

Empirisches Modell für die mittlere Maßstabsebene  
zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung  
erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer

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

von

Dipl.-Geogr. Johannes Voges  
geboren am 13.2.1965  
in Hannover

1999

Referent: Prof. Dr. Th. Mosimann

Korreferent: Prof. Dr. G. Kuhnt

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 07. 1999

**Schlagworte:**

Anbindungswahrscheinlichkeit, Modellierung, Geographisches Informationssystem  
probability of connection, modelling, geographical information system



## ABSTRACT

An efficient catchment area management aiming at reducing the input of particular nutrients into surface water bodies requires information on their spatial origin. Our knowledge in this respect is limited. In order to be able to plan measures of protection against nutrient input into rivers and ditches it is necessary to predict the locations responsible for the input and differentiated according to their relevance by means of models.

For this purpose, a statistical prediction model was developed which – based on areally available input data and supported by a geographical information system for spatial segments (grid cells) – determines the probability of substance input into rivers. The degree of this probability is a function of soil erosion processes, surface runoff, material transport and relief characteristics. It expresses the combination of landscape ecological and structural characteristics of the geographical space quantitatively.

The mesoscale model was applied to an agricultural catchment area in the Lower Saxon hills along the river Leine (*Leinebergland*). Scenarios are created to investigate the effect of changes in land use and spatial structure. The accuracy of prediction of areas connected and not connected with rivers or artificial ditches is 67 %, 11 % of which go to predicted input sources. According to the model, 28 % of the area under agricultural use are connected (the percentage of real input area determined by mapping or interviews is 24).

The spatial basis of evaluation are the slope catchments of substance transfer points into surface waters (sediment delivery area). They were identified by mapping erosion and interviewing farmers in the areas under study. In areas delivering sediment, the soil loss depends on the landscape ecological conditions (precipitation, plant cover, soil moisture) and amounts to 2.3 to 4.5 t/ha of arable land. 25 % of fine sediment accumulate in delivery area. The average size of sediment delivery areas is about 0.5 ha. Most of the inputs occurs in spots rather than areally into artificial ditches.

For determining the amount of water bodies delivering sediment, the model relies on 10 parameters, part of them integrating in nature. The connection to surface waters (degree of connection) varies depending on the model parameters. The influence on the input potential of spatial segment is strong with the parameters 'distance of water body', 'soil loss' and 'amount of runoff' and less pronounced with 'sediment transport path distance', 'sediment transport capacity', 'slope length' and 'size of catchment area'. The parameters 'slope' and 'slope curvature' are less relevant.

The surface runoff is assessed with the Curve Number method (SCS), the soil erosion hazard with the USLE. The sediment transport potential is based on an approach by J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995). Linear elements of spatial structure (traffic system, land use boundary) are integrated into the DEM by means of special procedure. In this way, the model takes their effect on the surface runoff into account. Spatial segments are declared 'disconnected' and potential areas of accumulation are identified. The lower sediment transport potential of temporarily water-containing ditches is implemented via reduction of the degree of connection to water bodies. The model calculations show plausible probability values with regard to the spatial distribution pattern and frequency distribution of degree of connection with rivers.

Model scenarios yield the following results. The degree of connection with surface water bodies decreases with an increasing degree of plant cover. Modelling uninfluenced by areal structure shows that linear structural elements have a pronounced effect on the predicted connection with water bodies in 8 % of the arable land. Consistent retention measures in ditches with occasional flow of water would make it possible to disconnect more than 40 % of arable land from permanently flowing rivers.

## KURZZUSAMMENFASSUNG

Grundlage eines effizienten flächenhaften Einzugsgebietsmanagements mit dem Ziel einer Reduzierung von partikulären Nährstoffeinträgen in Oberflächengewässer ist u.a. die Kenntnis über die Herkunft der eingetragenen Stoffe. Zur Frage der ortsgenauen Stoffherkunft sind Wissensdefizite vorhanden. Um gezielt Maßnahmen zum Schutz vor diffusen Stoffeinträgen in Gewässer zu projektieren und in der Fläche realisieren zu können, ist es notwendig, die für die Stofflieferungen relevanten Areale, differenziert nach ihrer Bedeutung, im Landschaftsraum zu prognostizieren.

Zu diesem Zweck wurde ein empirisch-statistisches Prognosemodell konzipiert, das auf Grundlage von flächenhaft verfügbaren Eingangsdaten mithilfe eines Geographischen Informationssystems für Raumsegmente den Anbindungsgrad (Wahrscheinlichkeit der Stofflieferung) an Fließgewässer ermittelt. Der Gewässeranbindungsgrad ist eine Funktion von Prozessen der Bodenerosion, des Oberflächenabflusses, des Stofftransportes und von Reliefeigenschaften. Er drückt als zusammenfassende Größe landschaftsökologische und strukturelle Eigenschaften des geographischen Raumes quantitativ in einer Wahrscheinlichkeit aus.

Das Modell des mittleren Maßstabbereiches wurde für ein ackerbaulich geprägtes Flusseinzugsgebiet im niedersächsischen Leinebergland angewendet. Szenarien untersuchen den Effekt von Landnutzungs- und Raumstrukturänderungen. Die Modellqualität, ausgedrückt im Prozentanteil der korrekt generierten angebundenen und nicht angebundenen Areale, liegt bei 67 %, wobei 11 % auf die prognostizierten Lieferflächen entfallen. Das Modell generiert 28 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche als angebunden (reale Lieferfläche aus Kartierung/Befragung: 24 %).

Als räumliche Auswertungsbasis dienen die Hangeinzugsgebiete von Stoffübertritten in die Oberflächengewässer (Liefergebiete). Sie wurden durch Kartierungen und Landwirtebefragungen im Untersuchungsraum identifiziert. In den Liefergebieten liegen die Bodenabträge in Abhängigkeit von den landschaftsökologischen Rahmenbedingungen (Niederschlag, Bewuchs, Bodenfeuchte) bei durchschnittlich 2,3 bis 4,5 t/ha LNF. 25 % des Feinbodens akkumulieren im Liefergebiet. Die durchschnittliche Lieferflächengröße liegt bei ca. 0,5 ha. Der größte Teil der Einträge verläuft punkthaft, seltener flächenhaft in künstliche Gräben.

Der Modellansatz berücksichtigt zur Ableitung des Gewässeranbindungsgrades zehn z. T. integrierende Parameter. Die Flächenanbindung ändert sich in Abhängigkeit von der Ausprägung der Modellparameter. Die Parameter Gewässerdistanz, Bodenabtrag und Abflussmenge zeigen einen sehr ausgeprägten, Transportpfaddistanz, Stofftransportkapazität, Hanglänge und Einzugsgebietsgröße einen weniger ausgeprägten Einfluss auf das Eintragungspotential eines Raumsegmentes. Hangneigung und -form sind weniger relevante Größen für die Bestimmung des Flächenanbindungsgrades.

Der Oberflächenabfluss wird über das CN-Verfahren, die Bodenerosionsgefährdung durch die ABAG abgeschätzt. Das Stofftransportpotential basiert auf einem Ansatz von J. SCHMIDT (1994) und M.v. WERNER (1995). Lineare Raumstrukturelemente (Verkehrsnetz, Nutzungsgrenzen) werden durch ein besonderes Verfahren in das DGM integriert. Das Modell berücksichtigt auf diese Weise ihre Wirkung auf den Oberflächenabfluss. Es werden Gebietssegmente als „abgekoppelt“ deklariert und potentielle Akkumulationsbereiche ausgewiesen. Das geringere Stofftransportpotential von temporär wasserführenden Gräben ist über die Reduktion des Anbindungsgrades implementiert. Die Modellberechnungen zeigen im räumlichen Verbreitungsmuster und in der Häufigkeitsverteilung des Anbindungsgrades plausible Wahrscheinlichkeitswerte.

Modellszenarien zeigen die folgenden Ergebnisse. Der Anbindungsgrad sinkt, wenn der Bodenbedeckungsgrad steigt. Die Modellierung ohne Raumstrukturbeeinflussung zeigt, dass bei 8 % der Ackerflächen lineare Raumstrukturelemente einen ausgeprägten Effekt auf die prognostizierte Anbindung ausüben. Durch konsequente Retentionsmaßnahmen in temporär wasserführenden Gräben ließen sich gut 40 % der gesamten Ackerfläche von den permanenten Fließgewässern abkoppeln.

## VORWORT

Die Arbeit ist im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs „Stoffströme in Wasser und Boden“ der Universität Hannover entstanden. An verschiedenen Instituten wird im Kolleg interdisziplinäre Forschung zum breit gefächerten Bereich von Wasser- und Stofftransportprozesse betrieben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Mosimann für die engagierte Betreuung der Arbeit, für fruchtbare Diskussionen und für die gewährte Freiheit sich die Arbeit entwickeln zu lassen.

Für die Übernahme des Korreferates möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Kuhnt bedanken.

Danken möchte ich ebenso allen Mitarbeitern des Institutes für die gute Zusammenarbeit. Herrn PD. Dr. Rainer Duttmann, für zahlreichen zeitintensiven Gedankenaustausch und fachliche Beratung, Herrn Dipl.-Geogr. Jens Bierbaum, für den frischen, kompetenten Support bei jeglichen Rechnerproblemen und Herrn Dipl.-Geogr. Volker Wickenkamp, für den mutigen Einsatz im Kampf gegen A/I.

Des weiteren danke ich den Herren Dr. J. Kunze, Dr. J. Sbresny und Dr. J. Schneider für wichtige Hinweise sowie N. Bohr für den Satz „An expert is a man who has made all the mistakes which can be made in a very narrow field.“

Martina Pakosch und Stefan Dallmeier danke ich für die gute Bearbeitung ihrer Diplomarbeiten, die ich mitbetreuen konnte.

Zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräften möchte ich für die Erledigung von Teilarbeiten und Frau Kurz für die Übersetzung meinen Dank aussprechen.

Danken möchte ich allen Mitgliedern des Graduiertenkollegs für das angenehme Arbeitsklima und den anregenden Gedankenaustausch.

Meinen Eltern danke ich ganz herzlich, weil sie mir das Studium ermöglichten und mich auch während der Promotion tatkräftig unterstützten.

Mein allergrößter Dank gilt aber vor allem meiner Frau, die in der langen entbehnungsreichen Zeit die größte Bürde zu tragen hatte, sowie meinem Sohn, der mich täglich an die wesentlichen Dinge erinnerte.

Hannover, im Juni 1999

Johannes Voges

## GLOSSAR

Anbindung	o. Gewässer- bzw. Flächenanbindung: Eigenschaft einer Fläche erodierte partikuläre Stoffe in das Graben- und Fließgewässersystem eintragen zu können
Anbindungsgrad	„Intensität der Koppelung“ einer Fläche mit einem Fließgewässer über den oberflächlichen Stofftransportpfad. Der Grad der Flächenanbindung wird durch die Größe der Wahrscheinlichkeit, mit welcher Bodensubstanz in Fließgewässer eingetragen wird, quantitativ beschrieben
ATKIS	Amtlich Topographisch Kartographisches Informationssystem der Landesvermessungsämter
CV	Variationskoeffizient
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
Fließgewässer	Mehr oder weniger anthropogen veränderte natürliche strömende Oberflächengewässer mit permanenter Wasserführung
Graben	Kleinstgewässer, vollständig künstlich angelegt. Es lassen sich landwirtschaftliche Gräben, Straßenbegleit-, Abwasser- und Mischwassergräben unterscheiden. Sie werden entsprechend ihrer Wasserführung zusammengefasst in permanente (mit ständiger Wasserführung), periodische (mit regelmäßig zeitweiser Wasserführung), episodische (unregelmäßig zeitweiser Wasserführung)
Gewässer	allgemeiner Begriff: umfaßt Fließgewässer und Gräben.
Liefergebiet	Fläche aus der Feststoffpartikel und die daran gebundenen Stoffe ausgetragen und in die Oberflächengewässer eingetragen werden
Raumstruktur	o. Raumstrukturelemente topographisches Element der Kulturlandschaft, das den Landschaftsraum gliedert und oberflächliche Stofftransportprozesse beeinflussen kann. Unterscheidung in mesoskalige R. (Fließgewässer und Gräben, Wege und Straßen) und mikroskalige R. (Gewässerrandstreifen, Ackerrandfurche, Uferbankett, bearbeitungsbedingte Leitlinie) sowie lineare R. und flächenhafte R.
Reale Lieferfläche	ist ein Hangeinzugsgebiet eines tatsächlichen Übertrittsbereichs. Ihre Stofflieferungen an die Oberflächengewässer sind durch Informationen aus Felderhebungen verifiziert.
s	Standardabweichung einer Stichprobe
(Stoff-)übertritt	Eintrag von Oberflächenwasser und erodiertem Bodenmaterial in das Fließgewässer- und Grabensystem (Prozess und Ortslage). Damit verbunden ist auch der Eintrag von an die Bodenmatrix gebundenen chemischen Stoffen (Phosphor, andere Agrochemikalien). Die Begriffe Übertrittsstelle oder Eintragsbereich kennzeichnen die örtliche Lage. Übertrittstypen sind: punktueller Übertritt (< 1 m breit), flächenhafter Übertritt (≥ 1 m breit)
Testgebiet	Untersuchungsgebiet, in dem die Datenerfassung durch Kartierungen und Befragungen durchgeführt wurde.
TIN	triangulated irregular network (Dreiecksvermaschung); Datendiskretisierungsmodell: Aufteilung in unregelmäßige Dreiecke,
Uferbankett	kleine wallähnliche Erhöhung des Mikroreliefs im Uferbereich von Gräben oder Fließgewässern (Höhe 10-50 cm).
$\bar{X}$	Mittelwert einer Stichprobe

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abstract</b> .....	3
<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	4
<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Glossar</b> .....	6
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	7
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	10
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	13
<b>Kartenverzeichnis</b> .....	14
<b>1. Einführung</b> .....	15
1.1. Das Problem: Partikelgebundene diffuse Stoffeinträge in die Oberflächengewässer .....	15
1.2. Der Ansatz „Gewässeranbindung“ - Möglichkeit zur Problemlösung bei diffusen Stoffeinträgen aus der Landwirtschaft.....	17
1.3. Begriffe und Definitionen .....	18
1.4. Ziele und Aufbau der Arbeit .....	21
<b>2. Methodik zur Ermittlung der Einflussparameter der Gewässeranbindung</b> .....	25
2.1. Vorgehensweise .....	25
2.2. Konzeption der Datenerhebung .....	27
2.2.1. Grundsätzliches .....	27
2.2.2. Datenebenen.....	28
2.2.3. Erosionsschadens- und Raumstrukturkartierung .....	29
2.2.4. Befragung von Landwirten zu Übertrittsgeschehen sowie Fließgewässer- und Grabenstrukturen .....	32
2.3. Datenauswertung .....	33
2.3.1. Datenintegration ins GIS .....	33
2.3.2. Berechnungen mit GIS .....	35
2.3.3. Datenbankkonzeption.....	37
2.3.4. Deskriptive und analytische Statistik .....	40
<b>3. Situation und Charakteristika des Einzugsgebietes von Nette und Lamme (Niedersächsisches Leinebergland)</b> .....	44
3.1. Geoökologische Ausstattung .....	44
3.1.1. Lage .....	44
3.1.2. Geologische Verhältnisse.....	45
3.1.3. Boden.....	47
3.1.4. Niederschlags- und Oberflächenabflussbedingungen.....	49

3.2. Veränderungen durch die Landwirtschaft.....	51
3.2.1. Flächennutzung.....	51
3.2.2. Graben- und Gewässernetz .....	51
3.2.3. Straßen und Wegenetz .....	53
3.3. Besonderheiten der ausgewählten Testgebiete .....	53
<b>4. Ursachen und Prozesse bei der Entstehung von Lieferflächen in den Testgebieten.....</b>	<b>55</b>
4.1. Übersicht zu den Hauptfaktoren der Gewässeranbindung .....	55
4.2. Bodenerosion und Gewässereintrag .....	59
4.2.1. Räumliche Verteilung .....	59
4.2.2. Abschätzung der Eintragsmenge.....	63
4.3. Boden.....	70
4.4. Raumstrukturen .....	71
4.4.1. Raumstrukturelemente als Einflussfaktoren der Fließwege .....	72
4.4.1.1. Raumstrukturelemente im microscale .....	72
4.4.1.2. Raumstrukturelemente im mesoscale .....	82
4.4.2. Transportbedingungen und Sedimentation im Gewässernetz.....	85
4.5. Räumliche Verteilung, Flächenanteil und –größe der realen Liefergebiete .....	90
4.5.1. Raumverteilungsmuster der realen Lieferflächen .....	91
4.5.2. Flächenanteile und Flächengröße der realen Liefergebiete .....	95
4.5.2.1. Flächenanteile .....	95
4.5.2.2. Flächengröße einzelner Lieferflächen.....	97
4.5.3. Übertrittstypisierung .....	101
4.6. Zusammenfassung und Fazit.....	103
<b>5. Identifikation der Modellparameter für die Simulation der Gewässeranbindung .....</b>	<b>105</b>
5.1. Prinzip .....	105
5.2. Relief .....	107
5.3. Menge der Direktabflussspende .....	116
5.4. Bodenerosion .....	117
5.5. Stofftransport .....	118
5.6. Modellparameter und Anbindungswahrscheinlichkeit.....	121
5.7. Reihung der Modellparameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Flächenanbindung ...	124
<b>6. Konzeption des Modells zur Bestimmung der Gewässeranbindung.....</b>	<b>129</b>
6.1. Allgemeine Bemerkungen.....	129
6.2. Modellstruktur .....	131
6.3. Reliefanalyse .....	134
6.4. Integration von linearen Raumstrukturelementen in die Abbildung des Reliefs (Raumstrukturintegration) .....	135

6.5. Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung .....	137
6.5.1. LS-Faktor .....	138
6.5.2. R-Faktor .....	141
6.5.3. K- und C- Faktor .....	145
6.6. Abschätzung des oberflächlichen Abflusses .....	146
6.6.1. Ermittlung des Gebietsniederschlags für ein repräsentatives Extremereignis .....	147
6.6.2. Ermittlung der direkten Abflussmenge .....	148
6.7. Abschätzung der Transportkapazität des Oberflächenabflusses .....	151
6.8. Stoffretentionspotential von Gräben .....	155
6.9. Klassifikationsverfahren zur Ermittlung des Gewässeranbindungsgrades .....	157
6.9.1. Verknüpfung der Einzelparameter .....	158
6.9.2. Identifikation abgekoppelter Areale und potentieller Akkumulationszonen .....	160
6.9.3. Kalibrierung des Modells .....	161
6.9.4. Qualität der Modellaussage .....	162
<b>7. Modellbasierte Bestimmung der Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer für das Innerstegebiet .....</b>	<b>165</b>
7.1. Raumverteilungsmuster wichtiger Einzelgrößen .....	165
7.1.1. Bodenerosionsgefährdung .....	165
7.1.2. Direktabfluss .....	167
7.1.3. Transportkapazität des Oberflächenabflusses .....	170
7.1.4. Stoffretentionspotential von Gräben .....	172
7.2. Raumverteilungsmuster der Anbindungswahrscheinlichkeit von Ackerflächen an Fließgewässer .....	174
<b>8. Anbindungsgrad für Nutzungs- und Raumstrukturszenarien .....</b>	<b>181</b>
8.1. Veränderter Bodenbedeckungsgrad .....	181
8.2. Veränderte Raumstrukturen .....	185
8.3. Stoffretention in Kleinstinzugsgebieten von temporären Gräben .....	188
<b>9. Möglichkeiten und Grenzen der GIS-gestützten Bestimmung der Flächenanbindung ...</b>	<b>192</b>
9.1. Der Ansatz „Gewässeranbindung“, wozu ? .....	192
9.2. Methodik .....	194
9.3. Perspektiven .....	196
<b>10. Zusammenfassung .....</b>	<b>200</b>
<b>11. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>206</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>216</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1:	Übertrittsbereich in ein Fließgewässer mit Abgrenzung des Liefergebietes .....	19
Abb. 2:	Kernfragen und Hauptziel der Arbeit.....	22
Abb. 3:	Methodische Vorgehensweise von der Datenerhebung und –verarbeitung über die Datenanalyse bis zur Modellanwendung .....	26
Abb. 4:	Kartierbogen zur Erfassung von Übertritts-, Erosionsgeschehen und Raumstrukturelementen .....	30
Abb. 5:	Datenbankkonzeption für die raumbezogene Datenanalyse der vier Testgebiete.....	39
Abb. 6:	Lage des Gesamtgebietes und der detailliert untersuchten Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden.....	44
Abb. 7:	Verteilung der Monatsniederschläge der Stationen Lamspringe, Bad Salzdettfurth und Hildesheim.....	49
Abb. 8:	Absolute Häufigkeit von Starkniederschlägen mit mehr als 15 mm/d der Station Seesen im Südteil des Untersuchungsgebietes.....	50
Abb. 9:	Absolute (■) und relative (—) Häufigkeitsverteilung von Höhen- und Neigungsstufen im Gesamtgebiet .....	51
Abb. 10:	Verteilung der Hauptbodentypen auf die gesamte Ackerfläche.....	51
Abb. 11:	Wichtige wechselwirkende Einflussparameter der Gewässeranbindung.....	56
Abb. 12:	Typisierter Querschnitt durch einen Übertrittsbereich .....	58
Abb. 13:	Häufigkeiten der geschätzten Eintragsmengen (Nettoabträge) aus den Lieferflächen aller Testgebiete in t pro Liefergebiet (Schneesmelzereignis).....	64
Abb. 14:	Häufigkeiten der geschätzten Nettoabträge für die Liefergebiete aller Testgebiete in t/ha (Schneesmelzereignis).....	65
Abb. 15:	Abhängigkeit der Gesamtflächengröße aller erfassten Liefergebiete von der Bodenart (BÜK 50); Prozentanteile der Bodenarten an den Lieferflächen bzw. an der Testgebietsfläche (Schneesmelzereignis).....	71
Abb. 16:	Länge und Anzahl linearer Raumstrukturelemente im Gewässerrandbereich der Liefergebiete (Schneesmelzereignis).....	74
Abb. 17:	Anteilverteilung der potentiell (in den Testgebieten) und tatsächlich (in den Liefergebieten) übertrittsfördernden und –hemmenden linienhafte Raumstrukturtypen .....	76
Abb. 18:	Feststoffretention vor Uferbankett und in Ackerrandfurche (Testgebiet Nette).....	77
Abb. 19:	Anzahl der Übertritte und die Gesamtflächengröße ihrer Liefergebiete in Abhängigkeit von der Bearbeitungsrichtung (Schneesmelzereignis).....	79
Abb. 20:	Prozentanteile von Gesamtanzahl und -länge der Raumstrukturen Weg und Straße innerhalb der realen Liefergebiete (Schneesmelzereignis; Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden) .....	83
Abb. 21:	Absolute Häufigkeit von Fahrbahnkronenbreite für verschiedene Fahrbahntypen in den Flurbereinigungsgebieten Westfeld, Sehlen und Lamspringe.....	84
Abb. 22:	Zusammenhang zwischen dem Umfang berücksichtigter Oberflächengewässer und ausgewählten Anbindungsparametern .....	86
Abb. 23:	Prozentanteile der Fließgewässer und Gräben an der Gesamtlänge der erfassten Gewässer (Datenquelle: Landwirtebefragung und Kartierung 1996/97).....	87



