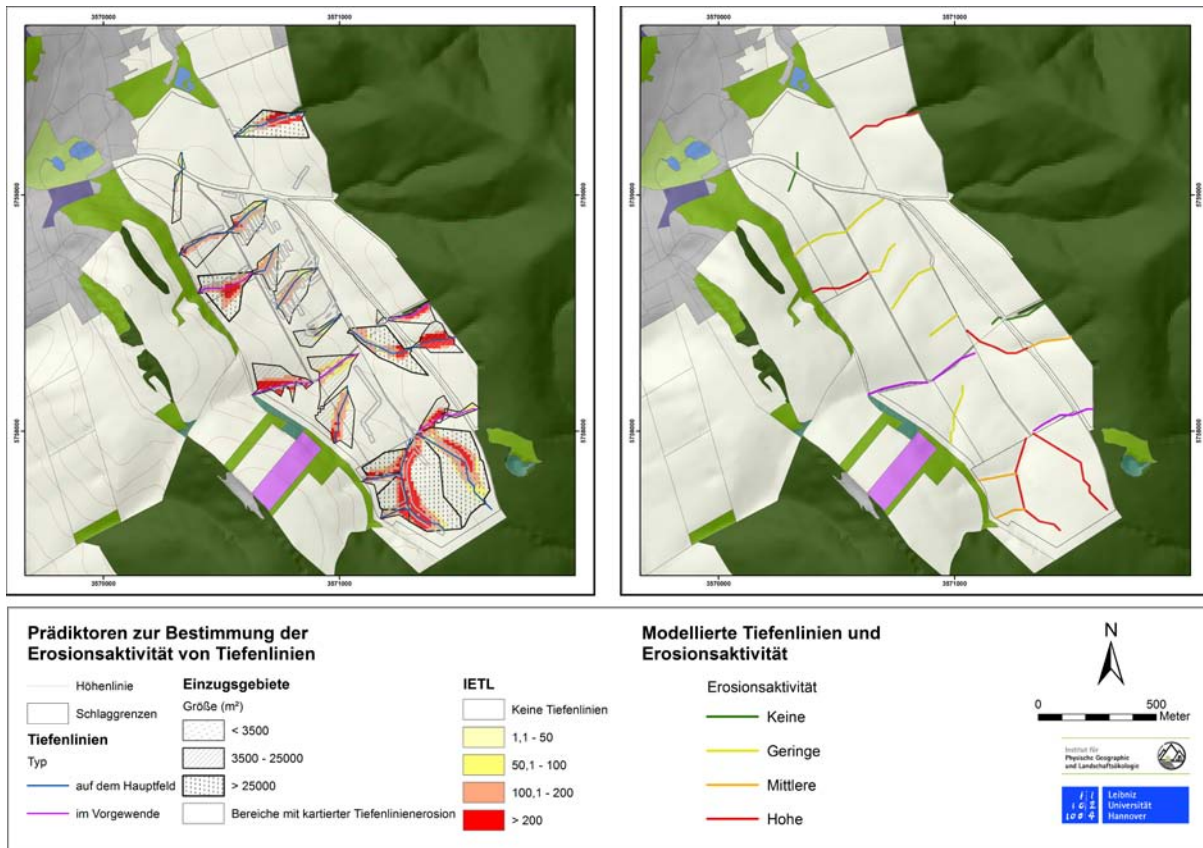


Abb. 29: Wahrscheinlichkeit von Bodenabtrag in Tiefenlinien – Prädiktoren und Modellergebnisse in Lamspringe

2.4.3.4 Teilmodell „Erosion in Fahrspuren“

Erosion in Fahrspuren tritt vor allem in Bereichen auf, die in oder schräg zur Falllinie bewirtschaftet werden. Je höher die Neigung im Bereich der Fahrspur ist, desto größer ist die Erosionsaktivität (FLEIGE ET AL. 1999). Zur Einschätzung des Ausmaßes von Abträgen in Fahrspuren ist dementsprechend der Prädiktor Neigung in Bearbeitungsrichtung von hoher Bedeutung. Die Analysen zeigen aber, dass eine einfache lineare Regression zwischen dem Abtrag und der Neigung in Bearbeitungsrichtung erwartungsgemäß nicht ausreicht. Auf sehr steilen Hängen kann die Hangneigung in Bearbeitungsrichtung auch bei Schräg- oder annähernder Querbearbeitung hohe Werte erreichen. Das Abtragungspotential ist hier aber kleiner als auf Flächen, die zwar eine geringere Neigung in Bearbeitungsrichtung aufweisen, aber dafür in Hangfallrichtung bearbeitet werden. Die Bearbeitung in Hangfallrichtung führt auch bei geringen Neigungen zur Kanalisierung des Oberflächenabflusses und damit zu Bodenabträgen durch lineare Erosionsformen.

Die untersuchten Zusammenhänge ermöglichen die Konzeption eines Entscheidungsbaumes zur Prognose der Fahrspurerosion (Abb. 30). Absolute Abtragungswerte können mit Hilfe des Baumes nicht prognostiziert werden. Dafür spielt die Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) eine zu große Rolle. Auf Schlagbasis werden jedoch die Bereiche lokalisiert, die Erosionsaktivität in Fahrspuren aufweisen. Durch die Ausweisung von Flächen mit

hoher Gefährdung lassen sich Maßnahmen wie beispielsweise die Intervallbegrünung gezielt planen und durchführen.

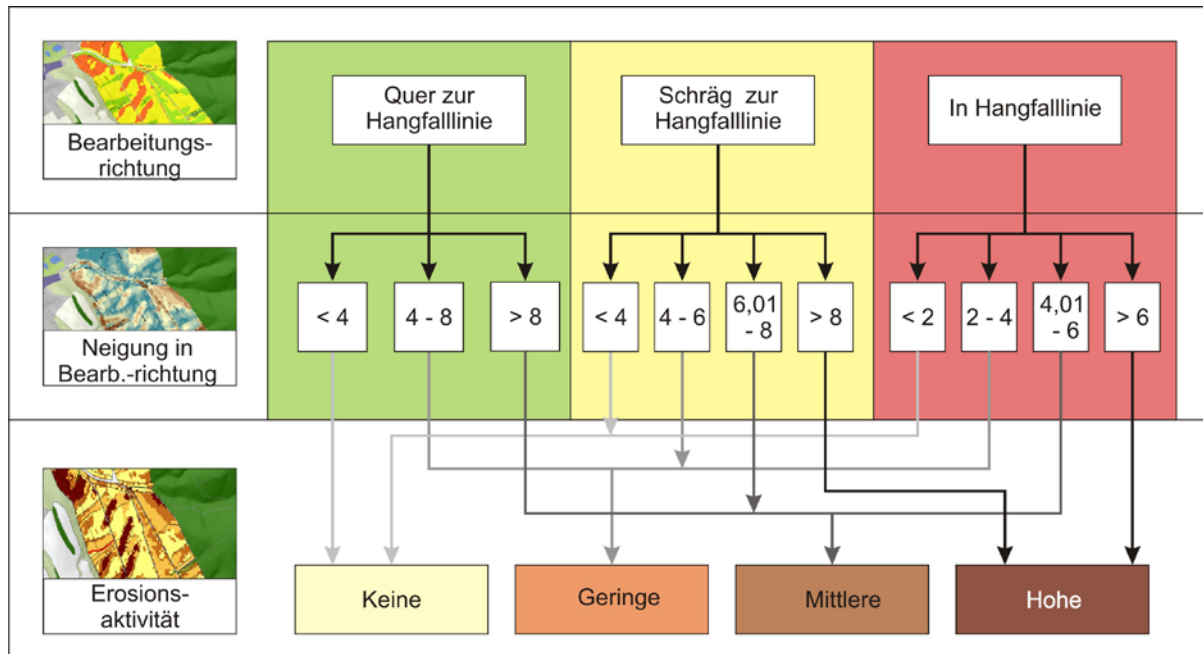


Abb. 30: Entscheidungsbaum zur Einschätzung der Erosionsgefährdung in Fahrspuren

Die Ermittlung der Schwellenwerte für den Prädiktor Neigung in Bearbeitungsrichtung basieren auf umfangreichen Analysen. Eine hohe Gefährdung bedeutet, dass es in diesem Schlagbereich wiederholt zu Abträgen kommt. Die Höhe des Abtrages selbst kann aber bei angepasster Fruchtfolge (Verzicht auf Reihenfrüchte) und angepasster Bodenbearbeitung (Pflugverzicht) im Vergleich zu anderen Schlägen gering sein.

Der Entscheidungsbaum kann auch zur Prognose des Auftretes von Bodenabträgen in Saatrillen verwendet werden. Die Saatrillen verlaufen parallel zu den Fahrspuren. Die Gefährdung der Fläche hängt demnach von den gleichen Faktoren wie die Erosionsaktivität in Fahrspuren ab. Die Dauerbeobachtung zeigt: Überall dort wo Erosion in Saatrillen auftritt, fand auch zu einem anderem Zeitpunkt Fahrspurerosion statt. Die Erosion in Saatrillen wird aber vielmehr von der Anbaukultur gesteuert. Beim Anbau von Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln treten diese Systeme häufiger auf als bei Getreide und Raps. Durch eine Kalibrierung und Integration der Anbaukulturen kann dementsprechend mit dem Modell auch die Erosionsaktivität in Saatrillen prognostiziert werden.

2.4.3.5 Teilmodell „Erosion im Vorgewende“

Zur Beschreibung der linearen Erosionsaktivität in Vorgewenden müssen die Prädiktoren aus dem Submodell Fahrspurerosion und aus dem Submodell Tiefenlinienerosion miteinander kombiniert werden. Die Bearbeitungsrichtung, die Neigung in Bearbeitungsrichtung, aber auch die Konvergenz steuern das Abtragsrisiko in Vorgewenden.

In den Vorgewenden treten häufig und verstärkt Erosionsformen in Bearbeitungsrichtung auf, wie zum Beispiel Abtrag in Fahrspuren oder in Bearbeitungsgrillen. Im Untersuchungsgebiet Lamspringe liegen insgesamt 11 der 25 Vorgewende in Tiefenlinienbereichen. Hier bilden

sich besonders häufig Erosionsformen. Das oberflächlich abfließende Wasser sammelt sich aufgrund der Hangform. Selbst geringe Hangneigungen in Bearbeitungsrichtung reichen in Vorgewenden mit Tiefenliniencharakter aus, um Bodenabtrag zu initiieren.

Der Entscheidungsbaum zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeit von Bodenabtrag im Vorgewende ist auf Basis von räumlichen Analysen der Vorgewende entstanden. Wie Abb. 31 zeigt, werden drei Prädiktoren für den Entscheidungsprozess benötigt.

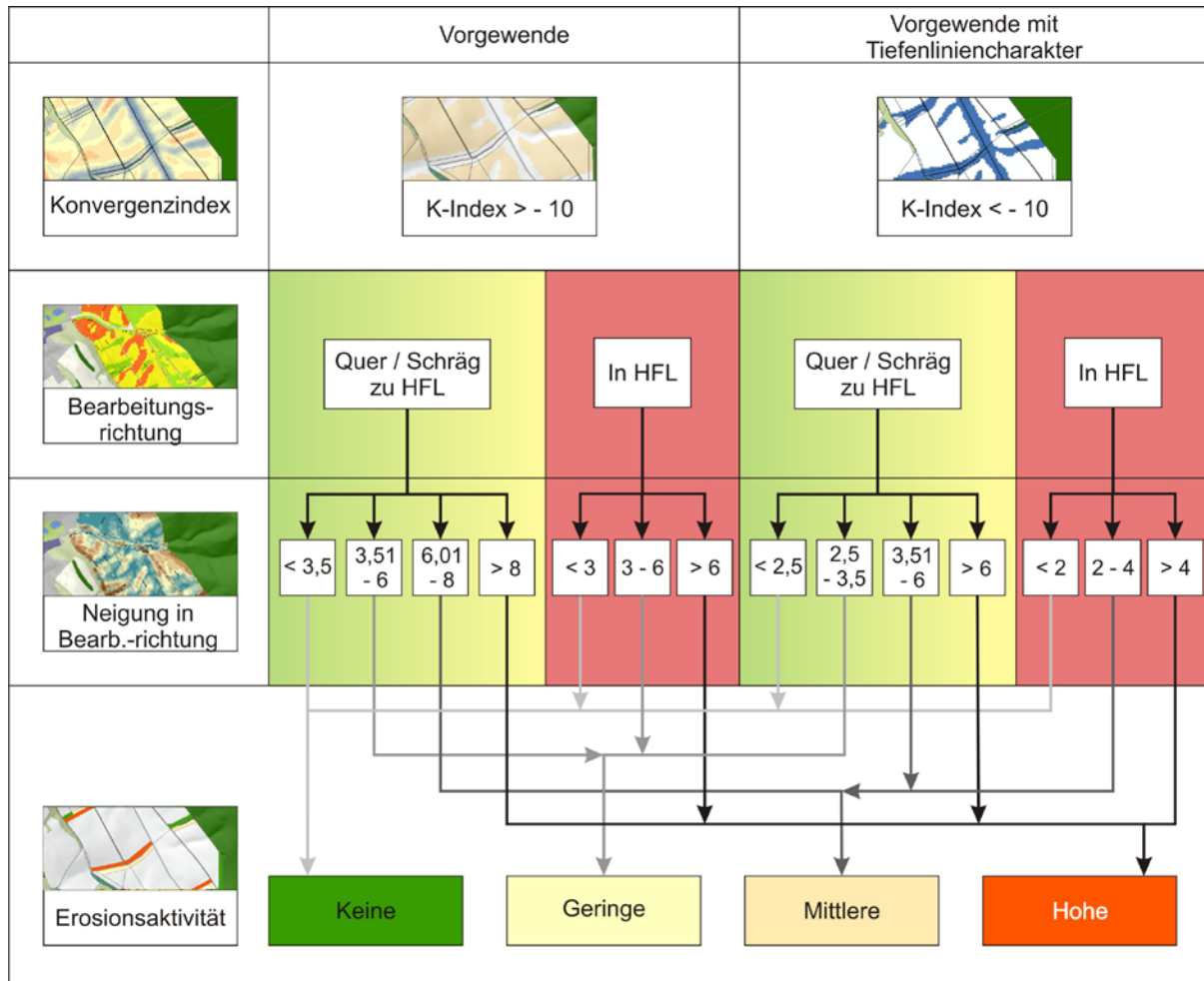


Abb. 31: Entscheidungsbaum zur Prognose der Erosionswahrscheinlichkeit im Vorgewende

Als erster wichtiger Indikator fließt der Konvergenzindex nach CONRAD (1998) in den Entscheidungsprozess ein. Durch diesen werden die Vorgewende mit Tiefenliniencharakter aus der Gesamtheit der Vorgewende selektiert.

Der zweite Faktor ist die Bearbeitungsrichtung. Quer zur Hangfalllinie angelegte Vorgewende weisen im Mittel eine geringere Erosionsaktivität auf. Entweder liegen diese Vorgewende am Oberhang oder am Hangfuß. Am Oberhang ist die Fließlänge in Hangfallrichtung sehr gering, entsprechend der Breite der Vorgewende, also im Mittel etwa 25 m. Hier sammelt sich kaum oberflächlich abfließendes Wasser. Die Vorgewende am Hangfuß fungieren meist als Depositionsräume. Schräg bearbeitete Vorgewende haben eine geringere Erosionsaktivität als in Hangfallrichtung bearbeitete.

Die Bearbeitungsrichtung fließt auch im dritten Prädiktor des Entscheidungsbaumes, der Neigung in Bearbeitungsrichtung, ein. Wenn ein Vorgewende quer bearbeitet wird, erreicht

dieser Prädiktor nur in Ausnahmefällen Werte über 2 %. Der Entscheidungsbaum weist hierfür keine Gefährdung der Vorgewende durch Bodenabtrag aus.

Durch den Zusammenhang zwischen dem zweiten und dem dritten Prädiktor können im Entscheidungsbaum die Bearbeitungsrichtungen quer und schräg zur Falllinie im Entscheidungsbaum zusammengefasst werden. Bei Schrägbearbeitung erreicht der Prädiktor Neigung in Bearbeitungsrichtung höhere Werte, als bei Querbearbeitung. Je höher der Wert ist, desto größer ist das Erosionspotential. Die Schwellenwerte können durch Auswertungen der Daten der 68 Vorgewende in den UG Barum und Lamspringe abgeleitet werden. Die Erosionsaktivität differenziert sich auf Basis der Schwellenwerte in die Stufen keine, geringe, mittlere und hohe Aktivität.

Bei Bearbeitung in Hangfalllinie setzt Erosion auch bei geringeren Neigungen ein. Die Bearbeitungsspuren führen zur Kanalisierung des oberflächlich abfließenden Wassers und damit zu linearer Erosion. Deswegen sind die Schwellenwerte für den Prädiktor Neigung in Bearbeitungsrichtung bei Bearbeitung in Hangfalllinie in allen Fällen kleiner als bei der Quer- bzw. Schrägbearbeitung.

2.4.3.6 Teilmodell „Erosion durch Zuschusswasser“

Mit Hilfe des Submodells Erosion durch Zuschusswasser lassen sich Gebiete auf Acker-schlägen mit Abtrag durch Fremdwasser von anderen Ackerschlägen ausweisen. Basis dieses Submodells sind die Auswertungen der Dauerbeobachtung, der Entscheidungsbaum Gewässeranschluss von Ackerflächen und das in Kapitel 3 vorgestellte Modell zur Prognose des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen (MOGWAF).

Bei der Analyse der Übertrittsstellen von Erosionsformen und der daraus resultierenden Erosion fällt auf, dass das Zuschusswasser in den überwiegenden Fällen entweder aus erosionsaktiven Tiefenlinien oder aus Vorgewenden mit mittlerem oder hohem Erosionspotential stammt. Tab. 7 fasst die Ergebnisse der Übertritte von Feinerde für das Gebiet Lamspringe zusammen.

Prognostizierte Erosionsaktivität	Erosionsaktive Tiefenlinien (n=15)			Vorgewende (n=21)		
	Gering	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Hoch
Anzahl	7	1	7	3	10	8
Davon mit Übertritt auf Nachbarparzelle	1	0	3	0	1	1
Davon mit Übertritt in Flüsse, Straßen, Grünland, etc.	3	1	4	2	3	1
Anteil mit Übertritt	57 %	100 %	100 %	66 %	40 %	25 %

Tab. 7: Durch Zuschusswasser betroffene Schlagteile im Gebiet Lamspringe

In Lamspringe führten bislang insgesamt 80 % der erosionsaktiven Tiefenlinien zum Übertritt von Feinerde in benachbarte Parzellen oder anders genutzte Bereiche (Flüsse, Grünland, Straße). Je höher die prognostizierte Erosionsaktivität der Tiefenlinien, desto

wahrscheinlicher ist auch der Übertritt. Auch bei den Vorgewenden zeigen die Daten, dass es hier zur Bündelung des Wassers und damit häufig zu Übertritten kommt. Lediglich vier im Gebiet beobachtete Übertrittsstellen können nicht mit einer erosionsaktiven Tiefenlinie oder einem Vorgewende verknüpft werden. Hierbei handelt es sich in zwei Fällen um flächenhafte Erosionsformen, die großflächig zum Übertritt von oberflächlich abfließendem Wasser geführt haben. Zwei weitere Systeme führten zum Übertritt, die selbst durch Zuschusswasser initiiert worden sind.

Aus den Erkenntnissen des Übertrittsgeschehens lässt sich ein Modell erstellen, das

- Flächen ausweist, die durch Zuschusswasser von Ackerflächen betroffen sind.
- kleinflächig Bereiche mit einem hohen Übertrittsrisikos ausweist.
- zur Planung von kleinflächigen Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz eingesetzt werden kann.

Das Modell basiert auf der topologischen Überschneidung der erosionsaktiven Tiefenlinien und der erosionsgefährdeten Vorgewende mit den Schlaggrenzen. Dadurch können die Übertrittsstellen sehr genau räumlich vorhergesagt werden. Durch die Werkzeuge der hydrologischen Modellierung werden die Wirkungsgebiete des Zuschusswassers abgegrenzt. Die Erosionsaktivität durch Zuschusswasser hängt von der Aktivität in der Tiefenlinie bzw. im Vorgewende ab. Je höher das Erosionspotential ist, desto mehr Zuschusswasser gelangt auf den tiefer gelegenen Schlag und desto höher sind auch die Abträge. Die Werte aus Lamspringe zeigen darüberhinaus, dass die Erosionsgefährdung durch Zuschusswasser aus Tiefenlinien höher ist als die durch Zuschusswasser aus den Vorgewenden. Auf Basis dieser Zusammenhänge lässt sich dann den betroffenen Gebieten eine Erosionsaktivität durch Zuschusswasser zuweisen.

2.4.4 Anwendungsmöglichkeiten der Teilmodelle

Erosion in Tiefenlinien

Anhand der prognostizierten Erosionsaktivität der Tiefenlinien lässt sich die Priorität der Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Eindämmung von Tiefenlinienerosion ableiten. Eine Maßnahme in einer Tiefenlinie mit hoher Erosionsaktivität ist effektiver als eine Maßnahme in einem Bereich mit geringer Aktivität. Vor allem in Kombination mit MOGWAF, das erosionsaktive Tiefenlinien auf ihr Potential zum Eintrag von Feinerde in Gewässer untersucht, lässt sich eine effektive Maßnahmenplanung in Tiefenlinien betreiben, die einen Beitrag zum Gewässer- und Bodenschutz liefert.

Erosion in Fahrspuren

Mit Hilfe des Entscheidungsbaumes zur Prognose der Erosionsaktivität in Fahrspuren lassen sich Flächen prognostizieren, auf denen Maßnahmen zur Eindämmung der Erosion in Fahrspuren sinnvoll sind. Die Fahrgassen können dadurch genau dort intervall- oder vollbegrünt werden, wo das Risiko des Abtrages am größten ist. Damit lässt sich Saatgut sparen und den Zwiewuchsanteil verringern.

Erosion im Vorgewende

Der Entscheidungsbaum zur Prognose des Erosionspotentials im Vorgewende kann die Priorität von Maßnahmen im Vorgewende zum Schutz vor Bodenerosion bestimmen. Als mögliche Maßnahmen können Hangverkürzungen, die Anlage von Querfurchen und Einlaufschächten oder die Teilung der Schläge dienen. Weitere Maßnahmen wären Untersaaten oder die Intervall- bzw. Vollbegrünung der Fahrgassen. Von einer Änderung der Bearbeitungsrichtung im Vorgewende, als Maßnahme zum Erosionsschutz, ist in der Regel abzusehen. Dieses würde bedeuten, dass die Bearbeitungsrichtung im Hauptfeld auch geändert wird. Dadurch könnte hier das Erosionspotential ansteigen.

Erosion durch Zuschusswasser

Durch das Teilmodell zur Bestimmung von Übertrittsstellen und dem Einfluss von Zuschusswasser lassen sich die über die Schlaggrenzen hinweggehenden Beziehungen von Erosionssystemen bestimmen. Es hilft dabei festzustellen, wo Zuschusswasser auftritt und wo Maßnahmen zur Unterbindung des Übertritts Sinn machen.

2.5 Ergebnisse der Erosionsmodellierung mit LINERO in Niedersachsen

Dieser Teil der Arbeit stellt die Ergebnisse des Modells LINERO für die Untersuchungsgebiete der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen vor. Das Modell ist durch Analysen in den Gebieten Lamspringe und Barum erstellt worden. Diese Ergebnisse spiegeln also die Qualität der Kalibrierung wider.

Eine Validierung ist durch die Anwendung in den drei Gebieten mit elfjährigen Beobachtungsreihen Klein Ilde, Nette und Küingdorf durchführbar. Auf Basis dieser Datenreihe ist eine sinnvolle Verifizierung der Modellergebnisse möglich. In den Gebieten Adenstedt, Brüggen und Hilprechtshausen ist hingegen die Datenreihe für eine Validierung zu kurz.

2.5.1 Modellergebnisse für das Gebiet Lamspringe

2.5.1.1 Verbreitung der Erosion im UG Lamspringe

Die Ergebnisse der Kartierung und der Modellierung im Gebiet Lamspringe werden in Abb. 32 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Gefährdung durch lineare Erosion lokal stark variiert. Obwohl wichtige erosionsbeeinflussende Faktoren, wie der Boden, der Niederschlag und die Fruchtfolge in diesem Gebiet keine großen Variationen aufweisen, differiert der Abtrag durch lineare Erosion räumlich. Die Faktoren Relief und Bewirtschaftungsrichtung beeinflussen Lage und Auftretswahrscheinlichkeit von linearen Erosionsformen entscheidend und bestimmen das Muster des Abtrages. Die Prognose mit LINERO gibt diese räumliche Differenzierung im Allgemeinen wieder. Hotspots der linearen Erosionsaktivität werden erkannt und ausgewiesen. Die Zuordnung zu den Prozesskomponenten stimmt mit den Kartierergebnissen überein.

Trotzdem kommt es in einigen Schlagbereichen zu Abweichungen zwischen der Messung und der Prognose durch das Modell. Folgend sollen durch die Diskussion der Abweichungen die Modellschwächen erkannt und erörtert werden. Die Analyse findet gesondert für die Ergebnisse der einzelnen Submodelle statt.



Abb. 32: Vergleich der Kartier- und Modellerggebnisse im UG Lamspringe

Eine Darstellung und zusammenfassende Beurteilung der Qualität der Vorhersagen erfolgt in Abb. 33. Dabei wird nach den einzelnen Formtypen der linearen Erosion bzw. Submodellen differenziert.




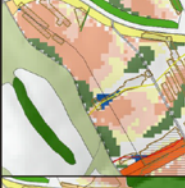
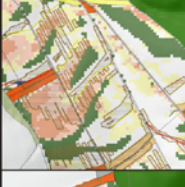


Schlag	Flächen ohne linearen Abtrag	Erosionsaktive Tiefenlinien (TL)	Fahrspurerosion (FE)	Vorgewende (VG)	Erosion durch Zuschusswasser	Fazit
	Prognose: Kein Abtrag im Zentrum und am N.-rand Beobachtung: Zentrum richtig N.-rand falsche Prognose	Prognose: 4 TL, 2 x hohe 2 x mittlere Erosionsaktivität (EA) Beobachtung: stimmt mit Prognose überein	Prognose: Hohe EA im W und O Beobachtung: stimmt mit Prognose überein	Prognose: im W EA mittel; im O keine EA Beobachtung: im W EA gering im O richtige Prognose	Prognose: kein Zuschusswasser Beobachtung: Zuschusswasser von Straße im W. nicht abgebildet	Die Erosion wird insgesamt gut lokalisiert und semi-quantitativ eingestuft.
	Prognose: Kein Abtrag im O und am S.-rand Beobachtung: O richtig S falsch.	Prognose: 1 TL, 1 x geringe EA Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: Geringe - hohe EA Beobachtung: nur selten Erosion in Fahrsuren	Prognose: Beide mittlere EA Beobachtung: südliches VG stärker betroffen	Prognose: Zuschusswasser im VG im S. Beobachtung: Übertritt nachgewiesen	Schlag ist selten von Abtrag betroffen, jedoch lokal begrenzte hohe Abträge durch Zuschusswasser möglich.
	Prognose: Rücken im Zentrum Beobachtung: Rücken nur teilweise ohne Erosion	Prognose: keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: hohe EA im N, geringe EA im S Beobachtung: hoher Abtrag im N, mittlerer Abtrag im S	Prognose: Hohe EA Beobachtung: Beide VG stark von Abtrag betroffen	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Schlag ist erosionsaktiv, hohe Abträge in Fahrsuren und im Vorgewende.
	Prognose: nur kleine Teile ohne Abtrag Beobachtung: Prognose richtig, andere Bereiche auch kein Abtrag	Prognose: 3 TL Beobachtung: EA wird richtig dargestellt	Prognose: hohe EA Beobachtung: kaum FE festgestellt. Fehler im Richtungsmodell	Prognose: Hohe und niedrige EA Beobachtung: VG im S stärker betroffen, richtige Prognose	Prognose: Übertritte an den TL Beobachtung: Übertritte nachgewiesen	Schlag ist erosionsaktiv, Abträge in Fahrsuren und im Vorgewende überwiegen.
	Prognose: Rücken ohne Abtrag Beobachtung: Prognose richtig	Prognose: 4 TL mit geringer EA Beobachtung: TL-Erosion wird richtig prognostiziert	Prognose: geringe - hohe EA Beobachtung: Erosion in FS wird genau lokalisiert	Prognose: Hohe und mittlere EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: kein Zuschusswasser Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Schlag ist erosionsaktiv, die Prognosen sind in TL, Fahrsuren und im Vorgewende zutreffend.
	Prognose: Schlag flächendeckend von Erosion gefährdet. Beobachtung: Prognose richtig	Prognose: 1 TL mit hoher EA Beobachtung: EA wird richtig dargestellt	Prognose: geringe EA Beobachtung: Bislang keine FE festgestellt	Prognose: Hohe und mittlere EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: kein Zuschusswasser Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Schlag ist erosionsaktiv in TL, im VG, und durch flächenhaft-linienhafte Systeme auch auf der gesamten Fläche.
	Prognose: Auf Rücken kein lin. Abtrag Beobachtung: Prognose richtig. teilweise Startpunkte der lin. Formen	Prognose: 1 TL mit mittlerer EA Beobachtung: TL bislang nur als Sedimentationsraum aufgetreten	Prognose: geringe EA Beobachtung: Erosion in FS wird genau lokalisiert	Prognose: Hohe und mittlere EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: keine Zuschusswasser Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Schlag ist erosionsaktiv in den FS in Richtung TL. Aufgrund der nur dreijährigen Messreihe nur begrenzt belastbare Ergebnisse.

Abb. 33: Vergleich der kartierten und der modellierten linearen Erosion am Beispiel einzelner Schläge im UG Lamspringe

Für das UG Lamspringe weist das Modell LINERO etwa 17 % der Fläche als Bereich ohne linearen Abtrag aus. Für 95 % dieser Fläche ist diese Einstufung korrekt.

2.5.1.2 Prognose der Erosionsaktivität und Höhe der gemessenen Abträge

Fahrspurerosion

Im UG Lamspringe weist das Submodell zur Prognose der Fahrspurerosion für 56 % der Fläche Aktivität aus. Tab. 8 zeigt das Ergebnis nach Klassen differenziert auf Zellenebene.

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen [n]	4052	1978	1461	1663
Flächenanteil [%]	44,3	21,6	16,0	18,1
Mit Abtrag [n]	418	276	332	561
Anteil mit Abtrag [%]	10,32	13,95	22,72	33,73

Tab. 8: Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in Lamspringe

Auf der als erosionsaktiv charakterisierten Fläche trat nicht überall Fahrspurerosion auf. Je höher die prognostizierte Erosionsaktivität ist, desto höher ist aber auch der Anteil der tatsächlich betroffenen Fläche. Das Risiko des Auftretes von Fahrspurerosion wird dementsprechend durch das Modell gut wiedergegeben. Der hohe Anteil an Fläche ohne tatsächlich aufgetretene Fahrspurerosion ist damit zu begründen, dass nicht auf jedem Pixel tatsächlich eine Fahrspur liegt. So beschreibt das Modell das Risiko des Auftretes, wenn an dem Punkt eine Fahrspur liegt. Für die Pixel auf denen Abtrag gemessen wurde, fasst Abb. 34 wichtige statistische Kennwerte im Box-Plot-Diagramm zusammen.

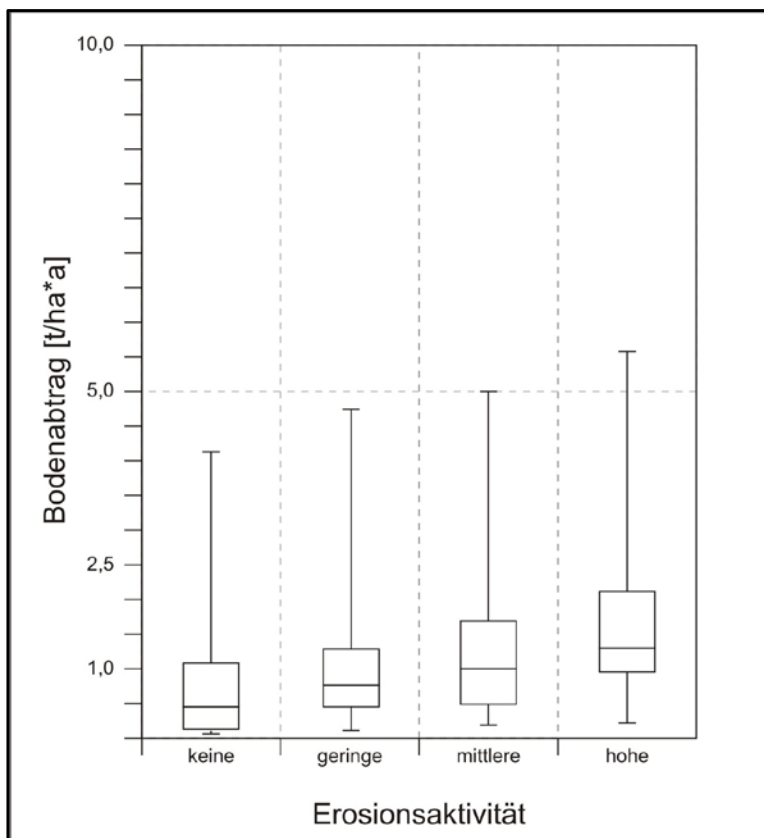


Abb. 34: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Lamspringe

Abb. 34 zeigt, dass mit steigender prognostizierter Erosionsaktivität auch alle Kennwerte des Bodenabtrages auf den Pixeln ansteigen. Es ist ein guter Zusammenhang zwischen der Prognose und dem gemessenen Abtrag festzustellen. Die starke Streuung zeigt aber an, dass der Prozess noch von weiteren Faktoren gesteuert wird, die nicht im Entscheidungsbaum berücksichtigt werden. Aufgrund des hohen Anteils an Werten ohne gemessenen Abtrag ist der Zusammenhang nicht signifikant (Signifikanztest nach Kruskal & Wallis, 99 % Signifikanzniveau).

In allen Stufen kommen Fälle vor, die der Prognose widersprechen. So tritt auch in der Stufe „keine Erosionsaktivität“ in 10 % der Fälle Fahrspurerosion auf. In einigen Bereichen, für die eine hohe Aktivität prognostiziert wird, konnte bislang kein Abtrag in Fahrspuren nachgewiesen werden. Die Abweichungen haben folgende Ursachen:

- 45 % der Fläche werden erst seit drei Jahren beobachtet. Die Messreihe ist nicht ausreichend für einen umfassenden Vergleich.
- Die Modellierung mit LINERO führt nicht zu einer präzisen Verortung der Fahrspuren. Das Modell sagt für eine Fläche die Erosionsaktivität in Fahrspuren voraus, wenn sich dort tatsächlich eine befindet. Da Fahrspuren jedoch nur einen kleinen Teil des Schlages (ca. 5 %) einnehmen, ist auch die kartierte Erosion lokal beschränkt. Auch durch die im Modell berücksichtigte Messungenauigkeit (16 m) kann keine komplette Übereinstimmung zwischen Kartierung und Modellierung erzielt werden. Es werden auch die Schlagbereiche als gefährdet ausgewiesen, auf denen sich keine Fahrspuren befinden. Eine genaue Verortung der Fahrspuren ist nicht möglich. Die Beobachtungen zeigen, dass sich die Lage der Gassen jedes Jahr um bis zu 5 m verschiebt.
- Eine weitere Fehlerquelle stellen Ungenauigkeiten in der Modellierung der Eingangsdaten dar. Bei der Abschätzung der Bearbeitungsrichtung wird für jeden Schlag nur eine Richtung ermittelt. Einige Schläge weisen aber auch eine an die Höhenlinien angepasste, also nicht gerade sondern gebogene, uneinheitliche Bearbeitungsrichtung auf. Diese stellt das Modell nicht nach. Bei solchen Fällen tritt eine Überschätzung der Erosionsaktivität auf.

Erosion in Tiefenlinien

In Lamspringe prognostiziert LINERO insgesamt 16 erosionsaktive Tiefenlinien. Davon haben drei kein Erosionspotential. Die Modellergebnisse stimmen mit den empirischen Daten überein. Ein Vergleich zwischen der kartierten Erosion und der Prognose zeigte bereits Kapitel 2.4.3.3.