Abb. 24: Frisch ausgekoffelter, stark verkrauteter und zusedimentierter landwirtschaftlicher Graben .....	88
Abb. 25: Regressionsbeziehung von Bedeckungsgrad und Flächengröße der realen Liefergebiete (Schneeschnelzereignis).....	97
Abb. 26: Häufige Übertrittssituationen typisiert auf Grundlage von 1100 Übertrittsfällen.....	102
Abb. 27: Prinzip der Häufigkeitsanalyse zur Bewertung der Bedeutung von Anbindungsparametern.....	106
Abb. 28: Relative Häufigkeiten der berechneten Hanglängen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	108
Abb. 29: Relative Häufigkeiten der berechneten Neigung im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	109
Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der Kombination von Hangneigung und -länge für die gesamten Testgebiete .....	111
Abb. 31: Relative Häufigkeiten der berechneten Hangformen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	112
Abb. 32: Relative Häufigkeiten der berechneten Entfernung zum Gewässer- und Grabensystem im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	113
Abb. 33: Relative Häufigkeiten der berechneten Einzugsgebietsgrößen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	114
Abb. 34: Relative Häufigkeiten der berechneten Transportstrecke im Grabensystem bis zum nächsten Fließgewässer im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung).....	115
Abb. 35: Relative Häufigkeiten der berechneten Direktabflussspenden im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	116
Abb. 36: Relative Häufigkeiten der berechneten Abträge im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	117
Abb. 37: Relative Häufigkeiten der berechneten Transportkapazität des Oberflächenabflusses im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	119
Abb. 38: Relative Häufigkeiten der Entfernung der Liefergebiete vom berechneten Transportpfad im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung) .....	120
Abb. 39: Gesamtabweichungen vom Testgebietsdurchschnitt für ausgewählte Anbindungsparameter.....	126
Abb. 40: Konzeption des Modells zur Bestimmung des Anbindungsgrades erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer.....	133
Abb. 41: Prinzip der Integration von Raumstrukturen in ein digitales Geländemodell.....	135
Abb. 42: Regression der Höhe und der mittleren Jahresniederschlagssumme für 29 Stationen im und um das Untersuchungsgebiet .....	142
Abb. 43: Beziehung von Windrichtung, -geschwindigkeit und Niederschlagshöhe für Tagesniederschlagswerte > 5 mm (Klein Ilde, Zentralambergau) .....	143
Abb. 44: Unterschiede zwischen den R-Faktor-Werten nach P. SAUERBORN 1994 und den nach der Regressions-/Interpolationsmethode ermittelten Werten.....	145

---

Abb. 45: Regression der Höhenlage zum arithmetischen Mittel der 50 größten Niederschlagsereignisse aus 25 Jahren von ausgewählter Klima stationen in und um den Untersuchungsraum .....	147
Abb. 46: Mittlere monatliche Abflussspende (MoMHq) am Pegel Östrum exemplarisch für Testgebiet Adenstedt .....	151
Abb. 47: Verbreitungs mosaik von prognostizierten Lieferflächen für Feststoffe bei verschiedenen Grenzwerten der Eintragswahrscheinlichkeit .....	178
Abb. 48: Räumliche Verbreitung von zufällig verteilten Bodenbe deckungen auf Ackerflächen zwischen 20 und 70 % sowie auf Grünland- und Waldflächen von 80-100 % .....	182
Abb. 49: Histogramm der Wahrscheinlichkeitsdifferenzen zwischen ur sprüngerlicher Model-lierung und Simulation mit flächendifferenziert erhöhtem Bodenbedeckungsgrad .....	184
Abb. 50: Differenzen der Direktabflussspende im Gesamtgebiet bei Vernach lässigung von linearen Raumstrukturelementen (Verkehrswegenetz und Nutzungsgrenzen) .....	187
Abb. 51: Prinzip der Modellkonzeption zur Ermittlung des Anbindungsgrades an Gewässer .....	204

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Übersicht über die erhobenen Felddaten: Flächendeckende Daten durch Eintrag in Karten sowie Detaildaten durch Aufnahme ausgewählter Übertritte in Kartierbogen. ....	31
Tab. 2:	Vergleich verschiedener Rasterauflösungen des Höhenmodells; aufgeführt sind die Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Rasterweite von 50 m.....	37
Tab. 3:	Gesteinsinformationen mit Wasserdurchlässigkeiten des geologischen Untergrundes.....	46
Tab. 4:	Gewässer- und Grabendichte in Abhängigkeit von der Flächennutzung.....	52
Tab. 5:	Übersicht wichtiger Charakteristika der Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden .....	54
Tab. 6:	Feststoffeinträge aus angebondenen Flächen berechnet aus Erosionsschadenskartierungen (Mittel über alle Testgebiete).....	68
Tab. 7:	Geschätzte Retentionskapazität der linearen Raumstrukturelemente Gewässer-randstreifen, Uferbankett, Ackerrandfurche. ....	78
Tab. 8:	Eigenschaften der Raumstrukturelemente Straße und landwirtschaftlicher Weg in den Flurbereinigungsgebieten Westfeld, Sehem und Lamspringe .....	85
Tab. 9:	Berechnung von theoretischem, potentiellm und realem Retentionsvermögen für eingetragenes Sediment in zeitweise wasserführende Gräben im Gesamtgebiet.....	89
Tab. 10:	Flächenausdehnung der erfassten Liefergebiete und Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (alle Testgebiete) .....	95
Tab. 11:	Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Maximalwert für die Flächengrößen der Liefergebiete.....	98
Tab. 12:	Lage- und Streuparameter zur Flächenausdehnung verschiedener Einzugsgebiete der Übertrittstypen (Lieferflächentypen).....	100
Tab. 13:	Bedingte Wahrscheinlichkeiten ausgewählter Anbindungsparameter .....	122
Tab. 14:	Reihung der Modellparameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Flächenanbindung nach verschiedenen Bewertungskriterien .....	125
Tab. 15:	Hypothesen zum empirischen Modell zur Bestimmung des Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer im mittleren Maßstab (1 : 25 000-50 000).....	131
Tab. 16:	Geländehöhendifferenz linearer Raumstrukturelemente aus ATKIS DLM 25/1 zur Integration in das DGM.....	136
Tab. 17:	Verwendete CN-Werte in Abhängigkeit von Bodengruppe und ATKIS-Bodennutzung in der Bodenfeuchteklasse II.....	149
Tab. 18:	Für die Flächennutzungen aus ATKIS verwendete Rauigkeiten nach MANNING.....	154
Tab. 19:	Rauhigkeitsparameter für verschiedene Grabentypen.....	157
Tab. 20:	Prognosequalität des Anbindungsmodells: Absolut- und Prozentangabe von Treffer- und Fehlerquote.....	163

**KARTENVERZEICHNIS**

Karte 1:	Flächennutzung .....	48
Karte 2:	Bodenverbreitung.....	48
Karte 3:	Bodenerosion durch Schneeschmelze mit Dauerregen, Testgebiet Adenstedt.....	61
Karte 4:	Bodenerosion durch Starkregen, Testgebiet Adenstedt .....	62
Karte 5:	Sedimenteinträge aus den Lieferflächen beim Schneeschmelzereignis, Gebiet Adenstedt .....	67
Karte 6:	Abflussbeeinflussende Raumstrukturen, Testgebiet Adenstedt.....	81
Karte 7:	Reale Liefergebiete aus Kartierung und Landwirtebefragung im Testgebiet Adenstedt.....	92
Karte 8:	Reale Liefergebiete aus Kartierung und Landwirtebefragung im Testgebiet Nette.....	94
Karte 9:	Regionalisierter R-Faktor .....	144
Karte 10:	Bodenerosionsgefährdung nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG)....	166
Karte 11:	Direktabfluss nach Starkniederschlag, abgeleitet über modifiziertes SCS- Curve-Number-Verfahren.....	168
Karte 12:	Transportkapazität des Oberflächenabflusses nach vereinfachtem Verfahren von J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995) .....	171
Karte 13:	Retentionspotential von Gräben (Reduktionsfaktor des Anbindungsgrades) .....	173
Karte 14:	Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer, Gewässeranbindungsgrad der aktuellen Situation.....	176
Karte 15:	Flächenanbindungsgrad für den Praxiseinsatz: Parzellenbezogen gemittelte Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages in Fließgewässer [%].....	179
Karte 16:	Anbindungsgrad für ein Frühjahrereignis (Mai-Juni) unter Berücksichtigung der kulturartabhängigen Bodenbedeckung .....	183
Karte 17:	Abweichung des Anbindungsgrades bei Eliminierung von Raumstrukturelementen....	186
Karte 18:	Feststoffretention im Einzugsgebiet zeitweise wasserführender Gräben .....	190

# 1. EINFÜHRUNG

## 1.1. Das Problem: Partikelgebundene diffuse Stoffeinträge in die Oberflächengewässer

Trinkwasser als ein unersetzliches Lebensmittel bildet die Lebensgrundlage des Menschen. Der Trinkwasserbedarf der Bundesrepublik wird im Durchschnitt zu ca. 28 % aus Oberflächengewässern gedeckt (H.-G. FREDE & S. DABBERT 1998). Regional gibt es große Unterschiede in der Wasserversorgung. Besonders in Verdichtungsräumen wird z. T. überdurchschnittlich viel Oberflächenwasser gefördert (R. MULL 1993, D. BRIESE 1984). Oberflächengewässer sind neben natürlichen vor allem Einflüssen durch zahlreiche anthropogene Aktivitäten ausgesetzt, die sich zu Belastungen ausweiten können. Das Problem der Nährstoffbelastung stellt sich folglich nicht nur aus ökologischer, sondern auch aus Sicht einer gesicherten Trinkwasserversorgung. Um langfristig eine hohe Trinkwasserqualität sicherzustellen, sind Schutzmaßnahmen erforderlich. Die **Nährstoffbelastungen der Oberflächengewässer** rühren vor allem von Stickstoff- und Phosphorverbindungen her.

Die Beeinträchtigungen der Oberflächengewässer durch Nährstoffeinträge sind auf die folgenden Verunreinigungen zurückzuführen. Die **Primärverunreinigungen** als Folgeerscheinung von N- und P-Einträgen begünstigen das Wachstum der Wasserpflanzen, führen zur Veränderung der Artensammensetzung und in der Konsequenz zur Speziesverarmung sowie Individuenvermehrung. Die **Sekundärverunreinigungen** gründen sich auf anhaltenden Sauerstoffmangel in Folge von übermäßigem Pflanzensterben. Dies führt schließlich zum „Umkippen“ stark eutrophierter Oberflächengewässer (Hypertrophie).

Der Stoffeintrag in die Gewässer vollzieht sich über punktuelle oder diffuse Quellen. Die **punktuellen Eintragsquellen** beruhen zumeist auf Abwasseremittenten. Sie sind gut lokalisierbar und die eingetragenen Stoffmengen gut quantifizierbar. Technische Verfahren vermögen den punktuellen Eintrag zu reduzieren. Durch zunehmenden Kläranlagenanschluss, verbesserte Klärtechnik und legislative Maßnahmen konnten die Stoffeinträge in der Vergangenheit ständig vermindert werden.

Die **diffusen Einträge** kommen größtenteils aus der Landwirtschaft. Die genaue Herkunft der Stoffe ist ebenso wie der Eintragspfad schwer zu lokalisieren. Die Einträge sind daher schwieriger zu quantifizieren als bei punktuellen Quellen (H.-G. FREDE 1992). Ca. 50 % der gesamten Phosphoreinträge stammen aus diffusen Quellen, von denen wiederum ca. 30 % durch Bodenerosion verursacht sind.

Durch Erosion können partikelgebundene Stoffe wie Humusbestandteile, organisch schwer abbaubare Verbindungen (Pflanzenschutzmittel), Ammonium, z.T. Kalium und eben v. a. Phosphor transportiert und in die Oberflächengewässer eingetragen werden (W. WALTHER 1995). Da Phosphor bei der Gewässereutrophierung i.d.R. den limitierenden Faktor darstellt, ist seine Berücksichtigung von zentraler Bedeutung für den wirksamen Gewässerschutz. Zusätzlich zu den direkten stofflichen Belastungen in den Oberflächengewässern rufen die Feststoffpartikel durch Sedimentation Beeinträchtigungen in kleinsten Fließgewässern und in Binnengewässern hervor. Neben diesen offsite-Schäden führt die Bodenerosion auf den Flächen selbst zu onsite-Schäden, die langfristig die Bodenfruchtbarkeit gefährden und einer standortgerechten Landwirtschaft entgegenstehen können. (TH. MOSIMANN 1995). Die Erosion schränkt die Pufferfunktion des Bodens ein, so dass auch die gelösten Stoffe, die über den Grundwasserpfad in die Vorfluter gelangen, langfristig in den Oberflächengewässern zunehmen (K. AUERSWALD 1992). In ein Konzept zum Schutz der Oberflächengewässer vor partikelgebundenen Stoffeinträgen sind also Aspekte des Bodenschutzes zu integrieren.

Das gesellschaftliche Interesse an einer Reduzierung stofflicher Belastungen der Oberflächengewässer hält an. Die zunehmende Eutrophierung der Oberflächengewässer inklusive Nord- und Ostsee durch Stickstoff und Phosphor erfordert dringend gezielte Maßnahmen zur Nährstoffreduktion (W. WERNER & H.P. WODSAK 1994). So wurde als politische Vorgabe auf den internationalen Nordseeschutzkonferenzen 1987 und '90 die 50 %ige Verringerung der Stoffeinträge beschlossen. Die zur Verabschiedung vorliegende Wasserrahmenrichtlinie der EU fordert aktuell ein flächenhaftes Einzugsgebietsmanagement (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 1997). Die EU dringt damit auf die Erweiterung des Gewässerschutzkonzeptes, das sich bis heute auf das Fließgewässer selbst konzentriert. Ein *kostenintensiver* Gewässerschutz lässt sich allerdings nicht durchsetzen, da politische Maßnahmen zum Erreichen von Umweltzielen nach dem Prinzip der Kostenminimierung und Ressourcenschonung durchgeführt werden müssen. Gewässerschutzmaßnahmen lassen sich also nicht für alle elementaren Teileinzugsgebiete gleichermaßen durchführen.

Aus den vorangestellten Thesen leitet sich die **Notwendigkeit** eines sehr wirksamen, flächendeckenden **Gewässerschutzes** für ganze Flussgebiete auf Basis von praktikablen Protektionsmaßnahmen ab. Die Effizienz des Gewässerschutzes lässt sich durch ein differenziertes Vorgehen steigern, bei dem die Maßnahmen auf besonders stoffbelastenden Flächen durchgeführt werden (H. LEHMANN & H.-O. ZINTZ 1993).

Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit eines großflächig greifenden Landnutzungsmanagements wird die Bearbeitung von zunehmend größeren Räumen unter hydrologisch-geographischen Aspekten notwendig (s. A. BRONSTERT & V. KRYSANOVA 1998). Dies ist durch den Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) auch für ganze Flusseinzugsgebiete realisierbar. Als Werkzeug zur Prozessabbildung sowie für die Simulation von Maßnahmen und deren Wirkungen

sind numerische Modellsysteme erforderlich (H. LEHMANN & H.-O. ZINTZ 1993). Aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit müssen diese Simulationsmodelle mit flächenhaft verfügbaren Grunddaten auskommen. Damit kristallisiert sich die Frage heraus, mit welchem Konzeptansatz sich für ein Flussgebiet ein gezielter integrierter Gewässerschutz am besten realisieren lässt.

## 1.2. Der Ansatz „Gewässermanagement“ - Möglichkeit zur Problemlösung bei diffusen Stoffeinträgen aus der Landwirtschaft

Gezielte **Strategien** zur Vermeidung von diffusen Gewässerbelastungen lassen sich nur bei Kenntnis der Anteile der verschiedenen Quellen und der Herkunft der Belastungen entwickeln (s. A. HAMM 1991). Allerdings sind die Herkunft von Bodenmaterial, das nach Erosion und Oberflächentransport in die Fließgewässer eingetragen wird, der Ort des Stoffeintrages (Übertrittsstelle) sowie die eingetragene Stoffmenge nur schwer zu prognostizieren. Die genaue Herkunft der Stoffe ist im Allgemeinen unklar und wird bei den meisten Untersuchungen zur diffusen Gewässerbelastung bisher vernachlässigt.

Im Allgemeinen steht nur ein Prozessteil der Stoffbelastung der Oberflächengewässer im Zentrum wissenschaftlicher Untersuchungen: Entweder die Bodenerosion auf der Fläche (Abtragsmenge) oder die stoffliche Beeinträchtigung im Gewässer selbst (Nähr-/Schadstoffmenge). Als Problemlösungsansatz reicht es nicht aus, *nur* Ort und Menge des Bodenabtrages oder *nur* eingetragene Stoffmengen zu ermitteln. Für die Praxis ist vielmehr eine **aussagekräftige** (integrative) **Größe** zur potentiellen Gewässerbelastung notwendig, die das Prozessgefüge aus Bodenerosion, oberflächlichem Stofftransport, Stoffübertritt und Fließgewässereintrag zusammenfasst. Diese Größe verknüpft on- und offsite-Schäden zu einer **zusammenfassenden** (synthetischen) **Aussage** und berücksichtigt damit Aspekte des Boden- *und* des Gewässerschutzes. Sie soll die für den Gewässereintrag relevanten Flächenbereiche nach ihrer Bedeutung differenziert für ein ganzes Flusseinzugsgebiet raumbezogen abbilden. Dazu möchte der Ansatz „Gewässermanagement“ einen konzeptionellen Beitrag leisten.

Für die **Planung** und **Durchführung** gezielter Maßnahmen zum Schutz der Gewässer vor Stoffeinträgen (örtlich differenzierte Erosionsschutzmaßnahmen, Oberflächenabflussregulierung, Anlage von Gewässerschutzstreifen usw.) ist die Erfassung von stoffliefernden Flächen und von Eintragsbereichen eine wichtige Grundlage. Über die Identifikation der Stofflieferflächen und die Abschätzung ihres Beitrags, den sie zum gesamten diffusen Gewässereintrag in einem Flusseinzugsgebiet leisten, kann die Effizienz von Schutzmaßnahmen im offsite-Bereich gesteigert werden. Auf Ackerflächen, die einen hohen bis sehr hohen Anbindungsgrad an Fließgewässer haben, lässt sich der Feststoffeintrag durch Erosionsschutzmaßnahmen (onsite-Bereich) oder durch Retentionsmaßnah-

men im Bereich der oberflächlichen Transportpfade zum Gewässer (s. H.-G. FREDE U. A. 1994) wirksam verringern.

Ein flächendifferenziertes Vorgehen im Sinne des Konzepts der Gewässeranbindung wirkt sich positiv auf die praktische Umsetzbarkeit von Managementmaßnahmen aus. Denn bei *denjenigen* Schutzkonzepten, die zunächst nur Flächenbereiche mit stark ausgeprägter Stofflieferfunktion für die Gewässerschutzvorhaben in Betracht ziehen, ist mit einer höheren Akzeptanz zu rechnen. Am überzeugendsten sind solche Maßnahmen des Gewässer- oder Bodenschutzes, die das günstigste Kosten-Wirksamkeitsverhältnis aufweisen, d.h. effizient sind (H.-G. FREDE & S. DABBERT 1998).

Für das Einzugsgebietsmanagement ist dazu in der Praxis die hinreichend genaue Prognose von hochgradig angebondenen Flächen notwendig. Für ganze Flusseinzugsgebiete von mehr als hundert Quadratkilometern Größe benötigt man ein rechnergestütztes Modellsystem, das auf Grundlage von flächenhaft leicht verfügbaren Basisdaten die Risikoflächen des Stoffeintrages bestimmt. Die Ermittlung relevanter Flächenbereiche der Gewässerbelastung kann im mittleren Maßstabsbereich in angenäherter Form durch eine GIS-basierte Modellprognose geschehen.

Für Fragestellungen, bei denen es auf besondere Genauigkeit (Prozessverständnis, Einzelfallbetrachtung) ankommt, können die auf mittlerer Maßstabsebene (mesoscale) prognostizierten stoffliefernden Flächen an komplexere Modellsysteme übergeben werden (schrittweises Flächenselektionsverfahren). Durch die starke Begrenzung der räumlichen Ausdehnung dieser Flächen ist es erst praktikabel, hochauflösende Modelle mit ihren hohen Datenanforderungen einzusetzen. Für begrenzte Gebietsausschnitte des kleinen Maßstabsbereiches (microscale) lassen sich detaillierte Eingangsdaten bereitstellen. Bei diesem sogenannten downscaling-Verfahren - d. h. dem Übergang von einer höheren zu einer niedrigeren Skale - sind jeder Dimensionsstufe spezifische Schätz- und Simulationsmodelle zugeordnet, die sich im Ansatz der Prozessabbildung voneinander unterscheiden (R. DUTTMANN 1999). Die Qualität der Modellaussage verbessert sich vom großen zum kleinen Maßstabsbereich. Insofern bietet sich durch die Bestimmung der Gewässeranbindung die Möglichkeit, besonders relevante Räume vorzuselektieren, um sie durch eine detaillierte Modellierung der Feststoffeinträge in Fließgewässer genauer zu beschreiben.

### 1.3. Begriffe und Definitionen

Der diffuse partikuläre Stoffeintrag vollzieht sich am sogenannten Übertrittsbereich (Abb. 1). Der **(Stoff-)übertritt** bezeichnet den Eintrag von Oberflächenwasser und erodiertem Bodenmaterial in das Fließgewässer- und Grabensystem (Prozess und Ortslage). Damit verbunden ist auch der Eintrag von an die Bodenmatrix gebundenen chemischen Stoffen (Phosphor, andere Agrochemikalien). Die Begriffe Übertrittsstelle oder Eintragsbereich kennzeichnen die örtliche Lage (Koordinaten) des

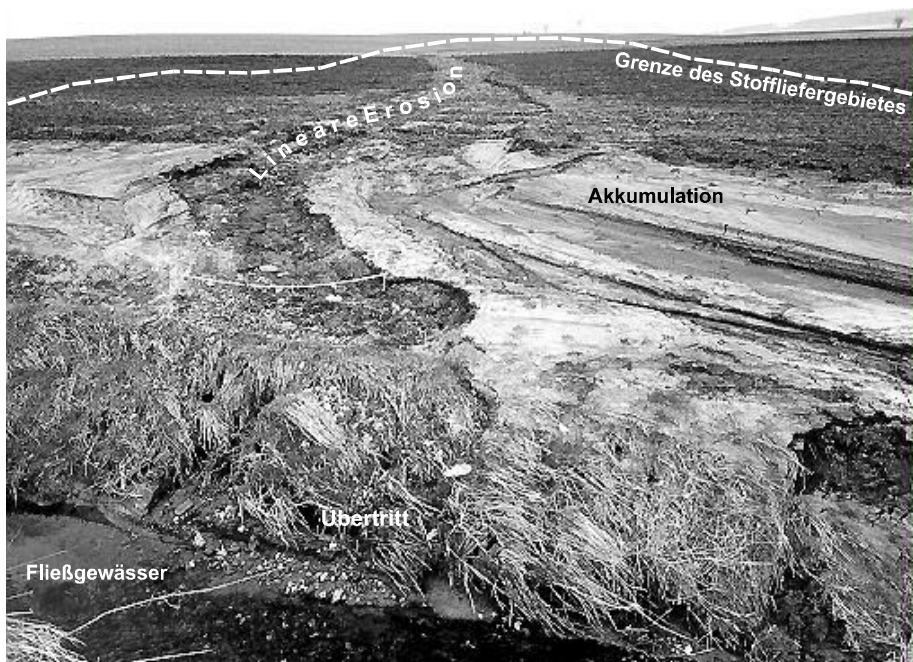


Eintragungsgeschehens. Übertrittstellen sind im Gelände an Spuren von Feinerde und Oberflächenabfluss zu erkennen. Die Stoffübertritte lassen sich typisieren hinsichtlich **Eintragsart**,

- punktueller Übertritt mit einem Eintragsbereich bis zu 1 m Breite
- flächenhafter Übertritt mit einem Eintragsbereich von über 1 m Breite

und **Eintragsziel**,

- Übertritt in perennierendes Fließgewässer
- Übertritt in künstlichen Gräben mit periodischer oder episodischer Wasserführung.



**Abb. 1: Übertrittsbereich in ein Fließgewässer mit Abgrenzung des Liefergebietes**

Die Stoffübertritte erfolgen in künstliche Gräben oder in natürliche Fließgewässer. Der Begriff **Fließgewässer** bezeichnet alle mehr oder weniger anthropogen veränderten natürlichen Oberflächengewässer, in denen permanent Wasser strömt. Sie weisen ein hohes Transportvermögen für Feststoffe auf. Der Begriff **Graben** kennzeichnet Kleinstgewässer, die zur besseren Landnutzung vollständig künstlich angelegt wurden. Es lassen sich landwirtschaftliche Gräben, Straßenbegleit-, Abwasser- und Mischwassergräben unterscheiden. Je nach Funktion nehmen sie Wasser von Straßen oder aus Dränung, Entwässerung und Siedlungen auf. Sie werden entsprechend ihrer Wasserführung zu

- permanenten oder perennierenden (mit ständiger Wasserführung)
- periodischen (mit regelmäßig wiederkehrender Wasserführung)
- episodischen (mit unregelmäßig wiederkehrender Wasserführung)

Gräben zusammengefasst (s. H. BRETTSCHEIDER U. A. 1993, S. DYCK & G. PESCHKE 1989).

Der allgemeine Begriff **Gewässer** umfasst Fließgewässer und Gräben.

Durch den Übertrittsbereich und die räumlichen Bedingungen sind die an die Gewässer angeschlossenen Gebiete definiert. Das **Liefergebiet** (Synonym: Lieferareal, Lieferfläche, angebundene Fläche) ist ein Areal des Landschaftsraumes, von dem aus Stoffe oberflächlich in die Gewässer eingetragen werden können. **Reale Lieferflächen** sind Hangeinzugsgebiete von tatsächlichen Übertrittsbereichen. Ihre Stofflieferungen an die Oberflächengewässer sind durch Informationen aus Felderhebungen verifiziert.

Somit lassen sich **Ackerflächen mit Gewässeranbindung** (Synonym: Gewässeranschluss, Flächenanbindung) folgendermaßen definieren:

- Ackerflächen gelten als an ein Gewässer **angebunden**, wenn von einer *erosionsgefährdeten* Fläche Oberflächenwasser und mitgeführte Feststoffe vom Ort der Materialablösung in ein Fließgewässer transportiert werden können.  
Ursache für die Möglichkeit der Stofflieferung sind *geoökologische und raumstrukturelle Charakteristika* der Fläche selbst und die *Eigenschaften des dazugehörigen Kleinsteinzugsgebietes*.
- Ackerflächen gelten als **nicht angebunden**, wenn aufgrund der räumlichen Rahmenbedingungen weder Oberflächenwasser noch Bodenmaterial in ein Fließgewässer gelangen kann.

Der **Grad der Flächenanbindung** (Synonym: Gewässer- oder Flächenanbindungsgrad) bezeichnet die „*Intensität der Koppelung*“ einer Fläche mit einem Fließgewässer über den oberflächlichen Stofftransportpfad. Der Grad der Flächenanbindung wird durch *die Größe der Wahrscheinlichkeit*, mit welcher Bodensubstanz in Fließgewässer eingetragen wird, quantitativ beschrieben. Ein hoher Anbindungsgrad einer Fläche bedeutet demnach eine hohe Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages bei Starkniederschlagsereignissen. Da der Flächenanbindungsgrad nicht über spezielle Messgrößen ermittelbar ist, muss er aus erfassbaren **Mittlergrößen** (Indikatoren) abgeleitet werden. Zu den Indikatoren der Gewässeranbindung zählen:

- Übertrittsstellen von Bodensubstanz und Wasser in die Gewässer oder Gräben
- Erosionsgeschehen
- für den Oberflächenabfluss relevante lineare Raumstrukturelemente

Unter **Raumstruktur(elementen)** sind topographische Elemente der Kulturlandschaft zu verstehen. Raumstrukturen gliedern den Landschaftsraum und können oberflächliche Stofftransportprozesse beeinflussen. Für den oberflächlichen Transport von Feststoffen sind folgende Raumstrukturelemente relevant:

Lineare Strukturelemente:

- Gräben und Fließgewässer
- Straße und Weg
- Parzellengrenze

- Uferbankett (entsteht durch Bodenbearbeitung, Gewässerpflegemaßnahmen und Bewuchs im Gewässerrandbereich)
- Ackerrandfurche (entsteht durch Bodenbearbeitung im Gewässerrandbereich einer Parzelle)
- sonstige Leitlinie.

Flächenhafte Strukturelemente:

- Bearbeitungsstruktur (Saatrillen, Pflugfurche usw.).

Wichtige Eigenschaften von Raumstrukturen (Höhe, Tiefe und Breite) lassen sich weiter spezifizieren. Diese näher definierten Strukturelemente werden Raumstrukturtypen genannt.

#### 1.4. Ziele und Aufbau der Arbeit

Es besteht bisher kein umfassender Modellansatz, der es ermöglicht, für größere Flussgebiete von einigen hundert km<sup>2</sup> eine flächenbezogene Abschätzung zum Risiko der Feststofflieferung aus erosionsgefährdeten Flächen an die Gewässer zu berechnen. Es existieren vielerlei Modelle zur Simulation von Bodenerosions- oder oberflächlichen Stofftransportprozessen (J. SCHMIDT 1994, M. V. WERNER 1995, A.P.J. DE ROO & R.J.E. OFFERMANS 1995, L. J. LANE & M.A. NEARING 1989, W.G. KNIESEL 1980). Und es sind zahlreiche Modellansätze zur Abbildung des Niederschlag-Abflussvorganges in Fließgewässern vorhanden (A. BRONSTERT U. A. 1998, B. MERZ 1996, P. LA BARBERA U. A. 1993, W. LUTZ 1984). Die Modellierung der Gewässeranbindung erfordert aber die Berücksichtigung beider Prozesskomplexe. Daher müssen in das Modellkonzept Elemente zur Simulation des landschaftsökologischen Prozessgefüges für den Stoffabtrag und -transport auf den Ackerparzellen, für den Stoffübertritt ins Gewässersystem sowie zur Abbildung hydrologischer Abflussverhältnisse im System temporär wasserführender Gräben eingehen. Als Simulationsergebnis ist eine langfristig geltende flächenbezogene Abschätzung über die Eintragsgefährdung von Flächenbereichen für ganze Flusseinzugsgebiete erforderlich. Für mittleren Maßstabsbereiches soll das Modell also eine flächendifferenzierte Aussage zur Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages in Fließgewässer ermöglichen.

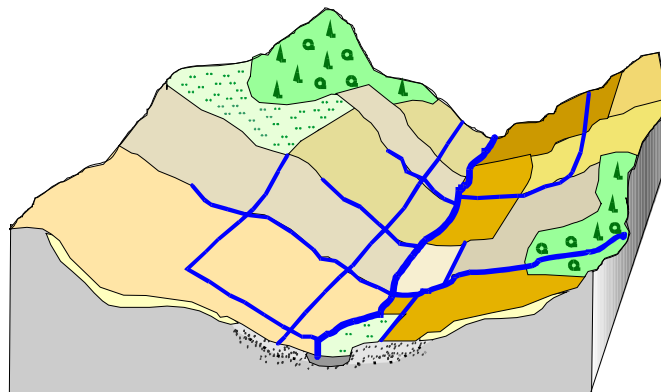
Ein solches Modell muss dabei die Forderung nach Praktikabilität erfüllen. Es muss sich auf wenige zentrale Prozessgrößen stützen, die sich aus flächenhaft verfügbaren Basisdaten ableiten lassen. Dazu eignet sich ein empirischer Modellansatz. Um einen ausreichenden Exaktheitsgrad zu erreichen, sollte das Modellkonzept abflussbeeinflussende Raumstrukturen sowie den reduzierten Stofftransport im zeitweise wasserführenden Grabensystem als Modellbausteine integrieren.

**Hauptziel** der Arbeit ist es, ein solches Modell zu konzipieren, in einem Geographischen Informationssystem technisch umzusetzen und die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zu überprüfen (Abb. 2).

Im Rahmen dieses Zieles sind folgende **Fragen** zu klären:

- Welche Flächen leisten überhaupt einen Beitrag zum Stoffeintrag in Gewässer, sind also angebunden ?
- Wie bedeutend sind die angebundenen Areale für den Stoffeintrag? Lassen sie sich entsprechend ihres Eintragspotentials differenzieren und mit einem Anbindungsgrad kennzeichnen?
- Welche Kompartimente des Landschaftsökosystems beeinflussen den Gewässeranbindungsgrad wesentlich und wie lassen sich die Haupteinflussfaktoren der Anbindung in einem Modellalgorithmus abbilden?

Ausgangsgröße: Flusseinzugsgebiet als komplexes Wirkungsgefüge im Landschaftsraum

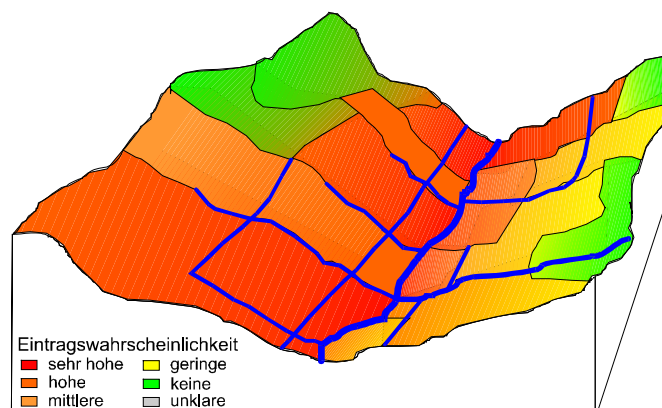


Transformation:



Zielgröße:

Anbindungsgrad von Teilflächen an die Fließgewässer



#### Kernfragen:

- Welche Teilflächen liefern Stoffe an Fließgewässer ?
- Wie wahrscheinlich ist die Stofflieferung von diesen Teilflächen ?
- Welche Teilflächen können keine Stoffe an Fließgewässer liefern ?

#### Teilfragen:

- Welche Faktoren sind dafür bestimmend ?
- Wie lassen sich diese Faktoren im großen Maßstab erfassen ?
- Wie lassen sich die Faktoren in ein Modell für den mittleren Maßstab umsetzen ?

**Abb. 2: Kernfragen und Hauptziel der Arbeit**

Die Problemstellung erfordert einen breit abgestützten **Arbeitsansatz**. Besonders wichtig sind dabei folgende Schritte:

- Es sind Arbeitskonzepte für die Felddatenerhebung, die umfassende Datenanalyse und Implementierung des fertigen Modellalgorithmus in ein GIS zu entwickeln.
- Über die Erfassung von Übertritten und Stofflieferflächen unter realen Raumbedingungen müssen die Einflussfaktoren der Gewässeranbindung im großen Maßstabsbereich identifiziert und analysiert werden.
- Die wichtigen Einflussfaktoren sind als einzelne „Anbindungsparameter“ für die mittlere Maßstabsebene zu regionalisieren.
- Es ist ein Modellalgorithmus zu entwickeln, der die regionalisierten Parameter miteinander koppelt und so ihre gemeinsame Wirkung auf den Anbindungsgrad abbildet.

Aus Eingangsfragestellung und Zielsetzung ergibt sich folgender **Aufbau der Arbeit**:

- Zunächst wird die methodische Vorgehensweise bei der Datenerhebung und –analyse beschrieben. Als methodische Instrumente der Datenerfassung kommen Kartierung und Landwirtebefragung zum Einsatz. Zur Datenauswertung werden im Besonderen Datenbank- sowie GIS-Applikationen angewendet (Kap. 2).
- Für das Gesamtverständnis ist die Beschreibung der landschaftsökologischen Rahmenbedingungen des gesamten Flusseinzugsgebietes von Nette und Lamme (Innerste-Bergland) und der zum Zweck der Datenerhebung ausgewählten Testgebiete (Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden) notwendig. Besondere Berücksichtigung erfahren dabei die anthropogenen Veränderungen der Landschaft (Kap. 3).
- Die Ergebnisse der Geländedatenerhebung aus Kartierungen und Befragungen bilden die Basis für die Modellkonzeption. Der Schwerpunkt liegt auf der qualitativen Deskription der Einflussfaktoren der Gewässeranbindung. Es erfolgt aber auch die Ableitung quantitativer Angaben zu Bodenerosions- und Übertrittsphänomenen in realen Liefergebieten. Als ein Aspekt wird der Einfluss von Raumstrukturen und von der Gewässerdichte auf die Anbindung untersucht (Kap. 4).
- Aus den Resultaten der Geländebeobachtung wird auf GIS-seitig operationalisierbare Parameter der Gewässeranbindung geschlossen (Regionalisierung). Die Wirkung der einzelnen Modellparameter auf die Entstehung von angebundenen Arealen ist Schwerpunkt der Analyse. Es erfolgt eine Reihung entsprechend der Bedeutung der Parameter für die Flächenanbindung (Kap. 5).

- Darauf aufbauend ergibt sich das Konzept eines empirisch-statistischen Modells zur Ableitung des Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer. Der Anbindungsgrad berechnet sich aus Reliefanalyse, Bodenerosionsgefährdung, Oberflächentransport, Stofftransportkapazität und Grabenretentionspotential (Kap. 6).
- Für ein Teileinzugsgebiet der Innerste (Nette und Lamme) erfolgt die Anwendung des Modellsystems im mittleren Maßstab. Das räumliche Verteilungsmuster wichtiger Einzelparameter sowie des Gewässeranbindungsgrades wird kartographisch präsentiert und interpretiert (Kap 7).
- Der Anbindungsgrad wird unter szenarisch veränderten Rahmenbedingungen im Untersuchungsraum betrachtet und mit den Resultaten der ursprünglichen Simulation verglichen. Daraus lässt sich erkennen, wie sensitiv das Modell auf Veränderungen wirkt (Kap. 8).
- Abschließend folgt ein methodisches Fazit zu Möglichkeiten und Grenzen der GIS-gestützten Bestimmung der Gewässeranbindung und die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse (Kap. 9 und 10).

## 2. METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER EINFLUSSPARAMETER DER GEWÄSSERANBINDUNG

### 2.1. Vorgehensweise

Die methodische Vorgehensweise ist in Abb. 3 dargestellt. Um das Ziel „Ermittlung der Anbindung von Ackerflächen an Gewässer“ zu erreichen, wird zunächst eine Problemanalyse durchgeführt. Aus den erarbeiteten Kern- und Teilfragestellungen ergibt sich die Notwendigkeit der Datenbereitstellung und –analyse auf zwei verschiedenen Maßstabsebenen (Dimensionsstufen) (S. A. BECKER 1992).