Erosion im Vorgewende

Zur Bestimmung der Qualität der Prognose der Erosionsaktivität im Vorgewende vergleicht Abb. 35 für die 25 Vorgewende in Lamspringe die prognostizierte Erosionswahrscheinlichkeit mit der kartierten Erosion. Mindestens auf einem Vorgewende jeder Aktivitätsstufen trat bislang kein Bodenabtrag auf. Die Mediane und Maxima der aufgenommenen Erosion

bestätigen aber die Einstufung in die Klassen. Die Einstufung ist jedoch aufgrund der großen Varianz nicht signifikant (Kruskal & Wallis-Test, 5 % Signifikanzniveau). Nur wenn die Stufen „mittel“ und „hoch“ zusammengefasst werden, zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Einstufung und der gemessenen Erosion.

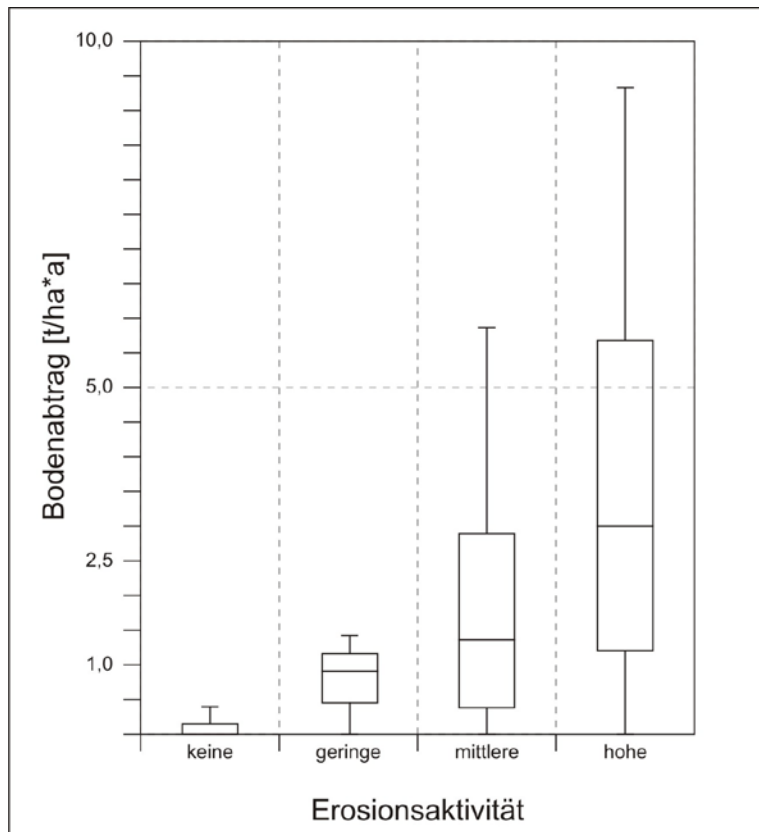


Abb. 35: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im UG Lamspringe

Erosion durch Zuschusswasser

Das Modell zur Prognose von Zuschusswasser weist für das Gebiet Lamspringe elf Übertrittsstellen aus. Von diesen Übertrittsstellen sind zehn durch die Kartierungen belegt. In acht der elf durch Zuschusswasser beeinflussten Gebiete trat bislang auch Bodenabtrag durch Zuschusswasser auf.

Folgerungen:

Insgesamt prognostiziert LINERO das Auftrettmuster und die Aktivität von linearer Erosion in Lamspringe gut. Der Vergleich der Ergebnisse der Teilmodelle zeigt eine große Übereinstimmung mit den Messungen. Fast überall wo Erosion auftritt sagt das Modell auch Erosionsaktivität vorher. Aufgrund der zum Teil kürzeren Messreihe gibt es aber auch Abweichungen, gerade hinsichtlich der inaktiven Flächen. Eine regionale Anpassung in diesem Modellteil kann zur Verbesserung der Ergebnisse führen. Die Übertragbarkeit des Modellansatzes würde aber eingeschränkt werden.

2.5.2 Modellergebnisse für das Gebiet Barum

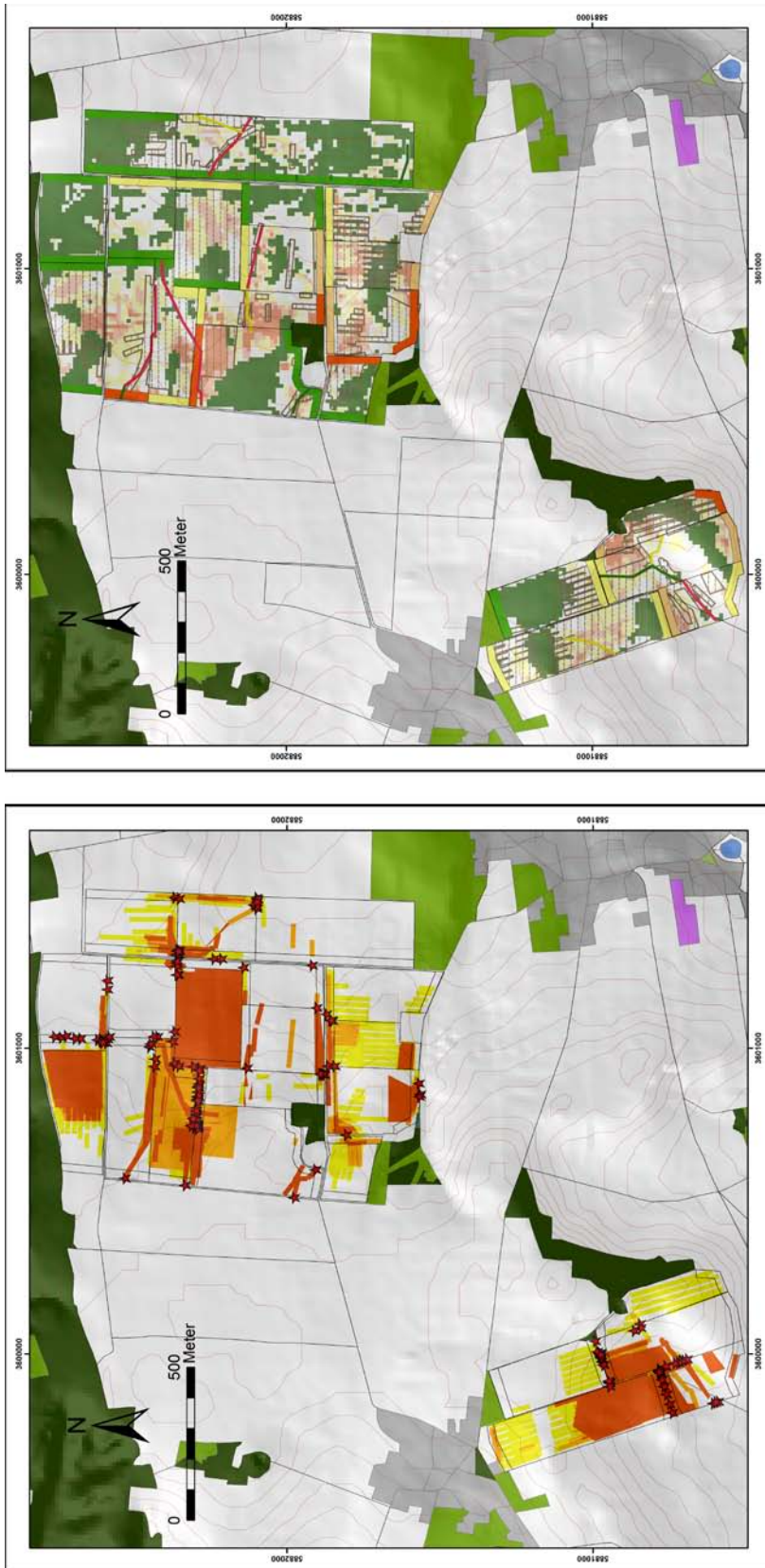
2.5.2.1 Verbreitung der Erosion im UG Barum

Der Vergleich der gemessenen und der modellierten linearen Erosion liefert für das Gebiet Barum die Abb. 26. Es zeigen sich dabei gute Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Submodelle und der tatsächlich aufgetretenen Erosion.

LINERO prognostiziert, dass gut 65 % der untersuchten Ackerfläche potentiell erosionsaktiv ist. Dieser Wert fällt geringer als in Lamspringe aus, wo 84 % der Fläche durch lineare Erosion gefährdet sind.

Das Ergebnis der Prognose stimmt auf knapp 93 % der Fläche mit den Beobachtungen überein. Auf 7 % der Fläche lautet das Ergebnis keine Erosionsaktivität, obwohl hier linearer Abtrag gemessen wurde. Dabei handelt es sich zum Teil um sehr flache Bereiche (Hangneigung < 2 %). Hier gehen Erosionsformen in Akkumulationsformen über. Auf einigen weiteren Flächen liegt ein Kartierfehler vor: Trotz hoher Divergenz soll im Scheitelpunktbereich eines Schlages lineare Erosion aufgetreten sein. Hydrologisch betrachtet kann das aufgenommene System aber nicht zusammenhängen.

Auf etwa der Hälfte der als erosionsaktiv charakterisierten Fläche trat bislang tatsächlich linearer Bodenabtrag auf. Die andere Hälfte der Fläche ist potentiell gefährdet, bislang konnte dies jedoch nicht nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass das Modell in Barum besser in der Lage ist, die erosionsaktive Fläche auszuweisen als in Lamspringe. Dort prognostiziert das Modell, dass 83 % der Fläche erosionsaktiv sind. Lediglich auf 22 % der Fläche trat tatsächlich Abtrag auf. LINERO ist dementsprechend für die Vorhersage der erosionsaktiven Fläche im Sandlössbereich gut geeignet.



Kartierergebnisse

Beobachtungszeitraum

- 2000 - 2010
- 2008 - 2010
- Übertritte

Bodenabtrag
t / ha in 11 (3) Jahren

- 0,2 - 10,0
- 10,1 - 20,0
- > 20

Institut für
Physische Geographie
und Landschaftsökologie

Modellergebnisse LINERO

- Kartierter linearer Abtrag
- Kein linearer Abtrag
- Zuschusswasser

Tiefenlinien
Erosionsaktivität

- keine
- geringe
- mittlere
- hohe

Fahrspuren
Erosionsaktivität

- keine
- geringe
- mittlere
- hohe

Vorgewende
Erosionsaktivität

- keine
- geringe
- mittlere
- hohe

Abbildung 36: Vergleich der Kartier- mit den Modellergebnissen im UG Barum

2.5.2.2 Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen Abträge

Erosion in Fahrspuren

LINERO stellt fest, dass über die Hälfte der Fläche des Untersuchungsgebietes Barum in Fahrspuren erosionsaktiv ist. Tab. 9 zeigt das Ergebnis nach Klassen differenziert auf Zellen-ebene (12,5 * 12,5 m)

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen [n]	5223	2050	938	596
Flächenanteil [%]	59,3	23,3	10,6	6,8
Mit Abtrag [n]	623	703	412	325
Anteil mit Abtrag [%]	11,93	34,29	43,92	54,53

Tab. 9: Prognoseergebnis des Fahrspurenerosionsmodells in Barum

Auch in Barum trat nicht auf der gesamten als erosionsaktiv prognostizierten Fläche Fahrspurerosion auf. Es gilt aber auch hier: Je höher die prognostizierte Erosionsaktivität ist, desto höher ist auch der Anteil der tatsächlich betroffenen Fläche. Abb. 37 gibt einen Überblick über die wichtigen statistischen Größen unterteilt nach prognostizierter Erosionsaktivität.

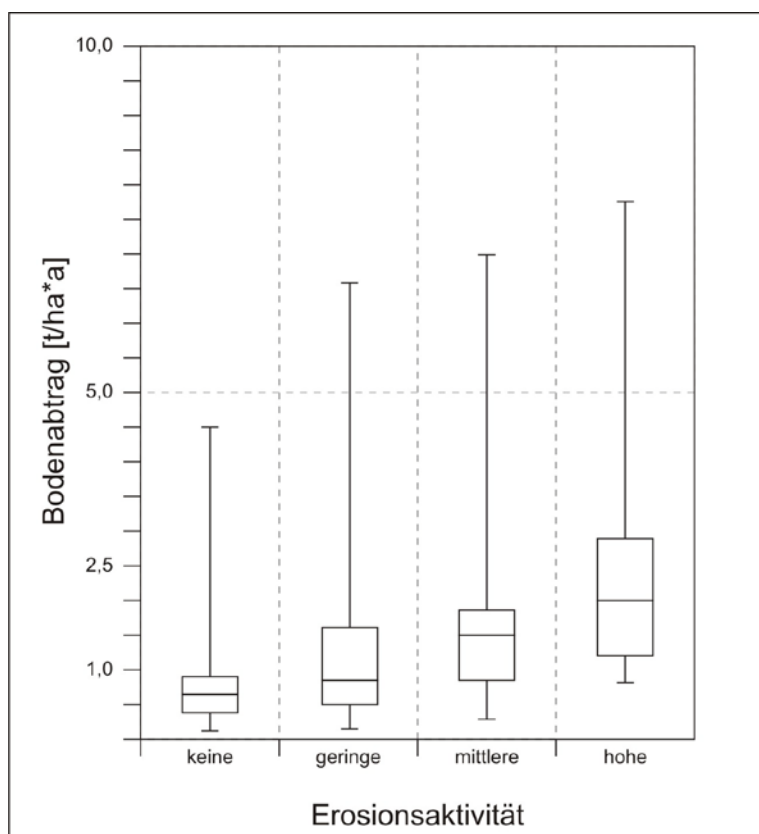


Abb. 37: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Barum

Die prognostizierten Erosionsaktivitätsstufen lassen sich in den Messwerten gut wiedererkennen. Je höher die prognostizierte Erosion ist, desto höher ist auch der gemessene Abtrag

in den Fahrspuren. Auch in Barum zeigt sich bei der Prognose der Fahrspurerosion, dass die Streuung der Werte der tatsächlich aufgenommenen Erosion in allen prognostizierten Stufen sehr groß ist. Das heißt, dass die Erosion noch von weiteren Faktoren beeinflusst wird. Die Varianz, gerade in der Stufe „keine Erosionsaktivität“, erklärt sich dadurch, dass auf drei Schlägen im Zeitraum der Aufnahme die Bearbeitungsrichtung verändert wurde. Die Prognose von LINERO geht von der aktuellen Bearbeitungsrichtung aus, die quer zur Hangfallrichtung verläuft. In den ersten Kartierjahren fand die Bearbeitung dieser Flächen in Hangfallrichtung statt. Zu diesem Zeitpunkt trat auch Erosion in Fahrspuren auf.

Erosion in Tiefenlinien

Im Untersuchungsgebiet Barum prognostiziert LINERO insgesamt 17 Tiefenlinien. Tab. 10 vergleicht die prognostizierte Erosionsaktivitätsstufe mit der tatsächlich kartierten Erosion.

Prognostizierte Erosionsaktivität		Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Tiefenlinien	[n]	7	4	0	5
Kartierter Abtrag	[t/ha*a]	0,0	1,8	0	4,5

Tab. 10: Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in Tiefenlinien im UG Barum

Weitere Tiefenlinienerosion trat in Barum nicht auf. Alle bekannten Konvergenzbereiche werden durch das Modell erkannt. Das Submodell zur Prognose der Erosionsaktivität in Tiefenlinien liefert für das Gebiet Barum valide und reproduzierbare Ergebnisse.

Erosion im Vorgewende

Die 46 Vorgewende im UG Barum weisen laut LINERO unterschiedliche Erosionsaktivitäten auf (Tab. 11).

Prognostizierte Erosionsaktivität		Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Vorgewende	[n]	17	13	10	6
Anteil	[%]	36,96	28,26	21,74	13,04

Tab. 11: Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion im Vorgewende im UG Barum

Eine statistische Auswertung zeigt, dass die Prognose der Erosionsaktivität in weiten Bereichen mit den Ergebnissen aus der Kartierung übereinstimmt. Abb. 38 stellt den tatsächlich kartierten Abtrag gruppiert nach der prognostizierten Erosionsaktivitätsstufe im Box-Plot-Diagramm dar. Der tatsächliche Abtrag in den Stufen geringe und mittlere Erosionsaktivität unterscheidet sich kaum voneinander. Die Unterteilung dieser Vorgewende ist statistisch nicht abgesichert. In der Stufe keine Erosionsaktivität ist ein extremer Ausreißer enthalten. Hier werden im jährlichen Mittel über 4 t/ha Bodenabtrag festgestellt. Dabei handelt es sich um ein Vorgewende, das durch Zuschusswasser beeinflusst wird. Da der Faktor

Zuschusswasser nicht in diesen Zweig des Entscheidungsbaums eingeht, ist die falsche Einstufung erklärbar.

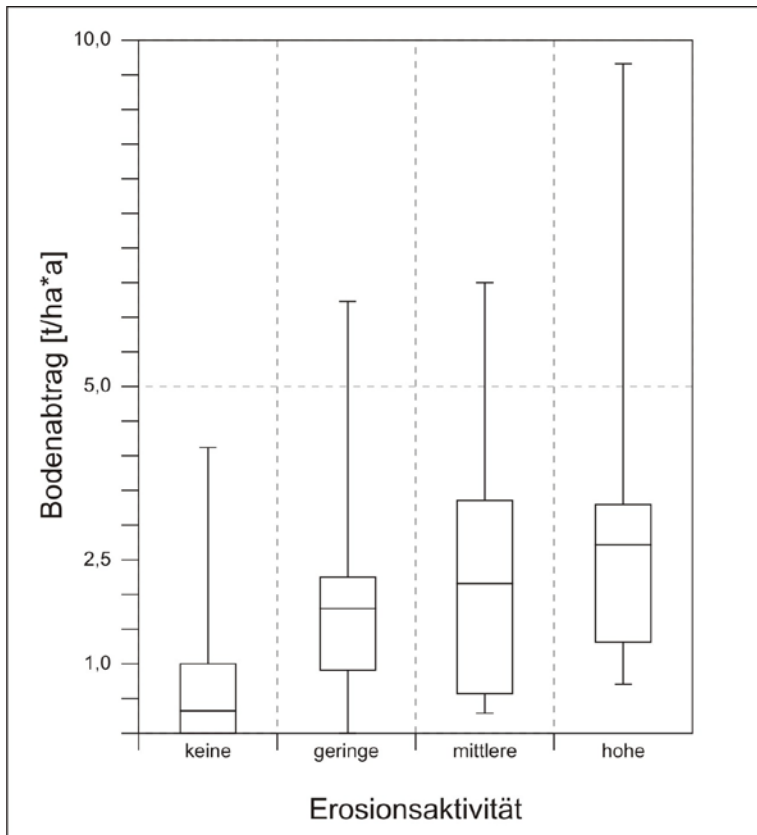


Abb. 38: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im UG Barum

Folgerungen:

Das Modell LINERO kann im UG Barum gut eingesetzt werden. Die Erosionsaktivität in Fahrspuren und in Tiefenlinien schätzt das Modell richtig ein. Die Ergebnisse des Submodells zur Prognose der Erosionsaktivität im Vorgewende stellen sich als Problem dar. Hier zeigt sich ein nur geringer Zusammenhang zwischen der prognostizierten Gefährdung und dem gemessenen Abtrag. Vor allem durch Zuschusswasser treten in Barum häufig höhere Abträge auf, als das Modell sie annimmt.

2.6 Validierung der Modellierung mit Hilfe von Kartierungsdaten aus weiteren Gebieten der Erosionsdauerbeobachtung

2.6.1 Modellergebnisse für das Gebiet Klein Ilde

Die Schläge des Gebietes Klein Ilde liegen alle auf einem Hang, der zum Flusse Lamme hin in südöstliche Richtung abfällt. Die Hangfallrichtung ist dementsprechend auf allen Schlägen gleich. Die Bearbeitungsrichtung variiert jedoch, etwa die Hälfte der Schläge wird in Hangfallrichtung, die andere genau quer zur Fallrichtung bewirtschaftet. Deshalb bietet sich dieses Gebiet besonders zur Validierung des Fahrspurmodells an.

2.6.1.1 Verbreitung der Erosion im UG Klein Ilde

Abb. 39 vergleicht die kartierte Erosion mit der modellierten linearen Erosionsaktivität im UG Klein Ilde in räumlicher Differenzierung. Die Kartierungen zeigen, dass in den elf Messjahren auf 47 % der Fläche lineare Erosion auftrat. In Hangfallrichtung bearbeitete Schläge sind flächendeckend von linearem Bodenabtrag betroffen. Auf den querbearbeiteten Schlägen traten auf der Hauptfläche kaum Erosionsformen auf, dafür aber in den Vorgewenden.

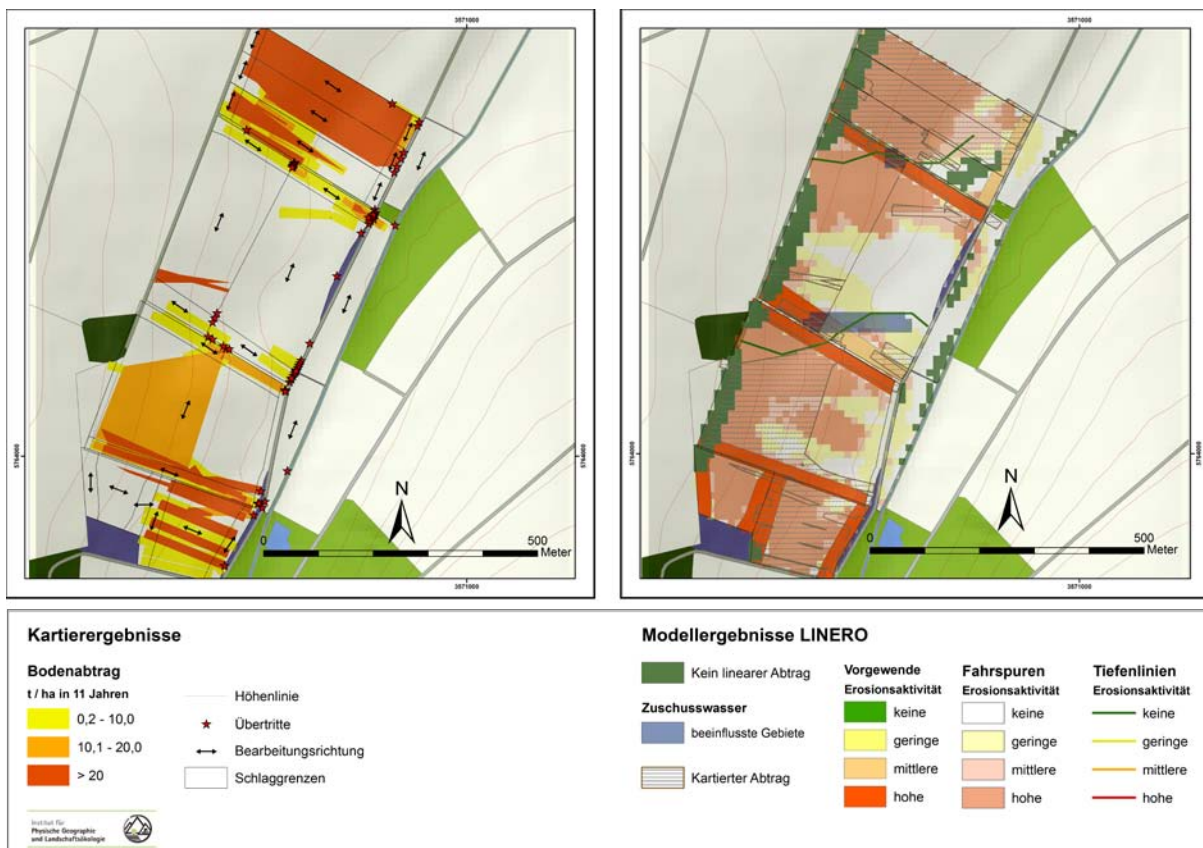


Abb. 39: Vergleich der Kartier- mit den Modellergebnissen im UG Klein Ilde

Die Ergebnisse der einzelnen Submodelle erläutert Abb. 40 auf Schlagbasis. Das Submodell zur Prognose von Flächen ohne lineare Erosion weist nur einen geringen Anteil der Fläche als nicht gefährdet aus. Auf etwa 11 % der Fläche ist keine lineare Erosion zu erwarten.

Die Prognose stimmt in 85 % der Fälle mit den Messergebnissen überein. Bei den Flächen mit einer falschen Prognose handelt es sich fast ausnahmslos um Flächen am Oberhang der Schläge. Hier ist der Fließweg kleiner als 50 m weshalb LINERO keine Erosionsaktivität ausweist. Tatsächlich sind diese Schlagteile aber häufig von Zuschusswasser von darüberliegenden Flächen beeinflusst. Das Zuschusswasser hat Erosionsformen initiiert, die den Vergleich der Kartier- mit den Modellergebnissen beeinflusst.

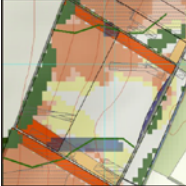
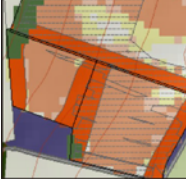
Schlag	Flächen ohne linearen Abtrag	Erosionsaktive Tiefenlinien (TL)	Fahrspurerosion (FE)	Vorgewende (VG)	Erosion durch Zuschusswasser	Fazit
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang und am südl. Hangfuss Beobachtung: Oberhang teilw. richtig, Hangfuss richtige Prognose	Prognose: 1 TL, keine Erosionsaktivität (EA) Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: Hohe EA bis zum Hangfuss Beobachtung: stimmt mit Prognose überein	Prognose: im W keine EA im O mittlere EA Beobachtung: im W kein Abtrag, im O geringe Abträge	Prognose: kein Zuschusswasser Beobachtung: Zuschusswasser vom Oberhang beobachtet	Die hohe Gefährdung der FS wird erkannt und richtig dargestellt. Die Abnahme der EA am Hangfuss wird richtig prognostiziert.
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: 2 TL, keine EA Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: Hohe im N. sonst geringe EA Beobachtung: kaum Abtrag im Bereich mit hoher EA	Prognose: Hohe - mittlere EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: Zuschusswasser im VG im S Beobachtung: Übertritt nachgewiesen	Schlag ist selten von Abtrag betroffen, jedoch hohe Abträge im Vorgewende. Prognose stimmt gut mit Beobachtung überein.
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: 1 TL, keine EA Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: hohe EA am Oberhang, geringe am UH Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: Hohe EA Beobachtung: Beide VG von Abtrag betroffen	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Schlag ist in den VG und in den Fahrspuren am Oberhang erosionsaktiv.
	Prognose: nur kleine Teile ohne Abtrag Beobachtung: Prognose richtig, Schlag großflächig von Abtrag betroffen	Prognose: Keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: Hohe EA Beobachtung: FE am Unterhang nachgewiesen, Oberhang war 7 Jahre Grünland	Prognose: Hohe EA Beobachtung: Kaum Erosion in den VG durch Querbearbeitung	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Schlag ist erosionsaktiv, hohe Abträge in Fahrspuren auf der Hauptfläche.

Abb. 40: Vergleich der Kartier- und Modellergebnisse auf Schlagbasis im UG Klein Ilde

2.6.1.2 Prognose der Erosionsaktivität und Höhe der gemessenen der Abträge

Fahrspurerosion

Tab. 12 stellt die Ergebnisse des Submodells zur Prognose der Erosionsaktivität in Fahrspuren für das Gebiet Klein Ilde vor. Mit steigender prognostizierter Erosionsaktivität nimmt auch der Anteil der tatsächlich betroffenen Fläche zu. Das Modell liefert damit plausible Ergebnisse für das Gebiet Klein Ilde und grenzt Gebiete mit dem Auftritt von Fahrspurerosion ein. Bei einem quantitativen Vergleich im Box-Plot-Diagramm zeigt sich, dass die von LINERO vorgenommene Einstufung bestätigt wird (Abb. 41). Die Klassifizierung ist statistisch signifikant (Kruskal & Wallis-Test, 5 % Signifikanzniveau).

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen	464	372	233	1035
Flächenanteil [%]	22,05	17,68	11,07	49,19
Mit Abtrag	25	30	28	331
Anteil mit Abtrag [%]	5,39	8,07	12,02	31,98

Tab. 12: Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells im UG Klein Ilde

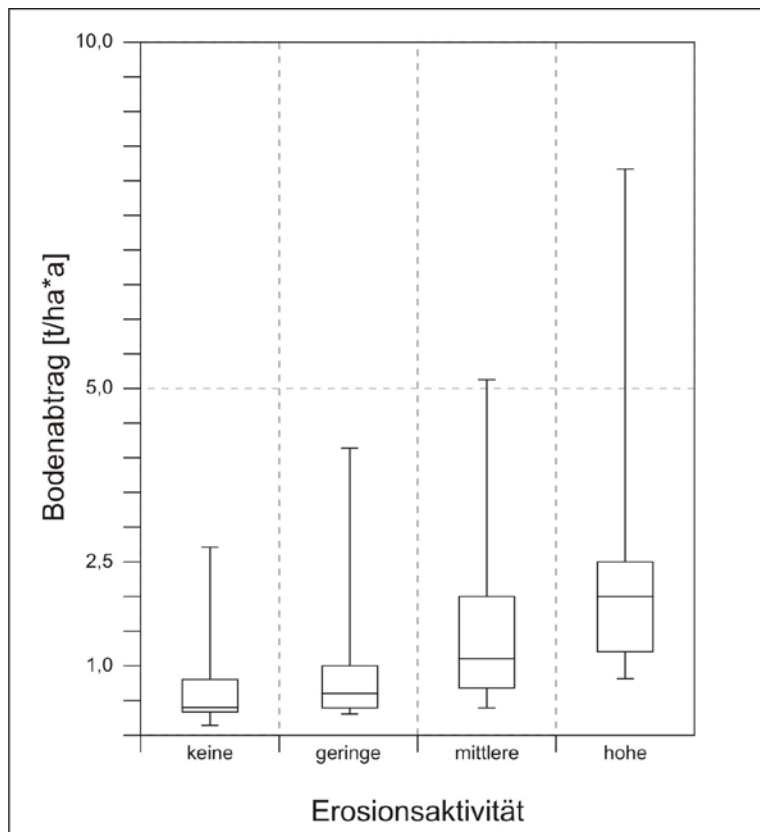


Abb. 41: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Klein Ilde

Erosion in Tiefenlinien

LINERO weist im Gebiet zwei Tiefenlinien auf. Das Modell stuft sie aber als nicht erosionsaktiv ein. Dieses Ergebnis bestätigt sich in den Ergebnissen der Kartierung. Bislang trat kein Bodenabtrag in Tiefenlinien im UG Klein Ilde auf. In einer prognostizierten Tiefenlinie tritt aber regelmäßig Deposition von Feinerde auf.

Erosion im Vorgewende

Die Ergebnisse des Modells zur Prognose der Erosionsaktivität in den Vorgewenden stellt Tab. 13 vor.

Prognostizierte Erosionsaktivität		Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Vorgewende	[n]	1	0	5	10
Anteil	[%]	6,25	0	31,25	62,5

Tab. 13: Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion im Vorgewende im UG Klein Ilde

Die Erosionsaktivität in Klein Ilde ist im Vergleich zu den Vorgewenden in Lamspringe und Barum größer. Die Prognose des Modells bestätigt dahingegen, dass nur die Stufen „mittlere“ und „hohe“ Erosionsaktivität in diesem Gebiet ausgewiesen werden. Die Einschätzung der Erosionsaktivität der Vorgewende deckt sich nicht mit den Ergebnissen der Kartierung. Im Vorgewende mit der Einstufung „keine Aktivität“ trat Erosion auf. Die Vorgewende mit mittlerer Aktivität haben einen höheren durchschnittlichen Jahresabtrag (1,3 t/ha*a) als die mit hoher Aktivität (1,2 t/ha*a). Gründe für die nicht zutreffende Einschätzung sind:

- Der Einfluss von Zuschusswasser auf Vorgewenden mit mittlerer Erosionsaktivität.
- Der Auftritt von Abtragsformen in Vorgewenden am Hangfuss, die nicht im Vorgewende selbst, sondern auf der Hauptfläche entstanden sind.
- Die insgesamt hohen Hangneigungen im Untersuchungsgebiet.

Folgerungen:

Die Ergebnisse aus Klein Ilde zeigen, dass das Modell zur Prognose der Fahrspurerosion gut funktioniert. Das Submodell zur Prognose von Erosion in Tiefenlinien sagt zutreffend voraus, dass keine erosionsaktiven Tiefenlinien im Gebiet vorkommen. Das Modell zur Prognose der Flächen, auf denen der Auftritt von linearer Erosion unwahrscheinlich ist, funktioniert gut, muss aber dahingehend angepasst werden, dass Zuschusswasser von anderen ackerbaulich genutzten Flächen am Oberhang mitberücksichtigt werden muss. Das Modell zur Prognose der Erosionsaktivität von Vorgewenden liefert dagegen in Klein Ilde keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

2.6.2 Modellergebnisse für das Gebiet Nette

2.6.2.1 Verbreitung der Erosion im UG Nette

Die Schläge des Gebietes Nette liegen alle auf einem Hang, der in südöstliche Richtung abfällt. Wie in Klein Ilde ist auch hier die Hangfallrichtung auf allen Schlägen gleich. Die Bearbeitung findet jedoch im Gegensatz zu Klein Ilde flächendeckend quer zur Fallrichtung statt. Dadurch entstehen in den Fahrspuren auf den Hauptflächen kaum Erosionsformen. Wie in Kapitel 2.2 bereits dargestellt, trat in Nette besonders in den Vorgewenden Erosion auf, da diese in Hangfallrichtung bewirtschaftet werden. Deswegen bietet sich dieses Gebiet besonders zur Validierung des Modells zur Prognose der Erosionsaktivität im Vorgewende an.

Abb. 42 fasst die Ergebnisse aller Submodelle zusammen und vergleicht diese mit den Kartierergebnissen der elfjährigen Messreihe.

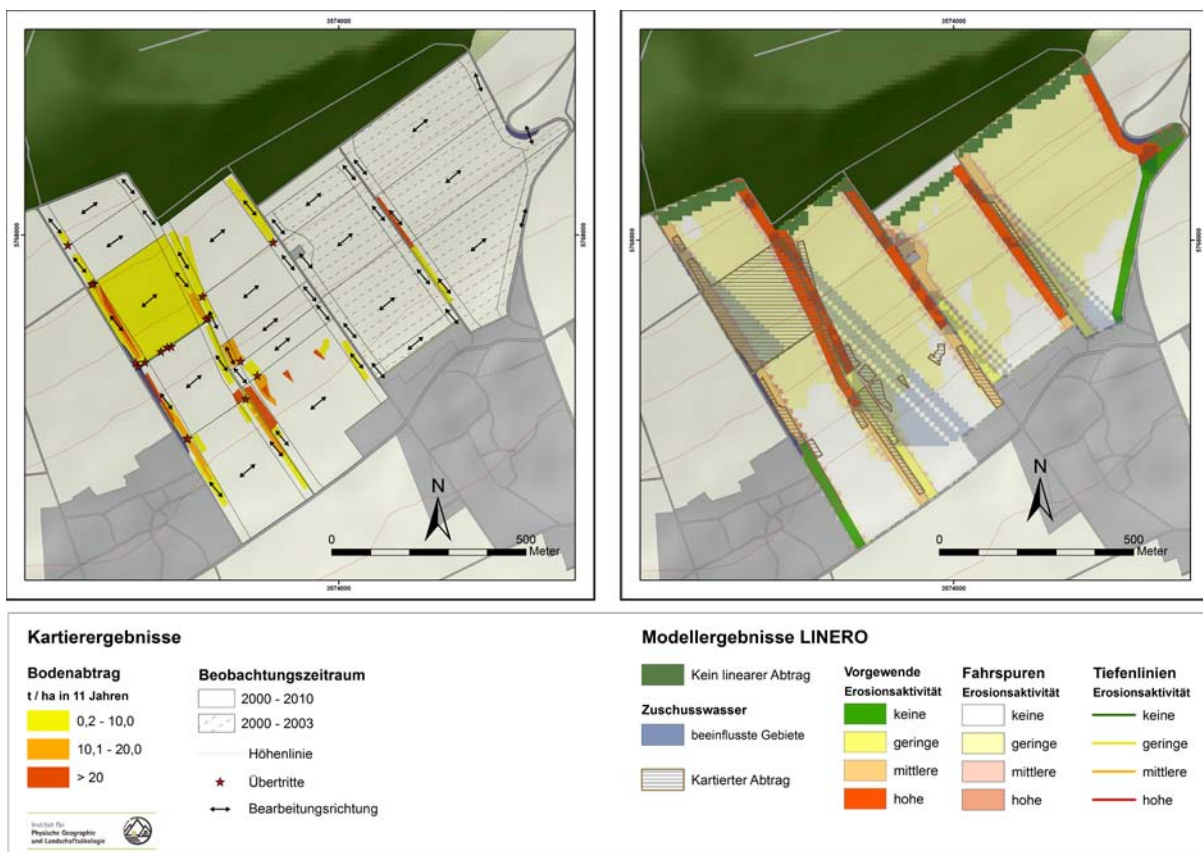


Abb. 42: Vergleich der gemessenen und der modellierten Erosion im UG Nette

LINERO prognostiziert für das Gebiet Nette, dass etwa 5 % der Fläche nicht erosionsaktiv sind. Die inaktiven Flächen liegen am Oberhang. Dort ist die Fließlänge kleiner als 50 m. Die Prognose trifft in 100 % der Fälle zu, da hier bislang keine lineare Erosion auftrat.