- Topische Dimension: Im großen Maßstabsbereich bzw. **microscale** (ca. 1 : 5 000-1 : 10 000, ) werden im Feld die Grunddaten der landschaftsökologischen Untersuchung in vier Testgebieten erhoben (s. H. LESER 1997). Aus ihnen können GIS-taugliche Modellparameter der Flächenanbindung abgeleitet werden. Die Parametrisierung geschieht durch die Überführung der analogen Daten in ein GIS. Dort sowie in einem Datenbankmanagementsystem erfolgt die Weiterverarbeitung und die statistische Analyse.
- Chorische Dimension: Für die mittlere Maßstabsebene bzw. den **mesoscale** (1 : 25 000-1 : 50 000) erfolgt die Konzipierung, Kalibrierung und Anwendung des Modells. Dazu ist die Integration von flächenhaft verfügbaren Basisdaten sowie von Daten zum Gewässernetz in das GIS notwendig. Mit den Grunddaten erfolgt die Berechnung der regionalisierten Parameter der Gewässeranbindung gebietsweit.

Über mehrere Zwischenschritte werden die Grunddaten in ein **GIS** integriert, dort zusammengeführt und weiterverarbeitet. Die Daten verschiedener Informationsquellen sind damit über die Raumkoordinaten verknüpft und lassen sich miteinander in Beziehung setzen. Durch statistische Analyseverfahren sind für beliebige Raumlagen Aussagen über die Einflussgrößen der Gewässeranbindung und deren wechselseitige Abhängigkeiten ableitbar.

Aus den Detaildaten der Testgebiete lassen sich in Kombination mit weiteren GIS-Berechnungen Grundgrößen der Gewässeranbindung deduzieren und als Kriterien für die Ableitung des Anbindungsgrades im gesamten Gebiet verwenden (**Regionalisierung**). Methodisch handelt es sich um ein induktives Upscaling-Verfahren. Denn es wird von präzisen Informationen auf der mikroskaligen Ebene im Maßstab 1 : 5 000 bzw. 1 : 10 000 mithilfe eines Übertragungsalgorithmus im mesoscale auf nicht untersuchte Raumbereiche mit äquivalenten anbindungsrelevanten Rahmenbedingungen geschlossen.

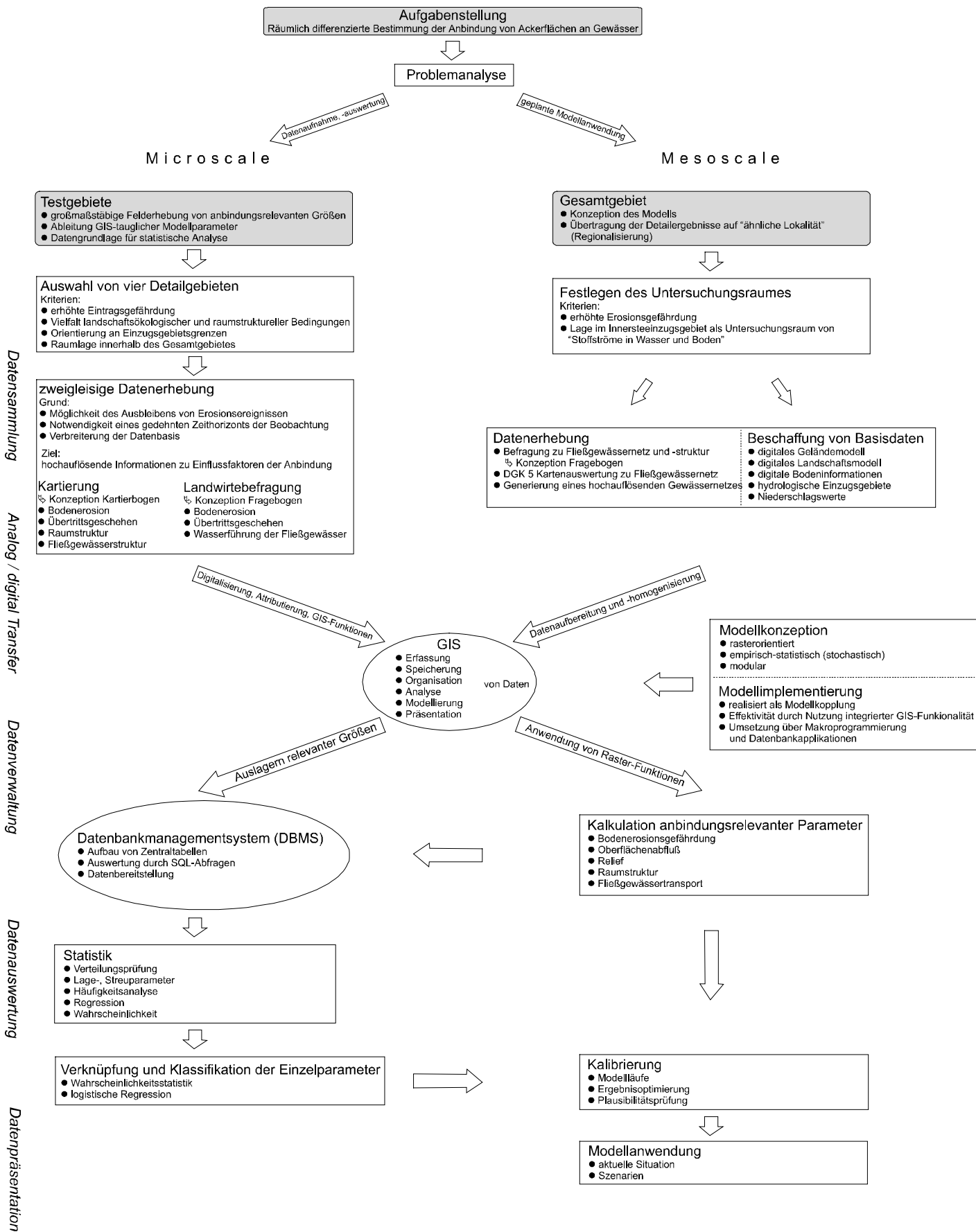


Abb. 3: Methodische Vorgehensweise von der Datenerhebung und –verarbeitung über die Datenanalyse bis zur Modellanwendung



## 2.2. Konzeption der Datenerhebung

### 2.2.1. Grundsätzliches

Das methodische **Grundproblem** bei der Ableitung von Daten zur Gewässeranbindung liegt darin, dass der Anbindungsgrad einer Fläche an ein Gewässer nicht *direkt* messbar ist. Weil der Anbindungsgrad eine Funktion von geoökologischen und raumstrukturellen Rahmenbedingungen ist, lässt er sich nur über den Bezug zur Raumposition eines Standortes definieren. Da ein parzellenscharfer Raumbezug hergestellt werden muss, ist es nicht möglich, auf Summenparameter bzw. Bilanzierungen ganzer Einzugsgebiete zurückzugreifen, wie sie bei hydrologischen Fragestellungen zu Stoffeinträgen in Gewässer angewandt werden (z. B. C. RUHE 1997, J. KUNZE 1999). Der Anbindungsgrad bzw. die Funktion von Ackerflächen als Stofflieferant zeigt sich innerhalb von Einzugsgebieten stark variabel, eine Mittelwertbildung oder Extremwertbetrachtung erscheint wenig sinnvoll.

Die Gewässeranbindung ist eine komplexe Eigenschaft des Landschaftsraumes, die nicht durch Feldmessungen bestimmbar ist. Zur Ableitung des Anbindungsgrades müssen **Mittlergrößen** (Indikatoren) eingesetzt werden. Solche Größen ermöglichen es, unter realen Feldbedingungen die Stofftransportwege und Übertrittsbereiche am Fließgewässerrand nachzuvollziehen bzw. abzubilden. Die Erhebung der Informationen soll die Voraussetzung schaffen, um Ursachen und Bedingungen des Übertrittsgeschehens unter realen geoökologischen und raumstrukturellen Rahmenbedingungen analysieren zu können. Aus diesen Indikatoren des großen Maßstabsbereichs werden im Zuge der Datenaufbereitung und -auswertung wichtige Parameter der Gewässeranbindung für den mittleren Maßstab identifiziert und auf dieser Ebene in ein Modell für den Gesamttraum eingebracht.

Die erhobenen **Daten** müssen folgende **Kriterien** erfüllen:

- Möglichkeit der empirischen raumdifferenzierten Erhebung auf unterer Maßstabsebene
- Beobachtbarkeit und Erfassbarkeit in relativ kurzem Zeitraum (2 Jahre) in angemessenem Umfang (d. h. mind. 50 Fälle in einer Stichprobe)
- Übertragbarkeit in ein GIS bzw. eine Datenbank
- Berücksichtigung einer ausreichenden Vielfalt der geoökologischen und der raumstrukturellen Bedingungen
- Validierbarkeit durch die Verwendung mehrerer Informationsquellen (Kartierung/Befragung)
- Eignung für die räumliche Abgrenzung von realen Lieferflächen
- Erfassbarkeit auf Basis erprobter, standardisierter Verfahren.

Folgende Größen erfüllen die genannten Kriterien und eignen sich deshalb als **Indikatoren der Gewässeranbindung**:

- sichtbare Spuren des Bodenerosions- und Übertrittsgeschehens
- abflussbeeinflussende Raumstrukturelemente
- Parameter der Graben- und Gewässerstruktur.

Kartierung und Befragung sind sinnvolle **Instrumente der Datenerhebung** in ausgewählten Testgebieten zur Bearbeitung einer raumstrukturellen Problematik. Die Methode der Kartierung stellt ein probates Mittel bei der flächenhaften Erfassung räumlicher Phänomene dar. Befragungen bieten die Möglichkeit, die zeitliche Dimension von Prozessgrößen in die Untersuchung mit einzubeziehen. So lassen sich Informationen zu Wiederkehrintervallen, Häufigkeiten und Langfristverhalten von anbindungsrelevanten Parametern erfragen (z. B. Häufigkeit von Erosionsschäden und Stoffeinträgen).

Für die **Auswahl der Testgebiete** waren folgende Eigenschaften maßgebend:

- erhöhte potentielle Erosions- und Eintragsgefährdung,
- hoher Anteil von gewässerangrenzenden Ackerflächen,
- Repräsentativität im Hinblick auf das Spektrum der landschaftsökologischen und raumstrukturellen Ausstattung,
- Orientierung an Einzugsgebietsgrenzen von Fließgewässern,
- gleichmäßige Verteilung über das Gesamtgebiet.

Die vier Teileinzugsgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden (Kap. 3.1.1) geben einen Querschnitt über das Spektrum der landschaftsökologischen und raumstrukturellen Ausstattung des Gesamtgebietes. Mit einer Flächenausdehnung der Testgebiete von insgesamt 38 km<sup>2</sup> wurden ca. 16 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Gesamtgebietes intensiv untersucht.

### 2.2.2. Datenebenen

Die **Datenerhebung** bzw. **-aufbereitung** gliedert sich in zwei Bereiche:

- hochauflösende Datenerfassung auf großer Maßstabsebene in ausgewählten Testgebieten und
- Datenzusammenführung und -aufbereitung von amtlichen Basisdaten der Landesämter für das gesamte Untersuchungsgebiet.

Die Auswertungsgrundlage besteht aus Dateneinheiten zu den nachstehenden Rauminformationen:

Im **Gesamtgebiet**

- Flächennutzung (ATKIS DLM 25/1)
- Relief (ATKIS DGM 50)
- Boden (BÜK 50)
- Niederschlagswerte (DWD)

- mesoskalige Raumstrukturelemente (Wege- und Straßennetz) (ATKIS DLM 25)
- Graben- und Fließgewässersystem (Kartierung, Befragung, DLM 25 und GIS-basierte Ableitung)
- hydrologische Einzugsgebiete (hydrologischer ATLAS)

und zusätzlich in den **Testgebieten**

- Spuren des Übertrittsgeschehens
- Spuren der Bodenerosion
- mikroskalige Raumstrukturelemente
- Gewässerstruktur
- Ackerbewirtschaftung
- reale Liefergebiete (Hangeinzugsgebiet der Stoffübertritte)

### 2.2.3. Erosionsschadens- und Raumstrukturkartierung

Die **Kartierung** hat die Aufgabe, die Datengrundlage für die Ursachenanalyse von Stofftransportprozessen und Übertrittsgeschehen zu bilden. Dies geschieht durch die ortsbezogene Aufnahme von Indikatoren der Flächenanbindung. Es wurden einerseits flächendeckende Kartierungen durchgeführt und andererseits ausgewählte Übertrittsbereiche detailliert in einen Kartierbogen aufgenommen. Die Felderhebungen basieren auf gängigen Kartieranleitungen zur Erfassung der Bodenerosion (DVWK 1995, ROHR U. A. 1990). Im Hinblick auf die Fragestellung waren Veränderungen und Erweiterungen der Kartierkonzepte notwendig. Folgende **Größen** wurden erfasst:

- Erosionsspuren,
- Übertritte erodierter Feinerde in Gewässer und Gräben,
- Übertrittseinzugsgebiete mit den dazugehörigen Fließwegen,
- komplexe Oberflächenstruktur, als Voraussetzung für Übertritte oder deren Begünstigung.

Dazu zählen:

- lineare Raumstrukturelemente (Gewässerrandstreifen, Uferbankett, Ackerrandfurche, Straßen- und Wegesystem),
- Bodenbedeckungsgrad,
- Bearbeitungsrichtung.

Da eine Vielzahl von Geo- und Anthropofaktoren in ihrer Wechselwirkung das Übertrittsgeschehen beeinflussen, kam es für die spätere statistische Auswertung darauf an, über die Ausweisung einer großen Anzahl von Liefergebieten ein breites Faktoren- und Wechselwirkungsspektrum abzudecken.

Allgemeine Daten		Besondere Anbindung von Ackerflächen an Gewässer und Gräben	
Aufnahme-Nr.	Datum	Ackerrandfurche	Gewässeranbindung
TK Nr.:	Koordinat	Tiefe	sicher
Gew. abschn.-Nr.	Gew.name	Breite	sicher nicht
Gemeinde-/Flurbez.		Funktion	potentiell
		keine	unklar
Bearbeiter	Foto-Nr.	Abflußleitbahn	<b>Gewässeranbindungsgrad</b>
<b>Niederschlag-/Abflußbedingungen d. Übertrittsereignisses</b>		unzureichendes Abflußhindernis	<b>Direkte Anbindung</b>
Starkregen nach Trockenperiode		wirksames Abflußhindernis	ohne Hindernis des Wasserflusses mit:
Dauerregen nach normal feuchter Periode		Struktur notwendig für Übertritt	kanalisierenden Strukturen
Schneeschmelze		<b>Barriere/Uferwall</b>	naturlichen Leitlinien
Regen während Schneeschmelze		Höhe	bearbeitungsbedingte Leitlinien
sonstiges		Breite	Fremdwasserzufluß
<b>Art des Übertritts</b>		Bewuchs	Ackerrandfurche
<b>Flächenhafter Übertritt</b>		kein	Leitbarriere
sicher vorhanden		Gras/Stauden	ohne zusammenfließendes Wasser
potentiell vorhanden		Dichte <input type="checkbox"/> < 25% <input type="checkbox"/> 25-50% <input type="checkbox"/> 50-75% <input type="checkbox"/> < 75%	sonstige Strukturen
ausgeschlossen		<b>Funktion</b>	<b>Indirekte Anbindung</b>
<b>Punktweiser Übertritt</b>		keine	mit Hindernis des Wasserflusses durch:
sicher vorhanden		Abflußleitbahn	Bearbeitungsrichtung
potentiell vorhanden		unzureichendes Abflußhindernis	Vorgewende
<b>Übertrittsspuren im Gewässerrandbereich</b>		wirksames Abflußhindernis	Ackerrandfurche
Feinermaterial		Struktur notwendig für Übertritt	Barriere
Barriere durchbrochen		<b>Vorgewende</b>	Hangverflachung im Übertritts-EZG
Barriere überflossen		Breite	Breite
Niveaunterschied Acker zu Uferböschung		Funktion	Abstand d. Hangverflachung vom Gew.
		unklar	Gewässerrandstreifen
<b>Übertrittseinzugsgebiet</b>		keine	Straße/Weg
Größe	m <sup>2</sup>	Abflußleitbahn	<b>keine Anbindung</b>
max. Hanglänge	m	unzureichendes Abflußhindernis	mit wirksamen Hindernis des Wasser-
mittlere Neigung	%	wirksames Abflußhindernis	flusses durch:
dominante Hangform		Struktur notwendig für Übertritt	Gewässerrandstreifen
gestreckt		<b>Hauptgrund des Übertritts</b>	Straße/Weg
konkav		erodierte Bodenmenge	Ackerandfurche
komplex		Größe des Übertrittseinzugsgebiets	Bankett/Uferwall
dominante Bodenbedeckungsgrad		kanalisierende Strukturen	Hangverflachung
dominante Bearbeitungsrichtung		zusammenfließende Wassermenge	sonstiges:
dominante Kulturart		Hangform	
<b>Erosion im Übertrittseinzugsgebiet</b>		künstliche Entwässerungsfurche	
<b>Erosionsform</b>		sonstiges	
Flächenspülung		<b>Skizze (Expositon, Maße)</b>	
flächent.-paralleler Abtrag Rillen			
flächent.-paralleler Abtrag Rinnen			
flächent.-fächerart. Abtrag Rillen/Rinnen			
Rillen			
Rinnen			
Graben			
betroffene Fläche	m <sup>2</sup>		
<b>Akkumulation im Übertrittseinzugsgebiet</b>			
konzentriert im Gewässerrandbereich			
mittlere Mächtigkeit	0-3 cm		
	3-10 cm		
	>10 cm		
	unklar		
betroffene Fläche	m <sup>2</sup>		

Abb. 4: Kartierbogen zur Erfassung von Übertritts-, Erosionsgeschehen und Raumstrukturelementen

© J. Vooes 1998, verändert u. ergänzt nach: Rohr, W. et al. 1990, Flächenhafter Bodenerosion des DWK 1995, Bach, M. et al. 1994

Flächenhafte **Kartierungen** der **Erosionsspuren**, des **Übertrittsgeschehens** und der **abflussbeeinflussenden Raumstrukturelemente** erfolgten in allen Testgebieten, um daraus die realen oberflächlichen Transportwege sowie die Einzugsgebiete der Übertrittsbereiche (realen Lieferflächen) abzuleiten. Die Erfassung wurde über den Eintrag von Signaturen in Feldkarten vorgenommen, um für die Auswertung den direkten Geländebezug der Informationen zu gewährleisten. Als Kartengrundlage diente die DGK 5. Die Datenerhebung umfasst insgesamt eine Fläche von 53 km<sup>2</sup>, davon 38 km<sup>2</sup> (65 %) Ackernutzung und 4 km<sup>2</sup> (7 %) Grünland.

Basis für die Erfassung profunder Felddaten ist der neu konzipierte und während der Kartierungen weiterentwickelte **Kartierbogen** „Anbindung von Ackerflächen an Gewässer und Gräben“. Er dient der feldbezogenen Ableitung des Anbindungsgrades einzelner Parzellen sowie der Aufnahme detaillierter Daten zu Raum- und Prozessbedingungen ausgewählter Stoffübertritte und deren Kleinst Einzugsgebieten (Abb. 4).

Der **Schwerpunkt des Kartierformulars** liegt in der Erfassung struktureller Geländemerkmale und oberflächlicher Transportpfade. Diese müssen im Hinblick auf ihre Funktions- und Wirkungsweise erfasst werden, um die Ursachen von Übertrittsphänomenen ermitteln zu können. Der Blickwinkel der Kartierung geht dabei vom Übertrittspunkt, d. h. dem Eintragungsgewässer, hin zum real angebotenen oberhalb gelegenen Hangeinzugsgebiet des Übertrittsbereiches.

Bodenbewirtschaftung	Erosionsgeschehen	Raumstrukturelement	Übertrittsgeschehen	Relief	Gewässersystem
Eintrag in Feldkarten					
Kulturart	Erosionsform	Straßen und Wege	Übertrittstyp		Lage
Bodenbedeckungsgrad	linear	Ackerrandfurche	punkthaft		Typ
Hauptbearbeitungsrichtung	flächenhaft	Breite	flächenhaft		Graben
Entwässerungsfurche	lin.-fläch.	Tiefe	Übertrittseinzugsgebietsgrenze		Fließgewässer
	Rille, Rinne, Graben	Uferbankett			Wasserführung
	Akkumulationsform	Höhe			temporär
	Mächtigkeit	Gewässerrandstreifen			permanent
	Fließweg	Breite			
	Lage				
Eintrag in Kartierbogen an ausgewählten Übertritten					
Bearbeitungszustand		Wegeigenschaften	Übertrittsbreite	Hangneigung	
		Vorgewende	Übertrittsmerkmale	Hanglänge	
		Fahrspur	Übertrittsursache	Hangform	
		Funktion der Strukturen	Anbindung	Hangverflachung	
				Tiefenlinie	

**Tab. 1: Übersicht über die erhobenen Felddaten: Flächendeckende Daten durch Eintrag in Karten sowie Detaildaten durch Aufnahme ausgewählter Übertritte in Kartierbogen.**  
(Weitere Einzelheiten der erfassten Größen siehe Kartierbogen Abb. 4 und Anhang)

Tab. 1 zeigt die **erhobenen Felddaten** im Überblick. Über die Integration der Daten ins GIS (Digitalisierung) können aus den qualitativen Kartierungsinformationen quantitative Daten zu Raumkoordi-

naten, Länge, Umfang, Flächengröße und Flächenanteil direkt abgeleitet werden. Die Nutzung von GIS-Funktionalitäten ermöglicht durch Datenverknüpfungen weitergehende Angaben zu Nachbarschaftsverhältnissen (Topologien), Überschneidungszonen der Geometrien oder Überlagerungen der Flächen- und Linienattribute.

## 2.2.4. Befragung von Landwirten zu Übertrittsgeschehen sowie Fließgewässer- und Grabenstrukturen

### Übertrittsgeschehen

Die **Befragung ortsansässiger Landwirte** stellt eine Möglichkeit dar, die Datengrundlage aus den Kartierungen zu verbreitern. Das geschieht durch die Identifikation weiterer Übertrittsbereiche und durch Zusatzinformationen zu Ursachen und Voraussetzungen des Übertrittsgeschehens. Die Informationen aus den Befragungen ergaben eine Gesamteinschätzung über einen längeren Zeitraum (5-10 Jahre).

Die Stofflieferung von Ackerflächen hängt u.a. von zeitvariablen Einflussfaktoren ab, wie z. B. der Bodenbedeckung, dem Bearbeitungszustand und der Bodenfeuchte. Um langfristige Aussagen über die Anbindung treffen zu können, sind langjährige Beobachtungen im Gelände und intensive Kenntnis der Geländesituation Voraussetzung. Eine Befragung geländekundiger Landwirte kann den Mangel eines kurzen Untersuchungszeitraumes z. T. auffangen, da die Befragten Übersicht über einen längeren Zeitraum besitzen. Die Landwirte kennen die Bereiche ihrer bewirtschafteten Parzellen, die häufig von Bodenerosion betroffen sind bzw. an denen Feinerde in die Gewässer gelangt, genau. Somit stellt –gute Mitarbeit vorausgesetzt– die Befragung eine sichere verwertbare Informationsquelle dar.

Zudem war nicht mit Gewissheit vorherzusagen, ob ein kartierenswertes Erosionsereignis innerhalb des Untersuchungszeitraumes auftreten würde. Durch die Befragung ließ sich im Vorfeld das Risiko begrenzen, mit unzureichender Datenfülle arbeiten zu müssen.

Der neu entwickelte Fragebogen wurde in den Testgebieten Adenstedt und Nette in Einzelbefragungen sowie in Hackenstedt und Rhüden in zwei Gruppenbefragungen bei insgesamt ca. 90 Landwirten eingesetzt (Anhang). Die Umfrage bezieht sich auf folgende **Fragenkomplexe**:

- Lage und Ursache von Bodenerosion
- Lage von Akkumulationen
- Häufigkeit von Erosionsspuren
- Lage und Ursache von Überritten
- Lage von linearen Raumstrukturelementen (Gewässerrandstreifen, Uferbankett).

Bei allen Befragungen wurden die wichtigen raumbezogenen Informationen vor Ort in auf 1 : 10 000 verkleinerte DGK 5 eingetragen.

### **Gewässer- und Grabenstrukturen**

Eine zweite **Befragung** hatte die Ermittlung der **Lage** und der **Struktur von Fließgewässern und landwirtschaftlichen Gräben** im gesamten Untersuchungsgebiet zum Thema (s. S. DALLMAIER 1997). Zielgruppe waren die jeweiligen Realverbandsvorsitzenden, als Verantwortliche für die Grabeninstandhaltung und -pflege. Es ging erstens darum, die topographische Lage der Gewässer und Gräben möglichst lückenlos im Untersuchungsgebiet zu erfassen. Zweitens sollten Gewässerstrukturparameter erhoben und über eine Kartierung validiert werden (Kartierbogen im Anhang). Von den erfassten Gewässerstrukturgrößen sollte auf die Transportkapazität der Gewässer und Gräben, d. h. auf die Möglichkeit des Weitertransportes eingetragenen Bodens bis zu den Fließgewässern geschlossen werden. Für jeden von ca. 3200 Gewässerabschnitten wurden Daten zu folgenden **Parametern** ermittelt:

- Lage von Fließgewässern und landwirtschaftlichen Gräben
- Wasserführung (keine, im Frühjahr, nach Starkregen, permanent)
- Beschaffenheit des Gewässerbettes (Form, Bewuchs, Befestigung)
- minimale, mittlere und maximale Wasserstände
- Art und Häufigkeit von Pflegemaßnahmen (Schlegeln, Aushub).

Befragungen konnten in etwa zwei Dritteln des gesamten Gebiets durchgeführt werden. Im restlichen Gebiet ließen sich die Gewässer aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM 25/1) und der Höhenlage mithilfe eines GIS generieren. Zu den bestehenden Fließgewässern aus dem amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystem (ATKIS) wurde das Gewässernetz an den Hauptverkehrswegen mit Gräben verdichtet, sofern sich aus der hydrologischen Analyse des digitalen Geländemodells (DGM) die Notwendigkeit einer Entwässerungsfunktion ergab.

## **2.3. Datenauswertung**

### **2.3.1. Datenintegration ins GIS**

Um Zusammenhänge und Wechselwirkungen von Prozessfaktoren untersuchen zu können, müssen für die umfassende Auswertung die erhobenen Daten miteinander verknüpft werden. Da es sich bei der Klärung der Gewässeranbindung um ein raumstrukturelles Problem handelt, sind funktionale Prozesszusammenhänge nur über die Lage im Raum erkennbar. Daher ist eine Zusammenführung und Verknüpfung der Daten nur über die Schaffung des Raumbezugs, d. h. über die Raumkoordinaten, zu erreichen. Innerhalb der gesamten komplexen Raumuntersuchung müssen große Mengen raumbezogener Daten verwaltet (d. h. Datenspeicherung, -strukturierung und -modellierung), analysiert und präsentiert werden. Diese Funktionalitäten kennzeichnen ein **Geographisches Informationssystem** (GIS) gemäß seiner Definition als Vierkomponenten-Modell (R. BILL & D.

FRITSCH 1991). Die Nutzung von Geographischen Informationssystemen stellt für die Untersuchung die Möglichkeit dar, die raumbezogenen Daten rationell zu verarbeiten, Arbeitsabläufe zu standardisieren, d. h. Ergebnisse zu objektivieren und umfangreiche Berechnungsalgorithmen automatisiert, wiederholbar ablaufen zu lassen. Hilfreich für die Projektierung der Vorgehensweise ist folgende Literatur, die einen Einblick in die Theorie von Geographischen Informationssystemen, das Management von GIS-Projekten geben und Anwendungsbeispiele aufzeigen (F.-J. BEHR 1998, R. BILL 1996, W. E. HUXHOLD & A. G. LEVINSOHN 1995, G. BUZIEK 1995, K. FEDRA 1994, R. BILL & D. FRITSCH 1991).

Für die komplexe Auswertung ist zunächst eine Homogenisierung der erfassten Inputdaten notwendig. Die **amtlichen Basisdaten** für das Gesamtgebiet wurden in ein für das GIS lesbares Format konvertiert, importiert, die Kartenblattschnitte zusammengefügt, ein Randabgleich wurde vorgenommen und das Untersuchungsgebiet ausgeschnitten.

Die **analogen Informationen über die Testgebiete** wurden nach Umzeichnen auf Fotopausen digitalisiert, kontrolliert, korrigiert und attribuiert und als Vektordaten gespeichert. Für die zwei Erosionsereignisse sowie die Landwirtebefragung entstanden für alle Testgebiete jeweils fünf getrennte

**Informationsebenen** (Coverages) mit Daten zu:

- Topographie (Flächennutzung, Kulturart, Bodenbedeckung)
- Fließgewässernetz
- Bodenerosionsspuren
- Raumstrukturen
- Übertritten.

Nach der digitalen Aufbereitung und dem Aufbau der separaten Informationsschichten wurde eine umfangreiche Palette von GIS-Funktionalitäten zur Weiterverarbeitung und Analyse genutzt (u.a. Konvertierung, Verschneidung, Selektion, Aggregation, Gruppierung, Grenzauflösung, Kalkulation).

Aus den Geländeinformationen zu Erosion und Übertrittsgeschehen wurden unter Zuhilfenahme von Reliefdaten und unter Berücksichtigung der kartierten abflussbeeinflussenden Raumstrukturen interaktiv im GIS die Einzugsgebiete jedes einzelnen Übertritts abgegrenzt und dem Übertrittspunkt zugeordnet. Die entstehenden Hangeinzugsgebiete der Übertritte werden als **reale Liefergebiete** bzw. **angebundene Flächen** bezeichnet. Sie dienen als Bezugsbasis für eine Vielzahl von statistischen Analyseverfahren. Damit existiert eine räumliche Datengrundlage, mit der sich die Herkunft von Feststoffen und deren genaue Eintragsstelle ins Gewässersystem angeben lässt. Für die verschiedenen Informationsquellen werden im GIS getrennte Informationsebenen vektorbasiert gene-



riert, so dass für die vier Testgebiete jeweils drei Covarages mit den realen Liefergebieten von Schneeschmelz- und Starkniederschlagsereignis sowie von der Landwirtebefragung entstehen.

Alle Vektordaten wurden für die Modellierung in ein kongruentes Raster mit 15 m Zellenweite überführt. Im GIS kann auf die verschiedenen Informationsschichten - vergleichbar wie in einer Datenbank mit Raumbezug - auf jede einzelne Zelle zugegriffen werden. So lassen sich verknüpfende Analysen erstellen oder mit mehreren Informationsebenen zellenbezogene Berechnungen durchführen.

### 2.3.2. Berechnungen mit GIS

Wegen der simplen klaren Datenstruktur sind rasterbasierte Geographische Informationssysteme gut für die Prozessmodellierung geeignet. Kontinuierliche Oberflächen können adäquat abgebildet werden (F.-J. BEHR 1998). Hochentwickelte GIS bieten heute ein breites Spektrum an **integrierten zellenbezogenen Berechnungsmöglichkeiten** an, die die Konzeption eigener Modelle erleichtern. Dazu gehören (s. auch C. RUHE 1995):

- mathematische Operatoren (arithmetische, trigonometrische, exponentielle, logarithmische und relationale)
- logische und kombinatorische Operatoren
- Funktionen zur Selektion und Reklassifikation
- lokale, zonale, fokale und globale Funktionen, die sich dadurch unterscheiden, wieviele Zellen sie in die Berechnung mit einbeziehen
- spezielle hydrologische Funktionen
- statistische und geostatistische Funktionen.

Zudem sind einige Komponenten höherer Programmiersprachen enthalten, wie z. B. Schleifen und IF-Anweisungen.

Für die Konzeption des Modells zur Ableitung des Gewässeranbindungsgrades eignet sich die Datenstruktur des Rasteransatzes sehr gut. Die selbst entwickelten Berechnungsalgorithmen lassen sich durch die Nutzung integrierter Raster-Funktionen effektiv umsetzen. In Rastermodellen sind für die Diskretisierung die verschiedenen Datenebenen (Layer) in ein kongruentes Gittersystem zu überführen. Für jede Raumposition im Gitternetz liegt damit ein Ensemble aus Rasterzellen mit den jeweiligen Einzelparametern zugrunde. Das schafft eine höchstmögliche Transparenz in der Datenstruktur. Rechenoperationen mit den verschiedenen Datenlayern sind damit gut nachzuvollziehen und sogar auch manuell zu überprüfen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem TIN-Ansatz (triangulated irregular network), mit dem die Modellierung von 3D-Oberflächen (Relief) ebenfalls möglich ist.

Den Vorteilen stehen die **Nachteile** der unintelligenten Rasterspeicherung gegenüber:

- hohe Speicherintensität
- das Fehlen von topologischen Informationen (Nachbarschaftsbeziehungen)
- sowie der Verlust von Dateninformationen bei der Vektor-/Rasterkonvertierung (Datenpräzision).

Das Problem der Speicherintensität wird durch preiswerte leistungsfähige Datenträger relativiert. Modellierungsschwierigkeiten durch das Fehlen der Topologie sind durch Rasterfunktionalitäten im GIS zu reduzieren, die Nachbarschaftsbeziehungen untersuchen oder einbeziehen. Da für die Modellberechnungen die Wirkung linearer Raumstrukturelemente in die Relieffanalyse integriert werden sollte, erscheint der dritte Punkt am bedeutendsten.

Der Informationsverlust bei der Vektor-Raster-Konvertierung kann nicht grundsätzlich quantifiziert werden. Er hängt von der Dichte der aufzurasternden Vektoren im Raum und der Vielfalt ihrer Sachinformation (Attributierung) ab. Der Aufrasterungsvorgang vollzieht sich, indem über die Vektorinformation ein Rechengitter der gewünschten Rasterauflösung gelegt wird. Es folgt eine Abfrage, welche Rasterelemente mit Information belegt sind und welche keinen Inhalt aufweisen (R. BILL & D. FRITSCH 1991). Der Vektor wird umso genauer im Gitter abgebildet, je feiner die Auflösung eingestellt ist (struktureller Datenverlust).

Bei der Integration verschiedener vektorieller Informationsschichten in ein Grid kann ein weiteres Problem auftreten. Wenn Vektorelemente verschiedenen Typus (Attributierung) in geringerer Distanz als der gewählten Rasterweite voneinander entfernt liegen, können aufgrund von Zellenüberlagerung der aufgerasterten Vektoren die attributiven Informationen von einem Coverage im Rasterformat möglicherweise nicht vollständig abgebildet werden (inhaltlicher Datenverlust). Für die Modellierung der Gewässeranbindung ist dies dann von Relevanz, wenn verschiedenartige Raumstrukturelemente sich ganz oder teilweise räumlich überlagern.

Dem Problem lässt sich durch die Auswahl der Raumstrukturelemente hinsichtlich ihrer Einflussstärke (Bedeutung) sowie durch die höchstmögliche Reduzierung der Rasterweite begegnen. Der strukturelle und inhaltliche Informationsverlust bei der Vektor-Raster-Konvertierung bleibt damit auf ein akzeptables Maß begrenzt.

Da die Basisdaten des DGM standardmäßig im 50 m Raster vorliegen, ist zu prüfen, inwieweit sich eine Veränderung der Ausgangszellenweite auf die Qualität des Reliefmodells auswirkt. Die Variation der Rasterauflösung berechnet sich mit einem linearen Interpolationsverfahren. Um Brüche im Reliefmodell zu vermeiden, findet im Zielrastergitter eine Anpassung der Oberflächenformung an die natürliche Reliefwölbung statt. Aus dem Berechnungsverfahren resultiert der Interpolationsfehler. Wie Tab. 2 zeigt, kommt es bei Verringerung der Zellengröße zu einer Geländeversteilung, zu einer Zunahme der mittleren und maximalen Höhenabweichung und zum exponentiellen Anstieg

der Zellenanzahl. Insgesamt treten nur geringe Abweichungen von der Ausgangsauflösung auf, so dass ein Heruntergridded von 50 auf 15 m Zellenweite vertretbar scheint.

Rasterweite [m]	15	25	50	100
mittlere Geländehöhe [m]	201,1	201,3	201,0	200,8
mittlere Abweichung [m]	0,1	0,01	-	0,01
Standardabweichung [m]	1,31	0,5	-	3,01
maximale Abweichung [m]	30	10	-	53
mittlere Neigung [%]	4,9	4,8	4,7	4,7
Zellenanzahl	3 857 080	1 385 175	346 884	86 858

**Tab. 2: Vergleich verschiedener Rasterauflösungen des Höhenmodells; aufgeführt sind die Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Rasterweite von 50 m**

Dies ergibt sich auch aus Untersuchungen von P. HUBER (1996). Danach erhält man bei einer Zellengröße von 1/3 der Ausgangsauflösung eine ausreichend genaue Reliefdarstellung.

Zur Diskretisierung des Modells wurde folglich eine Rasterauflösung von 15 m gewählt. Sie vereint ein vertretbares Maß an Speicherplatzbedarf sowie an Ungenauigkeiten im DGM mit akzeptablen inhaltlichen und strukturellen Konvertierungsverlusten.

### 2.3.3. Datenbankkonzeption

Trotz Weiterentwicklungen gestaltet sich die Schnittstelle zwischen GIS und anderen rechnergestützten Auswertungstools, wie Datenbank-, Tabellenkalkulations-, Statistik- oder Präsentationsapplikationen, als stark verbesserungsbedürftig. Wegen der komplizierten Datenstrukturen im Informationssystem ist man weit von einer Verschmelzung aus Highend-GIS und hochentwickelten kommerziellen oder wissenschaftlichen Anwendungen entfernt. Für die effektive umfassende Auswertung von im GIS errechneten Daten ist der direkte Datenzugriff von Auswertungssoftware mit spezifischen Funktionalitäten und die Möglichkeit einer präsentationsfähigen Grafik- und Textausgabe erforderlich. Zwar lässt sich ein Datenexport in gängige Datenbankformate oder im Ascii-Format durchführen. Für effiziente Auswertungen erweist sich dies als zu umständlich, unflexibel und zeitintensiv. Die Daten für die Analyse müssen vielmehr als permanent verknüpfte Informationen an zentraler Stelle gespeichert sein.

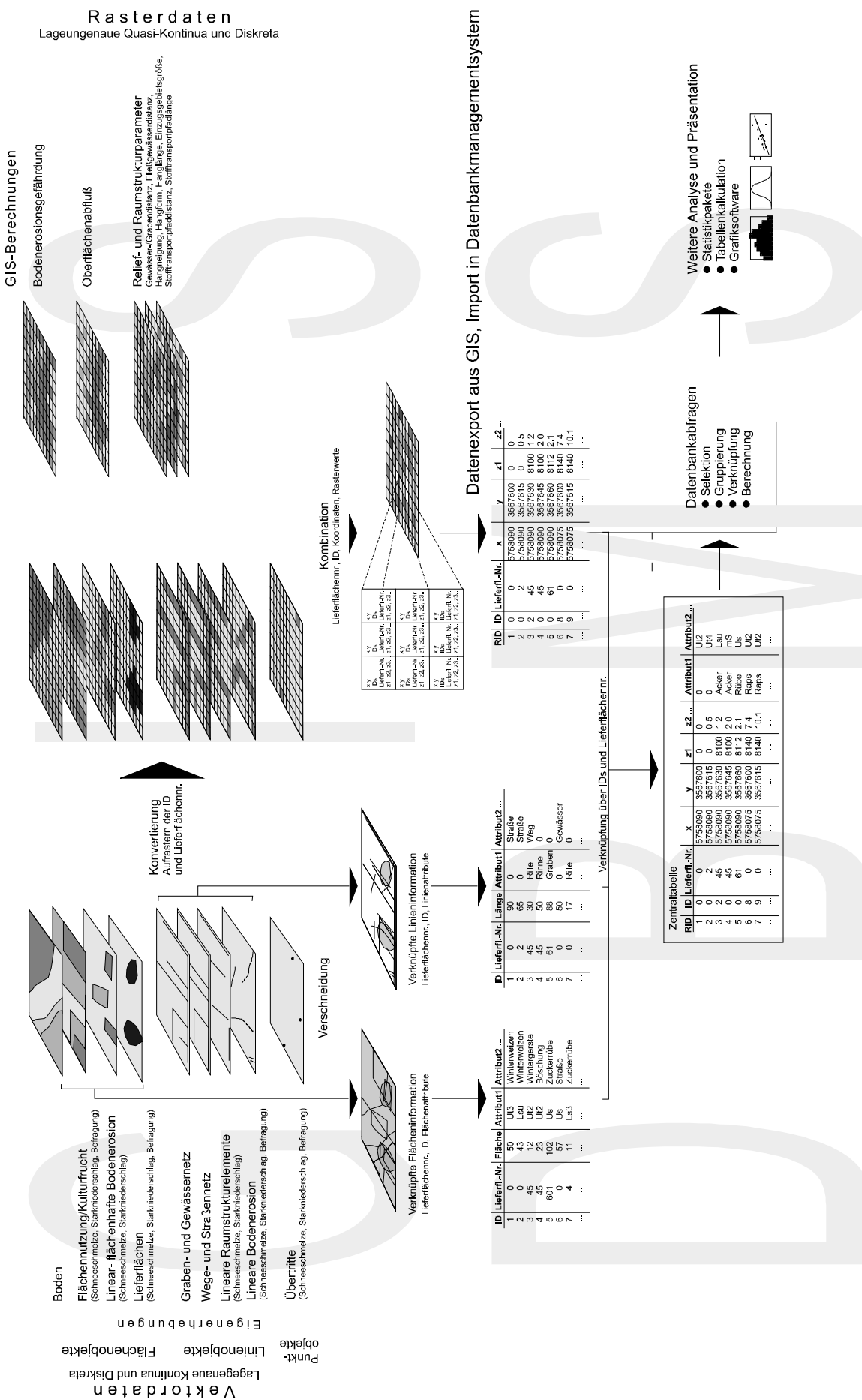
Es war deshalb erforderlich, ein **Datenbankkonzept** für die explorative Analyse der Daten aus den vier Testgebieten zu entwickeln. Das Ziel des Konzepts besteht darin, die verschiedenen Datentypen so miteinander zu verknüpfen, dass die umfassende Datenauswertung effektiv durchführbar wird.