2.6.2.2 Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen

Erosion in Fahrspuren

Das Submodell zur Vorhersage der Fahrspurerosion weist für über 80 % der Fläche vom UG Nette keine oder einer geringe Erosionsaktivität aus (Tab. 14). In diesem Ergebnis spiegelt sich die konsequent durchgeführte Querbearbeitung der Flächen wider.

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen	1136	2876	450	382
Flächenanteil [%]	23,45	59,37	9,29	7,88
Mit Abtrag [n]	15	238	68	143
Anteil mit Abtrag [%]	1,32	8,27	15,11	37,43

Tab. 14: Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells im UG Nette

Die Ergebnisse der Kartierung unterstützen die Modellergebnisse weitgehend. Auf der Fläche mit der Stufe „keine Erosionsaktivität“ trat bislang auch faktisch keine lineare Erosion auf. Auf knapp 40 % der Fläche mit hoher Aktivität trat auch Fahrspurerosion auf. Die Ergebnisse ähneln den Verteilungen aus den anderen Untersuchungsgebieten. Damit zeigt sich die Eignung des Submodells auch in diesem Gebiet. Abb. 43 vergleicht den modellierten mit dem kartierten Bodenabtrag für alle Pixel auf denen Fahrspurerosion aufgetreten ist.

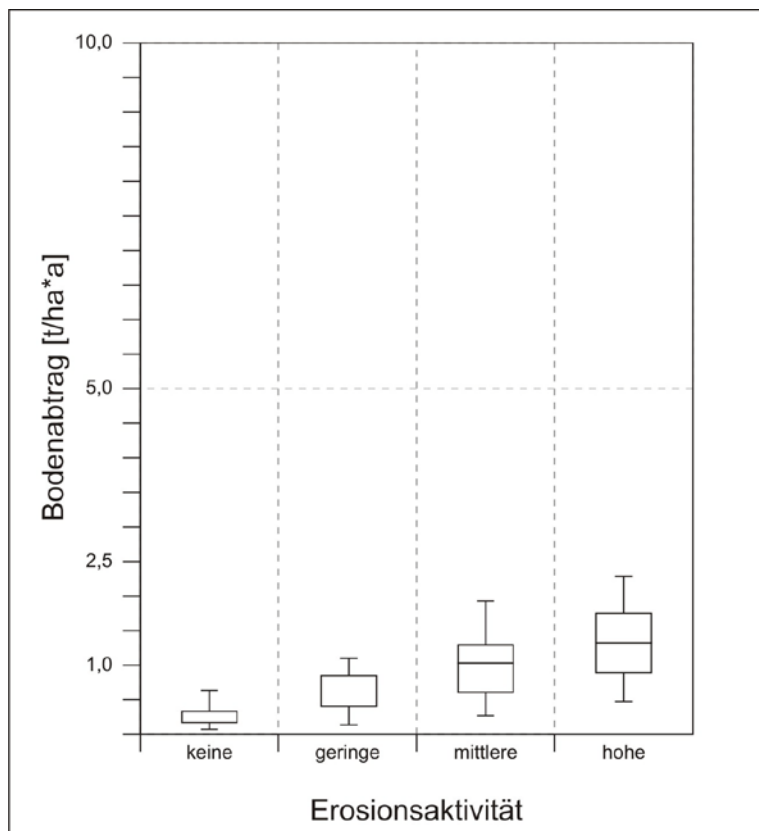


Abb. 43: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Nette

Der gemessene Bodenabtrag in Nette ist im Vergleich zu den anderen Gebieten wesentlich geringer. Die Streuung der Abträge innerhalb der prognostizierten Stufen fällt hier sehr klein aus. Das Modell eignet sich also auch in von Bodenabtrag weniger betroffenen Gebieten zur Differenzierung der Erosionsaktivität in Fahrspuren.

Erosion in Tiefenlinien

Das Modell LINERO prognostiziert in Nette keine Tiefenlinien. Das entspricht den Ergebnissen der Kartierungen im Rahmen der Dauerbeobachtung. Bislang fand kein Bodenabtrag in Tiefenlinien statt.

Erosion im Vorgewende

Die Ergebnisse des Teilmodells zur Prognose von Bodenabtrag im Vorgewende fasst Tab. 15 zusammen. Die statistischen Analysen zur Verifizierung der Prognose zeigen, dass die Modellergebnisse auch quantitativ zutreffen (Abb. 44).

Prognostizierte Erosionsaktivität		Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Vorgewende	[n]	2	5	10	16
Anteil	[%]	6,1	15,2	30,3	48,5

Tab. 15: Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in Vorgewenden im UG Nette

Das Modell prognostiziert für die Vorgewende am Oberhang, also den Bereichen mit hohen Hangneigungen, zumeist eine hohe Erosionsaktivität. Der Abtrag ist aber tatsächlich in den Vorgewenden am Mittel- und Unterhang höher. Deswegen weisen die Vorgewende in der Stufe „hohe Aktivität“ eine hohe Streuung auf. Durch den Übertritt von Erosionsformen von einem zum nächsten Vorgewende nimmt das Volumen des oberflächlich abfließenden Wassers zu. Dadurch verstärkt sich die erosive Wirkung des Abflusses (AHNERT 1996) und damit auch der Bodenabtrag. Das Submodell zur Abschätzung des Einflusses von Zuschusswasser sagt deshalb auch in Nette für den Bereich der Vorgewende Übertritte voraus.

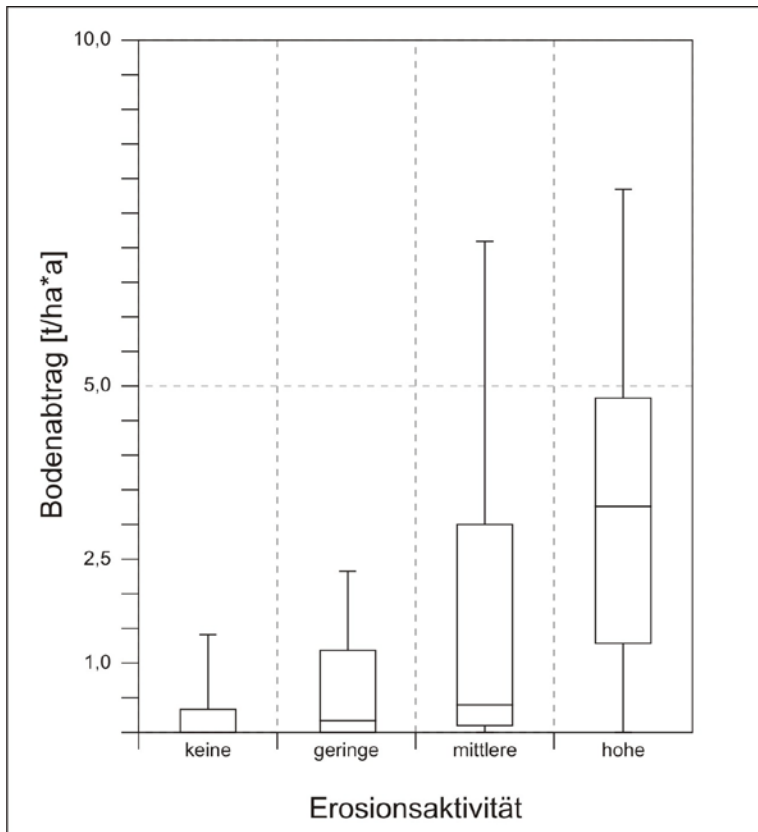


Abb. 44: Vergleich der kartierten Erosion in den Vorgewenden mit der Einschätzung durch LINERO im Gebiet Nette

Folgerungen:

Insgesamt sind die Ergebnisse des Modells LINERO im Gebiet Nette gut. Durch die konsequente Querbearbeitung auf allen Schlägen ist das Auftreten von linearen Erosionsformen selten und auch zumeist auf die Vorgewende beschränkt. Das Modell bildet diese Situation sehr gut ab.

Die Prognose der Erosionsaktivität in Vorgewenden kann im Gebiet Nette durch die Integration der Ergebnisse des Zuschusswassermodells noch verbessert werden. Nur durch die Kombination der Ergebnisse der beiden Submodelle liefert LINERO auch plausible Ergebnisse für die Vorgewende am Unterhang.

2.6.3 Modellergebnisse für das Gebiet Küingdorf

2.6.3.1 Verbreitung der Erosion im UG Küingdorf

Das Gebiet Küingdorf zeichnet sich durch seine Kleinparzellierung aus. Die Schläge haben eine durchschnittliche Größe von 2,6 ha und sind damit die kleinsten der Dauerbeobachtung. Dies beeinflusst das Erosionsgeschehen und somit auch das Ergebnis der Modellierung mit LINERO, wie Abb. 45 deutlich macht.

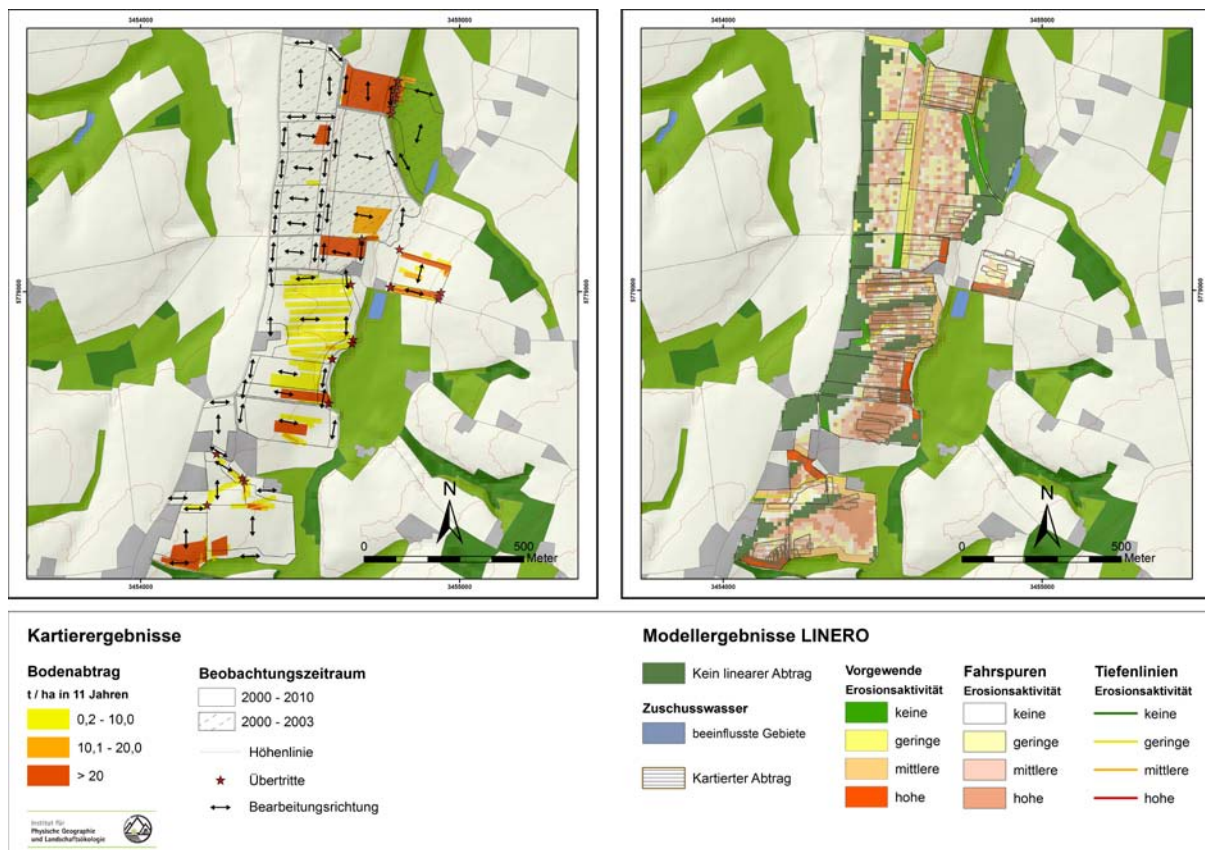


Abb. 45: Vergleich der gemessenen und der modellierten Erosion im UG Küingdorf

Auf Gebietsebene prognostiziert LINERO, dass 28 % der Fläche ohne lineare Erosion (Oberhang, flache Bereiche und Rücken) bleiben. Diese Prognose trifft auf 92 % der Fläche zu. Fehlerhafte Prognoseergebnisse konnten auf zwei Schlägen am Oberhang belegt werden. Hier trat Zuschusswasser auf. Ferner trat auf einem Rücken lineare Erosion auf, obwohl das Modell dies hier ausschließt. Eine regionale Anpassung des Schwellenwertes könnte hier zu einer Verbesserung des Modellergebnisses führen. Dies ist jedoch methodisch nicht sinnvoll, weil die Modelle dadurch nicht mehr regional übertragbar wären. Ein Vergleich der modellierten und der gemessenen Erosion auf Einzelschlagebene erfolgt in Abb. 46.

Schlag	Flächen ohne linearen Abtrag	Erosionsaktive Tiefenlinien (TL)	Fahrspurerosion (FE)	Vorgewende (VG)	Erosion durch Zuschusswasser	Sonstige Erosion
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang Beobachtung: Abtrag am Oberhang durch Zuschusswasser	Prognose: Keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: Geringe - mittlere Erosionsaktivität (EA) Beobachtung: FE nur im Vorgewende	Prognose: hohe EA Beobachtung: hohe Abträge im Vorgewende	Prognose: Zuschusswasser vom Oberhang Beobachtung: Zuschusswasser vom Oberhang beobachtet	Der Schlag ist vor allem im VG von Abtrag betroffen. Die Modellierung wird durch die Kartierung bestätigt.
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang und auf Rücken Beobachtung: Prognose am Oberhang richtig auf Rücken nicht	Prognose: 2 TL, geringe und mittlere EA Beobachtung: Abtrag im Bereich festgestellt, aber nicht als TL- E	Prognose: Geringe - hohe EA Beobachtung: Abtrag nachgewiesen	Prognose: im W keine EA im O mittlere EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Schlag ist in FS von Abtrag betroffen, am Oberhang keine Gefährdung. Prognose stimmt mit Beobachtung überein.
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: Keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: hohe EA am Unterhang. Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: im W keine EA im O hohe EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Prognose der Erosionswahr. wird durch die Kartierung bestätigt.
	Prognose: zwei Rücken ohne Abtrag Beobachtung: Prognose richtig	Prognose: 1 TL, geringe EA Beobachtung: Abtrag in TL festgestellt	Prognose: wechselnde EA Beobachtung: keine Erosion in FS aufgenommen	Prognose: im N hohe EA Beobachtung: Erosion in den VG nachgewiesen	Prognose: Zuschusswasser vom Oberhang Beobachtung: Übertritt nachgewiesen	Schlag ist im VG und in der TL erosionsaktiv. Modellierung wird durch die Kartierung bestätigt.
	Prognose: Kein Abtrag am Oberhang und auf Rücken Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: Keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: hohe EA im Süden Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: im N mittlere EA im S hohe EA Beobachtung: bestätigt die Prognose	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Schlag ist im Südteil erosionsaktiv. Modellierung wird durch die Kartierung bestätigt.
	Prognose: Kein Abtrag auf einem Rücken Beobachtung: Prognose wird bestätigt	Prognose: Keine TL Beobachtung: bislang keine Erosion in TL festgestellt	Prognose: geringe - hohe EA Beobachtung: nur geringe Abträge in FS	Prognose: mittlere EA Beobachtung: nur geringe Abträge in beiden VG	Prognose: Kein Zuschusswasser Beobachtung: keine Übertritte nachgewiesen	Prognose zeigt eine höhere Erosions-EA an, als bislang durch die Kartierung bestätigt wurde.

Abb. 46: Vergleich der Kartier- und der Modellergebnisse auf Schlagbasis im UG Küingdorf

2.6.3.2 Prognose der Erosionsaktivität und der Höhe der gemessenen Abträge im UG Küingdorf

Erosion in Fahrsuren

Die Ergebnisse des Submodells zur Prognose der Erosionsaktivität für das UG Küingdorf zeigt Tab. 16. Bei dem Vergleich der Prognoseergebnisse mit den Kartierdaten zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Gebiet Nette. Mit steigender Erosionsaktivität nimmt auch der mittlere kartierte Bodenabtrag zu. Das Niveau der Abtragswerte ist in Küingdorf auf dem Niveau von Nette. In der Klasse „hohe Erosionsaktivität“ wurde hier im Mittel ein Abtrag von 0,18 t/ha*a kartiert. Auch im Gebiet Küingdorf sind die Abträge in Fahrsuren also eher gering (Abb. 47).

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen	1143	901	869	762
Flächenanteil [%]	31,1	24,5	23,7	20,7
Mit Abtrag [n]	27	93	175	320
Anteil mit Abtrag [%]	2,4	10,3	20,1	42

Tab. 16: Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in Küingdorf

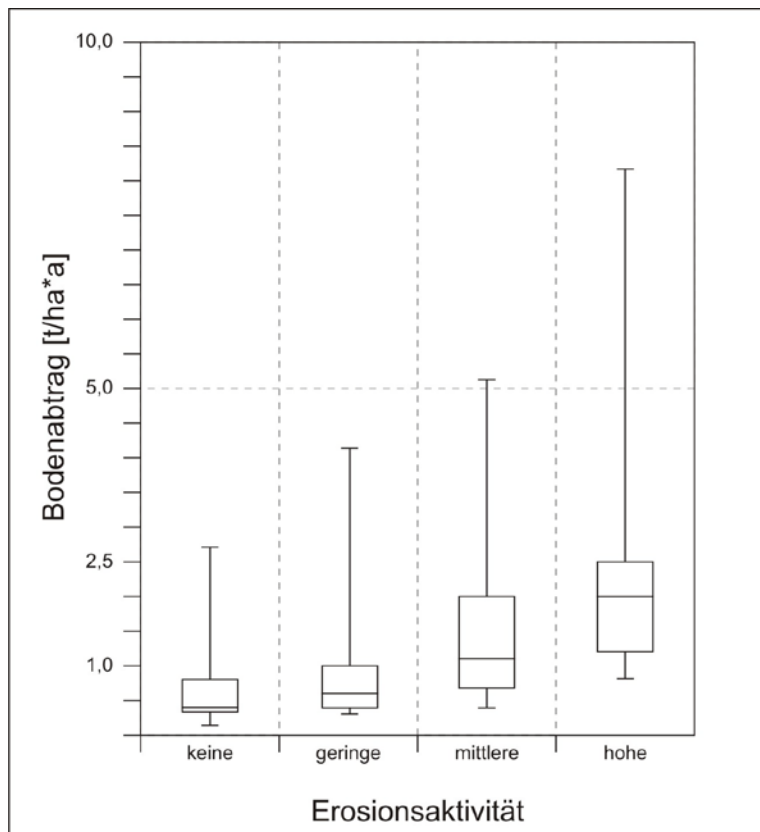


Abb. 47: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Küingdorf

Erosion in Tiefenlinien

Im Gebiet Küingdorf befinden sich dem Modell LINERO zufolge drei erosionsaktive Tiefenlinien mit jeweils geringer Erosionswahrscheinlichkeit. In einer der Tiefenlinien trat dreimal in elf Jahren Bodenabtrag auf. Auch in den anderen Tiefenlinien fand zwar Bodenabtrag statt. Dieser wurde bei der Kartierung aber nicht als Abtrag in Tiefenlinien identifiziert, sondern anderen Formtypen zugeordnet.

Erosion im Vorgewende

Die Prognose der linearen Erosionsaktivität in den Vorgewenden für das UG Küingdorf stellt Tab. 17 vor.

Prognostizierte Erosionsaktivität		Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Vorgewende	[n]	12	13	11	7
Anteil	[%]	27,9	30,2	25,6	16,3

Tab. 17: Ergebnisse des Modells zur Abschätzung der Erosion in den Vorgewenden im UG Küingdorf

Die Prognoseergebnisse werden durch die Kartierung bestätigt. In den Vorgewenden, die in der Klasse „keine Erosionsaktivität“ eingestuft sind, wurde bislang kein Bodenabtrag festgestellt. Der Median des kartierten Bodenabtrages steigt entsprechend der Klassifizierung durch LINERO an. Abb. 48 fasst statistische Kennwerte für die Vorgewende, abhängig vom Prognoseergebnis, zusammen. Der höchste kartierte Abtrag wurde in einem Vorgewende festgestellt, das in die Gruppe „mittlere Erosionsaktivität“ eingestuft wurde. Diese hohen Abträge sind aber durch Zuschusswasser entstanden. Die Einstufung in die Klassen ist statistisch signifikant (Kruskal & Wallis, 95 % Signifikanzniveau).

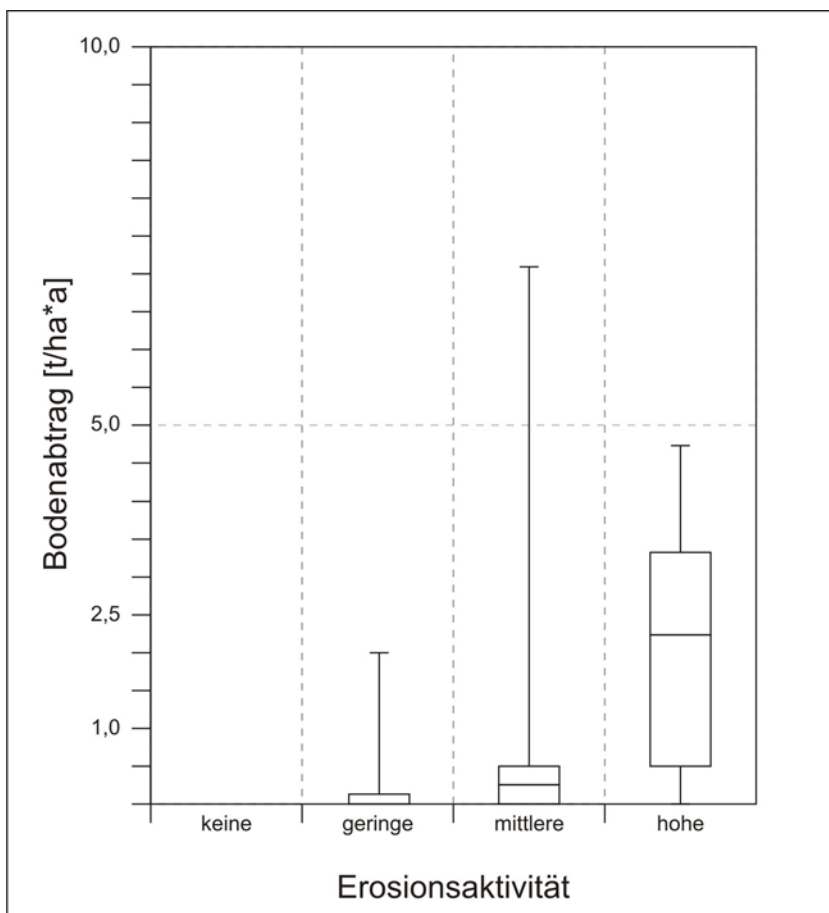


Abb. 48: Vergleich der kartierten Erosion in Fahrspuren mit der Prognose durch LINERO im UG Küingdorf

Folgerungen:

Das Modell LINERO liefert im Gebiet Küingdorf zutreffende und gute Ergebnisse. Das Modell gibt das Verteilungsmuster der linearen Erosion räumlich-differenziert wider und schätzt auch die Intensität des Abtrages richtig ein. Es ist daher gut geeignet um den Akteuren einen Überblick über das Gefährdungspotential durch lineare Erosion zu geben.

Abweichungen zwischen der Prognose und der Beobachtung treten nur auf Einzelschlägen mit geringem Abtrag auf. Diese Abweichungen resultieren aus der Bewirtschaftung. Das UG weist eine Kleinparzellierung auf, wodurch die Fließstrecken eher gering sind. Zudem werden Erosionsschutzmaßnahmen, wie die konservierende Bodenbearbeitung, bereits durchgeführt.

2.6.4 Zusammenfassende Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von LINERO

Das Modell LINERO liefert gute Ergebnisse, die bei der Einschätzung des Erosionsrisikos und bei der Planung von Erosionsschutzmaßnahmen hilfreich sind. Die Modellprognosen in den Gebieten Lamspringe und Barum stimmen mit der gemessenen Erosion gut überein. Das Modell schätzt sowohl die Höhe der Erosionsaktivität als auch das räumliche Verteilungsmuster nachvollziehbar ein. In den Validierungsgebieten zeigen sich ähnlich erfreuliche Ergebnisse. Im Folgenden wird die Leistungsfähigkeit der einzelnen Submodelle überprüft.

Modell zur Ausweisung nicht betroffener Schlagteile

Das Modell zur Vorhersage von Flächen ohne lineare Erosion weist in allen Gebieten Flächen aus, die auch tatsächlich erosionsinaktiv sind. Im Mittel prognostiziert das Modell für die Untersuchungsgebiete in Niedersachsen, dass etwa 22 % der Fläche nicht von linearem Abtrag betroffen sind. Die Trefferquote des Submodells ist sehr gut. Auf etwa 95 % der Fläche trifft die Prognose zu. Das Modell grenzt den Bereich, auf dem linearer Abtrag stattfindet, sinnvoll ein.

Das Modell sagt aber auch für Flächen eine potentielle Erosionsaktivität voraus, auf denen im Rahmen der Dauerbeobachtung in elf Jahren kein Abtrag kartiert wurde. Zu Abweichungen kommt es auf einigen Rücken und Oberhängen. An den Oberhängen führt zum Teil Zuschusswasser dazu, dass die Prognose nicht mit der kartierten Erosion übereinstimmt. Die Abweichungen liegen zum Teil daran, dass selbst eine elfjährige Messreihe noch keine ausreichenden Daten liefert, um einen so komplexen und diskontinuierlichen Prozess wie die Bodenerosion durch Wasser zu beschreiben (MOSIMANN ET AL. 2009).

Erosion in Fahrspuren

Das Submodell zur Prognose der linearen Erosionsaktivität in Fahrspuren liefert gute Ergebnisse. Die Güte der Vorhersage variiert aber abhängig vom Untersuchungsgebiet. In allen Gebieten kann festgestellt werden, dass mit steigender prognostizierter Erosionsaktivität auch der Anteil der von Fahrspurerosion betroffenen Fläche größer wird. Für alle Gebiete fasst dies Tab. 18 zusammen. Auch die Höhe der Bodenabträge steigt entsprechend der Einstufung an.

Prognostizierte Erosionsaktivität	Keine	Geringe	Mittlere	Hohe
Anzahl Zellen	12018	8177	3951	4438
Flächenanteil [%]	42,0	28,6	13,8	15,5
Mit Abtrag [n]	1108	1340	1015	1680
Anteil mit Abtrag [%]	9,2	16,4	25,7	37,9

Tab. 18: Prognoseergebnis des Fahrspurerosionsmodells in allen Untersuchungsgebieten

Das Submodell weist Flächen mit hoher linearer Erosionsaktivität aus, auf denen in den elf Beobachtungsjahren bislang kein Abtrag in Fahrspuren stattgefunden hat. Dies hängt zum Teil mit bereits durchgeführten Erosionsschutzmaßnahmen, wie etwa der Intervallbegrünung oder der Mulchsaat zusammen. Zum Teil tritt auf der Fläche auch kein Abtrag auf, da sich hier in elf Jahren keine Fahrspur befunden hat. Die Auflösung für die Auswertungen beträgt entsprechend der Laufweite des DGM 12,5 m. Die mittlere Bearbeitungsbreite beträgt 22 m. Dadurch kann es, wie Abb. 49 zeigt, dazu kommen, dass ein Schlagbereich als hochgefährdet ausgewiesen wird und es in der Umgebung auch zu Abträgen gekommen ist, die Fläche selbst (blau umrandet) aber nicht von einem Bodenabtrag betroffen ist.

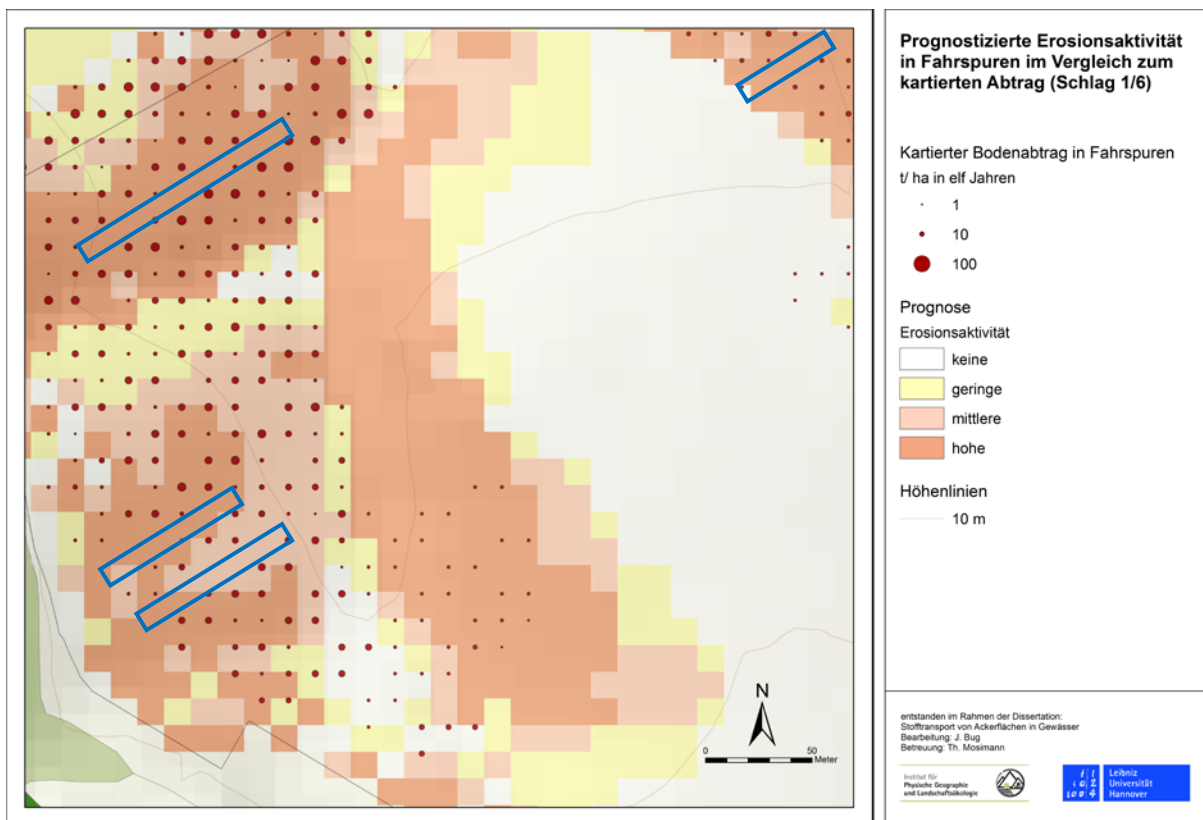


Abb. 49: Kartierter und prognostizierter Bodenabtrag in Fahrspuren auf Schlag 1/6 im UG Lamspringe

Die Prognose von Flächen mit der Stufe „keine Erosionsaktivität in Fahrspuren“ ist in gut 91 % der Fälle korrekt. Auf diesen Flächen wurde bislang kein Abtrag festgestellt. Die Ergebnisse des Submodells können deshalb sehr gut zur Planung von Erosionsschutzmaßnahmen in Fahrspuren, wie der Intervall- oder Vollbegrünung eingesetzt werden. Mit seiner Hilfe kann

die Fläche für die Begrünung eingegrenzt werden und damit Kosten für Saatgut gespart und Zwiewuchseffekt vermindert werden.

Erosion in Tiefenlinien

Das Modell zur Prognose von Erosionsaktivität in Tiefenlinien erzielt in allen Gebieten sehr gute Ergebnisse. In allen Tiefenlinien mit einer mittleren oder hohen Aktivität ist bislang bei den Kartierungen auch Abtrag festgestellt worden. Auch in den Tiefenlinien mit geringer Erosionsaktivität trat in 75 % der Fälle Bodenabtrag auf. Außer in den von LINERO prognostizierten Tiefenlinien wurde bislang kein Abtrag in Tiefenlinien festgestellt. Damit kann dieses Submodell die Lage von erosionsaktiven Tiefenlinien und die lineare Erosionsaktivität treffend abschätzen. Auch die Einstufung in die einzelnen Kategorien liefert eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Kartierdaten. Damit kann durch eine regionale Kalibrierung das Submodell sogar zur Berechnung von tatsächlichen Abträgen genutzt werden.

Da jedoch der Großteil der erosionsaktiven Tiefenlinien in den beiden Gebieten der Dauerbeobachtung liegen, die zur Modellerstellung genutzt worden sind, bedarf es noch einer weiteren Validierung, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu sichern. Dazu liegen jedoch bislang keine weiteren empirischen Daten vor. Durch die angelaufene Erosionsdauerbeobachtung in Baden-Württemberg kann das Modell in einigen Jahren sinnvoll validiert werden. Gerade das Modell zur Prognose der Erosionsaktivität in Tiefenlinien liefert wertvolle Ansätze für die Prognose der Erosionsgefährdung. Viele andere empirische Modelle, wie etwa die ABAG können diese Art des Bodenabtrages nicht prognostizieren. Deshalb kann dieses Teilmodell auch gut als Zusatz zur ABAG eingesetzt werden, um eine Prognose zu verbessern.

Erosion im Vorgewende

Das Submodell zur Prognose der Erosionsaktivität im Vorgewende liefert für die Planung einsetzbare Ergebnisse. Es untersuchte im Rahmen dieser Arbeit 160 Vorgewende auf ihre Erosionsaktivität. 18 der 20 Vorgewende, die am stärksten von Bodenabtrag betroffen sind, stuft das Modell in die Kategorie „hohe Erosionsaktivität“ ein. Die Zuweisung „keine Erosionsaktivität“ stimmt in 80 % der Fälle mit den Kartierergebnissen überein. Probleme bei der Prognose treten hauptsächlich durch Zuschusswasser von Straßen und Wäldern, aber auch benachbarten Ackerparzellen auf. Dieser Effekt sollte bei einer Überarbeitung der Entscheidungsbäume integriert werden.

Erosion durch Zuschusswasser

Das Modell zur Prognose von Flächen, die durch Zuschusswasser betroffen sind, dient der Ergebnisanpassung der anderen Submodelle. Es kann etwa 70 % der kartierten Übertrittsstellen prognostizieren. Durch eine Kombination mit einer hydrologischen Modellierung werden die durch Zuschusswasser beeinflussten Flächen ausgewiesen.

Fazit zum Modell LINERO

LINERO

- weist durch lineare Erosion nicht betroffene Flächen mit hoher Sicherheit aus,
- stuft die Aktivität von Fahrspurerosion differenziert für gefährdete Flächen ein,
- prognostiziert die Erosionsaktivität in Vorgewenden differenziert,
- modelliert erosionsaktive Tiefenlinien,
- erkennt Schlagbereiche, die durch Zuschusswasser beeinflusst sind.

Das Modell kann aufgrund seiner guten empirischen Basis zur lokal differenzierten Planung von Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz eingesetzt werden. Die Prognoseergebnisse haben qualitativen Charakter. Durch eine entsprechende lokale Kalibrierung können aber auch semi-quantitative Aussage getroffen werden. Die zugrunde liegenden Entscheidungsbäume können auch zur Prognose der linearen Erosionsaktivität bei Feldkartierungen eingesetzt werden.