Da es sich um die Untersuchung von räumlichen Phänomenen handelt, die im Wirkungsgefüge sich wechselseitig beeinflussender Raumelemente eingebettet sind, muss die Wahrung des Lagebezugs aller Daten als integrativer Bestandteil in der Datenbankstruktur verankert sein. Das Datenbankkonzept hat folgende **Funktionen**:

- Verknüpfung räumlicher Daten unterschiedlicher Herkunft und unterschiedlichen Inhalts (Kopplung von Vektor- und Rasterinformationen)
- Nutzung der Funktionalitäten hochentwickelter Datenbankmanagementsysteme
- Möglichkeiten des direkten Datenzugriffs von anderen Softwarepaketen zur Weiterverarbeitung.

Für den sinnvollen Aufbau einer Datenbank müssen **Grundsätze der Datenorganisation** beachtet werden (s. C.A. ZEHNDER 1987). Dazu gehört v. a. die Normalisierung der Daten. Unter Normalisierung ist einerseits die Begrenzung von Redundanzen (Doppeldeutigkeiten) und der Ausschluss von Anomalien bei Lösch- und Updatevorgängen zu verstehen. Andererseits enthält der Begriff Normalisierung die sogenannte Datenintegrität (Richtigkeit). Hinsichtlich der Datenintegrität ist beim Datenbankaufbau v. a. auf die Wahrung der Datenkonsistenz (= Widerspruchsfreiheit) und -sicherheit zu achten (M. VETTER 1986). Unter Respektierung der angeführten Postulate der Datenorganisation wurde die Datenbank zielorientiert konzipiert.

Die **Struktur des Datenbanksystems** ist in Abb. 5 dargestellt. Da die Datenstruktur relational angelegt ist, wird als Entitätsschlüssel (eindeutiger, fortlaufender Verknüpfungswert der Einzeltabellen) eine raumabhängige Identifikationsnummer (RID) verwendet. Nach Verschneidung der Flächen- bzw. Linieninformation im GIS entstehen die Tabellen mit „verknüpften Flächeninformationen“ und mit „verknüpften Linieninformationen“. Sie beinhalten eine eindeutige Zuordnung zur Nummer der Lieferfläche und zur ID des Polygons bzw. der Linie sowie die Attribute sämtlicher Informationsebenen. Die IDs der einzelnen Informationsebenen und die Lieferflächennummern werden kongruent aufgerastert und mit weiteren GIS-Berechnungen zu Bodenerosionsgefährdung, Oberflächenabfluss sowie Relief- und Raumstrukturparametern in einer Tabelle abgelegt. Die Tabelle enthält neben den IDs noch die Raumkoordinaten (x, y) der Rasterzellen sowie die Zellenattribute. Jede Zelle bekommt im Folgenden eine eindeutige raumbezogene ID (RID). Über die RID und ID der „Rastertabelle“ und die ID der „Vektortabelle“ können nun alle Elemente miteinander in der Zentraltabelle verknüpft und eindeutig angesteuert werden. Unter Verwendung von Datenbankabfragesprachen können aus der Zentraltabelle Daten selektiert, aggregiert und verrechnet werden. Weitere Analysen und Datenpräsentationen sind innerhalb und ausserhalb der Datenbank realisierbar.



**Abb. 5: Datenbankkonzeption für die raumbezogene Datenanalyse der vier Testgebiete.**  
 Unter Nutzung von Standard GIS-Funktionalitäten, wie Vektorschneidung und Vektor-Raster-Konvertierung, wird ein Datenbanksystem konzipiert, das als Auswertungsbasis Vektor- und Rasterdaten in verknüpfter Form vorhält.

Die **Vorteile dieses Datenbankkonzeptes** sind im Folgenden zusammengefasst:

- paralleles Vorhalten von miteinander verknüpften Vektor- und Rasterinformationen mit Raumbezug
- Möglichkeit des Aufbaus von 1:1, 1:n und n:m Verknüpfungen
- Möglichkeit der Erstellung leistungsfähiger SQL-Abfragen (Structured Query Language)
- Angebot mannigfaltiger Datenbankschnittstellen zu Analyse- und Präsentationsprogrammen.

#### 2.3.4. Deskriptive und analytische Statistik

Nachdem der Schritt von analogen Eingangsinformationen zu digitalen Daten mit dem Raumbezug als Verknüpfungselement vollzogen wurde, müssen zur Ergebnisinterpretation statistische Größen ermittelt werden. Sie weisen keinen direkten Raumbezug mehr auf.

##### Stichprobenbeschreibung

Es wurden gängige **Parameter der klassischen Statistik** berechnet und ausgewertet. Dazu gehören die Lage- und Streuparameter Minimum, Maximum, Standardabweichung, Mittelwert, Modalwert. Die Stichproben wurden auf ihre Verteilung hin geprüft. Da es sich um Teilmengen von Faktoren wie Relief oder Niederschlagsverteilung handelt, die im Raum als quasikontinuierlich verteilte Größen vorliegen, sind die Stichproben näherungsweise normalverteilt bzw. lognormalverteilt oder weisen einen Hang zur Lognormalverteilung auf.

##### Korrelation und Regression

Um den Grad (Stärke) des statistischen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen zu bestimmen, wurden **Korrelationen** nach PEARSON sowie Rangkorrelationen nach SPEARMAN berechnet. Um die Form (Art) des statistischen Zusammenhanges zu ermitteln und analytisch auf eine Stichprobe anzuwenden, wurden zumeist lineare **Einfachregressionen** durchgeführt.

##### Häufigkeitsanalyse

Ein Kernstück der Analysen basiert auf einfachen **Häufigkeitsverteilungen** und Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen. Häufigkeiten bilden die **Grundlage**, um zu untersuchen, ob signifikante Unterschiede zwischen der Anzahl des Auftretens von raumstrukturellen und geoökologischen Faktoren innerhalb der Liefergebiete (Spezialfall) bzw. innerhalb der Testgebiete (Normalfall) bestehen. Ein starker **Unterschied zwischen Normal- und Spezialfall** (große Häufigkeitsdifferenz) repräsentiert die bedeutende Wirkung des betrachteten Parameters auf die Eintragsgefährdung ins Gewässer. Lässt sich im Spezialfall nur eine durchschnittliche Ausprägung des Parameters (minimale Häufigkeitsdifferenz) feststellen, belegt dies die geringe Bedeutung der Einflussgröße für die Gewässeranbindung. Unter bestimmten statistischen Voraussetzungen lassen sich aus den Häufigkeitsverteilungen Wahrscheinlichkeitsaussagen zu den Parametern ableiten (Gesetz der großen Zahl).

Diese Wahrscheinlichkeitsaussagen sind verallgemeinerbar. Aus ihnen lassen sich Rückschlüsse auf nicht untersuchte Areale ziehen (räumliche Übertragung) und Prognosen erstellen.

Die Häufigkeiten (= Besetzungszahlen je Klasse) wurden als absolute oder relative Frequenzen sowohl in einfacher als auch in kumulativer Form bestimmt. Desweiteren erfolgte die Berechnung prozentual-kumulativer Häufigkeiten. Die zur Klassenbildung notwendige Klassenanzahl wurde nach empirischen Formeln abgeleitet (C.-D. SCHÖNWIESE 1992) oder musste wegen des großen Datenumfanges ( $n = 155000$ ) zwischen 7 und 15 festgelegt werden (L. SACHS 1997). Dabei wurde möglichst eine einheitliche Klassenbreite gewählt.

Die Häufigkeit eines Ereignisses erlaubt zunächst a posteriori Aussagen über ein bereits eingetretenes Ereignis. Nach dem Gesetz der großen Zahlen stabilisieren sich die relativen Häufigkeiten von zufälligen Ereignissen mit wachsendem Stichprobenumfang. Sie verändern sich dann nur noch marginal (s. R. STORM 1995). Aufgrund dieses Stabilisierungseffektes wird bei großem Stichprobenumfang  $n$  die relative Häufigkeit  $r_n(E)$  der Ereignisse ( $E$ ) einen brauchbaren Schätzwert für Häufigkeitsverteilungen zukünftiger unabhängiger Ereignisse liefern (Prognose). Damit nähert sich dieser Schätzwert der unbekanntenen **Wahrscheinlichkeit**  $P(E)$  an, so dass als Näherungswert gilt (K. BOSCH 1998):

$$P(E_1) \approx r_n(E_1) \quad \text{Gl. 1}$$

Bei umfangreichen Stichproben entspricht die *Wahrscheinlichkeit* eines Ereignisses in etwa der *relativen Häufigkeit* des Ereignisses. Unter Zuhilfenahme der Versuchserfahrung erhält man somit eine Wahrscheinlichkeit a posteriori oder eine statistische Wahrscheinlichkeit, d. h. eine relative Häufigkeit in einer sehr großen Versuchsserie. Damit wird aus der Erfahrung (rel. Häufigkeit) eine Erwartung (prognostizierte Eintrittswahrscheinlichkeit). Die Wahrscheinlichkeit als Erwartungswert wird zur mathematischen Abstraktion der relativen Häufigkeit (L. SACHS 1997). Vor diesem Hintergrund werden die ermittelten Häufigkeitsverteilungen dieser Untersuchung auch als **statistische Wahrscheinlichkeiten** interpretiert und für die Prognose herangezogen. Das in realen Liefergebieten überdurchschnittlich häufige Ereignis „starker Oberflächenabfluss“ bedeutet beispielsweise, dass bei hohen Abflussmengen grundsätzlich eine hohe Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages zu erwarten ist.

### Bedingte Wahrscheinlichkeit

Die Ermittlung sogenannter **bedingter Wahrscheinlichkeiten**  $P(E_1|E_2)$  ist notwendig, um Einflussparameter der Anbindung zu identifizieren und ihre Einflussstärke zu quantifizieren. Bedingte Wahrscheinlichkeiten geben an, mit welcher Probabilität  $P$  ein Ereignis  $E_2$  unter der Bedingung eintritt, dass  $E_1$  bereits eingetreten ist. Die bedingte Wahrscheinlichkeit unterscheidet sich von der absoluten (unbedingten) Wahrscheinlichkeit. Sie ist gleich dem Quotienten aus der Wahrscheinlichkeit  $P$  des Ereignisses  $E_1 \cap E_2$  und der Wahrscheinlichkeit von  $E_2$ :

$$P(E_1 | E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)}, \text{ wenn } P(E_2) > 0 \quad \text{Gl. 2}$$

Im Zähler steht die Wahrscheinlichkeit des Durchschnittes von  $E_1$  und  $E_2$  und im Nenner die Wahrscheinlichkeit vom Ereignis  $E_2$ . Die Wahrscheinlichkeit lässt sich für beliebige Parameterwerte berechnen. Dabei wird die Bedingung postuliert, dass ausschließlich Raumausschnitte innerhalb der Lieferareale betrachtet werden. So lässt sich beispielsweise ableiten, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Hangneigung zwischen 3 und 6 ° auftritt, sofern eine Ackerfläche beim kartierten Starkniederschlagsereignis innerhalb einer realen Lieferfläche liegt ( $P(\text{Lieferfläche}_{\text{ja}} | \text{Neigung}_{3-6^\circ})$ ). Bedingte Wahrscheinlichkeitsaussagen wurden für das Wertespektrum wichtiger Einflussgrößen der Gewässeranbindung ermittelt. Damit lässt sich die Veränderung der bedingten Wahrscheinlichkeit unter Änderung des Parameterwertes herausarbeiten. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten bilden neben den Häufigkeitsaussagen einen Baustein zur Beurteilung der Einflussparameter hinsichtlich ihrer Funktion für die Flächenanbindung.

### Logistische Regression

Aufgrund der Komplexität der Anbindungsproblematik und der daraus resultierenden besonderen Datenstruktur ergibt sich die Notwendigkeit, ein spezielles statistisches Verfahren anzuwenden, das auf Datengrundlage und Auswertungsziel hin angepasst ist: die **logistische Regression**.

Die Methode der **logistischen Regression** übernimmt in der Untersuchung folgende **Funktionen**:

- Verarbeitung von dichotomen Abhängigkeitsvariablen
- Analyse der Wechselwirkung mehrerer Parameter der Gewässeranbindung
- Erstellen eines Verknüpfungsalgorithmus für die Parameter der Gewässeranbindung
- Berechnung der Anbindungswahrscheinlichkeit aus den anbindungsrelevanten Parametern.

Eine ausführliche Beschreibung der Methode liefern E.B. ANDERSEN (1994) und D.W. HOSMER & S. LEMESHOW (1989). A. BÜHL & P. ZÖFEL (1998) geben Hinweise zur rechentechnischen Umsetzung des Verfahrens. Die logistische Regression stellt eines der wichtigsten Werkzeuge bei der Analyse von klinischen und epidemiologischen Phänomenen dar und findet in diesem Umfeld breite Anwendung (W. VACH 1994).

Die Art der Regression ist mit einem linearen Regressionsmodell vergleichbar. Sie ist für Datenmodelle geeignet, in denen die Abhängigkeit einer dichotomen (binären) Variablen von anderen unabhängigen Variablen untersucht wird. Eine dichotome Stichprobe enthält nur die Variablenausprägung 1 („ja“) oder 0 („Nein“). Anhand von Werten der Vorhersagevariablen wird das Auftreten oder Fehlen einer Eigenschaft bzw. eines Ereignisses prognostiziert. Das Verfahren prüft, in welcher Form das Ereignis „Fläche ist angebunden“ bzw. „Fläche ist nicht angebunden“ von anderen Variablen, den



Anbindungsparametern (Kap. 5), abhängt. Aus den Koeffizienten der logistischen Regression lassen sich die Quotenverhältnisse jeder unabhängigen Variablen im Modell schätzen. Die Prozedur ist am effektivsten, wenn, wie im vorliegenden Fall, die Gruppenzugehörigkeit auf einer echten kategorialen Variablen beruht. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses berechnet sich nach der Formel (D.W. HOSMER & S. LEMESHOW 1989):

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{Gl. 3}$$

mit  $z = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a$

p : Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses  
b<sub>i</sub> : Koeffizient  
x<sub>i</sub> : Werte der unabhängigen Variablen  
a : Konstante

Im Zuge der Analyse ermitteln statistische Berechnungen die Regressionskonstante und für jeden Anbindungsparameter den Koeffizienten. Das Fitting des statistischen Prognosemodells an die Stichprobenwerte erfolgt nach der Maximum Likelihood Methode, d. h. das Verfahren minimiert die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen beobachteter und geschätzter Wertemenge. Für die geringste ermittelbare Abweichung erfolgt die Bestimmung der Koeffizienten und der Konstante. Die Anzahl der unabhängigen Variablen (Anbindungsparameter) ist variabel, so dass man beliebig viele Koeffizienten in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und somit in das Modellresultat integrieren kann.

Die Regressionsberechnungen werden auf Basis von Rasterzellenwerten der Parameter durchgeführt. Die Ergebnisse sind Grundstock für ein Klassifikationsschema zur Ableitung der Wahrscheinlichkeit der Anbindung von Ackerflächen an Gewässer (Anbindungsgrad). Die Koeffizienten und Konstanten aus der logistischen Regressionsanalyse werden als Ausgangswerte für das Wahrscheinlichkeitsmodell herangezogen. Daran anschließend findet eine Anpassung der Modellergebnisse durch Kalibrierung statt, so dass prognostizierte und reale Lieferflächen räumlich besser übereinstimmen.

### 3. SITUATION UND CHARAKTERISTIKA DES EINZUGSGEBIETES VON NETTE UND LAMME (NIEDERSÄCHSISCHES LEINEBERGLAND)

#### 3.1. Geoökologische Ausstattung

##### 3.1.1. Lage

Das **Untersuchungsgebiet** liegt im südniedersächsischen Berg- und Hügelland ca. 40 km südlich von Hannover im Anschluss an die Hildesheimer Lößböden (Abb. 6). Naturräumlich gehört es zum Weser- und Leinebergland, speziell zum Innerste-Bergland.

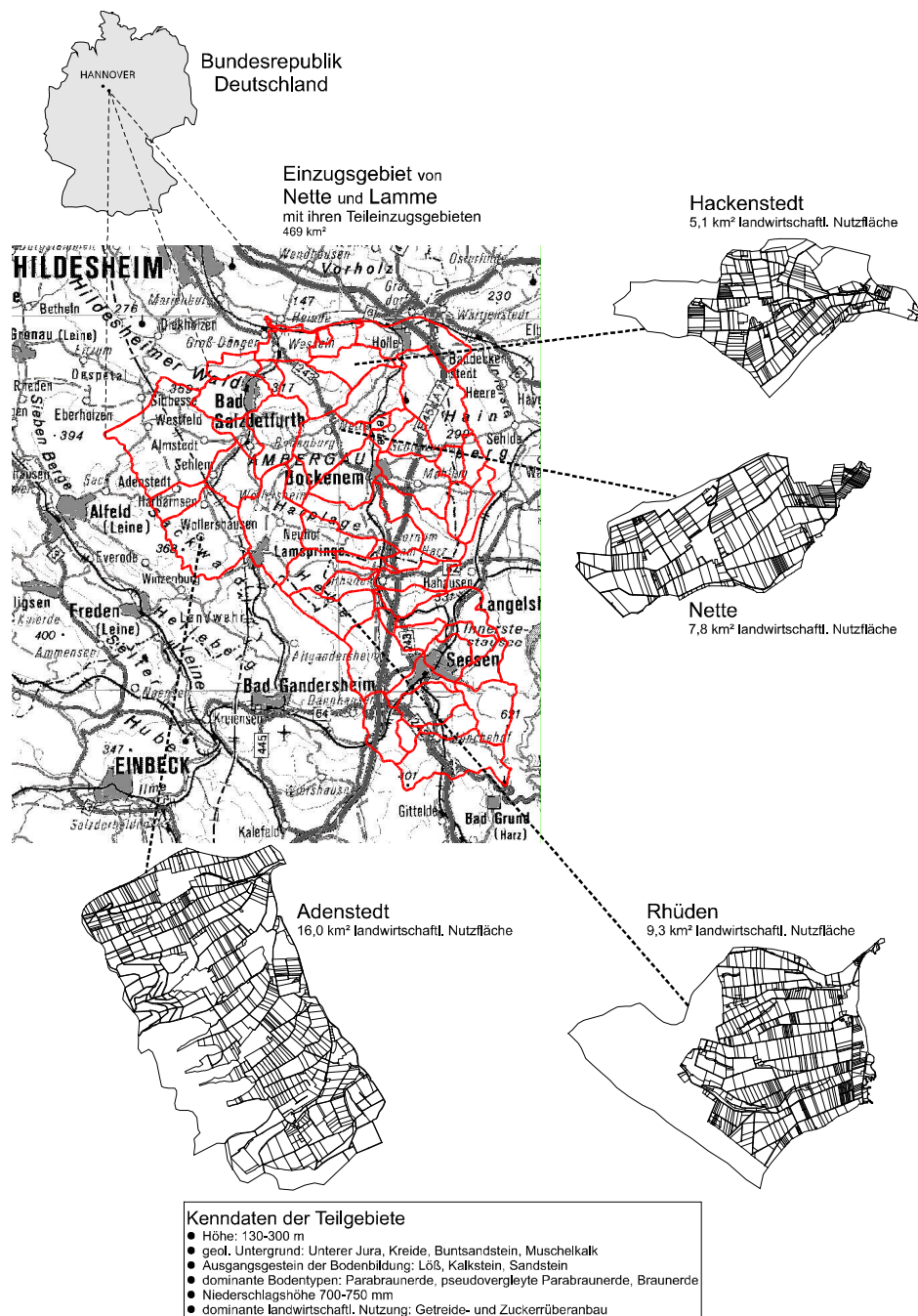


Abb. 6: Lage des Gesamtgebietes und der detailliert untersuchten Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden

Die Kombination aus relativ hohen Hangneigungen und schluffreichen, intensiv ackerbaulich genutzten Böden führt im Gebiet zu erhöhter Erosionsgefährdung und bildet damit eine gute Voraussetzung für die Untersuchung der Gewässeranbindung. Das Gebiet grenzt sich hydrographisch als **Einzugsgebiet** der Innerstezuflüsse **Nette** und **Lamme** ab und bildet mit 469 km<sup>2</sup> Größe ca. 1/3 des gesamten Innersteinzugsgebietes (1264 km<sup>2</sup>). Die Teileinzugsgebiete der Detailuntersuchungen (Testgebiete) haben eine Agrarfläche von 38 km<sup>2</sup> Größe. Dies sind 16 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Gesamtgebietes.

### 3.1.2. Geologische Verhältnisse

An der Mittelgebirgsschwelle wechseln offene, lößbedeckte Täler und Becken mit bewaldeten Höhenzügen ab, die von herzynisch, variskisch oder rheinisch streichenden **Schichtkämmen** gebildet werden (H. H. SEEDORF 1977). Die Festgesteine (Sand-, Kalk-, Tonstein) wurden im **Mesozoikum** während langer Meeresbedeckung sedimentiert und diagenetisch verfestigt. Während der Saxonischen Bruchschollentektonik wurden die Festgesteinsschichten gekippt, versenkt und herausgehoben, so dass ein Mosaik von Schollen und Gräben entstand. An tektonischen Schwächezonen kam es durch autonome Salzwanderungsvorgänge zum Aufstieg von Zechsteinsalzen (Perm z1-z3). Dabei wurden die mesozoischen Deckschichten zu Salzsätteln mitaufgeschleppt (Halokinese) (H. JORDAN 1987). Die Firstbildner der Schichtstufen und -kämme werden von morphologisch härteren Buntsandstein- und Muschelkalkschichten gebildet. Durch Subrosionsvorgänge der Zechsteinsalze kam es an geologischen Sätteln häufig zum Absacken der Deckschichten mit nachfolgender Ausräumung der Lockersedimente, so dass morphologische Mulden entstanden (Reliefumkehr) (W. EVERS 1964).

Während der **Elster- und Saalezeit** im Pleistozän waren der Ambergau und die umliegenden Höhenzüge vollständig vom Inlandeis bedeckt. Dabei bildeten sich glaziale Serien. Die saaleeiszeitliche Grundmoräne ist oberflächlich inselhaft vorhanden, bei z. T. unvollständiger Durchmischung mit Ferngestein dominieren lokale Gesteine. Petrographisch ist die Grundmoräne nach Verwitterung als Geschiebemergel oder -lehm anzusprechen. Er ist reich an tonigen Bestandteilen. Westlich der Nette sind sandig-kiesige Schmelzwasserablagerungen des Drenthestadiums anzutreffen.

In der **Weichselkaltzeit** kam es unter periglazialen Bedingungen zur Deflation aus Schmelzwasser- und Geschiebesanderflächen mit nachfolgender flächendeckender Lößsedimentation. Die Mächtigkeiten erreichen normalerweise 0,5–2 m. In Leelagen sowie im Bodenburger und Ambergauer Becken existieren bis zu 6 m mächtige Lößdecken. Das Ausgangssubstrat ist zu kalkfreiem Lößlehm verwittert und z. T. umgelagert (Schwemmlöß, Lößfließerde). Mit einem Schluffanteil von 80 %, dem 5 % Feinsand und 10-20 % Ton beigemischt sind (H. JORDAN 1987), besitzt er eine hohe Erodibilität.

Im **Holozän** trat nach ausgedehnten mittelalterlichen und neuzeitlichen Waldrodungen im Bergland verstärkt Bodenerosion auf. Dies führte zu einer erhöhten Sedimentfracht der Fließgewässer und durch Überschwemmungen zur Ablagerung von Auelehm (qh 1-4). Die Mächtigkeiten des tonig-schluffigen Sediments liegen bei 0,5-2 m (W. EVERS 1964).

### Durchlässigkeit

Die komplizierte erdgeschichtliche Entwicklung hat im oberflächennahen Untergrund ein Mosaik an unterschiedlichen Gesteinen hinterlassen, das sich auch auf den zu erwartenden Anbindungsgrad auswirkt. Der Wechsel mesozoischer Sedimentgesteine mit guter und geringerer Wasserleit- und Wasserspeicherefähigkeit führt -gleiche Nutzung vorausgesetzt- zu unterschiedlichen Versickerungsraten und oberflächlichen Abflussbildungen. Gesteine mit größerer Permeabilität und Porosität können größere Wassermengen aufnehmen und in den Untergrund ableiten (Tab. 3). Bereiche mit überwiegend Ton- und Mergelstein oder mächtigen Lößbedeckungen weisen hingegen höhere Abflussraten und damit eine größere Anbindungswahrscheinlichkeit auf. Bei den Felduntersuchungen ist festzustellen, dass geringmächtige Lößbedeckungen mit Buntsandstein- oder gutgeklüfteten Muschelkalkschichten im Untergrund geringere Erosionserscheinungen zeigen.

Gesteinsformation		Gesteinsausbildung	Durchlässigkeit	
Quartär	Auelehm	sandig-toniger Lehm	wechselnd, meist gering	
	Talschotter	Sand u. Kies	gut	
	Löß u. Geschiebelehm	feinsandiger- bis toniger Lehm, z. T. steinig oder schwach kalkig	gering bis sehr gering	
	Innerste-Terrasse	Sand und Kies mit Lehm- u. Tonlagen	gut	
Tertiär		schwachtoniger Sand, Kalksandstein, selten Mergel	gut	
Kreide	Obere: Turon	Mergel und Kalk	meist mäßig	
	Untere	Flammenmergel	tonig-kieseliger Mergel	gut
		Hilssandstein	eisenhaltiger Sandstein	gut
unterer Jura		Tonstein	schwer durchlässig	
Trias	Keuper	Oberer	Sandstein, Tonstein, Mergel	gut
		Mittlerer	Tonstein, Mergel	gut
		Unterer	Mergel, Dolomit, Sandstein, Tonstein	wechselnd, meist gering
	Muschelkalk	Oberer	Kalkplatten und Mergel, Trochitenkalk: Kalkbänke	gut
		Mittlerer	Mergel, Dolomit	schwer durchlässig
		Unterer: Wellenkalk	dünnbankiger Kalk- u. Mergel	gut
	Buntsandstein	Oberer	Tonstein	schwer durchlässig
		Mittlerer	Wechsel von Sandstein und Tonlagen	gering, in Klüftzonen etwas besser
		Unterer	mürber Sandstein u. bröckeliger Schiefer-ton	gering
Zechstein		Gips, Anhydrit, Dolomit, Steinsalz	in Klüftzonen sehr gut	

**Tab. 3: Gesteinsformationen mit Wasserdurchlässigkeiten des geologischen Untergrundes (verändert nach W. EVERS 1964)**

### 3.1.3. Boden

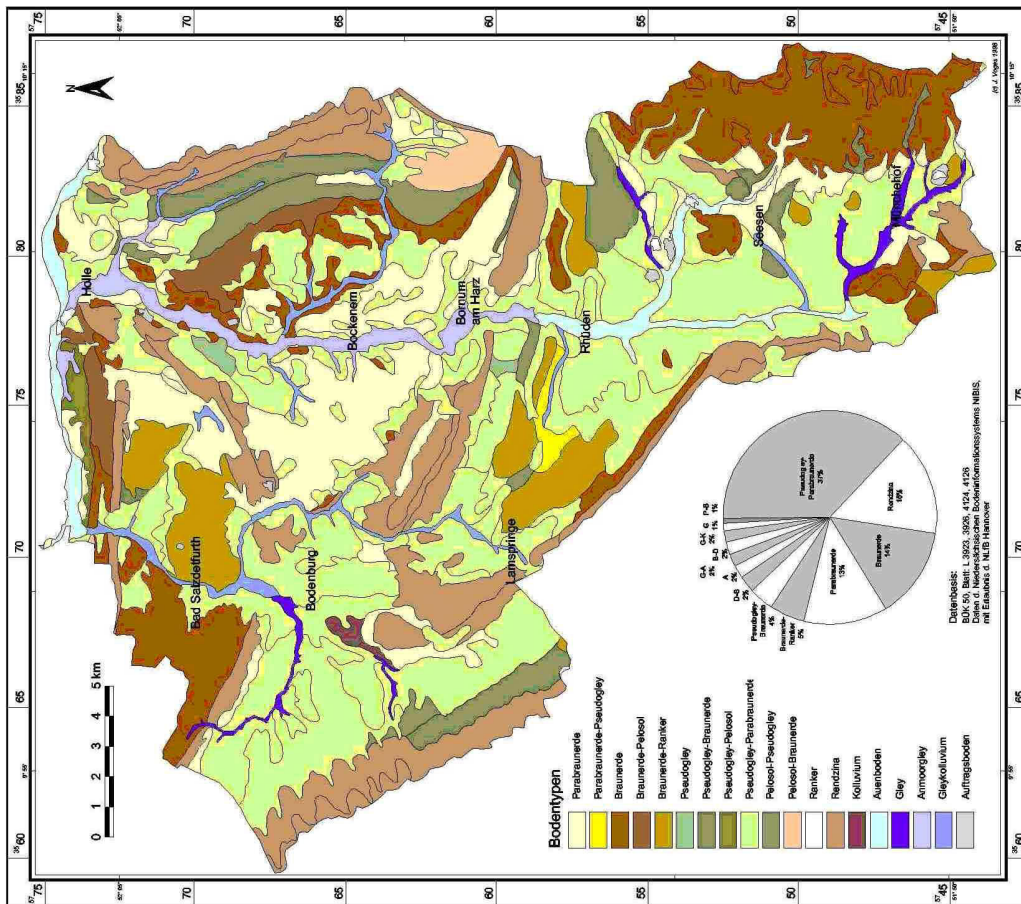
Den **dominanten Bodentyp** mit seinen Vergesellschaftungen bilden mit 37 % Flächenanteil die **Pseudogley-Parabraunerde aus Löß**, die **Parabraunerde aus Löß** (13 % Flächenbedeckung) und mit einer Verbreitung von 14 % die **Braunerde** aus Fließerden oder Hangschutt. Die Böden liegen über Buntsandstein- bzw. Kreide- sowie am Harzrand über Karbonformationen (Karte 2).

Bei den **Parabraunerdegesellschaften** handelt es sich um frische, örtlich staunasse tonige Schluffböden sehr hoher Bodenfruchtbarkeit mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Die Pseudogley-Parabraunerde ist durch weitergehende Tonverlagerung aus der lessivierten Parabraunerde hervorgegangen. Aufgrund ihrer geringen bis mittleren Wasserleitfähigkeit zeichnet sie sich oberhalb des 4-6 dm tiefen Tonanreicherungshorizontes (Bt) durch zeitweisen Luftmangel aus. Die Tonverlagerung führt zu 5-15 % mehr Ton im Unterboden (AG BODEN 1994, NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM 1987). Die relative Schluffanreicherung im Oberboden bewirkt eine Abnahme der Strukturstabilität des Bodens und zieht eine zunehmende Verschlammungsneigung und – bereits bei geringen Hangneigungen- eine verstärkte Erosionsanfälligkeit nach sich. Die Wahrscheinlichkeit des Bodeneintrags in das Gewässersystem liegt damit bodenseitig bei beiden Bodengesellschaften sehr hoch.

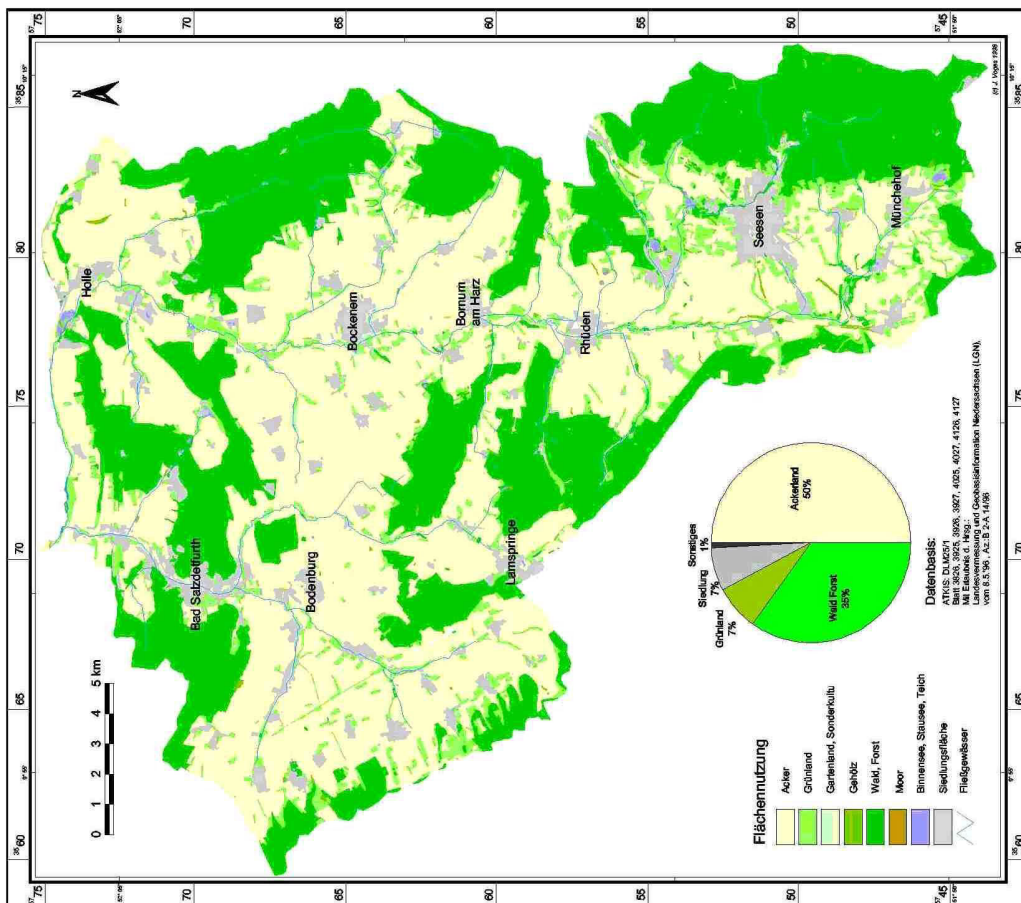
Die **Braunerden** finden sich auf mittleren bis steilen Hängen mit geringer Lößbedeckung und sind durch Verwitterung des Ausgangsgesteins mit einhergehender Verlehmung entstanden. Sie verzahnen mit Pseudogley-Braunerden und den wenig tiefgründigen Rankern. Aufgrund des kleinräumigen Gesteinswechsels weisen sie große Unterschiede in Bodenart, nutzbarer Feldkapazität und Gründigkeit auf. Sie bilden als steinig-sandige Böden geringwertige, als schluffig-tonige Lehmböden in ebenem Gelände gute Ackerstandorte (NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM 1987).

Bei hochanstehendem Muschelkalk entwickelten sich auf den Schichtkämmen **Rendzinen** (15 % Flächenanteil). Sie besitzen ein je nach Mächtigkeit des Verwitterungshorizontes mehr oder weniger geringes Wasserspeichervermögen. Ein gut ausgebildete Kluftsystem im Untergrund und der hohe Humusgehalt erhöhen die Wasserzügigkeit, so dass nur ein geringer Niederschlagsanteil oberflächlich abfließt. Der hohe Skelett- und Tongehalt vermindert zusätzlich die Erosionsanfälligkeit und damit den hinsichtlich der Bodeneigenschaften zu erwartenden Anbindungsgrad.

Mit Flächenanteilen von jeweils 1-2 % kommen besonders mit **Pelosolen** vergesellschaftete Übergangsformen der Böden vor. Pelosole sind aufgrund der hohen Tongehalte und der damit verbundenen starken Quellung und Schrumpfung nur grünlandfähig. Aufgrund der Flächennutzung sowie aufgrund ihrer hohen Aggregatstabilität ist bei diesen Standorten eine geringe Wahrscheinlichkeit des Übertritts von Boden in die Gewässer zu erwarten.



Karte 2: Bodenverbreitung

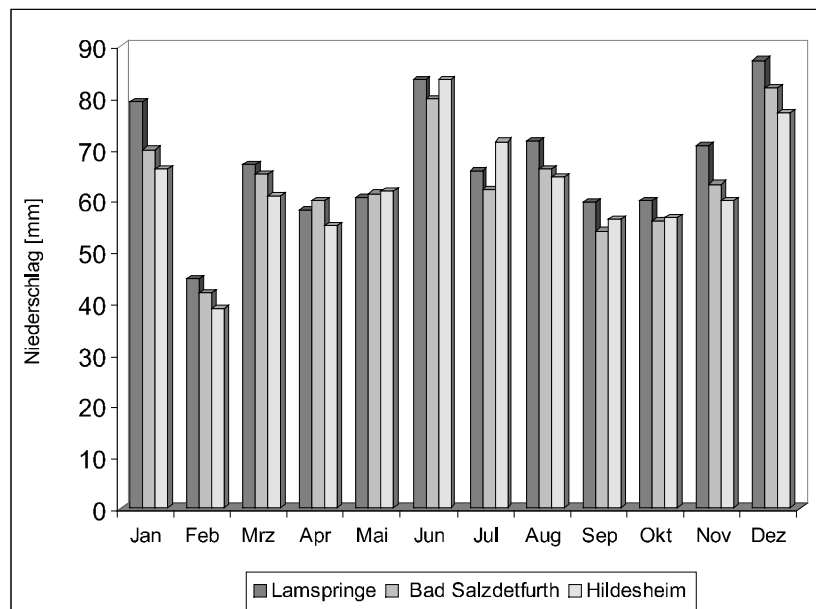


Karte 1: Flächennutzung

### 3.1.4. Niederschlags- und Oberflächenabflussbedingungen

#### Niederschlag

Der Untersuchungsraum ist eingebettet in die großräumige Westwindzirkulation und weist ausgeprägte maritime Züge auf. Dazu zählen der gedämpfte Temperaturgang sowie erhöhte Windgeschwindigkeiten und Gewitterneigungen mit Starkniederschlägen (NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM 1987). Die mittleren Jahresniederschlagssummen liegen entsprechend den lokalen Einflussfaktoren, Höhenlage sowie Luv- und Leeeffekte, zwischen 690 mm (Baddeckenstedt) bis 1300 mm (Wildemann). Im Sommer fallen kaum mehr Niederschläge als im Winter, die Unterschiede der Messstationen in der absoluten Niederschlagshöhe sind durch die Lage im Reliefumengefüge zu erklären (Abb. 7).

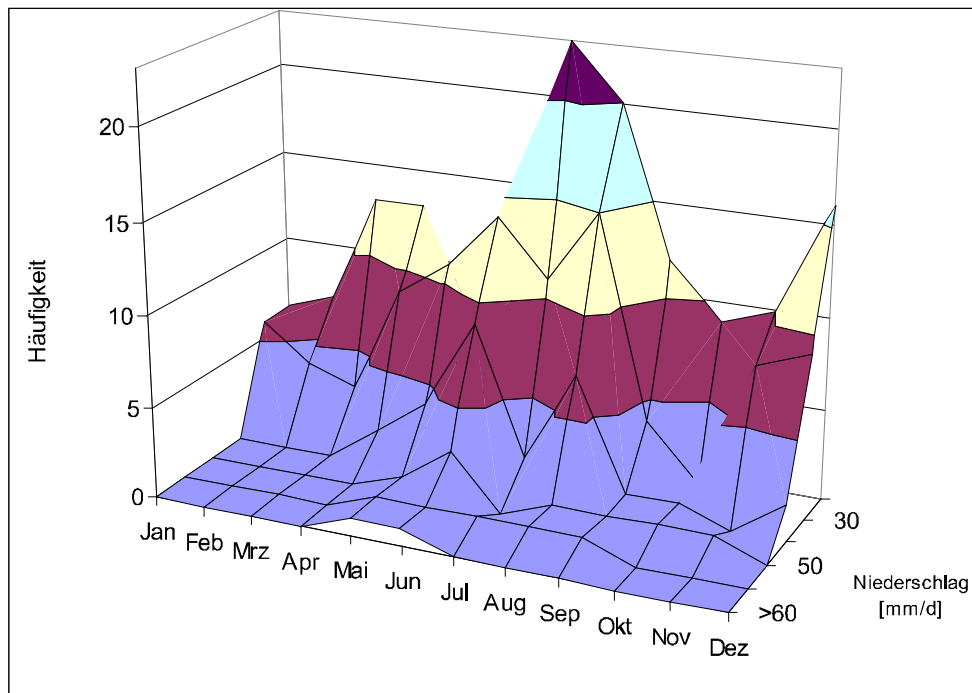


**Abb. 7: Verteilung der Monatsniederschläge der Stationen Lamspringe, Bad Salzdetfurth und Hildesheim (Grunddaten: Deutscher Wetterdienst 1980-´94)**

Für das Auftreten von Bodenerosion und Übertritten ist die Niederschlagsverteilung und -intensität d. h. die **Erosivität der Niederschläge** bedeutend. Besonders die heftigen Gewitterregen von Frühjahr bis Sommer sind sehr erosiv. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von erosiven Niederschlägen zeigt sich in diesem Zeitraum stark erhöht (H.-G. FREDE & S. DABBERT 1998).