2.7 Ausblick: Maßnahmenplanung mit LINERO

Für die Prävention von Bodenabtrag durch lineare Erosion weist LINERO gefährdete Flächen aus. Das Modell soll als Hilfestellung für zielgerichtete Maßnahmen dienen: Das bedeutet, dass abhängig von der Höhe (Erosionsaktivitätsstufe) und der Art (Fahrspur, Vorgewende, Tiefenlinie, etc.) der Gefährdung spezifische Maßnahmen vom Akteur eingesetzt werden können. Damit dient das Modell LINERO der Erstellung lokal-differenzierter Maßnahmenpläne zum Schutz vor linearem Bodenabtrag. Diese Pläne sollen vor Ort durch den Landwirt umgesetzt werden und als Hilfestellung zur Erreichung der Ziele der Guten Fachlichen Praxis dienen.

Sinnvolle Maßnahmen zum Schutz vor Bodenabtrag durch Wasser werden in vielen Publikationen vorgestellt (DIEZ 1994, LEHMANN 2000, FRIELINGHAUS ET AL. 2001, MOSIMANN ET AL. 2003, FELDWISCH 2004, MOSIMANN 2008) und bewertet. Es lassen sich dabei flächenhaft wirksame und lokal wirksame Maßnahmen unterscheiden. Wichtige flächenhafte Maßnahmen sind unter anderem:

- Veränderung der Landnutzung (von Ackerland zu Grünland).
- Umstellung der Fruchtfolge (geringerer Anteil von Reihenfrüchten, wie Mais, Zuckerrübe, Kartoffeln).
- Konservierende Bodenbearbeitung (Pflugverzicht).
- Einsatz von Mulchsaatverfahren.
- Ausbringen von Zwischenfrüchten.
- Querbearbeitung.
- Untersaaten in Reihenfrüchte (Mais).

Diese Maßnahmen sorgen für eine Verringerung der allgemeinen Gefährdung des Bodens durch Wassererosion und reduzieren damit auch den linearen Abtrag. Sie sind deshalb auf gefährdeten Flächen notwendig. Unter lokalen Maßnahmen lassen sich folgende zusammenfassen:

- Voll- oder Intervallbegrünung in Fahrgassen.
- Einsaat von Banketten, Grünstreifen.
- Begrünung von Tiefenlinien.
- Anlage von Querfurchen, Einlaufschächten zum Ableiten des oberflächlich abfließenden Wassers.
- Einsaat von Gewässerrandstreifen zum Schutz der Oberflächengewässer.

Abb. 50 zeigt, wie aus der Modellierung mit LINERO spezifische Erosionsschutzmaßnahmen abgeleitet werden können. Für alle Flächen, bei denen das Modell eine mittlere oder hohe lineare Erosionsaktivität prognostiziert, sind Maßnahmen notwendig. Abhängig von der form-spezifischen Erosionsaktivität bieten sich bestimmte Maßnahmen an, die bei der Form besonders effektiv ist. Effizienz bedeutet dabei, dass die Maßnahmen die spezifische Form verhindern und, dass diese mit vertretbarem Aufwand und vertretbaren Kosten durchführbar sind.

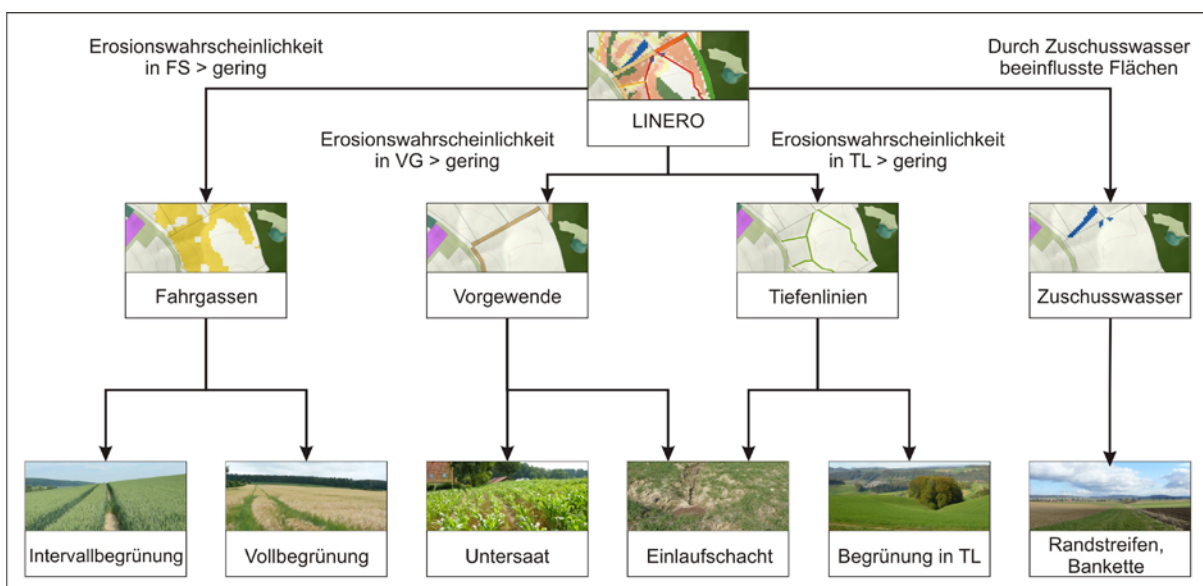


Abb. 50: Ableitung von Maßnahmen zum Schutz vor linearer Erosion aus einer Modellierung mit LINERO

Ein Beispiel für eine differenzierte Maßnahmenkarte für das Gebiet Lamspringe liefert Abb. 51. Die Karte weist Gebiete aus, auf denen Maßnahmen durchgeführt werden sollten. Die Fläche, für die Erosionsschutzmaßnahmen empfohlen werden, ist in Lamspringe etwa 62 ha groß. Das entspricht etwa 44,5 % der gesamten Fläche.

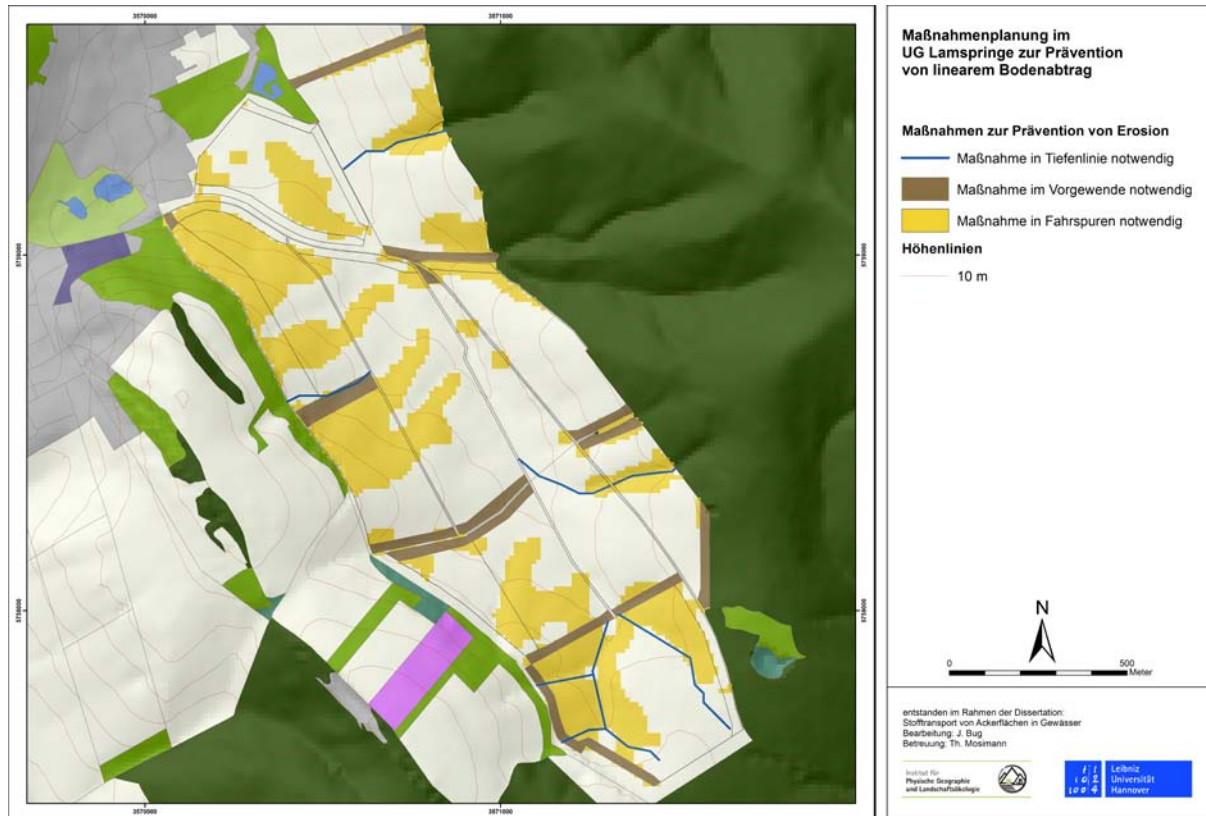


Abb. 51: Maßnahmenplanung im Gebiet Lamspringe zur Prävention von linearem Bodenabtrag

Das Modell LINERO leistet einen Beitrag zur individuellen, lokal-differenzierten und kostengünstigen Maßnahmenplanung zur Verminderung des Bodenabtrages durch Wasser auf Ackerflächen. Es liefert Karten, die bei der Planung von spezifischen Maßnahmen zur Reduktion der Abträge Hilfestellung leisten. Durch die empirische Herangehensweise entstanden valide Entscheidungsbäume, die auch für den Einsatz vor Ort, geeignet sind. In seiner GIS-basierten Variante liefert LINERO:

- eine flächendeckend hochauflösende Einschätzung der linearen Erosionsaktivität ohne Feldbegehungen,
- eine Hilfestellung zur effektiven Planung von Maßnahmen zur Minimierung des linearen Bodenabtrages und
- einen räumlich differenzierten Maßnahmenplan zur Verminderung der linearen Erosion.

3 Modell zur Bestimmung des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen (MOGWAF)

3.1 Einleitung

Bodenerosion führt nicht nur zu Schäden des Bodens auf der betroffenen Fläche. Durch Stofftransport von Ackerflächen in die Gewässer kommt es zu einer Beeinträchtigung der aquatischen Ökosysteme. Deshalb leisten Maßnahmen zur Verringerung der Bodenerosion, wie sie in Kapitel 2.7 vorgestellt werden, einen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz. Für die Beurteilung der Effektivität und des ökologischen Nutzens dieser Maßnahmen ist eine kombinierte Betrachtung der Bodenerosion und des Partikelaustrages von hoher Bedeutung. Maßnahmen, die auf Flächen durchgeführt werden, die sowohl durch Bodenerosion gefährdet, als auch zu Stoffausträgen führen, sind effektiver als Maßnahmen auf Flächen, die nur von Bodenabtrag betroffen sind.

Eine kombinierte Betrachtung des Bodenabtrages mit dem Austrag von Feinerde wird auch in den gesetzlichen Grundlagen gefordert. So geht die BUNDESBODENSCHUTZVERORDNUNG (BBODSCHV, §8) vom „Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung auf Grund von Bodenerosion durch Wasser“ aus, „wenn durch Oberflächenabfluss erhebliche Mengen Bodenmaterials aus einer Erosionsfläche geschwemmt wurden“, es also zur Verlagerung von Bodenmaterial in benachbarte Bereiche kommt. Bodenerosion ist demnach als der Abtrag auf einer Fläche kombiniert mit dem Eintrag in benachbarte Flächen definiert. Neben der BBodSchV fordert die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) Maßnahmen zum Schutz und zur Verbesserung des Zustandes der aquatischen Ökosysteme. Ziel der Richtlinie ist das Erreichen eines guten ökologischen und chemischen Zustandes in 15 Jahren. Eine Hauptursache für ein potentiell Nichterreichen der Vorgaben ist der Eintrag von Nährstoffen aus diffusen Quellen. Bodenabtrag durch Wasser ist eine bedeutende diffuse Quelle. Rund 20-50 % der abgetragenen Bodenpartikel gelangen mit den daran gebundenen Nähr- und zum Teil auch Schadstoffen in die Gewässer (WALTHER 1999). Die eingetragene Feinerde wird nicht gleichmäßig im gesamten Einzugsgebiet eines Flusses mobilisiert. Flächen mit hohem Erosionspotential, die sich in der Nähe des Gewässers befinden, liefern mehr Bodenmaterial als weit entfernte Schläge. Die auf weit entfernten Schlägen mobilisierte Feinerde wird im großen Maße im Einzugsgebiet selber deponiert und gelangt dementsprechend nicht in die Gewässer. Deshalb ist es wichtig, Methoden zu entwickeln, die prognostizieren, von welchen Ackerschlägen Bodenmaterial geliefert wird. Die entscheidende Frage ist: Welche Flächen haben Anschluss an ein Gewässer?

Wenn diese Information bekannt ist, können Bewirtschaftungsmaßnahmen zum Schutz der Bodenfruchtbarkeit gezielt auf diesen Flächen eingesetzt werden, wodurch diese Maßnahmen auch die Gewässerqualität verbessern. Für einen effizienten Boden- und Gewässerschutz, wie ihn der Gesetzgeber fordert, ist eine schlag- und betriebsbezogene Maßnahmenplanung notwendig. Die Information, von welchen Ackerparzellen Partikel durch Bodenerosion potentiell in die Gewässer gelangen können, steht dabei im Fokus der Planung.

Um diese Information bereitzustellen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Instrument entwickelt,

- das Ackerflächen mit Gewässeranschluss erkennt,
- das nutzungsspezifische Besonderheiten wie Bankette, Einlaufschächte und Grabenstrukturen mitberücksichtigt,
- das flächendeckend und schnell ohne Feldbegehungen den Anschluss modelliert und
- das als Grundlage für die Maßnahmenplanung eingesetzt werden kann.

Die parallele Entwicklung für Niedersachsen und die Nordwestschweiz sichert dabei die landschaftsübergreifende Anwendbarkeit des Modells.

Zur Lokalisierung von Flächen mit Gewässereintragspotential dient, neben vielen weiteren Modellen (z.B. SCHMIDT 1996, WURBS ET AL. 2007), der Feldschlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ (MOSIMANN ET AL. 2007). In Kombination mit dem Schlüssel „Bodenerosion selber abschätzen“ (MOSIMANN & RÜTTIMANN 1999, MOSIMANN & SANDERS 2003) kann im Rahmen einer Feldkartierung geklärt werden, ob ein Ackerschlag erosionsgefährdet ist und ob die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass von diesem Schlag Bodenmaterial in angrenzende Gewässer ausgetragen wird. Der Feldschlüssel folgt einem Entscheidungsbaum und benötigt einfache, im Feld zu erhebende Prädiktoren.

Der Schlüssel „Gewässeranschluss“ wird im Rahmen dieser Arbeit zu dem halbautomatisierten Modell MOGWAF (GIS-basiertes **MO**dell zur Bestimmung des **GeW**ässer**A**nchlusses von erosionsaktiven **Fl**ächen) weiterentwickelt, um die Abschätzung zu vereinfachen. Dieses Modell ermöglicht die Verortung an Gewässer angeschlossener Ackerparzellen ohne aufwendige Feldkartierungen. Es ist mit Anpassungen an die jeweilige Landschafts- und Nutzungsstruktur räumlich übertragbar und benötigt nur wenige Eingangsparameter.

3.2 Stand der Forschung

Rechtliche Grundlagen

Böden und Gewässer sind wichtige Güter, die durch zahlreiche gesetzliche Regelungen geschützt werden. Beispiele dafür sind die Cross Compliance (CC) der EU, die EU- Wasser-rahmenrichtlinie (WRRL) und das Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG). Bodenerosion durch Wasser bedroht beide Güter. Sie führt langfristig zu einer Abnahme der Fruchtbarkeit der Böden und damit zu Ernteeinbußen und Funktionsverlusten der Böden (BOARDMAN & POESEN 2006). Darüberhinaus gelangt die abgetragene Feinerde in die Gewässer und verursacht dort einen Anstieg der Nährstoffkonzentration (COLLINS & OWENS 2007).

Um den negativen Folgen dieses Prozesses entgegenzuwirken, verlangen die Auflagen der CC seit 2010 von den Landwirten die Anwendung der Guten Fachlichen Praxis (GFP, BMELV 2001) bei der Bewirtschaftung der Flächen. Diese Richtlinien müssen eingehalten werden, damit die Bewirtschafter weiterhin EU-Direktzahlungen erhalten. Die Anforderungen umfassen auch Auflagen zum Schutz der Böden vor Bodenerosion durch Wasser (MÜNCHHAUSEN ET AL. 2009).

Die WRRL dient im Gegensatz dazu nicht dem Schutz des Bodens sondern vornehmlich dem Schutz von Gewässern. Sie fordert die Erhaltung und Verbesserung des Zustandes aller aquatischen Ökosysteme. Ein guter ökologischer und chemischer Zustand soll bis 2015 erreicht werden. Eine wichtige Ursache für ein potientiell Nichterreichen eines solchen Zustandes ist der Eintrag von Nährstoffen durch diffuse Quellen, wobei der Bodenabtrag durch Wasser hierbei eine wichtige Rolle spielt. So stammt mindestens ein Drittel des Phosphateintrages aus der Bodenerosion. Die Landschaftsplanung kann hier durch die Ausweisung von besonders abtragsgefährdeten Gebieten Unterstützung zur Vorsorge gegen Einträge bieten (JESSEL & HASCH 2006).

Die gesetzlichen Grundlagen fordern, dass die Prozesse Bodenabtrag durch Wasser und Eintrag von Sedimenten in Gewässer kombiniert betrachtet werden müssen. Dies gilt auch in der Schweiz, wo das Gewässerschutzgesetz (GSCHG 1991) in Artikel 27 fordert, dass „Böden [...] entsprechend dem Stand der Technik so zu bewirtschaften sind, dass die Gewässer nicht beeinträchtigt werden“. Die VERORDNUNG ÜBER BELASTUNGEN DES BODENS (VBBO 1998) fordert in § 6,2, dass derjenige der, „den Boden bewirtschaftet [...] durch erosionshemmende Bau- oder Anbautechnik, Fruchtfolge und Flurgestaltung, dafür sorgen [muss], dass die Bodenfruchtbarkeit nicht durch Erosion langfristig gefährdet wird“.

Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer

Bei Betrachtung der Eintragspfade von Stoffen in Oberflächengewässer wird allgemein zwischen diffusen und punktuellen Quellen unterschieden (WERNER ET AL. 1994, BACH 1996). Nach NOVOTNY & OLEM (1994) sind Punkteinträge räumlich eindeutig abgrenzbar. Dazu zählen kommunale und gewerbliche Kläranlagen sowie Kleinkläranlagen. Dagegen treten diffuse Einträge flächenhaft auf. Unter diffusen Quellen gelten Einträge aus Landwirtschaftsflächen und entwässerten Hochmooren (Torfabbau), aber auch aus natürlicher Hintergrundlast und atmosphärischer Deposition.

In die Fließgewässer Deutschlands werden jährlich etwa 25.000 t des Pflanzennährstoffs Phosphat (P) eingetragen (BMU 2009). Bereits 1 g Phosphat im Gewässer reicht aus, um ca. 100 g Biomasse, z.B. Algen aufzubauen, bei deren aerobem Abbau dann 140 g Sauerstoff verbraucht werden. Deshalb stellen hohe P-Gehalte in vielen Oberflächengewässern ein ökologisches Problem dar (HEINTZ & REINHARDT 1996). Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit des ortho-Phosphats tritt P häufig als Minimumfaktor auf (DVWK 1993). Das bedeutet, dass sich bereits geringe P-Einträge in hohem Maße eutrophierungsfördernd auswirken können. Als Eutrophierung wird eine Nährstoffübersättigung von Gewässern verstanden. Dabei kommt es zu einer Überproduktion von organischer Masse, die zu einem überhöhten Sauerstoffverbrauch im Gewässer führt (LESER 2005).

Die Einträge von Phosphat in die Fließgewässer sind in den letzten 30 Jahren stark zurückgegangen. In der Periode 1983 - 1985 wurden noch 85.000 t jährlich in die Fließgewässer Deutschlands eingetragen. Die starke Abnahme ist fast ausschließlich auf den Rückgang der Einträge aus Punktquellen zurückzuführen. Dies ist eine Folge von verschärften gesetzlichen Regelungen, die unter anderem den Verzicht von phosphathaltigen Wasch- und Reinigungsmitteln fordern und den Einbau von Anlagen zur Phosphatelimination in Kläranlagen fördern. Auch der Eintrag aus industriellen Direkteinleitungen (MUNLV 2003) hat sich erheblich verringert. Als Folge der Abnahme punktueller Einleitungen hat sich zwar der relative Anteil diffuser Quellen an der Gesamtbelastung von ca. 15 % (1985) auf ca. 52 % im Jahr 2009 erhöht, die absolute Höhe diffuser P-Einträge ist in diesem Zeitraum jedoch konstant geblieben. Trotz erster Reduktionsmaßnahmen sind hierfür die bis Ende der 1980er Jahre gestiegenen P-Gehalte im Boden und die Zunahme der Bodenerosion hauptverantwortlich (ERLACH 2005).

Ferner belastet der Eintrag von Pflanzenschutzmitteln (PSM) die Oberflächengewässer. Phasenweise kann die Belastung mit PSM in Abhängigkeit von der Konzentration, eine toxische Wirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft haben (AKKAN ET AL. 2003). Diffuse Belastungen von Gewässern spielen deshalb in der Forschung der letzten Jahrzehnte eine immer wichtigere Rolle (WALTHER 1999).

Ein effektiver Gewässerschutz zur Vermeidung solcher Stoffeinträge ist vor allem durch präventive Maßnahmen zu erreichen. Zur Planung solcher Maßnahmen ist die Eintragsherkunft der Stoffe zu ermitteln. Da dem Eintrag von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen in Oberflächengewässer immer ein Austrag vorausgeht, ist eine Ursachenforschung im Sinne der Stoffherkunft in vielen Forschungsarbeiten betrieben worden. Eine hohe Bedeutung wird dabei den Eintragungspfaden über landwirtschaftlich genutzte Flächen beigemessen (HAIDER 1994, FRIELINGHAUS ET AL. 1997, ISENBECK-SCHRÖTER ET AL. 1998, LÜTKE ENTRUP 2000, UBA 2000).

Modellierung von Gewässereintrag und Gewässeranschluss

Zur Ausweisung von Flächen, die zum diffusen Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer einen Beitrag liefern, dienen zahlreiche Modelle und Hilfsmittel, die im Folgenden vorgestellt werden. Die ersten Modelle zur Bestimmung des Eintrages von ökologisch relevanten Stoffen in den Landschaftshaushalt von Fließgewässern entstanden in den 1980er und 1990er Jahren. BRAUN ET AL. (1991) haben ein Modell entwickelt, das den Eintrag von Phosphor im Rheineinzugsgebiet, abhängig von der Landnutzung im Einzugsgebiet,

berechnet. Neuere Modelle zur Bestimmung der Einträge in Gewässer basieren entweder auf den bereits in Kapitel 2.2 vorgestellten Modellen zur Vorhersage der Bodenerosion. Einige Modelle wie etwa WEPP oder EROSION 3 D sind dazu geeignet Stofftransport vom Acker in die Gewässer zu quantifizieren. Beispielhaft zeigt Abb. 52 das Ergebnis einer Modellierung mit dem Modell Erosion 3D im Gebiet Hölstein-Diegten (Kanton BL) für ein Niederschlagsereignis im Mai 2007 (22 mm, maximale 30 min –Intensität: 16,6 mm/h). Es ist die Nettoerosion im Einzugsgebiet des Vorfluternetzes dargestellt.

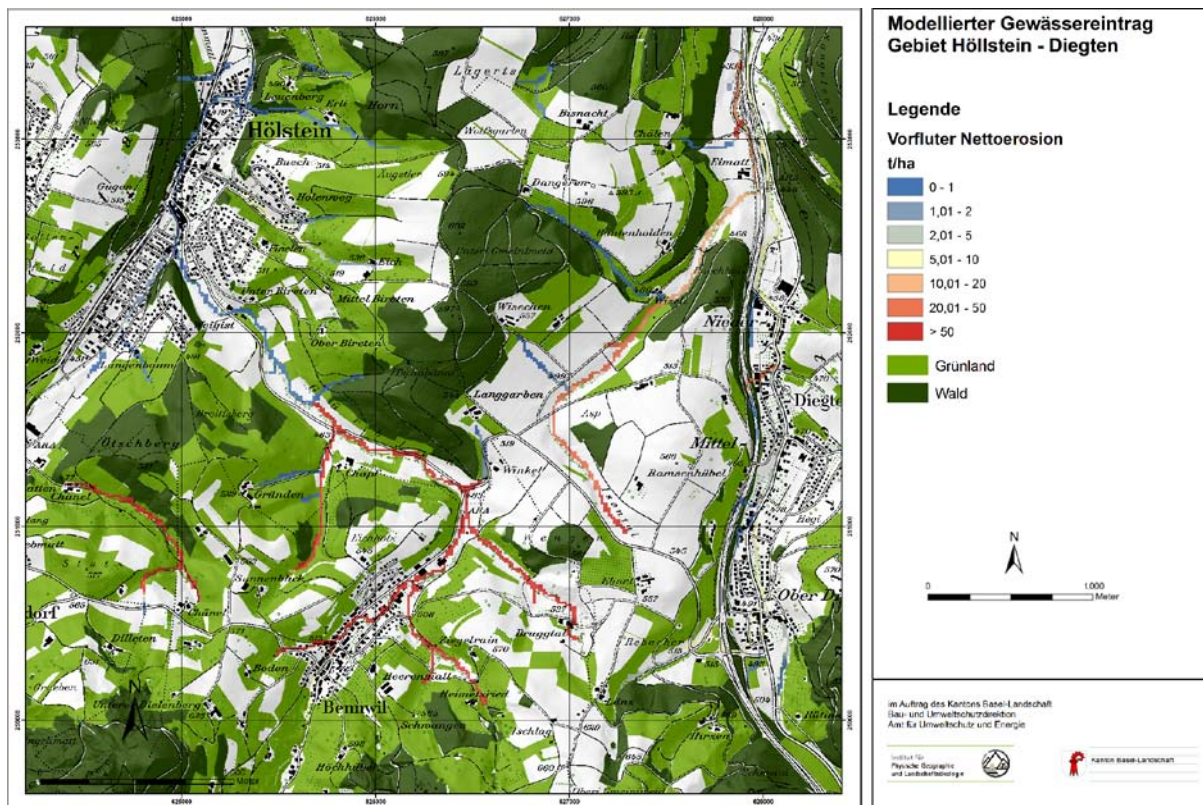


Abb. 52: Modellierter Gewässereintrag (Erosion 3D) bei einem Niederschlagsereignis im Mai 2007 im Gebiet Hölstein - Diegten (Kanton Basel-Landschaft, Schweiz)

Viele GIS-gestützte Modelle zur quantitativen Abschätzung des Gewässereintrages, wie etwa MODIFUS (PRASUHN 2008), MEPHOS (TETZLAFF 2006), Stoffbilanz (KAISER & GEBEL 2003) oder ABAGflux (WURBS ET AL. 2007) basieren auf der ABAG. Die Mobilisierung von Bodenmaterial bestimmt die Abtragsgleichung, die Verlagerung basiert auf unterschiedlichen Algorithmen. MONERIS (BEHRENDT ET AL. 2000) ist ein weiteres GIS-basiertes Modell, das zur Abschätzung der Einträge in Gewässer dient, aber auch Eingangsdaten aus der ABAG benötigt. Die ABAG hat aber gerade bezüglich der Anwendung im Bereich der Verlagerung von Stoffen Schwächen. Das Modell dient der Ausweisung vom Bodenabtrag auf Parzellen. Wo das Material hingelangt oder akkumuliert wird, beantwortet das Modell nicht. Außerdem schätzt die ABAG mittlere jährliche Bodenabträge ab. Es macht keine Aussagen über die Verteilung der Bodenabträge innerhalb eines Jahres aus. Dabei findet Gewässereintrag besonders bei Extremereignissen statt.

Zur Prognose der Verlagerung von Pestiziden kann das Modell PELMO (KLEIN 1994) verwendet werden. Das Modell DRIPS dient der kleinmaßstäbigen Abschätzung von Gewässereinträgen (UBA 2000).

Die vorgestellten Modelle haben gemein, dass sie entweder viele Eingangsparameter zur Abschätzung der Einträge in die Gewässer benötigen oder aber nur in sehr kleinem Maßstab einsetzbar sind. Ein leicht übertragbares, auf wenige Eingangsparameter beschränktes Modell zur schlaggenauen Abschätzung des Gewässereintrages oder der Gewässeranschlusssituation einzelner erosionsaktiver Flächen liegt bislang nicht vor. Deshalb konnte die lokale Minimierung des Partikeleintrages in Gewässer bisher auch nicht in die örtliche Maßnahmenplanung einbezogen werden.

3.3 Kartierschlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ als Grundlage von MOGWAF

Mit dem Schlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ liefern MOSIMANN ET AL. (2007) eine Feldmethode zur Identifizierung von Flächen, die zu Gewässereintrag führen können. Der Anbindungsgrad einer Fläche ist nicht direkt messbar, da der Landschaftsraum eine hohe Komplexität aufweist. Dieses Grundproblem wird mit der Ermittlung des Gewässeranschlusses auf Basis mehrerer Indikatoren (Lage des Schlags, Reliefeigenschaften, Oberflächenstrukturelemente) gelöst. Durch die Kombination dieser Indikatoren in einen Entscheidungsbaum und die Einführung spezifischer Schwellenwerte lässt sich der Anschlussgrad abschätzen. Die Indikatoren bzw. Prädiktoren können mit Hilfe des Schlüssels im Feld erhoben werden und dadurch bereits vor Ort die Stofftransportwege und Übertrittsstellen in ein Gewässer nachvollziehbar machen. Die Grundstruktur des Schlüssels visualisiert Abb. 53. Den kompletten Entscheidungsbaum stellt Abb. 54 dar.

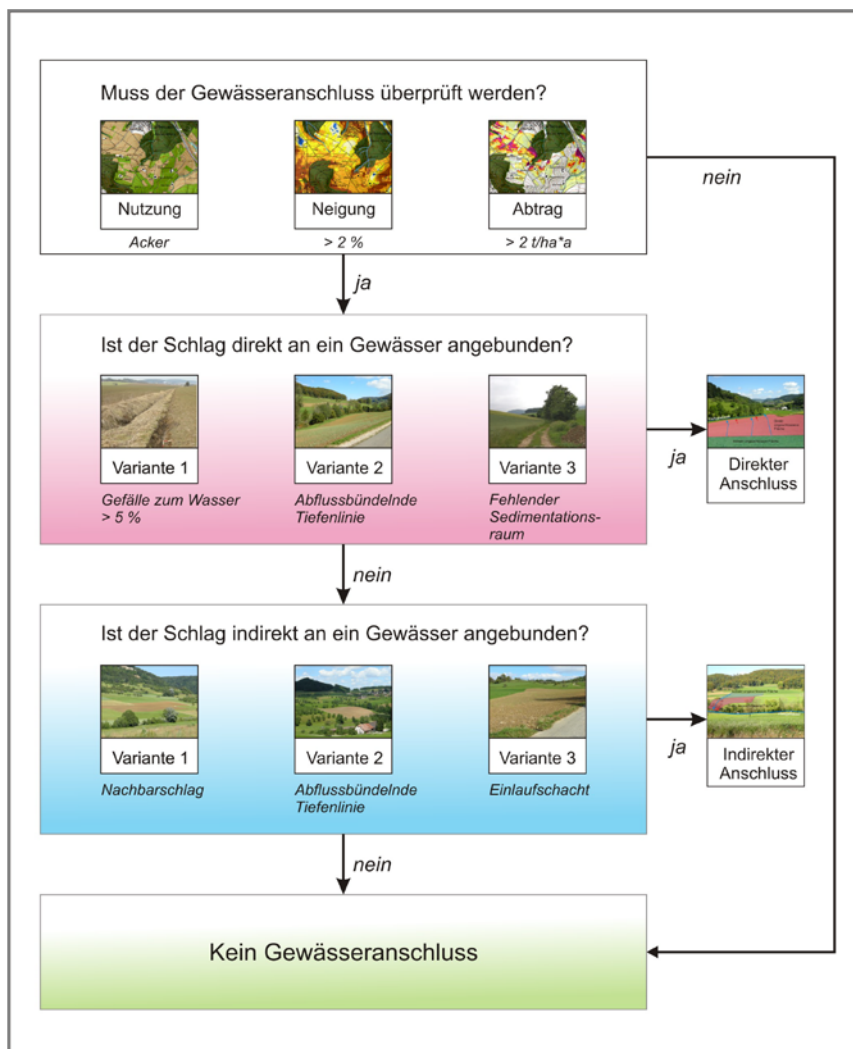


Abb. 53: Vorgehen des Gewässeranschlussschlüssels

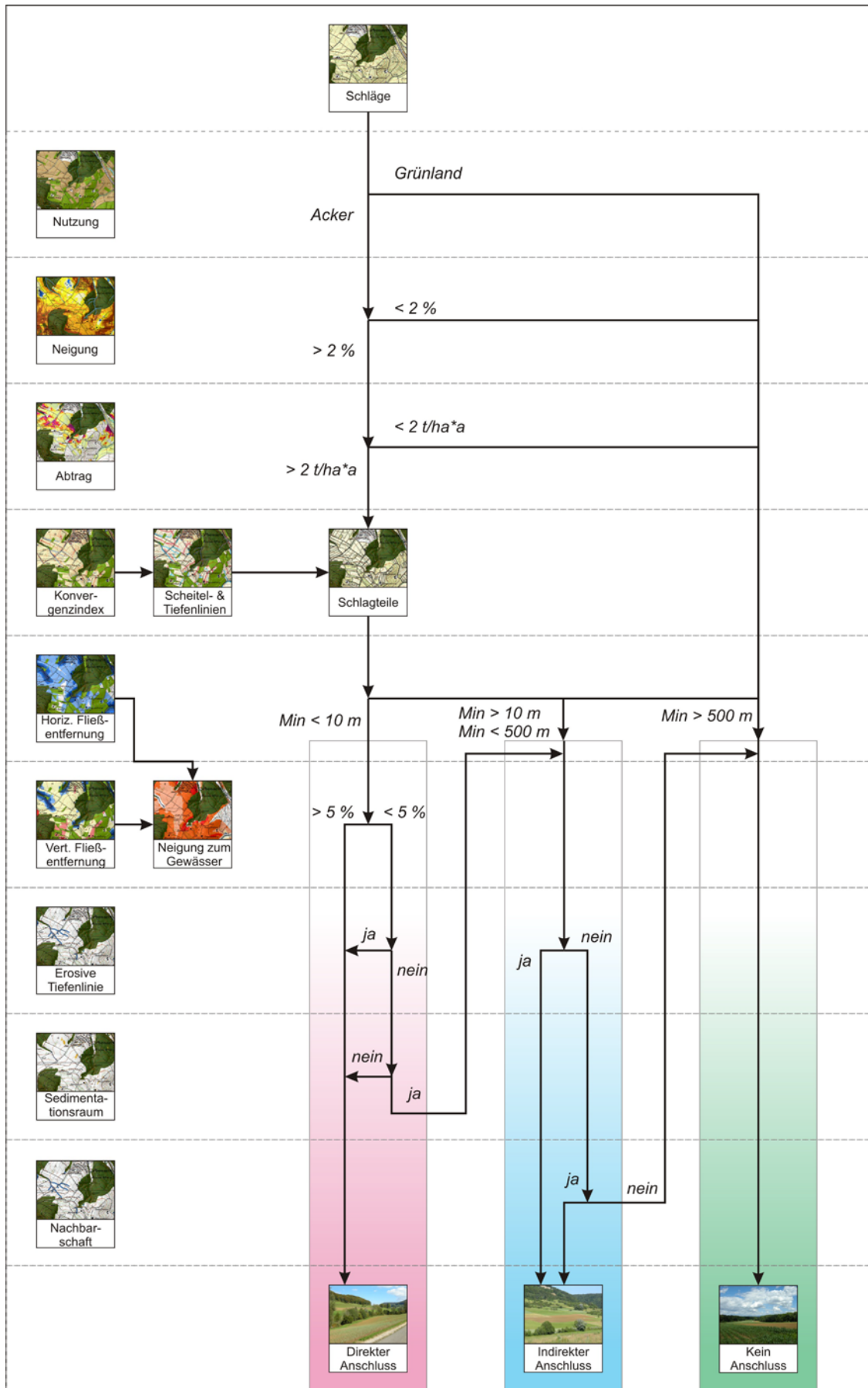


Abb. 54: Entscheidungsbaum zur Modellierung des Gewässeranschlusses

Das Konzept und die Struktur der Arbeitshilfe „Gewässeranschluss“ orientiert sich am Schlüssel „Bodenerosion selber abschätzen“ (MOSIMANN & RÜTTIMANN 1999, MOSIMANN & SANDERS 2003). Der Schlüssel ist als Abfragebaum aufgebaut (binäres entscheidungsbasiertes Vorgehen). Die merkmalsorientierten Abfragen ergeben jeweils die Aussage „Gewässeranschluss wahrscheinlich“, „Gewässeranschluss unwahrscheinlich“ oder die Fortführung im Abfragebaum.

3.3.1 Direkter Anschluss

Ein direkter Gewässeranschluss liegt vor, wenn ein erosionsaktiver Ackerschlag unmittelbar an ein Gewässer angrenzt, nur durch einen kleinen Grünstreifen oder durch einen Weg von diesem getrennt wird. Beim direkten Gewässeranschluss werden drei Varianten ausgewiesen:

- Unterkante des Schlages in maximal 10 m Entfernung zum Gewässer und Neigung zum Gewässer größer als 5 %.
- Unterkante des Schlages in maximal 10 m Entfernung zum Gewässer und Anschluss über eine abflussbündelnde Tiefenlinie.
- Unterkante des Schlages in maximal 10 m Entfernung zum Gewässer und fehlender Sedimentationsraum zwischen Fläche und Gewässer.

Abb. 55 zeigt eine Situation für sowohl einen direkt als auch einen indirekt angeschlossenen Schlag. Die Neigung zum Gewässer ist größer als 5 %. Zwischen dem Fließgewässer und dem Schlag ist nur ein kleiner Grünstreifen von etwa 5 m Breite.

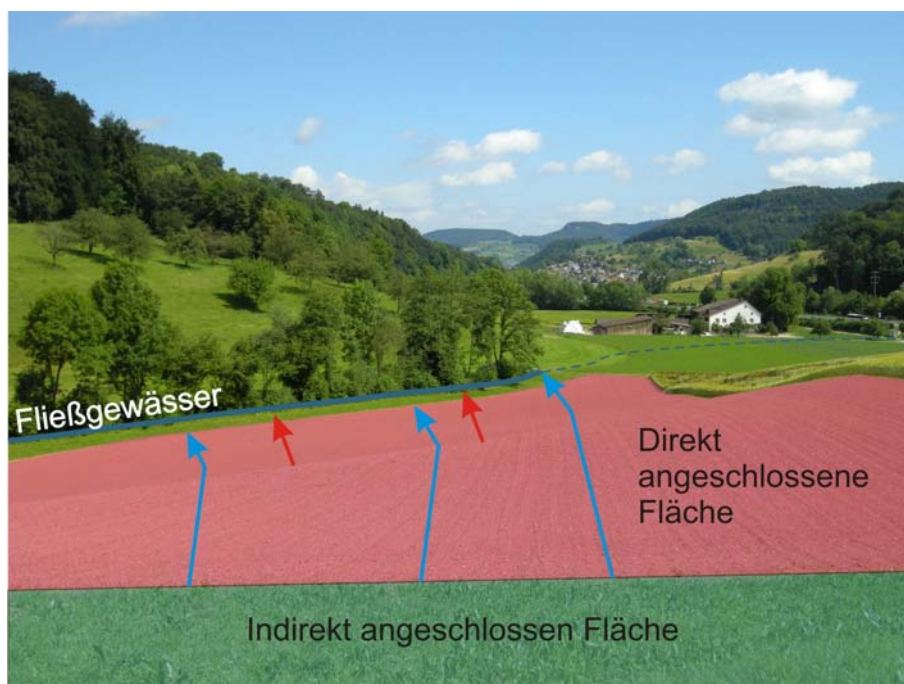


Abb. 55: Direkt und indirekt angeschlossener Schlag (Rothenfluh, Kanton Basel-Landschaft, Schweiz, Juni 2009)

Die Wahrscheinlichkeit, dass Feinerde von einem direkt angeschlossenen Ackerschlag in das benachbarte Gewässer eingetragen wird, ist hoch. Bereits bei erosiven Niederschlägen mit mittlerer Intensität kann es zu Übertritten kommen.

3.3.2 Indirekter Anschluss

Ein indirekter Gewässeranschluss liegt vor, wenn die Ackerfläche weiter als 10 m vom Gewässer entfernt ist, es aber trotzdem möglich ist, dass durch Bodenerosion Feinerde in ein Gewässer gelangt. Es gibt drei Varianten des indirekten Gewässeranschlusses:

- Anschluss über abflussbündelnde Tiefenlinie.
- Anschluss über einen direkt oder indirekt angeschlossenen Nachbarschlag.
- Angrenzen an einen Weg oder eine Straße, auf der sich Einlaufschächte befinden (Anschluss über Kanalisation).

Abb. 56 zeigt ein Beispiel eines indirekt angeschlossenen Ackerschlages. Der Anschluss erfolgt über einen direkt angeschlossenen Nachbarschlag.

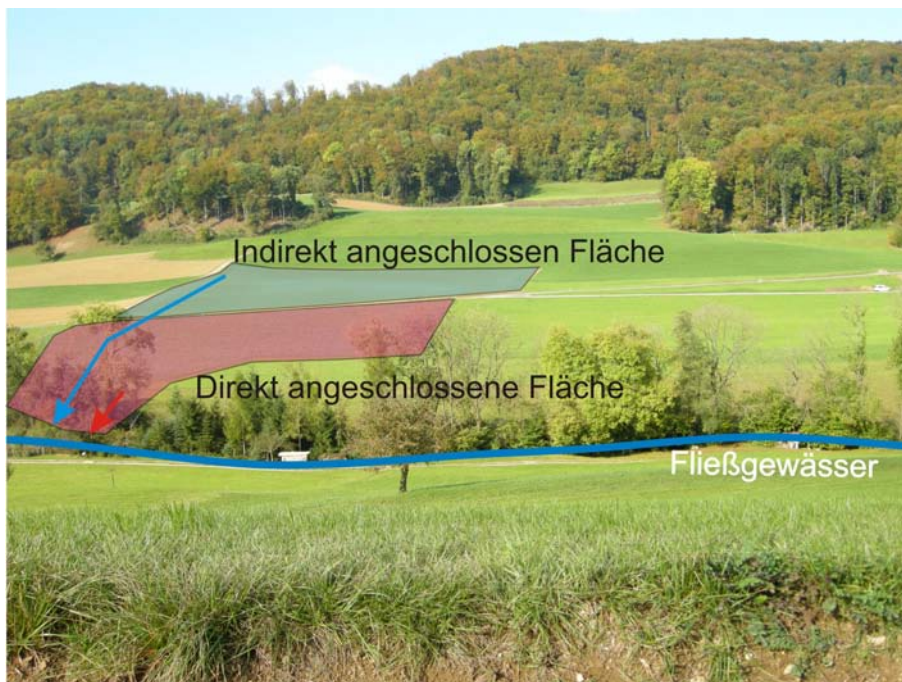


Abb. 56: Indirekter Gewässeranschluss im Gebiet Rothenfluh (Kanton Basel-Landschaft, Schweiz, Juni 2009)

Die Wahrscheinlichkeit, dass Feinerde von einem indirekt angeschlossenen Ackerschlag in das benachbarte Gewässer eingetragen wird, ist weniger hoch, als bei einem direkt angeschlossenen Schlag. Der Oberflächenabfluss muss durch einen weiteren Schlag fließen, wo es durch eine andere Ackerfrucht zur Verlangsamung des Wassers und damit zur Akkumulation des Bodenmaterials kommen kann. Dementsprechend kommt es nur bei erosivem Niederschlag mit hoher Intensität oder sehr hohen Niederschlagsmengen zu Übertritten. Die Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen zeigt, dass etwa 38 % der Erosionssysteme,

die auf direkt angeschlossenen Flächen auftreten, zu Gewässereintrag führen. Bei Systemen auf indirekt angeschlossenen Schlägen wurde nur in etwa 22 % der Fälle ein Gewässereintrag nachgewiesen.

3.3.3 Kein Gewässeranschluss

Das Ergebnis „kein Gewässeranschluss“ kann durch eine ganze Reihe von Varianten zustande kommen:

- Bodenabtrag kleiner als 2 t/ha*a.
- Hangneigung unter 2 %.
- Fläche weiter als 500 m von einem Gewässer entfernt.
- Auf dem Transportweg zwischen der Fläche und dem Gewässer ist ein Sedimentationsraum mit einer Breite von mindestens 50 m.
- Zwischen der Fläche und dem Gewässer befindet sich ein Randstreifen von mehr als 10 m Breite.

Ein Übertritt von Flächen ohne Gewässeranschluss ist sehr unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich. Gerade bei extremen Niederschlagsereignissen, bei denen die gesamte Ackerfläche von Oberflächenabfluss betroffen ist, kann es zum Übertritt kommen. Im Rahmen der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen ist in elf Jahren aber noch kein solcher Fall dokumentiert worden.

3.4 Modellstruktur und Ablauf der GIS-gestützten Ableitung des Gewässeranschlusses mit dem Modell MOGWAF

3.4.1 Notwendige Eingangsdaten zur Modellierung des Gewässeranschlusses

Das Modell zur Bestimmung des Gewässeranschlussschlüssels benötigt nur wenige Eingangsdaten. Diese lassen sich in absolut notwendige und zusätzliche Eingangsdaten unterteilen (Tab. 19):

Absolut notwendige Eingangsdaten	Zusätzliche Eingangsdaten
Schlagstruktur	Bodenabtrag
Landnutzung	Fließgewässer
Hangneigung	
Fließdistanz	

Tab. 19: Eingangsdaten für die Modellierung des Gewässeranschlusses

Diese Daten liegen nicht für jeden Landschaftsraum in einer optimalen Auflösung vor. Gerade die Schlagstrukturen, also die Strukturen der Bewirtschaftung, ändern sich häufig und werden meist nicht in amtlichen Topographischen Werken verzeichnet. Deshalb müssen sie teilweise aus Luftbildern digitalisiert werden.

Die Landnutzung liegt in Deutschland zumeist differenziert vor. In der Schweiz wird im amtlichen Werk nicht zwischen Grün- und Ackerland differenziert. Dafür musste im Rahmen dieser Arbeit eine Ableitung aus anderen Daten, wie Boden-, Hangneigungs- und Nutzungseignungsdaten entwickelt werden.

Die Hangneigung kann mit Hilfe eines Digitalen Gelände Modells (DGM) über einfache Standardroutinen berechnet werden. Die Auflösung der Daten hängt von der Auflösung des DGM ab. In den deutschen Untersuchungsgebieten ist die Auflösung mit 12,5 m mehr als sechsmal so groß wie die Auflösung in der Nordwestschweiz (2 m).

Der Bodenabtrag einer Ackerfläche kann mit dem bereits beschriebenen Modell ABAG (Kapitel 2.2) berechnet werden. Dafür werden viele weitere Eingangsdaten benötigt, die in Kapitel 3.4.3 vorgestellt werden.

Die Distanz von einem Ackerschlag zum Gewässer ist mit Hilfe von GIS leicht zu bestimmen. Problematisch ist jedoch die Frage, was ein Gewässer darstellt. § 1 Abs. 1 Nr. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2002) definiert ein oberirdisches Gewässer als „ständig oder zeitweilig in Betten fließendes oder stehendes oder aus Quellen wild abfließendes Wasser“. Die Frage stellt sich aber, ob Gräben, die zur Entwässerung von landwirtschaftlichen Schlägen angelegt wurden, als Gewässer zu betrachten sind. Das Gleiche gilt für die Entwässerung von Ackerflächen über Einlaufschächte und Kanalisationen. Bei einer landschaftsökologischen Betrachtung ist eine Berücksichtigung dieser Strukturen sinnvoll, da der Stoffhaushalt von Gewässern auch von den Einträgen aus Gräben und Einlaufschächten beeinflusst wird. Zur Lage und räumlichen Verteilung von Gräben und Einlaufschächten liegen aber meist keine digitalen Daten vor. Deshalb werden im Folgenden Methoden zur Abschätzung dieser Strukturen vorgestellt.

3.4.2 Modellgestützte Lokalisierung von Grünlandflächen in landwirtschaftlichen Mischgebieten

Für die Modellierung des Gewässeranschlusses von erosionsaktiven Flächen ist die Information zur Lage von Grünlandflächen unerlässlich. Grünlandparzellen fungieren als Sedimentationsbereiche. Sie sorgen dafür, dass der Eintrag von Feinmaterial in Gewässer unterbunden wird (MOSIMANN ET AL. 2007). In Deutschland steht die Information „Grünland“ in den ATKIS-Daten zur Verfügung (Unterteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Grünland, Ackerland und Sonderkulturen). In der Schweiz liegt eine solche Information nicht vor. Die Übergänge zwischen den Landnutzungen sind in der Schweiz fließender als in Deutschland. So ist auf ackerbaulich genutzten Flächen die Einsaat von Kunstwiesen sehr weit verbreitet. Der Schlag wird meist über mehrere Jahre intensiv als Wechselgrünland genutzt. Nach zwei bis drei Jahren erfolgt der Umbruch und es werden andere Feldfrüchte oder zum Teil auch wieder Kunstwiesen angepflanzt.

Für die Modellierung des Gewässeranschlusses muss also die Information, wo sich Ackerland befindet, anhand von anderen vorhandenen Daten abgeleitet werden. Dafür wurde im Rahmen der Arbeit ein neues Modell entwickelt und validiert. Abb. 57 stellt das Grundkonzept dieses Modells dar. Die Modellentwicklung erfolgt in vier Schritten.

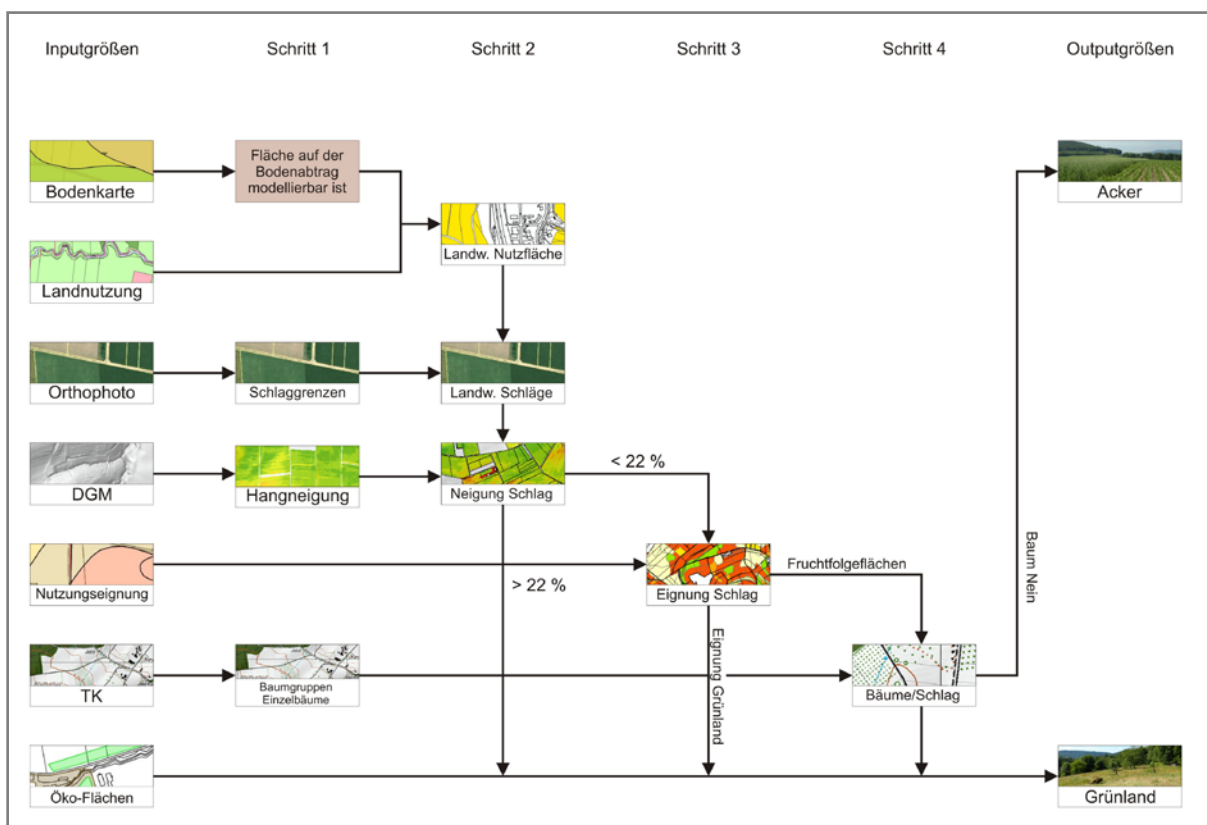


Abb. 57: Modell zur Bestimmung der Nutzung auf Landwirtschaftsflächen im Kanton Basel-Landschaft

Vorbereitung

In die Phase der Vorbereitung fällt die Sichtung und Auswahl der vorhandenen Daten. Für den Kanton Basel-Landschaft liegen vielfältige Informationen im Kantonalen GIS vor (Geoview.bl.ch), die sich mit der landwirtschaftlichen Nutzfläche beschäftigen. Unter anderem nutzt das Modell die Bodenkarte, die Landnutzung, die Nutzungseignung und die kantonalen Ökoflächen. Darüberhinaus benötigt das Grünlandmodell ein DGM und nutzt zusätzlich die Informationen der Luftbilder sowie der Topographischen Karte im Maßstab 1:25.000.

Schritt 1: Modellierung von Eingangsgrößen

Aus den Informationen Landnutzung und der Bodenkarte lässt sich die für die Modellierung relevante, landwirtschaftlich genutzte Fläche ableiten. Aus dem Orthophoto muss die Schlagstruktur digitalisiert werden. Das Modell bestimmt dann weiterhin aus dem DGM die Hangneigung für die relevanten Flächen. Aus der Topographischen Karte extrahiert das Modell die Information zu Baumgruppen und Einzelbäumen.

Schritt 2: Bestimmung der Landwirtschaftlichen Schläge

Im zweiten Schritt fasst das Modell die Informationen zur Landwirtschaft zusammen. Daraus ergibt sich ein Datensatz mit den Einzelschlägen im UG. Für die Schläge ermittelt es dann noch die mittlere Hangneigung. Eine ackerbauliche Nutzung bei Neigungen von über 22 % ist sehr unwahrscheinlich. Allen stärker geneigten Schlägen wird die Nutzung Grünland zugeordnet.

Schritt 3: Nutzungseignung

Neben den Bodendaten steht auch die Nutzungseignung der Böden im kantonalen-GIS zur Verfügung. Dabei handelt es sich um eine Beurteilung von Boden-, Gelände- und Klimaeigenschaften im Hinblick auf eine standortgemäße Nutzung. Das Modell nutzt diese in klassifizierter Form und berechnet die mittlere Nutzungseignung der Böden eines Schlages. Anhand dieser lassen sich Rückschlüsse auf die tatsächliche Nutzung ziehen. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass die als Fruchtfolgeflächen ausgewiesenen Flächen auch ackerbaulich genutzt werden.

Schritt 4: Einzelbäume und Baumgruppen

Die topographische Karte liefert Informationen zu Einzelbäumen und Baumgruppen. Mit Hilfe dieser Daten können Hochstammobstanbaugebiete identifiziert und ausgewiesen werden. Zuletzt gehen in das Modell die kantonal geförderten Ökoflächen ein. Dort ist genau verzeichnet, welche Nutzung auf den Flächen betrieben wird. Dementsprechend lassen sich Grünlandflächen damit bestimmen. Diesen Flächen weist das Modell die Nutzung Grünland zu.

Outputgrößen

Das Modell gibt für alle landwirtschaftlich genutzten Flächen eine Einschätzung zu der tatsächlichen Nutzung ab. Als Ergebnis erhält jeder Schlag entweder die Nutzung Grünland oder die Nutzung Ackerland.

Ergebnisse der Modellierung

Insgesamt sind im Kanton ca. 42 % der Landwirtschaftsfläche ackerbaulich genutzt. Der Anteil der Ackerfläche variiert stark von < 10 % in einzelnen Gemeinden im Jura bis zu 80 % in den Ausläufern des Sundgauer Hügellandes. Abb. 58 zeigt einen Ausschnitt der Acker-Grünlandmodellierung für das Gebiet um die Gemeinden Arisdorf und Giebenach. Das Gebiet repräsentiert den Übergang zwischen dem Lösshügelland im Nordwesten und dem Jura im Südosten. Der Grünlandanteil ist im Nordosten aufgrund des bewegten Reliefs und der tonreichen, geringmächtigen Böden wesentlich höher als im Nordwesten.

Die Ergebnisse der Modellierung unterlagen einer eingehenden Prüfung auf Basis der Gemeindestatistiken und durch Feldbegehungen. Es zeigt sich eine sehr große Übereinstimmung. Kapitel 3.7.2 stellt die Validierung des Grünlandmodells im Rahmen der Validierung des Gesamtmodells in der Nordwestschweiz vor.

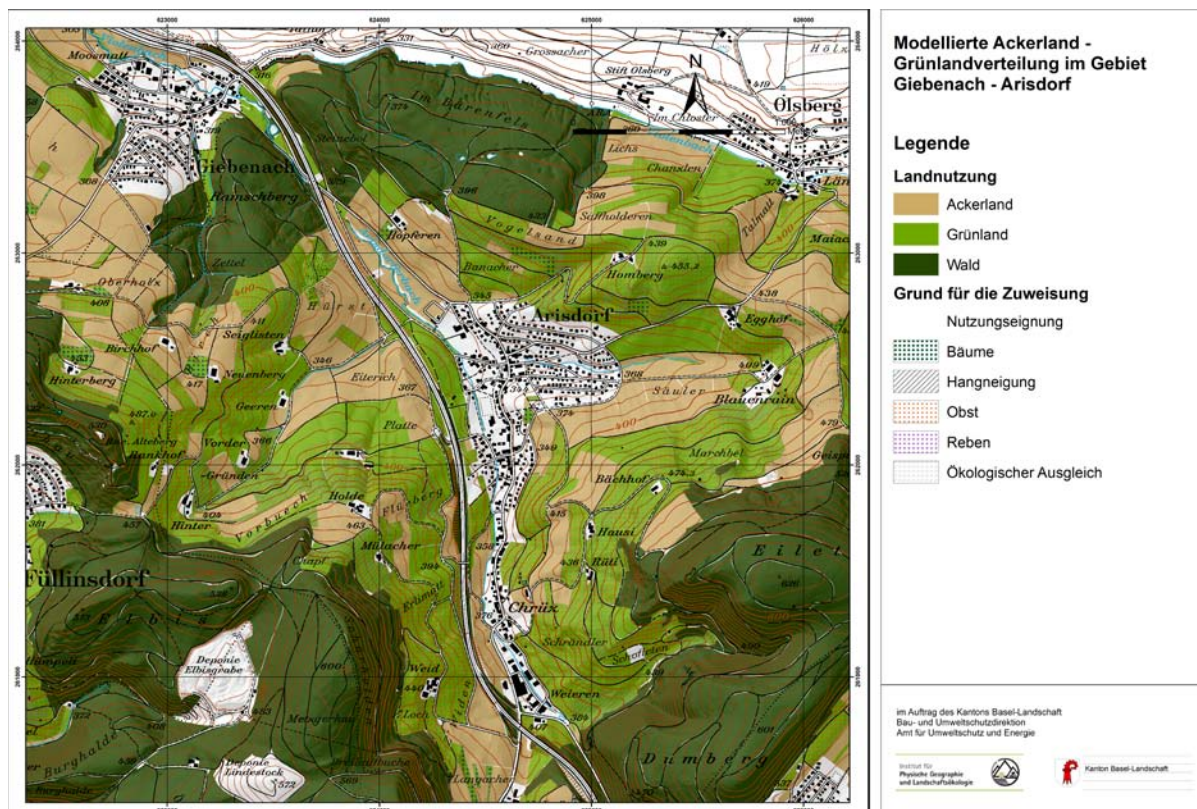


Abb. 58: Ergebnis des Grünlandmodells im Gebiet Giebenach – Arisdorf

Die Übertragung des Modells in andere Landschaftsräume mit Mischwirtschaft ist prinzipiell möglich. Ob die notwendigen Eingangsdaten in der Region zur Verfügung stehen ist aber eher ungewiss.

3.4.3 Abschätzung der Erosionsaktivität von Ackerflächen mit Hilfe der ABAG

Zur Abschätzung des Gewässeranschlusses von erosionsaktiven Flächen ist eine Information zur Höhe des Bodenabtrages durch Wasser wünschenswert, aber nicht zwangsläufig notwendig. Wenn jedoch alle benötigten Eingangsdaten vorhanden sind, sollte der Abtrag berechnet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit fand die Abschätzung des Gewässeranschlusses für den Kanton Basel-Landschaft statt. Das Projekt umfasste auch die Bestimmung des Bodenabtrages. Auf Basis der ABAG erfolgte eine wahrscheinlichkeitsbasierte Bestimmung des mittleren Bodenabtrages. Die Berechnung der aktuellen Erosion basiert dabei auf der Multiplikation der fünf Einzelfaktoren der ABAG. Abb. 59 zeigt das Vorgehen.

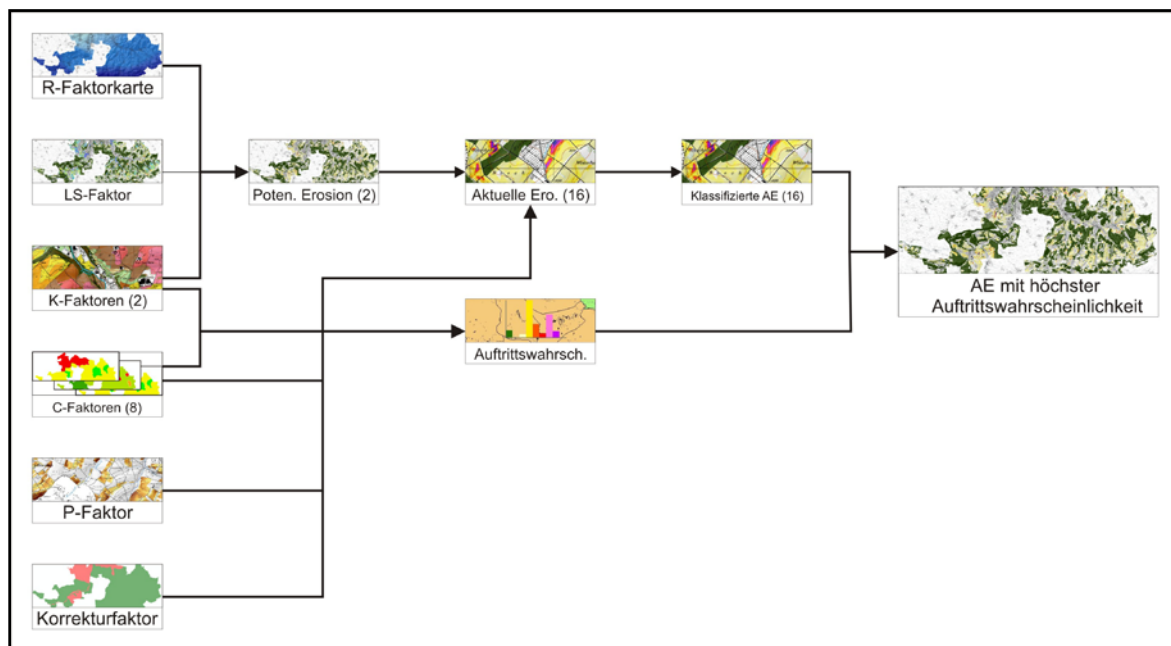


Abb. 59 ABAG-Berechnung für den Kanton Basel-Landschaft

Die Bestimmung von Fruchtfolgen und Humusverteilung auf Gemeindeebene führte dazu, dass für jeden Schlag der Bodenabtrag mit acht verschiedenen C-Faktoren und zwei verschiedenen K-Faktoren berechnet wurde. Die Bestimmung der Fruchtfolgen erfolgte auf Ebene von Gemeindegruppen auf Basis von aggregierten Anbaustatistiken. Die Humusverteilungen entstammen einer 10 % Stichprobe des Schlagregisters des Landwirtschaftlichen Zentrums Ebenrains, das insgesamt 15.000 Schläge umfasst. Das bedeutet, dass insgesamt 16 Werte für die aktuelle Erosion berechnet werden konnten. Durch Kombination der Einzelergebnisse mit ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit war es möglich den Bodenabtrag mit der höchsten Auftrittswahrscheinlichkeit zu berechnen. Damit steht eine komplexe Karte zur Verfügung, die den Bodenabtrag nicht als absolute Zahl wiedergibt, sondern die Wahrscheinlichkeit von hohen Abträgen vorhersagt.

3.4.4 Modellierung von Vorflutern und Gräben in Niedersachsen

Gerade das Gewässernetz ist bei der Modellierung des Gewässeranschlusses oftmals der limitierende Faktor. So fehlen in den ATKIS-Daten in Deutschland häufig kleinere Bäche und fast immer Grabensysteme, die der Entwässerung der Hangeinzugsgebiete dienen. Deshalb müssen diese fehlenden Informationen mit Hilfe von GIS-Modellierungen auf Basis des DGM und des Straßen- und Wegenetzes erstellt werden.

In den Eingangsdaten fehlende Bäche können mit Hilfe einer hydrologischen Modellierung dem Gewässernetz hinzugefügt werden. Das GIS SAGA kann mit Hilfe eines Multiple Flow Algorithmus mit hoher Wahrscheinlichkeit die Lage von Bächen vorhersagen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lage in 87 % der Fälle richtig eingestuft wird. Nur bei Flüssen, die im Rahmen von Flurbereinigungs- und Begradigungsmaßnahmen nicht mehr am tiefsten Punkt verlaufen, treten Fehler auf.

Gräben verlaufen in den meisten Fällen parallel zu Ackergrenzen und Wegen. Deshalb werden für einzelne Wegabschnitte die Hangneigung, die Größe und die Neigung des landwirtschaftlichen Einzugsgebietes und die Art der Straße bestimmt. Wenn die Neigung groß und das Einzugsgebiet groß sind, steht an dieser Stelle viel Wasser zur Verfügung. In den meisten Fällen verläuft an diesen Straßen auch ein Graben. Anhand von Schwellenwerten, die mit Hilfe von umfangreichen Kartierungen von Gräben in den Gebieten „Oberes Einzugsgebiet der Lamme“ und „Gronau – Alfeld - Sibbesse“ durchgeführt wurden, können Abschnitte ausgewiesen werden, bei denen die Wahrscheinlichkeit eines Graben hoch sind. Das Modell hat eine Trefferquote von 83 %.

3.4.5 Vorhersage von Einlaufschächten in der Nordwestschweiz

In der Nordwestschweiz gelangt durch Bodenerosion verlagertes Feinmaterial nicht nur durch Gräben in die Fließgewässer. Vielmehr findet die Entwässerung hauptsächlich durch unterirdische Kanalsysteme statt, die an der Oberfläche in regelmäßigen Abständen Einlaufschächte aufweisen. Um ein reales Bild der Gewässeranschlusssituation zu erzeugen, müssen hier, mit Hilfe einer Modellierung die Straßenabschnitte mit Einlaufschächten identifiziert werden.

Kartierungen in zwölf ausgewählten Schwerpunktgebieten lieferten Daten zum Muster des Auftrittes von Einlaufschächten in der Nordwestschweiz. Es zeigt sich, dass sich Einlaufschächte vor allem auf Flurstraßen und –wegen befinden, die asphaltiert und quer zur Fallrichtung des Hanges angelegt sind. Darüberhinaus sind häufig dort Einlaufschächte angebracht, wo Hangkonvergenzen vorliegen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt die Erstellung des Modells, das Straßenabschnitte ausweist, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Einlaufschächte haben. Als Eingangsdaten fungieren ein nach Typen differenziertes Straßennetz und ein DGM, aus dem die Hangneigung, die Einzugsgebiete der Straßenabschnitte sowie die Konvergenz abgeleitet werden.

Die Modellierung erfolgt dabei in 3 Schritten.

- Auswahl von relevanten Straßen und Wegen.
- Hydrologische Berechnung der Einzugsgebietsgröße des Straßenabschnittes und Modellierung der Hangneigung.
- Ausweisung von Abschnitten mit Einlaufschächten.

Abb. 60 stellt das Ergebnis der Modellierung in der Region Giebenach dar. Neben den modellierten Straßen und Wegen mit hoher Wahrscheinlichkeit von Einlaufschächten zeigt die Karte auch die kartierten Einlaufschächte.

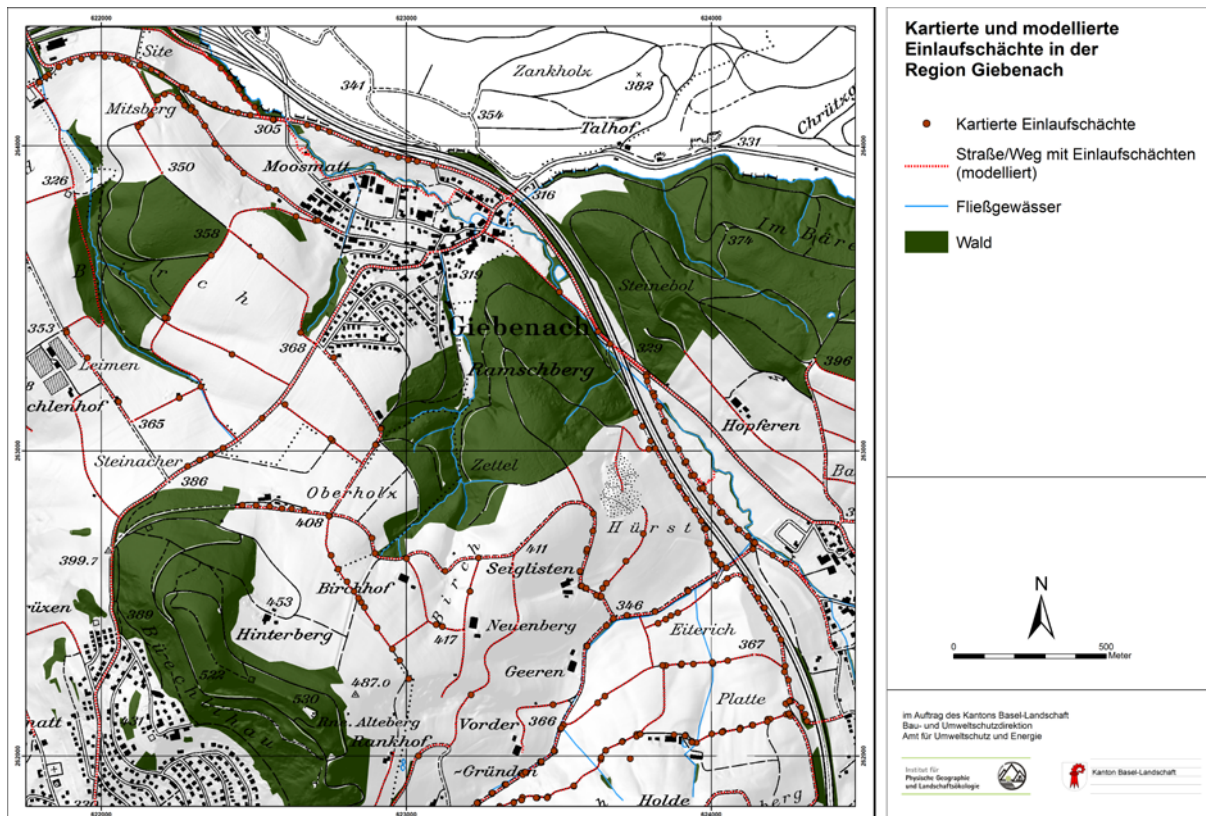


Abb. 60: Modellerte und kartierte Einlaufschächte im Gebiet Arisdorf-Giebenach

Überprüfungen des Modells zeigen, dass es zu einer leichten Überschätzung der Straßen mit Einlaufschächten kommt. Auf gut 6 % der ausgewiesenen Straßen befinden sich in der Realität keine Einlaufschächte. Ca. 5 % der Wege und Straßen, auf denen keine Einlaufschächte prognostiziert werden, haben eine Kanalisation unter sich. Der dadurch entstandene Modellfehler ist als gering einzustufen.

3.5 Modellierungsschritte von MOGWAF

MOGWAF setzt den in Abb. 54 vorgestellten Entscheidungsbaum aus dem Feldschlüssel „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ (MOSIMANN ET AL. 2007) Schritt für Schritt um. Als Inputgrößen benötigt das Modell lediglich die Landnutzung, die Schlagstruktur, die Fließgewässer bzw. die Grabenstruktur sowie ein DGM. Aus diesen Daten müssen in der ersten Modellphase mehrere Zwischenergebnisse erstellt werden. Dabei handelt es sich um hydrologisch abgegrenzte Schlagteile, Sedimentationsräume, Fließdistanzen und abflusswirksame Tiefenlinien. Die Prädiktoren, der jeweilige Modellierungsschritt und das eingesetzte GIS werden in Tab. 20 zusammengestellt.

Prädiktor	Modellierung / GIS
Hangneigung	Größte Höhendifferenz zur Nachbarzelle (ArcGIS)
Neigung zum Gewässer	Horizontale und vertikale Fließdistanz zum Gewässer (SAGA)
Entfernung zum Gewässer	Fließdistanz (SAGA)
Erosionsaktive Tiefenlinien (EATL)	Konvergenzindex (SAGA), Hangneigung der EATL, Einzugsgebiet der EATL (ArcGIS)
Sedimentationsräume	Hangneigung, Größe der Flächen (ArcGIS)
Topologische Beziehungen einzelner Schlagteile	ArcGIS
Einzugsgebiete	ArcGIS

Tab. 20: Die Prädiktoren von MOGWAF und ihre Modellierung

Durch die Kombination der Zwischenergebnisse kann eine Entscheidung gefällt werden, ob ein Schlag an ein Gewässer angeschlossen ist oder nicht. Abb. 61 gibt einen Überblick über die gesamte Modellstruktur. Das Ergebnis der Modellierung ist die differenzierte Ausweisung des Gewässeranschlusses. Folgende Stufen werden unterschieden:

- DA- Variante 1: Direkter Anschluss an das Gewässer; Schlag hat eine Neigung von mehr als 5% zum Gewässer.
- DA- Variante 2: Direkter Anschluss über eine abflussbündelnde Tiefenlinie.
- DA- Variante 3: Direkter Anschluss, Schlag hat eine Neigung von 3 - 5% zum Gewässer; kein Sedimentationsraum zwischen Schlag und Gewässer vorhanden.
- IA- Variante 1: Indirekter Anschluss über eine Tiefenlinie.
- IA- Variante 2: Indirekter Anschluss über einen Nachbarschlag.
- KA: Kein Gewässeranschluss (keine Erosionsgefährdung, zu große Entfernung zum Gewässer, keine direkte Verbindung zum Gewässer)

Die Ergebnisse des Modells korrespondieren mit den in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Varianten des direkten bzw. den in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Varianten des indirekten Gewässeranschlusses. Im Folgenden werden die wichtigen Zwischenschritte sowie die Ergebnisse von MOGWAF vorgestellt.

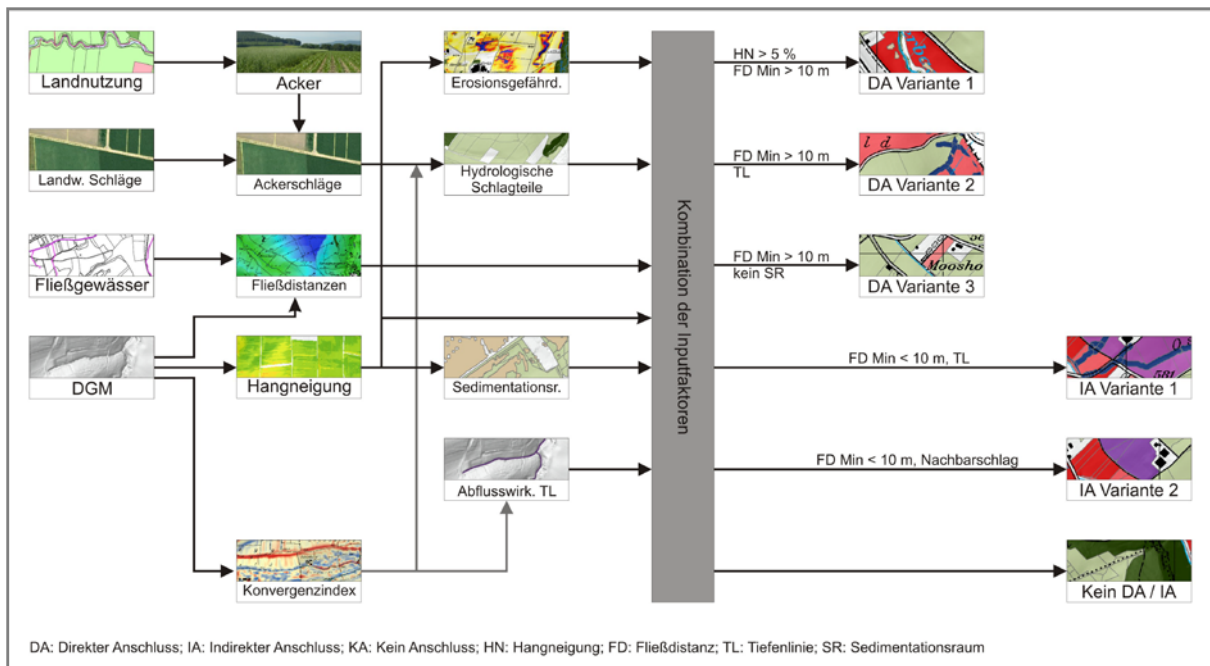


Abb. 61: Modellstruktur von MOGWAF

3.5.1 Schlagteilung durch Einsatz eines Konvergenzindexes

Ackerschläge werden immer größer (BRUNOTTE & FRÖBA 2007) und erstrecken sich zunehmend über mehrere Reliefeinheiten. Die Entwässerungsrichtung auf einem Schlag kann variieren, so dass verschiedene Teile eines Schlages an unterschiedliche Gräben oder Flusssysteme angeschlossen sind. Für die Modellierung des Gewässeranschlusses müssen diese komplexen Schläge geteilt werden. Die Teilung basiert auf der Modellierung von Scheitel- und Tiefenlinien auf Basis des Konvergenzindexes nach CONRAD (2006). Abb. 62 zeigt die Ergebnisse der Schlagteilung für das Obere Einzugsgebiet der Lamme.

Wenn eine Tiefen- oder Scheitellinie einen Schlag in voller Länge durchzieht, wird dieser unterteilt. Falls diese nur in den Schlag hineinreichen, bleibt der ursprüngliche Schlag als Einheit bestehen. Um die Zerstückelung von Schlägen durch das Modell zu verhindern, wird die Teilung aufgehoben, wenn ein Schlag in einen sehr großen und einen äußerst kleinen Teil (10 % der Schlagfläche) unterteilt wird.

Die Teilung der Schläge stellt einen sehr wichtigen Schritt in der Modellierung des Gewässeranschlusses dar. Durch dieses automatisierte Verfahren kann die Gewässeranschlusssituation wesentlich differenzierter und exakter dargestellt werden.

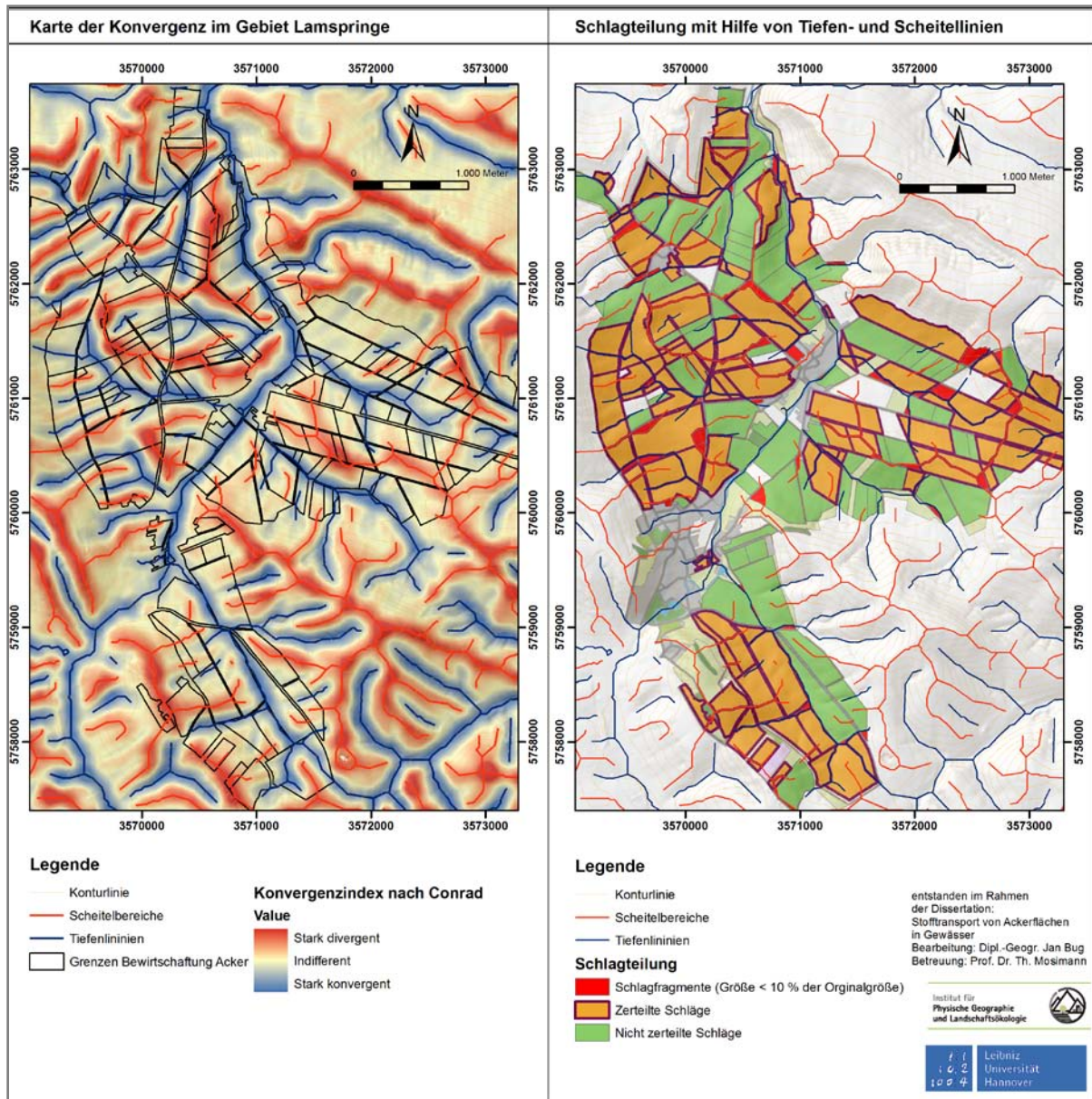


Abb. 62: Schlagteilung mit Hilfe des Konvergenzindex nach O. Conrad (2006) im Oberen Einzugsgebiet der Lamme

3.5.2 Modellierung von Fließentfernungen zwischen Acker und Vorfluter

Ein grundsätzliches Problem bei der Modellierung des Gewässeranschlusses ist die Bestimmung der Entfernung vom Schlag zum Gewässer. Je größer die Entfernung ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit des Gewässereintrages. Bei großen Distanzen wird deshalb auch prinzipiell von einem indirekten Gewässeranschluss und nicht von einem direkten gesprochen. Der Entscheidungsbaum verlangt diese Größe an mehreren Knotenpunkten. Eine einfache Berechnung der euklidischen Distanz, also der kürzesten Distanz zwischen zwei Punkten im Raum, ohne Berücksichtigung des Reliefs, vom Schlag zum Gewässernetz ist dabei nicht zielführend. So gibt es Grabensysteme, die im Hang oberhalb eines zu betrachtenden Schlages liegen können. Da der Schlag in die andere Richtung entwässert, ist

die euklidische Distanz zu dem oberhalb gelegenen Graben für den Entscheidungsbaum nicht relevant. Erst die Distanz zum Vorfluter des Schlages bringt die geforderte Information. Deshalb wird anstatt der euklidischen Distanz, die Fließdistanz als Prädiktor im Modell integriert.

Die Fließdistanz berechnet das GIS SAGA auf Basis eines Multiple Flow Algorithmus. Ein Beispiel für diese Berechnung zeigt Abb. 63. Mit Hilfe einer zonalen Statistik können auf Basis der Fließdistanz die Schläge selektiert werden, die weiter als 500 m von einem Gewässer entfernt sind.

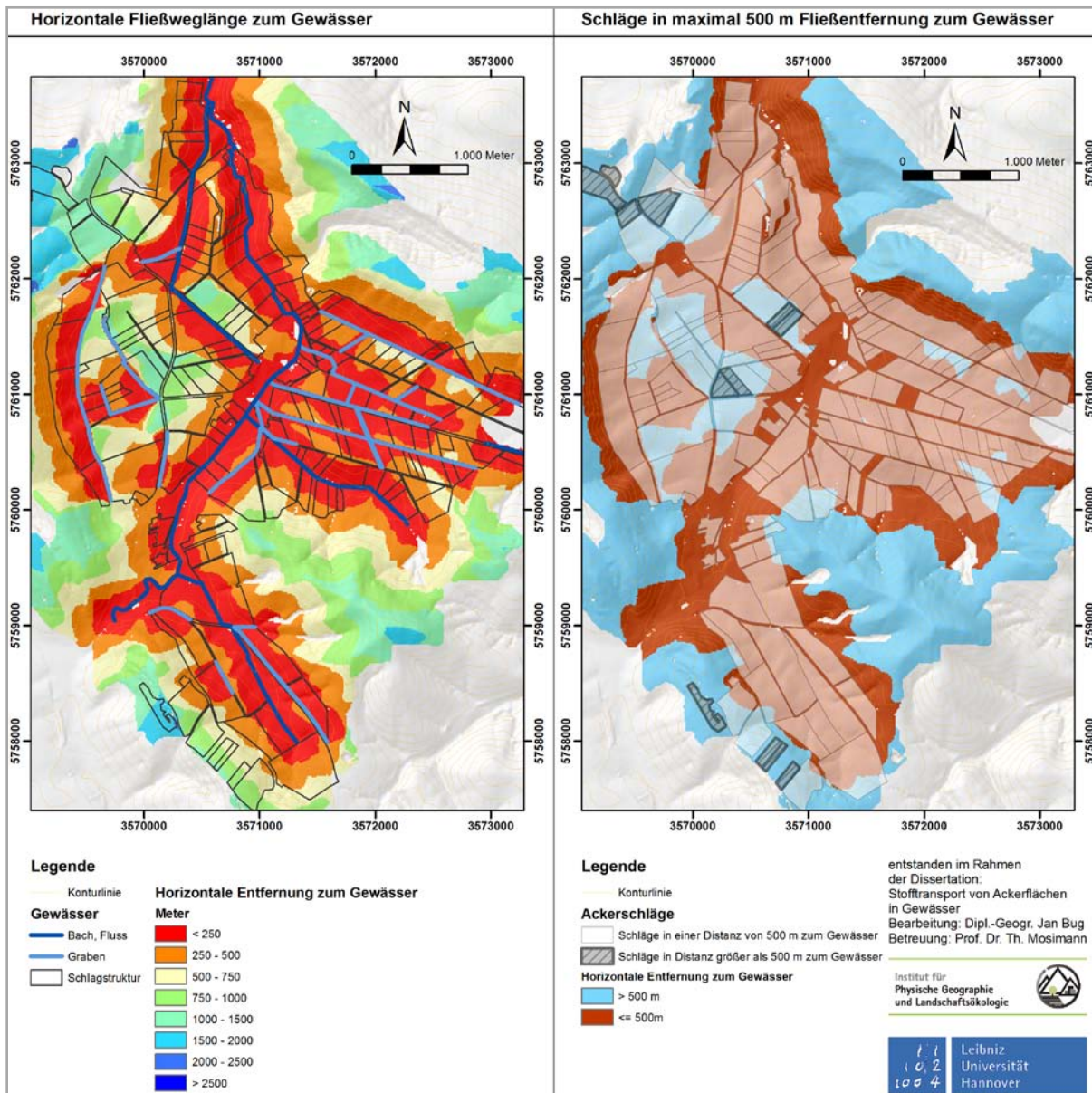


Abb. 63: Fließentfernungen zu Gewässern im Oberen Einzugsgebiet der Lamme und selektierte Schläge mit weniger als 500 m Fließstrecke zum nächstliegenden Gewässerabschnitt

Neben der horizontalen Fließdistanz kann mit Hilfe von SAGA auch die vertikale Fließdistanz zum Gewässer berechnet werden. Aus diesen beiden Größen lässt sich dann mittels der folgenden Formel die Neigung zum Gewässer berechnen.

$$\text{Neigung zum Gewässer [\%]} = \frac{\text{Vertikale Fließdistanz} * 100}{\text{Horizontale Fließdistanz}}$$

Diese Größe wird benötigt um den ersten Typ des direkten Gewässeranschlusses auszuweisen, also Schläge, die in weniger als 10 m Entfernung vom Gewässer entfernt liegen und deren Hangneigung größer als 5 % ist.

3.5.3 Modellierung von erosionsaktiven Tiefenlinien mit Gewässeranschluss

Die erosionsaktiven Tiefenlinien modelliert LINERO (Kap. 2.4.2.2). Diese nutzt MOGWAF, sofern sie in einer Fließentfernung von weniger als 25 m von einem Gewässer entfernt liegen. Dann hat die erosionsaktive Tiefenlinie auch einen Gewässeranschluss. Die Dauerbeobachtung hat gezeigt, dass eine Tiefenlinie, die weiter als 25 m vom Vorfluter entfernt liegt, nicht zum Gewässereintrag führt. Zwischen der Tiefenlinie und dem Vorfluter befindet sich zumeist ein Sedimentationsraum, der das in der Tiefenlinie abgeleitete Wasser bremst.

3.5.4 Kombination der Eingangsdaten und der Zwischenergebnisse zur Modellierung des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen

Die Bestimmung des Gewässeranschlusses von erosionsaktiven Flächen wird in drei Phasen durchgeführt.

- Phase 1: Ermittlung von Schlägen, die sicher keinen Gewässeranschluss haben: nicht erosionsaktiv oder Lage in einer Entfernung von über 500 m zum Vorfluter.
- Phase 2: Prüfung der drei Varianten des direkten Gewässeranschlusses: Da der Entscheidungsbaum hierarchisch gegliedert ist, kann ein Schlag nur eine Zuweisung bekommen, obwohl zwei Zuweisungen möglich sind. So kann ein Schlag z.B. direkt, aufgrund der Hangneigung zum Gewässer, und über eine abflussbündelnde Tiefenlinie angeschlossen sein.
Direkter Anschluss, unmittelbare Nähe zum Gewässer Neigung > 5 %.
Direkter Anschluss über Tiefenlinie.
Direkter Anschluss, da kein Sedimentationsraum vorhanden ist.
- Phase 3: Prüfung der Varianten des indirekten Gewässeranschlusses:
Anschluss über eine erosionsaktive Tiefenlinie?
Anschluss über einen Nachbarschlag ?
Kein Anschluss?

3.6 Ergebnisse der Modellierung mit MOGWAF

3.6.1 Gewässeranschlusskarte Oberes Einzugsgebiet der Lamme

Das Obere Einzugsgebiet der Lamme weist aufgrund von hohen Hangneigungen (zwischen 2 % und 22 %), langen Fließwegen, schluffdominierten und humusarmen Böden eine hohe Erosionsgefährdung der Ackerflächen auf. Ein weitverbreitetes Mosaik von Gräben und Flüssen führt zu einem sehr hohen Gewässeranschlussgrad der Ackerflächen (Abb. 64).

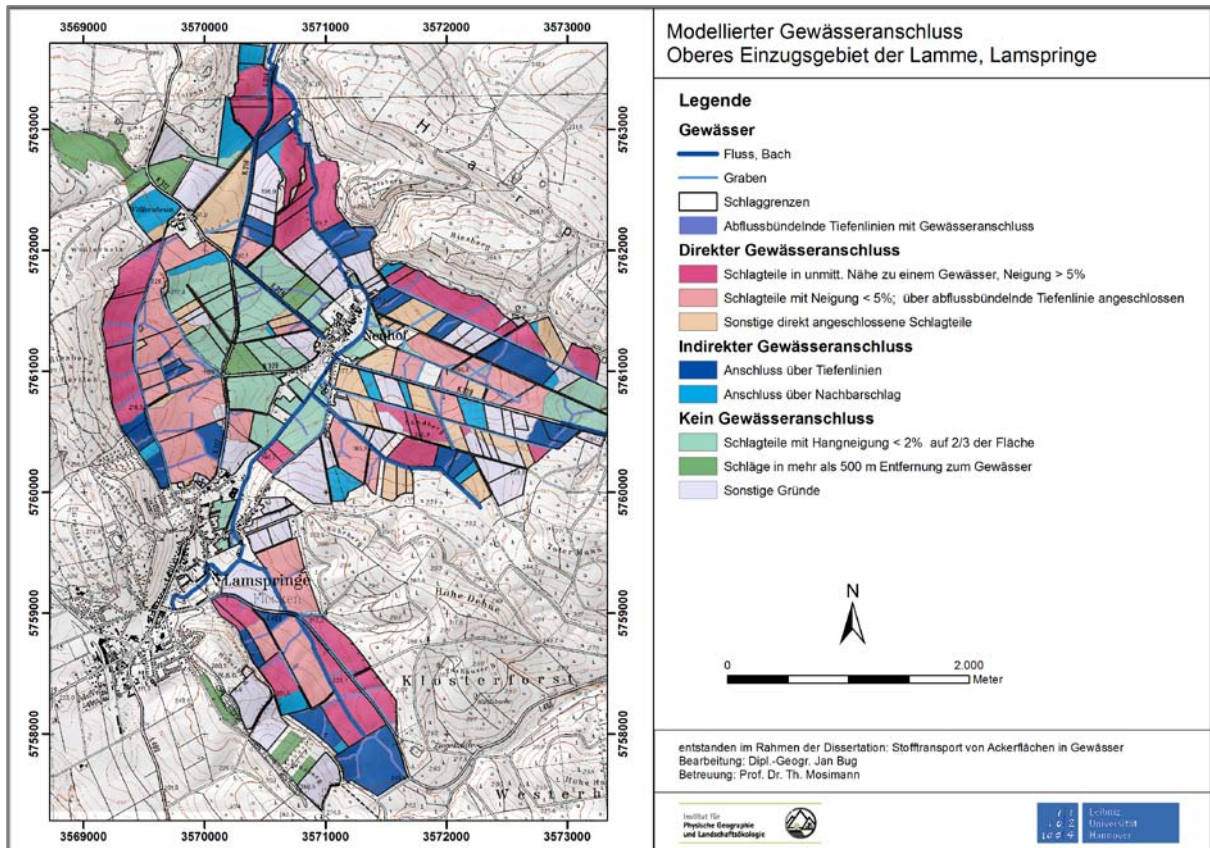


Abb. 64: Gewässeranschlusskarte des Oberen Einzugsgebietes der Lamme

Insgesamt sind im Oberen Einzugsgebiet der Lamme 65% der Ackerfläche an ein Gewässer angeschlossen. Das bedeutet für den Stoffhaushalt der Gewässer eine hohe Belastung bei Starkniederschlägen mit Erosionsfolgen.

Die äußeren Flächen des Einzugsgebietes haben einen vergleichsweise hohen Anschlussgrad. Hier weisen die Schläge häufig hohe Hangneigungen zu den Vorflutern auf. Durch das hügelige Relief bedingt, sind auch kleine Schläge von Tiefenlinien durchzogen, die zu einem Gewässeranschluss führen. Zusätzlich führt das weitvernetzte Mosaik von Gräben zu den hohen Anschlussgraden.

Einige wenige Flächen am Rand des Gebietes sind weiter als 500 m von einem Gewässer entfernt und deshalb nicht angeschlossen. Im relativ flachen Zentrum des Gebietes reicht die Hangneigung nicht für den Transport von Feinerde von der Ackerfläche in ein Gewässer aus. Deshalb prognostiziert MOGWAF hier keinen Anschluss. Tab. 21 stellt die Ergebnisse der Anschlussvarianten im Gebiet zusammen.

Anschluss	Variante	Fläche [%]
Direkter Anschluss	Unmittelbare Nähe zum Gewässer	20,5
Direkter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	19,2
Direkter Anschluss	Kein Sedimentationsraum	9,2
Indirekter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	10,3
Indirekter Anschluss	Über Nachbarschlag an ein Gewässer angeschlossen	5,4
Kein Anschluss	Diverse Gründe	35,4

Tab. 21: Ergebnisse von MOGWAF im Untersuchungsgebiet Lamme

Das Obere Einzugsgebiet der Lamme repräsentiert den Landschaftstyp des ackerbaulich intensiv genutzten niedersächsischen Berg-und Hügellandes. Durch das fast komplette Fehlen von Grünland, die hohen Hangneigungen von 3 – 20 % und das differenzierte Gewässernetz ist hier der Großteil der Ackerfläche an ein Gewässer angebunden.

3.6.2 Gewässeranschlusskarte im UG Gronau – Alfeld – Sibbesse

Das UG Gronau – Alfeld – Sibbesse ist im Gegensatz zum Oberen Einzugsgebiet der Lamme ein differenziert genutzter Landschaftsauschnitt. In der Leineau und auch im östlichen Teilgebiet, dem Teileinzugsgebiet der Despe, werden größere Flächen als Grünland genutzt. Die Hangneigungen sind im UG im Mittel geringer als im Unteren Einzugsgebiet der Lamme. Deshalb ist der Anschlussgrad der Ackerflächen hier auch wesentlich geringer (Abb. 65). Wie Tab. 22 darlegt, weisen nur etwa 20 % der Ackerfläche einen direkten oder indirekten Gewässeranschluss auf, wovon zwei Drittel direkt angeschlossen sind.

Auf 80 % der Ackerfläche des UG ist nicht mit dem Transport von Feinerde in Gewässer zu rechnen. Teilweise fungieren Grünlandflächen als Sedimentationsraum, teilweise ist die Hangneigung kleiner als 2 %, so dass Feinerde nicht in nennenswertem Maß mobilisiert werden kann.

Anschluss	Variante	Fläche [%]
Direkter Anschluss	Unmittelbare Nähe zum Gewässer	4,0
Direkter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	6,4
Direkter Anschluss	Kein Sedimentationsraum	3,5
Indirekter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	3,6
Indirekter Anschluss	Über Nachbarschlag an ein Gewässer angeschlossen	2,6
Kein Anschluss	Diverse Gründe	79,9

Tab. 22: Anteil der Varianten des Gewässeranschlusses im UG Gronau – Alfeld - Sibbesse

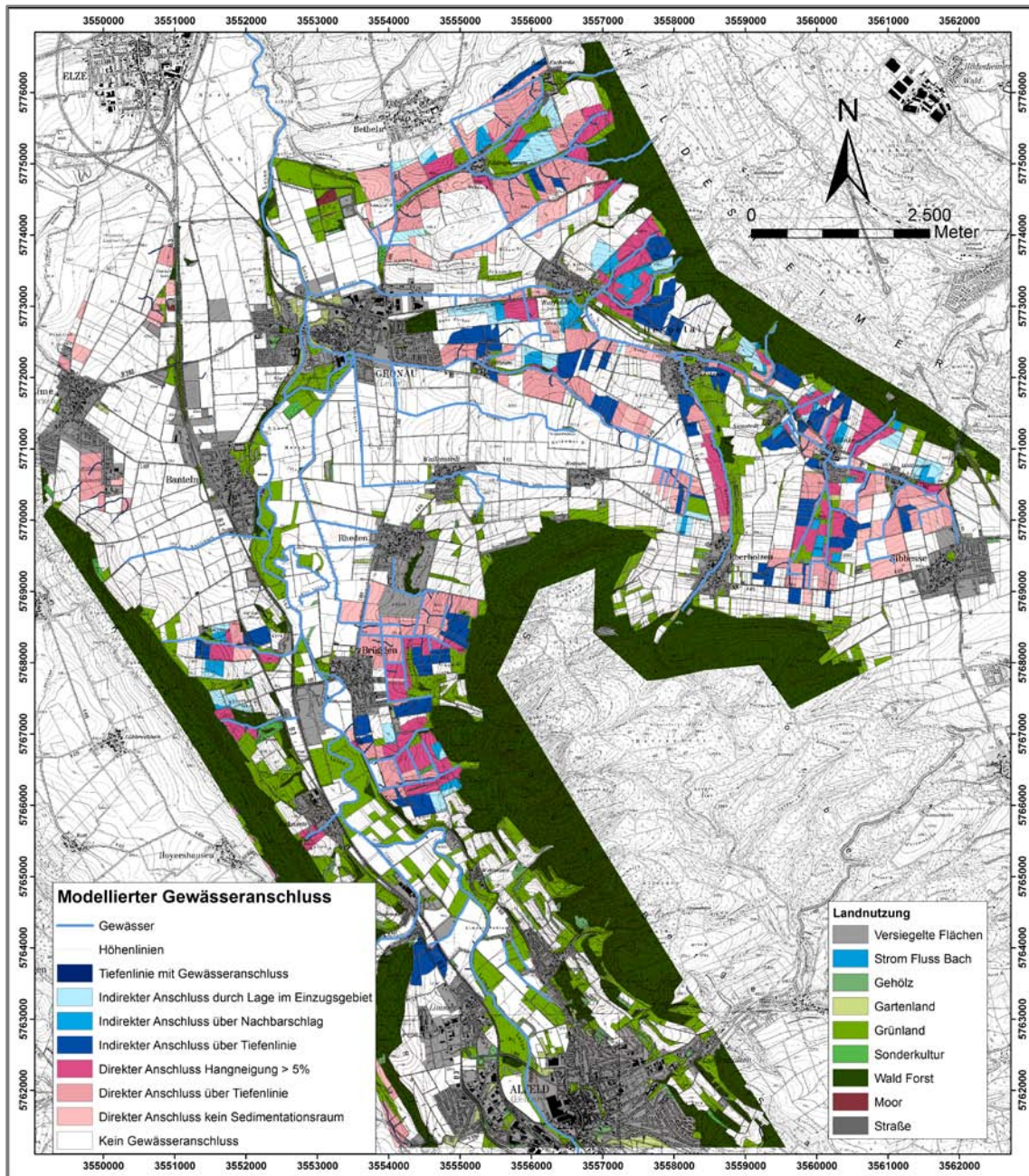


Abb. 65: Gewässeranschlusskarte für das UG Gronau – Alfeld – Sibbesse

Die Gewässeranschlusskarte zeigt, dass vor allem an den steilen Abhängen der Sieben Berge und des K ülfs, an der Despe und am Eddinghäuser Bach ein hoher Anschlussgrad zu verzeichnen ist. Die Hangneigungen zu den Gewässern fallen hoch (bis zu 18 %) aus, Grünstreifen kommen nur in Ausnahmefällen vor. Viele Tiefenlinien führen ebenfalls zum Anschluss. Im Norden des UG weisen wesentlich weniger Flächen Gewässeranschluss auf. Hier ist die Erosionsgefährdung geringer, die Neigungen zu den Gewässern reichen nicht aus. Tiefenlinien treten in der Landschaft nicht auf.

3.6.3 Information Gewässeranschluss als Bestandteil der Erosionsgefährdungskarte des Kantons Basel-Landschaft.

Im Auftrag des Kantons Basel-Landschaft entstand am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie eine neue Erosionsgefährdungskarte. Durch innovative GIS-Techniken zur Berechnung des LS-Faktors sowie einen wahrscheinlichkeitbasierten Ansatz bei der C- und K-Faktor-Berechnung konnte eine differenzierte Gefährdungskarte erzeugt werden. Die Karte weist Schwerpunkte der Erosionsgefährdung aus und gibt für jeden Schlag den Bodenabtrag mit der höchsten Auftrittswahrscheinlichkeit an (Kap. 3.4.3). Die Karte enthält zusätzlich die Information Gewässeranschluss. Im Rahmen dieser Neuberechnung der Erosionsgefährdung wurde deshalb eine Gewässeranschlussmodellierung für ca. 90 km² Landwirtschaftsfläche durchgeführt. Abb. 66 (Beispielgebiet Giebenach – Arisdorf) und Tab. 23 geben einen Einblick in die Modellierungsergebnisse.

Anschluss	Variante	Fläche [%]
Direkter Anschluss	Unmittelbare Nähe zum Gewässer	10,5
Direkter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	0,6
Indirekter Anschluss	Über erosionsaktive Tiefenlinie an ein Gewässer angeschlossen	0,1
Indirekter Anschluss	Über Nachbarschlag an ein Gewässer angeschlossen	1,5
Indirekter Anschluss	Über Einlaufschacht an ein Gewässer angebunden	34,9
Kein Anschluss	Bodenabtrag < 2 t pro ha und Jahr	36,7
Kein Anschluss	Entfernung Unterrand der Fläche > 500 m	1,1
Kein Anschluss	Hangneigung auf 2/3 der Fläche unter 2%	6,2
Kein Anschluss	Keine Verbindung zu Gewässern oder Straßen	8,5

Tab. 23: Anteil der Varianten des Gewässeranschlusses im Kanton Basel-Landschaft

Der Anschlussgrad an oberirdische Gewässer (direkt und indirekt) ist mit nur 12 % im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten sehr gering. Gründe für den geringen Anschlussgrad sind:

- Ein hoher Anteil an Grünlandfläche und damit an potentiellen Sedimentationsräumen.
- Das Vorhandensein von Gewässerschutzstreifen.
- Ein hoher Anteil der Entwässerung der landwirtschaftlichen Flächen verläuft unterirdisch.
- Das intensiv ackerbaulich genutzte Lösshügelland ist relativ flach, gerade im Bereich der Gewässer.

Vor allem der letzte Punkt spiegelt sich in den Ergebnissen der Tab. 23 wieder. Auf knapp 37 % der Flächen ist der Bodenabtrag nach ABAG kleiner als 2 t/ha*a und damit unterhalb der Relevanzgrenze für den Gewässereintrag. Im Gebiet Arisdorf-Giebenach besteht hingegen ein hoher Anschlussgrad (Abb. 66). Dieses Gebiet liegt im Übergang zwischen den

landschaftlichen Großräumen Lösshügelland im Nordwesten und dem Tafeljura im Südosten.

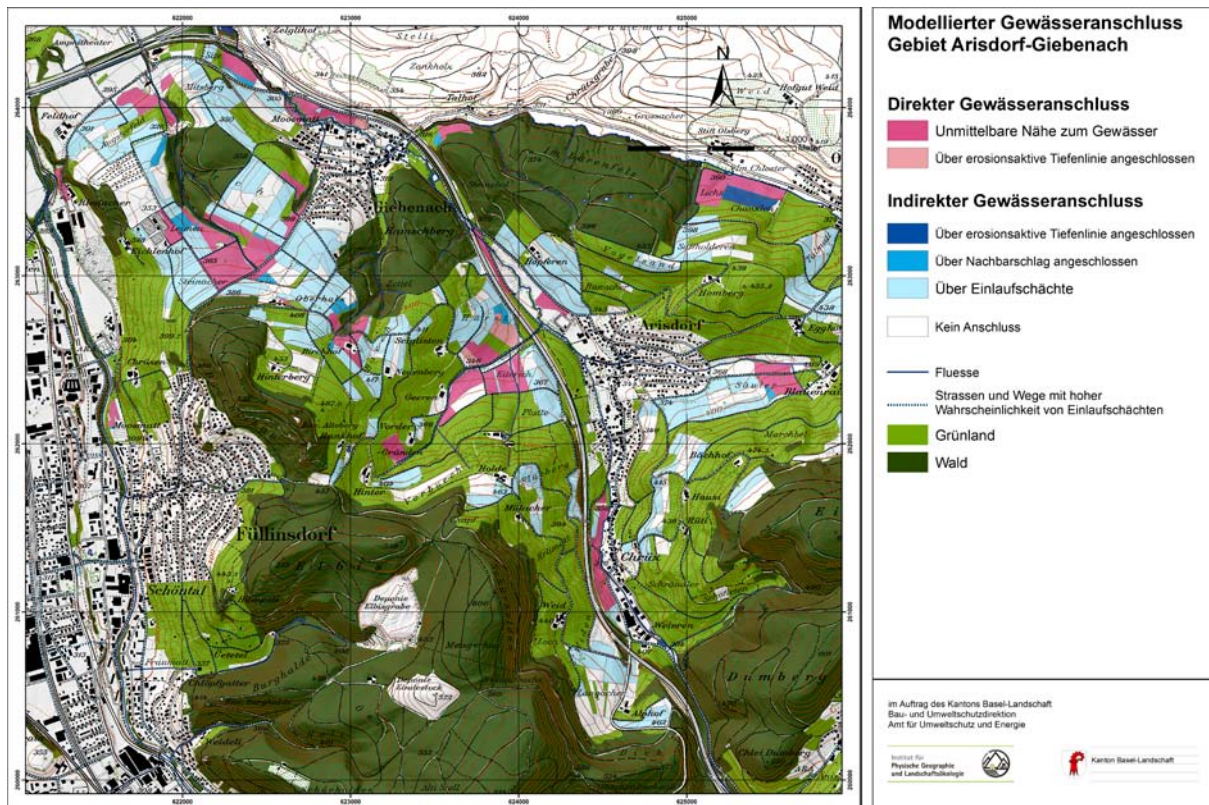


Abb. 66: Gewässeranschlusskarte für das Teilgebiet Arisdorf-Giebenach

Im Tafeljura im Südosten werden im Gegensatz zum Lösshügelland im Nordwesten des Kartenausschnittes, viel mehr Flächen als Grünland genutzt. Die wenigen Ackerflächen weisen aber zu einem hohen Anteil Gewässeranschluss auf. Das liegt an den hohen Hangneigungen (bis zu 25 % auf Ackerflächen und an dem weit verzweigten Bachnetz. Im Lösshügelland ist der Anteil der Ackerflächen an der gesamten Landnutzung wesentlich größer. Der Anschluss an Gewässer verläuft aber in den meisten Fällen indirekt über einen Einlaufschacht. Als Gründe für den auch im gesamten Kanton hohen Anteil von Flächen, die indirekt über einen Einlaufschacht angebunden sind, erweisen sich folgende:

- Ein dichtes Netz von Einlaufschächten.
- Keine Grünstreifen zwischen Acker und Einlaufschächten.
- Einlaufschächte häufig in Bereichen mit Hangneigungen über 6 %.

Durch den indirekten Anschluss über Einlaufschächte sind insgesamt über 50 % der Ackerflächen im Kanton Basel-Landschaft an Gewässer angebunden.

3.7 Validierung der Modellergebnisse

Bei der Validierung von MOGWAF stellen sich drei Hauptfragen zur Modellgüte:

- Wird der Entscheidungsbaum aus der Arbeitshilfe „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ richtig umgesetzt?
- Sind die Ergebnisse der Submodelle zur Prognose von Einlaufschächten und die Gesamtergebnisse im Landschaftsraum nachvollziehbar?
- Findet von den nach MOGWAF angeschlossenen Flächen tatsächlich Stofftransport in Gewässer statt?

Die erste Frage beantwortet der Vergleich der Daten einer unabhängig durchgeführten Kartierung und der Modellierung mit MOGWAF im UG Alfeld – Gronau – Sibbesse. Im Kanton Basel-Landschaft fanden ebenfalls Kartierungen zur Überprüfung der Gültigkeit des Modells statt. Dabei wurden auch die modellierten Eingangsdaten Grünland und Straßen mit Einlaufschächten überprüft. Der Vergleich zwischen den Prognosen des Modells und den Daten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen stellt den letzten Schritt der Validierung dar.

3.7.1 Vergleich der Ergebnisse mit Detailkartierungen im Leinebergland

Für die Überprüfung von MOGWAF im UG Alfeld – Gronau – Sibbesse stehen Resultate einer unabhängig durchgeführten Kartierung zur Verfügung. Die Kartierungen wurden im Jahr 2008 im Rahmen der Erstellung des Schlüssels „Gewässeranschluss von Ackerflächen“ durchgeführt. Abb. 67 zeigt beispielhaft den kartierten und den modellierten Gewässeranschluss im Einzugsgebiet des Eddinghäuser Bachs, Landkreis Hildesheim. Etwa die Hälfte der ackerbaulich bewirtschafteten Schläge ist an ein Gewässer oder einen Graben angeschlossen. Viele Flächen haben einen direkten Gewässeranschluss. Der vergleichsweise hohe Anschlussgrad ist auf das weitverzweigte Grabensystem, das bewegte Relief mit meist hohen Hangneigungen (3 - 16 %) und die daraus resultierende hohe Erosionsgefährdung zurückzuführen. Das heterogene Relief mit vielen erosionsaktiven Tiefenlinien leistet weiterhin einen Betrag zum Gewässeranschluss.

Im Vergleich zu den Kartierergebnissen unterteilt MOGWAF die Schläge verstärkt in kleinere Subeinheiten. Bei der Feldkartierung fand die Betrachtung eher auf Schlagebene statt. Das Modell liefert daher ein differenzierteres Bild der Fließbeziehungen. Das führt zu einem höheren Anschlussgrad. Die Beziehungen werden durch das Modell exakter beschrieben und weniger stark generalisiert. Die Ergebnisse der beiden Vorgehensweisen stimmen auf 80 % der untersuchten Schlagteile überein, in 20 % der Fälle gibt es Abweichungen. In 9 % der Fälle sagt das Modell MOGWAF Gewässeranschluss voraus, der bei der Feldaufnahme nicht erkannt wurde. Nur in einem Fall wird ein im Feld festgestellter Anschluss nicht modelliert. Die Modellierung führt zu einer höheren Anzahl von angeschlossenen Schlägen, da die abflussbündelnden Tiefenlinien in das Modell integriert werden. Im Feld sind diese Strukturen zum Teil nicht richtig oder nicht eindeutig zu erkennen. MOGWAF kann auch zu Fehleinschätzungen führen, da es lokale Strukturen wie Bankette nur zum Teil erkennt.

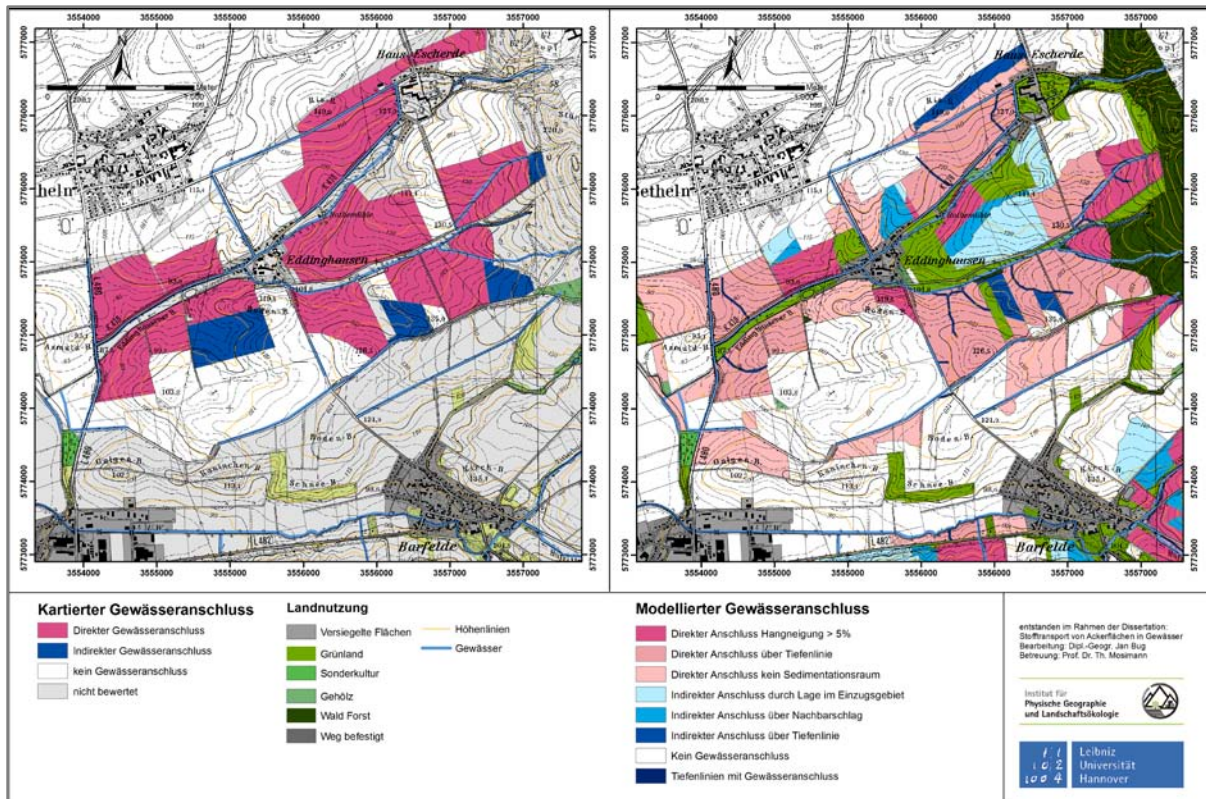


Abb. 67: Kartierter und modellierter Gewässeranschluss im Gebiet Eddinghausen

Das Modell weist auch in den anderen untersuchten Schwerpunktgebieten mehr Flächen mit Anschluss aus als die Kartierung. Tab. 24 stellt die Ergebnisse des Vergleiches für alle drei Gebiete vor, in denen Kartierungen durchgeführt worden sind. Es zeigt sich, dass der Modellfehler im Gebiet Brüggen-Süd besonders klein ist. Das liegt an der Tatsache, dass hier über 80 % der Schläge an ein Gewässer angeschlossen sind. Im Gebiet Hönze ist der Fehler ebenfalls geringer als in Eddinghausen. Hier sind ca. 67 % der Flächen direkt, oder indirekt an ein Gewässer angebinden. Je höher der Anschlussgrad, desto geringer ist die Fehlerquote der Modellierung.

Gebiet	Anzahl Schlagteile	Anteil Schläge mit Anschluss Kartierung [%]	Anteil Schläge mit Anschluss MOGWAF [%]	Übereinstimmung der Methoden [%]
Eddinghausen	55	60,00	74,55	80,0
Brüggen-Süd	34	76,47	82,35	91,2
Hönze	40	67,50	67,50	87,5

Tab. 24: Vergleich der Ergebnisse von MOGWAF mit Kartiererergebnissen im südlichen Niedersachsen

Eine Abweichung von 9 – 20 % (Schlaganzahl), bzw. 5 – 13 % (Fläche) belegt für die Teilgebiete des UG Alfeld – Gronau – Sibbesse insgesamt, dass die Ergebnisse der GIS-Umsetzung des Schlüssels plausibel und verlässlich sind. Während die Kartierung der 129 Schlagteile etwa 40 Arbeitsstunden benötigte, nahm die Modellierung nur etwa fünf Stunden in Anspruch. Darüberhinaus ist das Ergebnis der Modellierung stärker differenziert. Das Modell liefert auch Gründe für den Gewässeranschluss. Dadurch können gezielte Maßnahmen, wie z.B. die Begrünung von Tiefenlinien direkt am Ergebnis abgelesen werden.

3.7.2 Validierung in der Nordwestschweiz

Die Validierung von MOGWAF im Kanton Basel-Landschaft erfolgt mit Hilfe von Feldbegehungen in zwölf zuvor ausgewiesenen Schwerpunktgebieten. Wichtige Fragen sind dabei:

- Wird die Grünlandfläche richtig vorhergesagt?
- Werden die Straßen mit Einlaufschächten richtig modelliert?
- Stimmt die beobachtete Gewässeranschlusssituation mit der Modellierung überein?

Die Überprüfung der ersten Fragestellung stellt gleichzeitig die Validierung des in Kap. 3.4.2 vorgestellten Grünland-Ackerland-Modells dar. Eine Validierung mit Hilfe von Luftbildern kann hier nur einen geringen Betrag leisten, um die Prognosegüte des Modells zu bestimmen. Der Unterschied zwischen Grünlandflächen und als Kunstwiesen genutzten Ackerflächen kann nur schwer auf Basis von Luftbildern ermittelt werden. Beide Flächen unterscheiden sich in der Grünlandtextur, der Schlaggeometrie und der Artenzusammensetzung. Kunstwiesen haben meist eine rechtwinkelige Struktur, die Textur ist extrem gleichmäßig und nur wenige Arten (4-6) kommen vor. Grünland weist komplexere und abwechslungsreichere Strukturen und auch mehr Arten auf. Die Unterschiede innerhalb der Grünlandgruppe erweisen sich aber als sehr groß, abhängig davon ob die Fläche als Wiese oder Weide genutzt wird. Die Ermittlung der tatsächlichen Nutzung kann deshalb nur im Feld stattfinden, da auf Luftbildern weder die Textur noch die Artenzusammensetzung bestimmbar sind.

Die Validierung des Einlaufschachtmodells findet für einzelne Straßen- und Wegabschnitte statt. Dabei stellt sich die Frage, ob unter dem Weg auch tatsächlich eine Kanalisation vorhanden ist, in die über Einlaufschächte Oberflächenwasser und Feinerde in die Gewässer gelangen kann. Auch hier bietet es sich an, das in Kap. 3.4.5 vorgestellte Modell im Feld überprüfen zu lassen. GIS-Daten zur Kanalisation standen nicht zur Verfügung.

Die Ergebnisse werden auf Plausibilität überprüft, indem die Entfernung zwischen Schlag und Gewässer, die allgemeinen Fließverhältnisse und die Neigungen nachvollzogen werden. Eine Kartierung mit dem Schlüssel selber kann aufgrund des hohen Zeitbedarfs nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der drei Validierungsschritte fasst Tab. 25 zusammen.

	Übereinstimmung	Unterschiede	Fehlerquote
	Anzahl	Anzahl	Anteil [%]
Grünlandmodell	126	35	21,74
Einlaufschachtprognose	99	13	11,61
Gewässeranschluss	109	15	12,10

Tab. 25: Validierungsergebnisse von MOGWAF im Kanton Basel-Landschaft

Die Validierung zeigt, dass das Grünland-Ackerland-Modell die höchste Fehlerquote der drei überprüften Modelle aufweist. Folgende Tendenzen ergaben sich:

- Im Lösshügelland unterschätzt das Modell den Grünlandanteil. Gerade in der Nähe der Höfe werden einige Fläche als Weiden genutzt. Diese Flächen sind weder stark geneigt noch verfügen sie über für den Ackerbau ungeeignete Böden.
- Im Jura überschätzt das Modell den Grünlandanteil. Dort wird zum Teil in extrem steilen Lagen (bis zu 25 %) Ackerbau betrieben.

Im Grünland-Ackerland-Modell stellen die Prädiktoren Hangneigung und Nutzungseignung die größten Fehlerquellen dar. Im Gegensatz dazu sind die Einzelbäume und die ökologischen Ausgleichsflächen zu über 95 % sichere Prädiktoren für die Prognose der Grünlandfläche. Die Ergebnisse fließen in die Modellkalibrierung ein, so dass der Fehler auf 12,2 % Flächenanteil minimiert werden konnte.

Die Prognose der Einlaufschächte ist in den Gebieten zu knapp 90 % zutreffend. Es gibt Wege mit prognostizierten Einlaufschächten, auf denen tatsächlich keine sind, aber auch Wege mit Einlaufschächten, wo das Modell keine prognostiziert. Der Fehler ist in beiden Landschaftsräumen etwa gleich groß. Eine Verbesserung des Modells kann nur durch bessere Eingangsdaten realisiert werden.

Die Prognose der Gewässeranschlusssituation trifft in gut 90 % der Fälle zu, resultierende Fehler aus den beiden Submodellen nicht miteingeschlossen. Das entspricht in etwa der Modellgüte, die auch in Niedersachsen erreicht wird. Das belegt die Übertragbarkeit von MOGWAF in andere Landschaftsräume. Als Fehlerquellen erweisen sich nicht in den Daten vorhandene Grünstreifen, falsche Schlagtrennungen und falsch prognostizierte Bäche.

Fazit

Die Modellierungen liefern in der Nordwestschweiz gute Ergebnisse. Die Fehlerquoten sind auf Probleme mit den Eingangsdaten oder aber auf regionale Besonderheiten zurückzuführen. Eine deutlich bessere Annäherung an die Realität ist nur durch aufwendige Kartierungen zu erreichen und dementsprechend mit hohen Kosten verbunden.

3.7.3 Validierung mit Daten der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen

Im dritten Schritt der Validierung von MOGWAF wird das Modell mit Daten von tatsächlich aufgetretenen Übertritten getestet. Dazu dienen die Daten der Erosionsdauerbeobachtung (MOSIMANN ET AL. 2009). Das Modell prognostiziert den Gewässeranschluss für alle Schläge der Dauerbeobachtung. Danach erfolgt die Überprüfung, ob von den angeschlossenen Flächen bislang tatsächlich Bodenmaterial in die Gewässer gelangt ist. Der Entscheidungsbaum des Gewässeranschlussschlüssels entstand auf Basis der südniedersächsischen Gebiete (Lamspringe, Klein Ilde, Nette). Die Ergebnisse für diese Gebiete spiegeln also die Kalibrierung von MOGWAF wieder. Das nordniedersächsische Gebiet Barum und das westniedersächsische Gebiet Küngdorf dienen als unabhängige Validierungsgebiete. Tab. 26 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs.

Gebiet	Schlagteile [n]	Anteil Anschluss [%]		Übereinstimmung der Methoden [%]
		EDB	MOGWAF	
Lamspringe	20	75,0	95,0	77,3
Klein Ilde	13	61,5	84,6	76,9
Barum	24	58,3	66,7	91,7
Küingdorf	10	50,0	70,0	80

Tab. 26: Ergebnisse der Erosionsdauerbeobachtung im Vergleich zu den Modellierungen mit Hilfe von MOGWAF in Niedersachsen

Auf allen Schlägen, von denen bisher Material in Fließgewässer gelangt ist, prognostiziert MOGWAF Gewässeranschluss. Das Gefahrenpotential wird dementsprechend erkannt, Gewässereintrag von Flächen für die kein Gewässeranschluss prognostiziert wird, ist demnach sehr unwahrscheinlich.

Das Modell MOGWAF sagt in allen betrachteten Gebieten der Dauerbeobachtung weitere Schläge mit Gewässeranschluss voraus. Auf diesen Schlägen konnte dieser bislang jedoch nicht nachgewiesen werden. Dies liegt vornehmlich an der Diskontinuität des Erosionsprozesses. Extreme Starkniederschläge in Perioden mit geringer Bodenbedeckung blieben im Beobachtungszeitraum aus. Niederschläge mit hoher Intensität wurden bislang nur einmal erfasst. Dieser Regen hatte die Intensität eines Ereignisses, das alle 20 Jahre auftritt. Zum Zeitpunkt des Niederschlages Ende Juli war aufgrund der hohen Bodenbedeckung das Erosionspotential auf den Flächen gering. Ein vergleichbares Ereignis im Mai oder Juni hätte zu einem viel stärkeren Bodenabtrag geführt. Insgesamt zeigt sich: Die erosionsrelevante Niederschlagsaktivität lag im Beobachtungszeitraum unter dem Schnitt (MOSIMANN ET AL. 2009). Da Gewässereinträge vornehmlich bei Erosionsereignissen mit hoher Intensität auftreten, erklärt die nachgewiesene geringe Erosivität der Niederschläge, warum der modellierte Gewässeranschluss bislang noch nicht auf allen Flächen empirisch nachgewiesen werden konnte. Zusätzlich werden auf den Flächen Maßnahmen zur Erosionsminderung, wie zum Beispiel die konservierende Bodenbearbeitung oder die Intervallbegrünung der Fahrgassen durchgeführt. Auch diese tragen zur Verminderung des Erosions- und Gewässereintragspotentials in den Gebieten bei. Dadurch kommt es zu den Unterschieden zwischen der Modellierung und der Kartierung.

Insgesamt sind in den niedersächsischen Untersuchungsgebieten im Mittel etwa 50 % der Schläge direkt oder indirekt an ein Gewässer angebunden. Für die Statistik wird auch das Gebiet Nette mitberücksichtigt, in dem weder vom Modell, noch bei Kartierungen ein Gewässeranschluss festgestellt werden konnte. Die Spannweite der Flächen mit Gewässeranschluss liegt also in Niedersachsen zwischen 0 und 90 %, abhängig von den strukturellen Eigenschaften und der Erosionsgefährdung des jeweiligen Gebietes. Die Modellgüte schwankt zwischen 77 % und 100 %. Dies belegt, dass MOGWAF das Gewässereintragsrisiko räumlich gut verorten kann und die Anschlussvarianten richtig einstuft.

3.8 Ausblick, Übertragbarkeit und Weiterentwicklung von MOGWAF

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Modell MOGWAF dient der Ausweisung und Lokalisierung von Ackerflächen mit Gewässeranschluss. Auf diesen Schlägen sind Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion durch Wasser doppelt effektiv. Sie führen zur Abnahme des Bodenverlustes auf der Fläche und zur Verminderung des Eintrags von Feinerde in angrenzende Gewässer. Damit leistet das Modell einen effektiven Beitrag zur Umsetzung der Ziele beim Schutz des Bodens und der Gewässer, wie sie vom Gesetzgeber formuliert werden. Maßnahmen können gezielt und örtlich konzentriert geplant und umgesetzt werden. Besonders zur Erreichung der Ziele der WRRL können durch das Modell Gewässerrandstreifen zur Retention von abgetragenem Feinmaterial an Orten geplant werden, an denen es sich wirklich lohnt. Voraussetzung für die Wirksamkeit ist allerdings eine Mindestbreite der Streifen von 5-10 m.

Durch die geringe Anzahl der Eingangsdaten ist MOGWAF für die Planung eine einfach durchführbare und kostengünstige Alternative zu komplexeren quantitativen Modellen wie Erosion 3D (SCHMIDT 1996) oder ABAGflux (WURBS ET AL. 2007). Das Modell basiert auf der Kombination verschiedener GIS-Modellbausteine. Es benötigt als Eingangsdatensatz nur das DGM und einen Landnutzungsdatensatz, um die Information Gewässeranschluss vorherzusagen. Kosten für Kartierungen und Bodendaten fallen nicht an.

Der prognostizierte Anbindungsgrad einer Ackerfläche an ein Gewässer differenziert das Modell in direkten und indirekten Gewässeranschluss. Maßnahmen können spezifisch an diesen Anbindungsgrad angepasst werden. Auf Flächen mit direktem Gewässeranschluss haben Maßnahmen zur Abtragsreduktion höhere Priorität als auf indirekt angeschlossenen. Auf Flächen, die durch eine abflussbündelnde Tiefenlinie angeschlossen sind, sollten Maßnahmen zur Reduktion des Abtrages in Tiefenlinien bzw. in deren Einzugsgebieten verwendet werden, um einen Beitrag zum Gewässerschutz zu leisten.

Dadurch, dass die Aussage des Modells eindeutig ist (Gewässeranschluss ja /nein), ist sie gut vermittelbar. Das Modell liefert den Entscheidungsträgern eine einfache Information, die durch empirische Daten gesichert ist. Die Erhebung der Daten fand unter realen Bewirtschaftungsbedingungen statt. Dies sichert die Übertragbarkeit im Gegensatz zu kleinräumigen Berechnungs- oder Abflussversuchen. Die Ergebnisse weisen den Landwirt auf eine räumlich abgrenzbare Gefahr hin, auf die er durch spezielle Maßnahmen kleinräumig reagieren kann. Die Modellierung ist schnell durchführbar, Kosten werden durch die geringe Anzahl an Eingangsdaten verringert.

MOGWAF ist regional übertragbar. Die Anwendung in Niedersachsen und in der Nordwestschweiz zeigt trotz der regionalen Unterschiede ähnliche Ergebnisse. Die Übertragbarkeit des Schlüssels ist mittels Feldbegehungen belegt. Eine Validierung durch empirische Kartierdaten aus der Schweiz steht jedoch noch aus. Nur durch die Auswertung solcher Ergebnisse kann die Übertragbarkeit endgültig nachgewiesen werden.

In Zukunft sollen die Möglichkeiten geprüft werden, ob das Modell auch den Eintrag in andere Schutzgüter, wie dystrophe Ökotope oder aber auch Siedlungsbereiche, vorhersagen kann.

4 Die Erosionsgefährdungs- und Gewässeranschlusskarte als Beispiel für den Einsatz von MOGWAF in der Praxis

Das Hauptziel der Modellierung mit MOGWAF ist es, die Ergebnisse für die Planung von Erosionsschutzmaßnahmen und im Landnutzungsmanagement allgemein einzusetzen. So weist das Modell Flächen aus, auf denen Maßnahmen zum Schutz vor Bodenerosion auch zu einer Verbesserung der Gewässerqualität führen. Gerade im Rahmen der Zielerreichung der WRRL kann damit ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der chemischen Qualität der Fließgewässer geleistet werden. Für eine effektive Planung von Schutzmaßnahmen ist eine Kombination der Ergebnisse der Gewässeranschlussmodellierung mit Erosionsabschätzungen z. B. mittels der ABAG (SCHWERTMANN ET AL. 1991, DIN 19708) anzustreben. Von besonders erosionsaktiven Flächen kann auch viel Feinerde in Gewässer gelangen. Deshalb soll die durch MOGWAF gewonnene Information, Gewässeranschluss in neue und bereits bestehende Erosionsgefährdungskarten integriert werden.

Ein Beispiel dafür ist die Erosionsgefährdungskarte des Kantons Basel-Landschaft. Im Rahmen der Neuberechnung der Erosionsgefährdung wurde eine Gewässeranschlussmodellierung für ca. 90 km² Landwirtschaftsfläche durchgeführt. In die Karte gehen neben den Ergebnissen der ABAG (Kap. 3.4.3) auch die Ergebnisse der Grünlandmodellierung (Kap. 3.4.2) und die Ergebnisse von MOGWAF ein. Abb. 68 zeigt an einem Beispiel aus dem Laufener Becken die Inhalte einer „Praxiskarte Bodenerosion“, welche Bodenschutz und Gewässerschutz verknüpft.

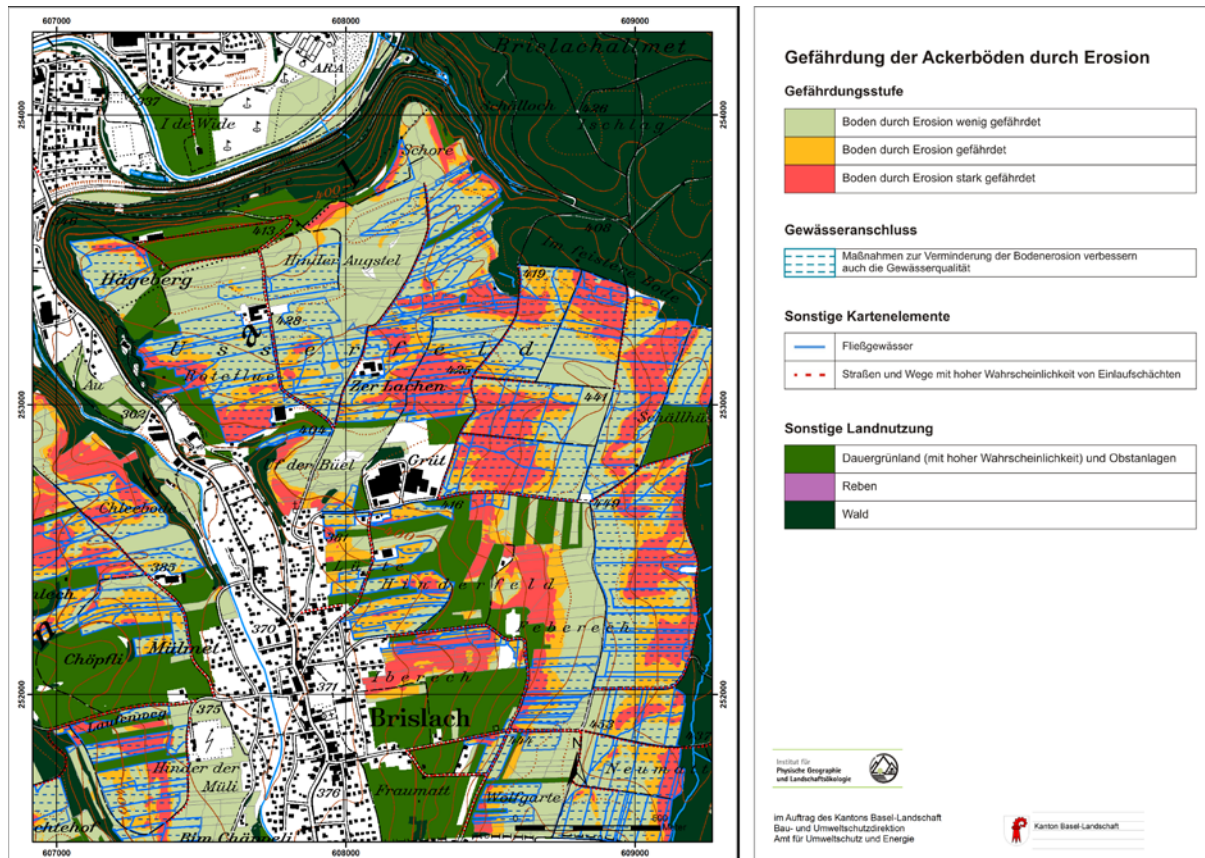


Abb. 68: Praxiskarte Bodenerosion Kanton Basel-Landschaft. Ausschnitt

Der Bodenabtrag wird entsprechend der Vorgaben aus MOSIMANN ET AL. (2003) in die Stufen „Boden durch Erosion wenig gefährdet“, „Boden durch Erosion gefährdet“ und „Boden durch Erosion stark gefährdet“ unterteilt. Diese Gefährdungsstufen sind abhängig von der Höhe des Abtrages und der Bodenmächtigkeit. Das Grundprinzip ist dabei, dass auf sehr mächtigen Böden Erosion eher tolerierbar ist, als auf geringmächtigen Böden. Das Laufener Becken weist zumeist sehr mächtige Lössböden auf, die, abhängig vom Relief, mittel bis stark von Bodenabtrag gefährdet sind. Die hohen Gefährdungsstufen treten auf nur etwa 35 % der Fläche auf, obwohl der Bodenabtrag teilweise mit $> 9 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ hoch ist. Der Anteil, der an die Gewässer direkt und indirekt angeschlossenen Flächen, ist mit etwa 50 % vergleichsweise hoch. Dabei haben nur etwa 20 % der Flächen oberirdischen Anschluss. Die restlichen Flächen grenzen an landwirtschaftliche Straßen und Wege mit Einlaufschächten an. In den Auenbereichen zeigt sich ein niedrigerer Anschlussgrad, da diese Böden nur gering geneigt und damit kaum von Bodenabtrag betroffen sind.

Durch die Kombination der beiden Informationen Gewässergefährdung und Bodengefährdung in der Karte, lassen sich schnell Gebiete mit hoher Priorität für Schutzmaßnahmen ausmachen. Damit können Bewirtschafter, Berater und Planer auf eine sinnvolle Grundlage zur Verbesserung des Schutzes von Böden und Gewässern zurückgreifen. Durch die Integration der Ergebnisse von MOGWAF in Erosionsgefährdungskarten kann der Prozess der Bodenerosion auch in seiner Wirkung auf die Gewässer abgebildet und als Umweltinformation für alle betroffenen Akteure regionalisiert werden. Abb. 69 zeigt für das Beispielgebiet eine Karte mit den Flächen, auf denen Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz erforderlich sind. Eine solche Karte stellt die Grundlage für die spezifische Planung von Maßnahmenkonzepten dar.

Flächen, die in die Kategorien „durch Erosion gefährdet“ und „durch Erosion stark gefährdet“ fallen, bezeichnet die Maßnahmenkarte als Gebiete auf denen Maßnahmen zum Bodenschutz notwendig sind. Sofern die Flächen Gewässeranschluss haben, dienen die Maßnahmen hier dem Schutz des Bodens und der Gewässer. Damit lassen sich Gebiete schnell identifizieren auf denen Maßnahmen zum Schutz vor Bodenerosion erforderlich sind. Durch die Einbindung der Gefährdungsstufen, lässt sich auch die Priorität von Maßnahmen einschätzen. Zuerst sollten Maßnahmen auf Flächen geplant und durchgeführt werden, die stark gefährdet sind und direkten Gewässeranschluss haben. Etwa 5 % der Fläche fallen in diesem Gebiet in diese Kategorie.

Als Maßnahmen zur Reduktion von Bodenabtrag durch Wasser gelten die konservierende Bodenbearbeitung (LEYS ET AL. 2010), die Anpassung der Fruchtfolge, die Einsaat von Zwischenfrüchten, die Durchführung der Querbearbeitung bis hin zur Konturbearbeitung, die Schlagteilung (MOSIMANN 2008), Untersaaten, die Anlage von Einlaufschächten und Banketten oder auch die Begrünung von Fahrgassen (SANDERS 2007).

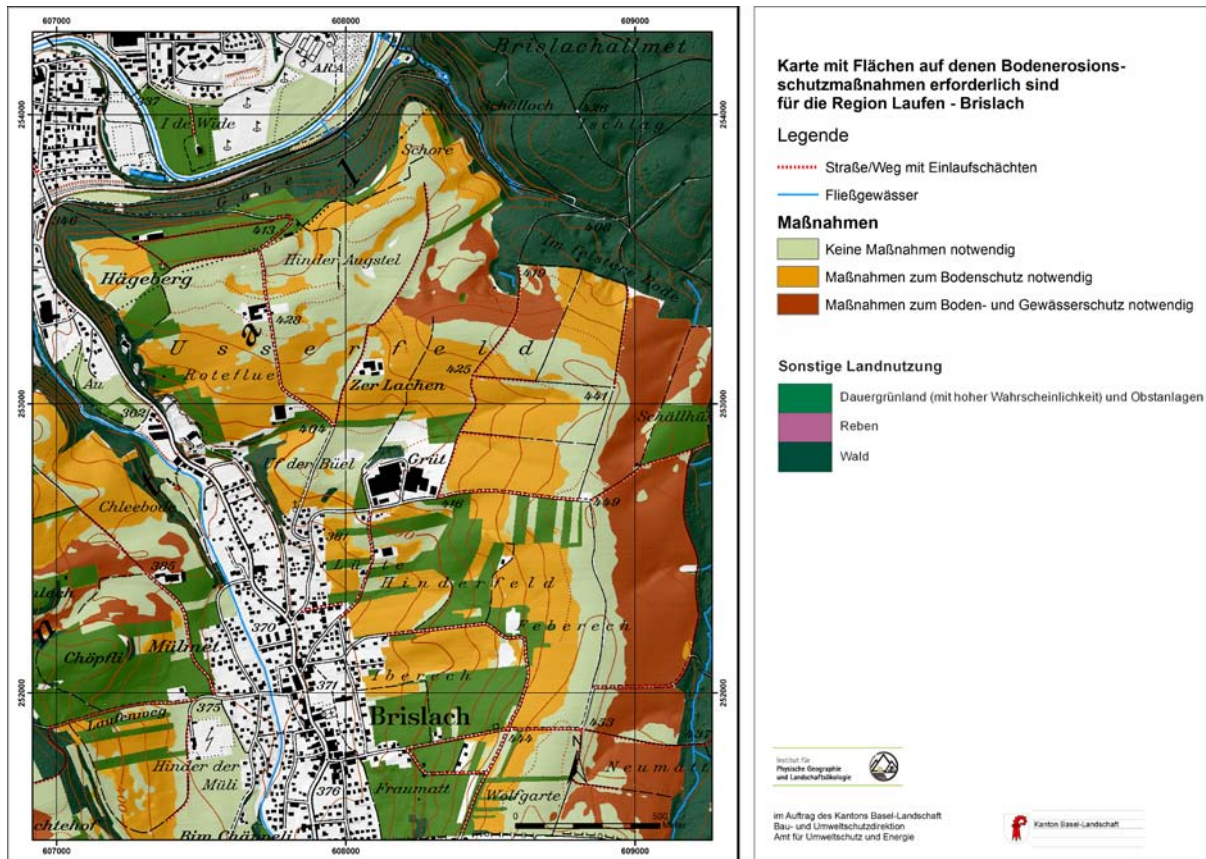


Abb. 69: Karte der Flächen, auf denen Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz erforderlich sind

Für das Gebiet bietet sich vor allem eine konsequentere Durchführung der konservierenden Bodenbearbeitung an, da so nur etwa 15 % der Fläche bewirtschaftet werden. Weiterhin sollten der Anteil der Reihenfrüchte in einigen Fruchtfolgen verringert und Untersaaten gerade beim Maisanbau durchgeführt werden. Um die Anbindung von Ackerschlägen an Gewässer zu verhindern, könnten fauch Grünstreifen angelegt werden. Diese end-of-pipe-Maßnahme behebt aber nicht das Problem der Erosion, sondern sie vermindert nur die Auswirkungen auf das Gewässer.

Insgesamt kann durch die Verknüpfung der flächenhaften Abtragssimulation mit der ABAG und der Gewässeranschlusssimulation mit MOGWAF eine Karte erzeugt werden, die

- Flächen ausweist, auf denen der Boden durch Erosion und angrenzende Gewässer durch Eintrag gefährdet sind,
- Schläge ausweist auf denen Maßnahmen zum Erosionsschutz durchzuführen sind und
- die Priorität der Maßnahmen einstuft.

5 Gesamtfazit und Ausblick

Die vorangegangenen Ausführungen haben die Modelle LINERO und MOGWAF vorgestellt. Sie dienen primär dazu, Flächen auszuweisen, auf denen Maßnahmen zum Schutz vor Bodenabtrag notwendig sind.

Das Modell LINERO weist die Gefährdung von Ackerflächen durch lineare Erosion differenziert nach Formtyp aus. Es basiert dabei auf einfachen wissensbasierten und empirisch-statistischen Entscheidungsbäumen. Dadurch ist es im Gegensatz zu Black-Box oder Grey-Box-Modellen nicht nur für Experten nachvollziehbar. Die Akteure können den Entscheidungsprozess verstehen, was die Akzeptanz erheblich verbessert.

LINERO benötigt nur wenige Eingangsdaten. Die Verwendung des Modells soll möglichst einfach und unkompliziert sein. Das Modell kann in naturräumlich unterschiedlichen Gebieten verwendet werden.

Die Validierung von LINERO zeigt, dass das Modell die lineare Erosion gut einschätzt. Die prognostizierten Stufen der linearen Erosionsaktivität stimmen gut mit den Beobachtungen in den unabhängigen Validierungsgebieten überein. Eine weitere Validierung mittels Daten, die außerhalb von Niedersachsen erhoben werden, ist zur Verbesserung des Modells erstrebenswert. Dazu dient die im Jahr 2011 angelaufene Erosionsdauerbeobachtung in Baden-Württemberg.

Ein Modellziel konnte jedoch nicht erreicht werden: In die Entscheidungsbäume konnten bislang keine absoluten Abtragswerte eingesetzt werden, sondern nur relative Erosionsaktivitäten. Zur Prognose von absoluten Bodenabtragswerten müssen andere Faktoren, die den Prozess der Bodenerosion beeinflussen, berücksichtigt werden. Darunter fallen die Bewirtschaftung oder der Niederschlag. Auf Basis der vorhandenen Daten kann aber eine relative bzw. semi-quantitative Einschätzung der Abtragswerte durchgeführt werden. Mit Hilfe von noch umfangreicheren Messreihen und der Vergrößerung der Untersuchungsgebiete kann in Zukunft eine Verbesserung der Prognosegüte sowie der Ausgabedaten erreicht werden. Aber auch heute kann LINERO durch eine regionale Kalibrierung bessere Aussagen zu den linearen Bodenabträgen liefern. Es wird zu überprüfen sein, ob aus den semi-quantitativen Aussagen später auch quantitative Aussagen werden, und wie eine regionale Kalibrierung durchzuführen ist.

Ein weiteres Ziel der Modellentwicklung von LINERO ist es, den Entscheidungsbaum auch im Feld einsetzbar zu machen. Eine Implementierung der Bäume in den Schlüssel „Bodenerosion selber einschätzen“ (MOSIMANN & SANDERS 2003) soll in Zukunft realisiert werden.

Das zweite Modell, das in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist MOGWAF. Es zeigt Möglichkeiten auf, wie erosionsaktive Schläge auf ihren Anbindungsgrad an das Gewässernetz hin untersucht werden können. Durch die Ausweisung von Flächen mit Gewässeranschluss können wiederum Maßnahmen zum Schutz vor Bodenerosion gezielt geplant werden. Diese Maßnahmen dienen aber nicht nur dem Schutz der Böden, sondern können die chemische Qualität von Gewässern positiv beeinflussen.

Die Validierung von MOGWAF zeigt, dass das Modell in verschiedenen Landschaftsräumen erfolgreich eingesetzt werden kann. Durch die Konzeption von Modellen zur Erstellung von

wichtigen Eingangsdaten ist auch der Einsatz in Regionen mit anderen oder weniger Basisdaten gesichert.

In Zukunft soll das Modell dahingehend erweitert werden, dass nicht nur der Eintrag in Gewässer prognostiziert wird. Auch andere Schutzgüter, wie Biotope oder auch Siedlungen sollen in den Fokus von MOGWAF gerückt werden. Dazu soll die Qualität des Modells weiter verbessert werden. Basis dafür können nur längere Messreihen und die Erweiterung der Beobachtungsgebiete sein. Zusätzlich soll der Einfluss der Auflösung zum Beispiel von Höhendaten untersucht werden. Die Frage stellt sich, ob immer genauere Daten auch immer genauere Modelle erzeugen können.

Für die Erstellung von Karten zur Planung von Erosionsschutzmaßnahmen müssen weitere Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung der Maßnahmen durchgeführt werden. Folgende Fragen sind noch zu klären, die auch für die Modellentwicklung entscheidend sind:

- Wie breit müssen Grünstreifen für einen effektiven Schutz vor dem Übertritt von durch lineare Erosion mobilisierter Feinerde sein?
- Können Maßnahmen zum Schutz vor linearer Erosion tatsächlich eine Reduktion der Einträge erwirken, oder würden sich bei der Anwendung dieser, das Wasser und damit auch die Feinerde andere Wege suchen?
- Wie hoch sind die Kosten und wie groß ist der Nutzen von Maßnahmen zur Prävention von linearer Erosion und vom Gewässereintrag?

6 Literatur

- AHNERT, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart. 440 S.
- AKKAN, Z., FLAIG, H & K. H. BALLSCHMITER (2003): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel in der Umwelt. Emissionen, Immissionen und ihre human- und ökotoxikologische Bewertung. Berlin, 315 S.
- AUERSWALD, K. (1993): Bodeneigenschaften und Bodenerosion : Wirkungswege bei unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben. Berlin, 208 S.
- AUERSWALD, K., FIENER, P. & R. DIKAU (2009): Rates of sheet and rill erosion in Germany — A meta-analysis. In: *Geomorphology* 111, S. 182-193.
- AUERSWALD, K. & M. KAINZ (1998): Erosionsgefährdung (C-Faktor) durch Sonderkulturen. In: *Bodenschutz*, 3,3, S. 98-102.
- AUERSWALD, K. & S. WIEGAND (2001): Ist die Erosionsschadenskartierung geeignet, um im Sinne der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung Erosionsflächen zu identifizieren und den Bodenabtrag festzustellen? In: *Bodenschutz*, 4, S.123-128.
- AUZET, A. V., BOIFFIN, J., PAPY, F., LUDWIG, B. & J. MAUCORPS (1993): Rill Erosion as a Function of the Characteristics of Cultivated Catchments in the North of France. In: *Catena*, 20, S. 41-62.
- AUZET, A. V., BOIFFIN, J. & B. LUDWIG (1995): Concentrated flow erosion in cultivated catchments: Influence of soil surface state. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, S. 759-767.
- BACH, M. (1996): Diffuse Stoffeinträge in Fließgewässer in Deutschland. *Vom Wasser*, 87: S. 1-13.
- BEHRENDT, T., HUBER, P.; KORNMILCH, M.; OPITZ, D.; SCHMOLL, O.; SCHOLZ, G. & R. UEBE (2000): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. Forschungsbericht UBA 296: 25 515, Berlin, 386 S.
- BIERBAUM, J. (2001): Digitales Raumstrukturmodell zur Prognose von Bereichen mit linearer Erosion auf Parzellen und in Einzugsgebieten. Hannover, 117 S.
- BOARDMAN, J. (2006): Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. In: *Catena* 68, S. 73 – 86.
- BOARDMAN, J. & J. POESEN (2006): Soil Erosion in Europe: Major Processes, Causes and Consequences. In: BOARDMAN, J. & J. POESEN [HRSG.]: *Soil Erosion in Europe*, Chichester, S. 479-488.
- BÖHNER, J. & T. SELIGE (2006): Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: BÖHNER, J., MCCLOY, K.R. & J. STROBL: *SAGA – Analysis and Modelling Applications*. Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, S.13-27.
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion, Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulationen. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, 13, Braunschweig, 249 S.
- BORK, H.-R. & A. SCHRÖDER (1996): Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: *Handbuch der Bodenkunde (Loseblatt-Ausgabe)*, Landsberg, Kap. 6.3.5.

- BRAUN, M., FREY, M. & P. HURNI (1991): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1986). FAC Liebefeld, 87 S.
- BREBUDA & RICHTER (1998): Kurze Geschichte der Bodenerosion und ihrer Erforschung in Mitteleuropa. In: Richter, G. [Hrsg.]: Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems, Darmstadt, S. 21 – 30.
- BRUNOTTE, J. (1990): Landtechnische Maßnahmen zum bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG, 183, Dissertation, Kiel, 205 S.
- BRUNOTTE, J., FRÖBA, N. (2007): Schlaggestaltung – kostensenkend und bodenschonend. KTBL-Schrift 460. Darmstadt, 178 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) [HRSG.] (2001): Gute Fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenverdichtungen und Bodenerosion, Bonn, 165 S.
- CAPELLE, A. (1990): Die erosionsgefährdete Landesfläche in Niedersachsen und Bremen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 31, S. 11-17.
- CAPELLE, A. & R. LÜDERS (1985): Die potentielle Erosionsgefährdung der Böden in Niedersachsen. In: Göttinger Bodenkundliche Berichte, 83, S. 107-127.
- COLLINS, A.J. & OWENS (2007): Soil erosion and sediment redistribution in river catchments. Wallingford, 328 S.
- CONRAD, O. (1998): Die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter am Beispiel des Einzugsgebietes Linnengrund. Geographisches Institut Universität Göttingen, 89 S.
- CONRAD, O. (2006): SAGA - Program Structure and Current State of Implementation. In: BÖHNER, J., MCCLOY, K.R. & J. STROBL [Hrsg.]: SAGA - Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen, Bd. 115, S.39-52.
- DE BAETS, S., POESEN J., MEERSMANS, J. & L. SERLET (2011): Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. In: Catena, 85, S. 237-244.
- DESMET, P. J. J. & G. GOVERS (1997): Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. In: Catena, 29, S. 283-306.
- DESMET, P. J. J., POESEN, J., GOVERS, G. & K. VANDAELE (1999): Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. In: Catena, 37, S. 377-392.
- DETLING, W. (1989): Die Genauigkeit geoökologischer Feldmethoden und die statistischen Fehler quantitativer Modelle. Physiogeographica 11, Basel, 140 S.
- DEUMLICH, D., FUNK, R., FRIELINGHAUS, M., SCHMIDT, W.-A., & O. NITZSCHE (2006): Basics of effective erosion control in German agriculture. In: J. Plant Nutr. Soil Sci., 169, S. 370–381.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSER- UND KULTURBAU E.V. (DVWK) (1998): Bodenerosion durch Wasser - Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. DVWK-Merkblätter, 239, Bonn, 62 S.
- DIEZ, T. (1994): Erosionsschäden vermindern. aid Broschüre 1108, Bonn, 32 S.

- DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.
- DOTTERWEICH, M. (2008): The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of Central Europe: deciphering the long term interaction between human and the environment – a review. In: *Geomorphology*, 101, S. 192-208.
- DUTTMANN, R. (1999): Partikuläre Stoffverlagerungen in Landschaften. Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden und Stoffumlagerungen auf verschiedenen Maßstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Änderungen der Bodenfeuchte. *Geosynthesis* 10, Hannover, 234 S.
- DUTTMANN, R & J. BRUNOTTE (2002): Oberirdische Stofftransporte in Agrarlandschaften. In *Geographische Rundschau*, 54, 5, S. 26-33.
- ELLWELL, H.A. (1978): Modelling soil losses in southern Africa. In: *J. Agric. Engng Res.*, 23, S. 117-127.
- ENGEL, N. & U. MÜLLER (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover, 27 S.
- ERLACH, F. (2005): Strategien zur Minderung diffuser Einträge von herbiziden Wirkstoffen und Nährstoffen in Oberflächengewässer. Paderborn, 255 S.
- EUROPÄISCHE UNION (EU) [HRSG.]: (2006): Thematische Strategie für den Bodenschutz. Brüssel, 14 S.
- EVANS, R. (1993): Extent, Frequency and Rates of Rilling of Arable Land in Localities in England and Wales. In: WICHEREK, S. [HRSG.]: *Farm Land Erosion. In: Temperate Plains Environment and Hills*, S. 177-190.
- FAVIS-MOTLOCK, D.; BOARDMAN, J.; MACMILLAN, V. (2001): The limits of erosion modeling: Why we should proceed with care. In: HARMON, R.S.; DOE, W.W. [HRSG.]: *Landscape erosion and evolution modeling*. New York. S. 477-516.
- FELDWISCH, N. (2004): Neue Maßnahmen zur Gefahrenabwehr bei flächenhaften schädlichen Bodenveränderungen. In: MUNLV [Hrsg.]: *Bodenschutz – europäisch und lokal*. Publikation zur gemeinsamen Fachtagung in Berlin am 1. April 2004. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf. S. 120-127.
- FELDWISCH, N. (1995): Hangneigung und Bodenerosion. *Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie*, 3, Gießen, 164 S.
- FLANAGAN, D.C. & J.M. LAFLÉN (1997): The USDA water erosion prediction project (WEPP). In: *Eurasian Soil Science*, 30, S. 524 -530.
- FLEIGE, H., HORN, R. & M. WEIßBACH (1999): Bodenerosion in Fahrspuren und mögliche Erosionsschutzmaßnahmen. In: *Wasser & Boden*, 51/12, S. 33-36
- FLEIGE H. & R. HORN (2000): Surface runoff and loss of nutrients in traffic ruts of agricultural soils (Luvisols) in a hilly moraine landscape in Germany. *ISTRO-2000 Conference*, Ford Worth/USA.
- FOX, D. M. & R. B. BRYAN (1999): The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. In: *Catena*, 38, S. 211-222
- FRIELINGHAUS, M. [HRSG.] (1997): Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg. ZALF-Bericht Nr. 27, Müncheberg, 51 S.

- FRIELINGHAUS, M. (1998): Bodenschutzprobleme in Ostdeutschland. In: RICHTER, G. [HRSG.]: Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems, Darmstadt, S. 204-221.
- FRIELINGHAUS, M., BRANDHUBER, R., & W.-A. SCHMIDT (2001): Vorsorge gegen Bodenerosion im Bodenschutzrecht. *Wasser & Boden*, 53, 25-31.
- GOVERS, G. (1985): Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. In: *Catena* 12, 35-49.
- GOVERS, G. & J. POESEN (1988): Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. In: *Geomorphology*, 1, S. 343 - 354.
- GRIMM, M., JONES, R. & L. MONTANARELLA (2002): Soil erosion risk in Europe. EUR 19939 EN, Luxembourg. 40 S.
- HAIDER, J. (1994): Herbizide in Oberflächenabfluß und Bodenabtrag - Feldversuche mit simuliertem Regen. Dissertation, TU München-Weihenstephan, 231 S.
- HALBFASS, S., GRUNEWALD, K. (2008): Abschätzung potenzieller Herkunftsflächen von erosionsbedingten Stoffeinträgen in Oberflächengewässern im mittleren Maßstab. *Wasserwirtschaft* 98, 12, S. 24 – 28.
- HEEGE, H. J. & H. H. VOßHENRICH (1987): Fahrgassenschaltung bei Drillmaschinen. In: *Bauernblatt*, 4. April 1987.
- HERWEG, K. (1996): Field Manual for Assessment of Current Erosion Damage. Soil Conservation Research Programme, Ethiopia and Centre for Development and Environment University of Berne, Switzerland [HRSG.], Bern, 69 S.
- HERZIG, A. (2005): Entwicklung eines GIS-basierten Entscheidungsunterstützungssystems als Werkzeug nachhaltiger Landnutzungsplanung. Dissertation. Kiel. 148 S.
- HIRCHE, D. (1990): Die Erosivität der Niederschläge in Niedersachsen. Diplomarbeit am Institut für Geographie, Abt. für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Braunschweig, 155 S.
- ISENBECK-SCHRÖTER, M., KOFOD, M., KÖNIG, B. SCHRAMM, T. BEDBUR, E. & G. MATTHES (1998): Auftreten von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässern und im Grundwasser. In: *Grundwasser*, 2, S. 57 - 66.
- ISRINGHAUSEN, S., DUTTMANN, R. & TH. MOSIMANN (1999): Überprüfung räumlich differenzierter Prognosen erosionsbedingter Stofftransporte durch Feldbeobachtungen. In *Wasser & Boden*, 51, 12, S. 25-32
- JESSEL, B., HASCH, B. (2006): Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie – Welche Unterstützung kann die Landschaftsplanung bieten? *Naturschutz und Landschaftsplanung* 38, 4, S.108 -113.
- JUNG, L. & R. BRECHTEL (1980): Messungen von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des DVWK, 48, Berlin, 150 S.
- KAISER, M. & M. GEBEL (2003): Quantifizierung diffuser Stickstoffeinträge mit dem Modell STOFFBILANZ in einem bewaldeten Gewässereinzugsgebiet im Mittelgebirge. In: *GEOÖKO*, 24, 3-4, S.261-269.
- KINNELL, P.I.A. (2005): Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. *Soil Science Society America Journal*, 69, S. 674-680.

- KLEIN, M. (1994): Evaluation and Comparison of Pesticide Leaching models for Registration Purposes. Results of Simulations performed with the Pesticide Leaching Model. *Journal of Environmental Science & Health, A* 29, 6, S. 1197-1209.
- KNISEL, W.G. (1980): CREAMS: A Fieldscale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA, Science and Education Administration, Conservation Report No. 26, Washington, D.C., 640 S.
- KOPF, W., PÖHLMANN, W. & K. REIMANN (1988): Grundlagen der Eutrophierung von Fließgewässern, dargestellt am Beispiel von Main und Regnitz. München, 319 S.
- LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE [HRSG.] (2006): Bodenschutz in Niedersachsen. Arbeitsbericht 2006 und Planung 2007, Bremen, 31 S.
- LANG, A. & H. R. BORK (2006): Past Soil Erosion in Europe. In: BOARDMAN, J. & J. POESEN: Soil erosion in Europe. S.465-478.
- LEHMANN, A. (2000): Bodenerosion im Ackerbau: Massnahmen gezielt planen. In: UMWELT Praxis 25, Zürich, S. 57-60.
- LESER, H. [HRSG.] (2005): DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie. Braunschweig 1040S.
- LESER, H. & V. PRASUHN (1990): Möglichkeiten der Erosionsschadenskartierung im Felde und daraus entwickelte Schadens- und Gefährdungskarten. Überlegungen zu deren methodischen und arbeitstechnischen Prinzipien. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 61, S. 25-34
- LESER, H., MEIER-ZIELINSKI, S. & V. PRASUHN (2002): Soil erosion in catchment areas of Northwestern Switzerland. Methodological conclusions from a 25-year research programme. - *Z. Geomorph. N.F.* 46, 1, S. 35-60.
- LEYS, A, GOVERS, G., GILLIJNS, K. BERCKMOES, E., TAKKEN, I. (2010): Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover. *J. of Hydrology*, 390, S. 143-154.
- LOCH, R.J. (1996): Using rill/interrill comparisons to interfere likely responses of erosion to slope length: implications for land management. In: *Australian Journal of Soil Research*, 34, S. 489 - 502.
- LÜTKE ENTRUP, N. (2000): Integrierter Pflanzenbau - Das Leitbild für eine standortgerechte und umweltverträgliche Landwirtschaft. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEMICHEN, J. [HRSG.]: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 2: Kulturpflanzen, S. 1 - 23.
- MEYER & HARMON (1985): Sediment losses from cropland furrows of different gradients. *Trans. ASAE*, 28, S. 448-453.
- MICHAEL, A. (2000): Anwendung eines physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells Erosion 2D/3D – Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Freiberg. 147 S.
- MOLLENHAUER, K., FELDWISCH, N., SCHOLTEN, T., & K. SCHOLZ (2006): Bodenerosion durch Wasser – Bewertungsmethodik und Instrumente der deutschen Bundesländer. BVB-Materialien 14, Berlin, 151 S.
- MOORE, I.D., GRAYSON, RB & A. R. LADSON (1991): Digital terrain modelling: a review of hydrological geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes* 5, S. 3-30.

- MORGAN, R.C.P. (2001): A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan-Finney Model. In: *Catena* 44, S. 305–322.
- MORGAN, R.C.P. (2005): *Soil Erosion and Conservation*, 3rd edition, Oxford, 304 S.
- MOSIMANN, T. (1994): Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft. Aktueller Stand, Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, Thesen zur Erhaltung der Böden, Weiteres Vorgehen. Bau- und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft [Hrsg.], Liestal, 31 S.
- MOSIMANN, T. (1998): Bodenerosion im Bodenschutzvollzug. In: RICHTER, G. [Hrsg.]: *Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems*, Darmstadt, S. 171-184
- MOSIMANN, T. (2003): Erosionsgefährdung und Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung im Kanton Basel-Landschaft. Entwicklungstrends aus dem Monitoring 1982-2002 und Folgerungen für die Beratung. Amt für Umweltschutz und Energie des Kanton Basel-Landschaft [Hrsg.], Liestal, 32 S.
- MOSIMANN, T. (2008): Wie gut wirken Erosionsschutzmaßnahmen, und was kann der Erosionsschutz noch erreichen? In FNL [Hrsg.] Heft 15/2008: Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf. Tagungsband zur Fachveranstaltung von ilu, GKB und KTBL am 5. und 6. Dezember 2007 in Bonn, S. 155 – 169.
- MOSIMANN, T. (2008b): Mehr machen als Mulchsaat. *Diz-agrarmagazin* 4, 2008 S. 56-62.
- MOSIMANN, T., BUG, J. & K. FRACEK (2010): Modellierung der Bodenerosionsgefährdung im Kanton Basel-Landschaft. Projekt im Auftrag des Amtes für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft.
- MOSIMANN, T. BUG, J. SANDERS, S., BEISIEGEL, F. (2009): Bodenerosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen 2000 – 2008. *Geosynthesis* 14, Hannover, 101 S.
- MOSIMANN, T., BONO, R. & P. SIMON (2003): Besserer Erosionsschutz durch ökologischen Leistungsnachweis? In: *Agrarforschung*, 10, 11-12, S. 428-433
- MOSIMANN, T., CROLE-REES, A., MAILLARD, A., NEYROUD, J.-A., THÖNI, A. & W. ROHR (1990): Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Ausmass und Gegenmassnahmen. Nationales Forschungsprogramm „Nutzung des Bodens in der Schweiz“, Bd. 51, Liebefeld-Bern, 262 S.
- MOSIMANN, T. & M. RÜTTIMANN (1999): Bodenerosion selber abschätzen – ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Aarau, Bern, Luzern und Solothurn, 36 S.
- MOSIMANN, T & S. SANDERS (2003): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater in Niedersachsen. Ackerbaugebiete im südlichen Niedersachsen. Hannover, 29 S.
- MOSIMANN, T. & H. WESTPHAL (2007): Einfluss von Klimaänderungen auf die Bodenerosion in Niedersachsen. Prognose der Bodenabträge 2000 - 2050 in den Modellgebieten Barmum und Lamspringe. Unveröffentlicher Bericht im Auftrag des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 25 S.
- MOSIMANN, T., WESTPHAL, H., BACKHAUS, J. (2007): Gewässeranschluss von Ackerflächen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater in Niedersachsen, Hannover, 18 S.

- MOSS, B., BOOKER, I. R., MANNING, H.R. & K.L. MANSON (1982): Study of the River Bure, Norfolk Broads' Final Report to the Department of the Environment and Anglian Water Authority
- MÜNCHHAUSEN, S. & KNICKEL, K. & REHBINDER, E. (2009): Gemeinsame Agrarpolitik (GAP). Cross Compliance und Weiterentwicklung von Agrarumweltmaßnahmen. Ergebnisse aus dem gleichnamigen F+E-Vorhaben des Bundesamtes für Naturschutz. In: Naturschutz und Biologische Vielfalt 77, 306 S.
- NACHTERGAELE, & POESEN, J. (1999): Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high altitude (stereo) aerial photographs. In: Earth Surface Processes and Landforms 24, S. 693–706.
- NEARING, M.A., JETTEN, V., BAFFAUTC, C., CERDAND, O., COUTURIERD, A., HERNANDEZA, M., BISSONNAISE, Y.L., NICHOLSA, M.H., NUNESF, J.P., RENSCHLER, C.S., SOUCHEREH, V. & K. V. OOSTI (2005): Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. In: Catena, 61, S. 131–154.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (NLÖ) [HRSG.] (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung, Hildesheim, 50 S.
- NOVOTNY, V. & H. OLEM (1994): Water quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution. New York, 1054 S.
- OGERMANN, P., HEBEL, B., PRASUHN, V. & P. WEISSHAIDINGER (2006): Erfassung von Bodenerosion in der Schweiz. In: Geographica Helvetica, 61, 3, S. 209-216.
- OGERMANN, P., MEIER, S. & H. LESER (2003): Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. In: Landnutzung und Landentwicklung, 44, S. 1 - 10.
- OLAYA, V. & O. CONRAD (2008): Geomorphometry in SAGA. In: Hengl, T. and Reuter, H.I. [Hrsg.]: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science, 33, Amsterdam & Oxford, S. 293-308.
- ØYGARDEN, L. (2003): Rill and gully development during an extreme winter runoff event in south-eastern Norway. In: Catena 50, 2-4, 217-242.
- PAGENKOPF, W., WINNIGE, B. & M. FRIELINGHAUS (1997): Wassererosionspfade in der Landschaft. Aufnahme Informationsverarbeitung – Kartographie. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 83, S. 447-450
- POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G. & C. VALENTIN (2003): Gully erosion and environmental change: importance and research needs. In: Catena, 50, 91-133.
- PRASUHN, V. (2004): Mapping of actual soil erosion in Switzerland. Eurosoil 2004, 4.-12.9.2004, Freiburg, 10 S.
- PRASUHN, V. (2005): Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion. Schriftenr. der FAL, S. 108 – 119.
- PRASUHN, V. (2011): Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey. In: Geomorphology 126, S. 32–41.
- PRASUHN, V. & K. GRÜNIG (2001): Evaluation der Ökomassnahmen. Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. Schriftenreihe der FAL, 37, Zürich-Reckenholz, 151 S.

- REUTER H. I. & A. NELSON (2008): Geomorphometry in ESRI Packages In: HENGL & REUTER [Hrsg.]: Geomorphometry Concepts – Software – Applications, Developments in Soil Science 31, Amsterdam & Oxford.
- RICHTER, G. [HRSG.] (1998): Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems, Darmstadt, 264 S.
- ROGLER, H. & U. SCHWERTMANN (1981): Erosivität der Niederschläge und Isoerodentenkarte Bayerns. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 22, S. 99-112.
- ROHR, W., MOSIMANN, TH., BONO, R., RÜTTIMANN, M. & V. PRASUHN (1990): Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und –schäden auf Ackerflächen. Legende, Erläuterungen zur Kartiertechnik, Schadensdokumentation und Fehlerabschätzung. Basler Beiträge zur Physiogeographie, 14, Basel, 56 S.
- RÜTTIMANN, M. & V. PRASUHN (1990): Möglichkeiten der Fehlerabschätzung und Optimierung der Erosionsschadenskartierung. Materialien z. Physiogeographie 14, Basel, S. 41-49.
- SANDERS, S. (2000): Erfassung von Bodenerosion und Bewirtschaftung im Rahmen der Bodenerosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen. Konzeption, Datenerhebung und Auswertung für die Jahre 1995 – 2000. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Hannover, Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie, Hannover, 118 S.
- SANDERS, S. (2007): Erosionsmindernde Wirkung von Intervallbegrünungen in Fahrgassen. Untersuchungen im Weizen- und Zuckerrübenanbau mit Folgerungen für die Anbaupraxis. Geosynthesis 13, Hannover, 139 S.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT [HRSG.] (1996): Parameterkatalog Sachsen, in: Erosion 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser, Dresden, 150 S.
- SCHAUB, D. (1989): Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheintales (Möhliner Feld/Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft. Basler Beiträge zur Physiogeographie, 13, Basel, 228 S.
- SCHICK, V. (1991): Minderung von Spurschäden auf Ackerflächen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), 202, Kiel, 176 S.
- SCHMIDT, R-G. (1979): Probleme der Erfassung und Quantifizierung von Ausmaß und Prozessen der aktuellen Bodenerosion (Abspülung) auf Ackerflächen. Methoden und ihre Anwendung in der Rheinschlinge zwischen Rheinfeldern und Wallbach (Schweiz). In: Physiogeographica 1, Maulburg, 240 S.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulations-Modells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen, Berlin, 148 S.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1991): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl., Stuttgart, 63 S.
- SCHWIND, M. (1947): Bodenerosion im Landkreis Uelzen. In: Neues Archiv für Landes- und Volkskunde von Niedersachsen, 3, S. 228-233

- SHARPLEY, A.N. FOY, R.H. & P.J.A. WITHERS (2000): Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water. An Overview. *Journal of Environmental Quality*, 29, S. 1–9.
- SOUCHÈRE, V., CERDAN, O., LUDWIG, B., LE BISSONNAIS, Y., COUTURIER, A. & F. PAPY (2003): Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. In: *Catena*, 50, S. 489-505.
- STEINHOFF, B., BUG J, MEER, U. & T. MOSIMANN (2010): GIS- und GPS-gestützte Erfassung von Bodenerosion. In: *Arc Aktuell*, 3 S. 20-21.
- SUMMER, W, KALGHOFER, E. & W. ZHANG (1998): Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes, *International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publications*, 249, Wallingford, 453 S.
- TAKKE, I., JETTEN, V., GOVERS, G., NACHTERGAELE, J. AND A. STEEGEN (2001): The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. In: *Geomorphology*, 37, S. 1–14.
- TETZLAFF, B. (2006): Die Phosphatbelastung großer Flusseinzugsgebiete aus diffusen und punktuellen Quellen. – Dissertation, Universität Hannover. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment*, 65, 301 S.
- TOY, T. J., FOSTER, G.R., & K.G. RENARD, K.G. (2002): *Soil Erosion- processes, prediction, measurement and control*. New York. 338 S.
- VANDAELE, K. (1993): Assessment of factors affecting ephemeral gully erosion in cultivated catchments of the Belgian Loam Belt. In: WICHEREK, S. [HRSG.]: *Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environment and Hills*, S. 125-136.
- VANDALAE, K. & J. POESEN (1995): Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, central Belgium. In: *Catena*, 25, S. 213-226.
- VORDERBRÜGGE, T. & J. BRUNOTTE (2011): Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) - Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung "sensibler Gebiete" in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis. *Landbauforschung vTI agriculture and forestry research*, Band 61, Heft 1, Braunschweig, 75 S.
- WALTHER, W. (1999): *Diffuser Stoffeintrag in Böden und Gewässer*, Leipzig 310 S.
- WESTPHAL, H. (2009): *Wirksamkeit und Kosten von Maßnahmen zur Verringerung von Bodenerosion und Stoffaustrag in Gewässer. Untersuchungen im Leineeinzugsgebiet bei Gronau (Niedersachsen)*. = Diss. Univ. Hannover, 200 S
- WEIDANZ, J. (2007): *Auswirkungen eines verstärkten Maisanbaus zur Biogasproduktion auf die Bodenerosion - Simulation von verschiedenen Nutzungsszenarien mit Erosion-3D im südlichen Niedersachsen*. Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Universität Hannover, Hannover, 118 S.
- WEIDANZ, J. & TH. MOSIMANN (2008): *Auswirkungen von Maisanbau zur Produktion von Biogas auf die Bodenerosion*. In: *Wasser und Abfall* 7-8, S. 16-20.
- WERNER, M. V. (1995): *GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten*, Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin.)

- WERNER, W., LEINFELDER, R.R., FÜRSICH, F.T. & M. KRAUTTER (1994): Comparative Palaeoecology of marly coralline sponge-bearing reefal associations from the Kimmeridgian (Upper Jurassic) of Portugal and Southwestern Germany. - Cour. Forsch. Inst. Senckenberg, 172; Frankfurt, S. 381-397.
- WILLIAMS, J.R., C.A. JONES & P.T. DYKE (1984): A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27:129-144.
- WISCHMEIER, W.H. (1976): Use and misuse of the universal soil loss equation. In: Journal of Soil and Water Conservation, H.31, S.5-9
- WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537, Washington, 57 S.
- WOODWARD, D. E. (1999): Method to predict cropland ephemeral gully erosion. In: Catena, 37, S. 393-399
- WREDE, S. (1996): Ausmaß und Ursache der linearen Bodenerosion im Gebiet der Lamme (Südniedersachsen) mit besonderer Berücksichtigung determinierbarer und nicht determinierbarer Faktoren. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Hannover, Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie, Hannover, 116 S.
- WURBS, D., KOSCHITZKI, T. & MÖLLER, M. (2007): ABAGFlux - ein hierarchischer Modellansatz zur Maßnahmenplanung im Boden- und Gewässerschutz. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 110, 721-722.

Gesetzestexte

- BBODSCHG 1998: Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist.
- BBODSCHV 1999: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist.
- EEG 2000 Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 12. April 2011 (BGBl. I S. 619) geändert worden ist
- GSCHG 1991: Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG)
- VBBO 1998 Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo)
- WRRL 2000 Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

Abkürzungen

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
Abb.	Abbildung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
CC	Cross Compliance
DGM	Digitales Gelände Modell
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
E3D	Erosion 3D
EEG	Gesetz zum Vorrang der Erneuerbaren Energien
IETL	Index Erosionsaktivität in Tiefenlinien
GFP	Gute Fachliche Praxis
GIS	Geographische Informationssysteme
GSchG	Gewässerschutzgesetz
LINERO	Modell zur Prognose der räumlichen Verteilung und Aktivität von Linearen Erosionsformen
MOGWAF	Modell zur Bestimmung des Gewässeranschlusses erosionsaktiver Flächen
PSM	Pflanzenschutzmittel
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
UG	Untersuchungsgebiet
USLE	Universal Soil Loss Equation
VBBO	Verordnung über Belastungen des Bodens in der Schweiz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Zur Person

Name	Jan Fabian Bug
Geburtsname	Weidanz
Geburtsdatum	31. Oktober 1980
Geburtsort	Hannover

Aktuell

08.2007 -	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie
08.2007 -	Promotionsstudium zur Erlangung des Dr. rer. nat. an der der Leibniz Universität Hannover

Studium

07.2007	Abschlussprüfungen zum Diplom-Geographen.
06.2006 – 04.2007	Verfassung der Diplomarbeit: Auswirkungen eines verstärkten Maisanbaus zur Biogasproduktion auf die Bodenerosion - Simulation von verschiedenen Nutzungsszenarien mit Erosion-3D im südlichen Niedersachsen.
02.2004 – 05.2006	Studium der Physischen Geographie und Landschaftsökologie (Hauptfach), der Bodenkunde und Landespflege (Naturschutz und Umweltplanung) an der Leibniz Universität Hannover.
09.2003 – 01.2004	Studium der Geographie, Hydrologie und Glaziologie an der University of Salford, Greater Manchester, UK.
10.2001 – 08.2003	Studium der Geographie (Hauptfach), der Bodenkunde und der Landespflege (Naturschutz und Umweltplanung) an der Leibniz Universität Hannover.

Zivildienst

09.2001 - 08.2000	DRK Sozialstation Langenhagen, Mobiler Sozialer Hilfsdienst
-------------------	---

Schulbildung

08.1987 - 06.2000	Schulzeit, Langenhagen
-------------------	------------------------