Abb. 8 weist nach, dass Starkniederschläge im Gebiet besonders in den Monaten April bis September vorkommen. Niederschläge von mehr als 60 mm pro Tag treten ausschließlich im Mai und Juni auf, Niederschläge von 50 bis 60 mm Höhe gibt es nur zwischen Mai und September.





**Abb. 8: Absolute Häufigkeit von Starkniederschlägen mit mehr als 15 mm/d der Station Seesen im Südteil des Untersuchungsgebietes (Grunddaten: Deutscher Wetterdienst 1970-'97)**

In diesem Zeitraum liegt die Möglichkeit des Eintrags von erodierter Feinerde in Gewässer niederschlagsbedingt besonders hoch. Zudem wird die Erosionsneigung und der Stofftransport dadurch begünstigt, dass die Bodenbedeckung für die Kulturfrüchte Zuckerrübe und Mais noch bis in den Juni hinein, für Wintergetreide bis in den April hinein unter 20 % beträgt (R. DUTTMANN 1999).

### Hangneigungsverhältnisse

Damit oberflächlicher Abfluss und Stofftransport entstehen kann, müssen einerseits die Infiltrationskapazität unterhalb der pro Zeiteinheit auf die Bodenoberfläche auftreffende Niederschlagsmenge liegen und andererseits eine ausreichende Geländeneigung existieren. Die Häufigkeitsverteilung von Neigungs- und Höhenstufen des Untersuchungsraumes ist in Abb. 9 dargestellt.

Der größte Flächenanteil liegt zwischen 0 und 9 ° Neigung. Das Maximum mit 40 % Flächenanteil tritt zwischen >0 und 3 ° Neigung auf. Die relative Häufigkeit in den Neigungsklassen nimmt dann stetig bis zur maximalen Neigung von 30 ° ab, so dass eine linksschiefe Verteilung entsteht. Die dominante Höhenlage der Flächen im Untersuchungsraum reicht von 150 bis 300 m. Da Bodenverlagerungsprozesse ab einer Neigung von 2° relevante Ausmaße erreichen können (TH. MOSIMANN 1991), bietet das Gebiet auch von Seiten des Reliefs die Voraussetzungen für eine erhöhte Stoffeintragsgefährdung in Gewässer.



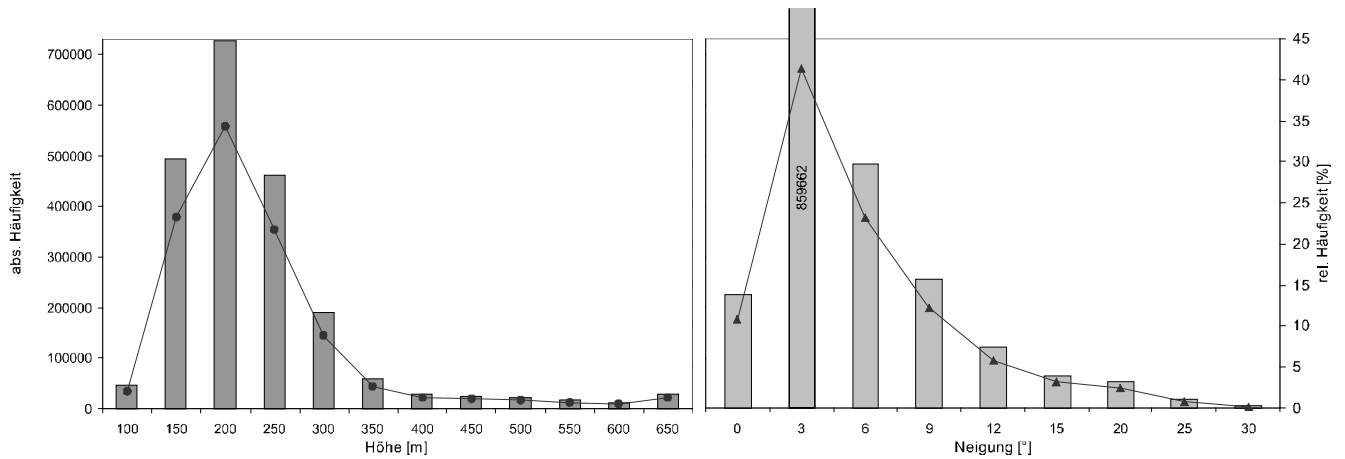


Abb. 9: Absolute (■) und relative (—) Häufigkeitsverteilung von Höhen- und Neigungsstufen im Gesamtgebiet

### 3.2. Veränderungen durch die Landwirtschaft

#### 3.2.1. Flächennutzung

Das Gebiet wird wegen verbreitet hoher Bodenfruchtbarkeit zu 50 % intensiv landwirtschaftlich genutzt. 7 % der Fläche, zumeist steile oder feuchte Lagen, steht unter Grünlandnutzung. 35 % des Raumes tragen aufgrund starker Neigungen und ungünstiger Bodenbedingungen Wald und Forst (Karte 1). Als Kulturpflanzen werden auf 80-90 % der Ackerfläche Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben im Verhältnis 50:20:30 % angebaut. Untergeordnete Kulturpflanzen sind v. a. Raps und Sommergetreide.

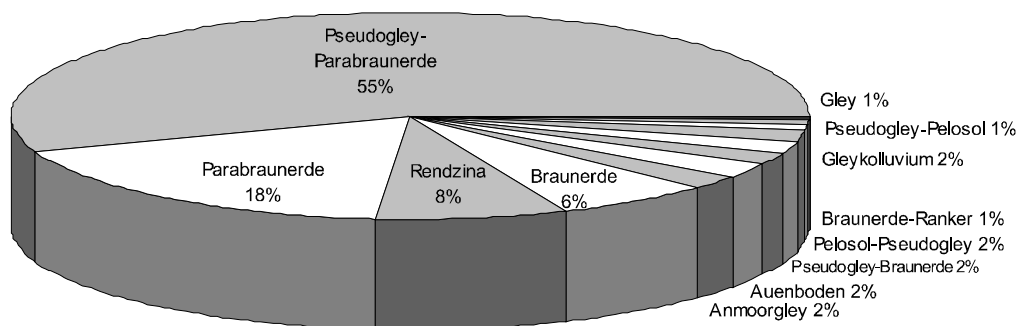


Abb. 10: Verteilung der Hauptbodentypen auf die gesamte Ackerfläche

Unter Ackernutzung ist die Pseudogley-Parabraunerde mit 55 % Flächenanteil im Vergleich zum Gesamtgebiet überdurchschnittlich stark repräsentiert (Abb. 10). Parabraunerden bilden ebenfalls überdurchschnittlich intensiv genutzte Ackerstandorte. Ranker und Braunerden hingegen weisen

unter Ackernutzung einen geringeren Flächenanteil auf als im gesamten Untersuchungsraum. Die übrigen Bodengesellschaften spielen mit jeweils 1-2 Flächenprozent eine untergeordnete Rolle.

Der Hauptanteil der agrarischen Nutzfläche befindet sich auf den Bodengesellschaften der Parabraunerden aus Löß zwischen 150-300 m Höhe und Neigungen zwischen 0-9 °.

### 3.2.2. Graben- und Gewässernetz

Im Zuge der Intensivierung der Landwirtschaft wurden Flächen mit zunächst geringer Produktivität in Nutzung genommen. Durch Kultivierungsmaßnahmen wie Dränung und Entwässerung ließen sich die zu verzögerter Sickerung neigenden Parabraunerdegesellschaften den Bedürfnissen der Kulturpflanzen anpassen.

Die Intensivlandwirtschaft ist oft verbunden mit der Begradigung der Gewässer und der gleichmäßigen Gestaltung der Abflussquerschnitte sowie der Beseitigung der Ufergehölze (BEZIRKSREGIERUNG HANNOVER 1993). Zudem musste eine Vielzahl neuer Gräben angelegt werden, um Oberflächen- und Dränwasser schnell abzuführen.

Flächennutzung	Gewässerdichte [km/km <sup>2</sup> ]		
	Fließgewässer	Gräben	Fließgewässer- und Gräben
Acker	1,3	2,0	3,3
Grünland	2,1	1,8	3,9
Wald, Forst	1,7	0,5	2,2
Siedlung	3,9	1,1	5,0
gesamt	1,0	1,7	2,9

**Tab. 4: Gewässer- und Grabendichte in Abhängigkeit von der Flächennutzung**

In Tab. 4 ist die Gewässerdichte in Abhängigkeit der Flächennutzung angegeben. Die höchsten Gesamtgewässerdichten treten in Siedlungsgebieten auf, wobei der Anteil von künstlichen Gräben dort relativ niedrig liegt. Auf Ackerflächen wurde durch Anlage künstlicher Gräben die Gesamtdichte mehr als verdoppelt. Bei Grünlandnutzung übersteigt die Gesamtdichte zwar diejenige unter Acker, wird aber v. a. durch den hohen Anteil an natürlichen permanenten Fließgewässern gebildet. Unter Wald ist aus forstwirtschaftlicher Sicht die Verdichtung des Gewässernetzes kaum notwendig. Die Dichte der künstlichen Gewässer steigt mit der Intensität der landwirtschaftlichen Flächennutzung. Die höheren Gewässerdichten sind demnach mit Eingriffen in das Entwässerungssystem zu erklären, die primär aufgrund von anthropogenen Flächennutzungsansprüchen vorgenommen wurden. Die Durchlässigkeit des oberflächennahen Untergrundes spielt eine untergeordnete Rolle.

### 3.2.3. Straßen und Wegenetz

Die zunehmende Technisierung der Landwirtschaft führt zum vermehrten Einsatz immer größerer und schwerer Landmaschinen. Um die ungehinderte Zufahrt zu den Parzellen zu gewährleisten, wurde wie überall das **Wegesystem** ausgebaut, d. h. verdichtet und eine verbesserte breitere Wegebefestigung angelegt. Die Flurbereinigung trägt einen Teil zu dieser Entwicklung bei. So wurden etwa drei Viertel der landwirtschaftlichen Wege im Zuge von Flurbereinigungen gebaut (BRONSTERT U. A. 1995). Ziel von Flurbereinigungsmaßnahmen ist es, durch Neuordnung des ländlichen Grundbesitzes die Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft zu verbessern, d. h. eine moderne wettbewerbsfähige Land- und Forstwirtschaft zu erhalten und zu stärken (AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1995). So sind die meisten landwirtschaftlichen Wege heute asphaltiert oder tragen zumindest stark verdichtete wassergebundene Decken. Unbefestigte Graswege bilden die Ausnahme. Dabei kann die Neuordnung der Parzellen zur Verstärkung der Bodenerosion führen, wenn die Wegeanordnung auf langen Schlägen die Bearbeitung in Gefällrichtung erzwingt (U. SCHWERTMANN 1982). Zudem können die Wege selbst Oberflächenwasser kanalisiert ableiten (D. BRIESE & CH. ERPENBECK 1986).

Wegen der stark reduzierten Wassersickerung sind die landwirtschaftlichen Wege häufig von einem Graben begleitet. Um das Wasser schneller ableiten zu können, werden die Wege in Richtung des Grabens geneigt konstruiert. Auf solchen Wegen kann sich vermehrt Wasser sammeln, abgespülte Feinerde auf der hydraulisch glatten Oberfläche weitertransportiert und unverzögert in die Gewässer eingetragen werden (BRONSTERT U. A. 1995). Damit erhält das Straßen- und Wegesystem eine wichtige raumstrukturelle Funktion im Zusammenhang mit Prozessen des Stofftransportes und des Stoffeintrags in Gewässer. Es findet daher in der Modellierung Berücksichtigung.

### 3.3. Besonderheiten der ausgewählten Testgebiete

In den Testgebieten wird die Datenbasis für das Modell geschaffen, das für das Gesamtgebiet konzipiert und angewendet wurde. Die Eigenschaften der untersuchten Testgebiete sind in Tab. 5 als Übersicht zusammengestellt.

Die Gebiete Adenstedt und Rhüden sowie Hackenstedt und Nette zeigen hinsichtlich Gebietsgröße und Gewässerslänge ähnliche Eigenschaften. Die Gewässerdichte liegt in Nette besonders hoch. Geomorphologisch bieten nur die Gebiete Hackenstedt und Rhüden miteinander vergleichbare Verhältnisse. Als Ausgangsgestein der Bodenbildung findet sich überall Löß oder Lößlehm. Darauf haben sich in allen Testgebieten Parabraunerdegesellschaften entwickelt. Der Flächenanteil der erosionsanfälligen Zuckerrübe liegt in den Testgebieten etwa gleich hoch. Die Neigungsverhältnisse der Gebiete unterscheiden sich im Mittel nur um max. 1,7 %-Punkte, können im Einzelfall aber we-

sentlich voneinander differieren. Zusammengenommen bilden die vier Testgebiete einen Querschnitt der landschaftsökologischen und raumstrukturellen Bedingungen des gesamten Untersuchungsraumes.

Merkmal		Adenstedt	Hackenstedt	Nette	Rhüden
Gebietsgröße [km <sup>2</sup> ]		20,9	8,2	8,4	15,1
Gewässerlänge [km]		65,2	31,6	46,1	59,0
Gewässerdichte [km/km <sup>2</sup> ]		3,1	3,8	5,4	3,9
geol. Untergrund		Unterkreide, Lias, Keuper	Unterer u. mittlerer Buntsandstein, unterer, mittlerer u. oberer Muschelkalk	unterer, mittlerer u. oberer Muschelkalk, Auelehm	Unterer u. mittlerer Buntsandstein, Auelehm
geomorphol. Einordnung		welliges enggekammertes, z. T. steiles Relief, Schichtstufen aus Kreidekalken	Subrusionsbecken mit wechselnden Reliefbedingungen	gestreckter steiler Stirnhang v. Schichtstufe mit konkavem Unterhang	Subrusionsbecken mit stark wechselnden Reliefbedingungen
Ausgangsgestein d. Bodenbildung		Lößlehm, Löß über Geschiebelehm o. -mergel	Lößlehm , Löß z. T. umgelagert	Lößlehm , Löß z. T. umgelagert	Lößlehm , Löß z. T. umgelagert
Bodentyp unter Acker		Pseugogley-Parabraunerde Pseugogley-Braunerde Rendzina	Parabraunerde Parabraunerde –Pseugogley Braunerde-Ranker	Pseugogley-Parabraunerde Parabraunerde	Pseugogley-Parabraunerde Auenboden
Nutzung [%-Anteil]	Acker	65,6	59,6	86,3	56,9
	Grünland	16,9	4,2	2,6	5,8
	Wald	11,0	29,6	5,3	33,6
Kultur [%-an Acker]	Wintergetreide	45,2	49,6	53,2	59,7
	Zuckerrübe	38,1	39,4	35,6	28,3
	davon mit Zwischenfrucht [%]	10,4	11,1	19,1	27,9
Neigung [%]	minimal	0	0	0	0
	mittlere	4,4	5,4	3,7	4,2
	maximal	27,0	24,3	18,5	23,9

Tab. 5: Übersicht wichtiger Charakteristika der Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden

## 4. URSACHEN UND PROZESSE BEI DER ENTSTEHUNG VON LIEFERFLÄCHEN IN DEN TESTGEBIETEN

Zum besseren Prozessverständnis sind zunächst einige theoretische Erläuterungen zur Problematik der Gewässeranbindung notwendig. Danach folgt die Präsentation eigener Ergebnisse der Datenerhebung und -auswertung. Dabei geht es zunächst darum, die wesentlichen Einflussgrößen des Stoffeintrages in Gewässer unter Feldbedingungen herauszuarbeiten. In einem zweiten Schritt ist zu prüfen, welche anbindungsrelevanten Größen sich in einem Modellalgorithmus abbilden, d.h. im Modellkonzept zur Bestimmung des Anbindungsgrades berücksichtigen lassen.

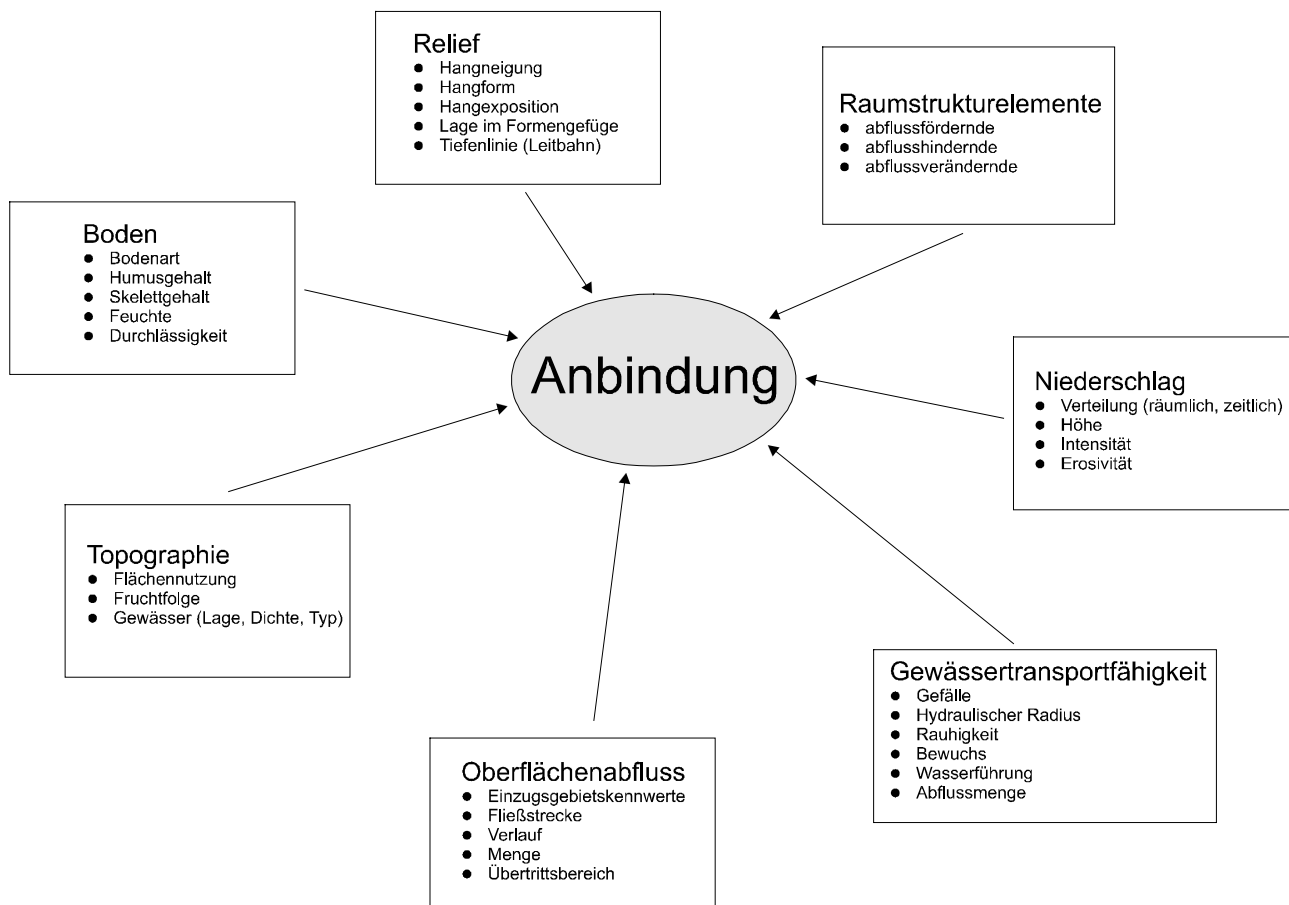
### 4.1. Übersicht zu den Hauptfaktoren der Gewässeranbindung

Um ein **Modell** zur Generierung des Gewässeranbindungsgrades entwickeln zu können, ist zunächst zu ermitteln, welche Prozesse den Stoffeintrag in Gewässer vornehmlich beeinflussen und welche Parameter die Prozesse im Wesentlichen steuern. Ein empirisches Modell für den mittleren Maßstabsbereich kann dabei nur die dominanten Einflussfaktoren berücksichtigen und sie in ihrer funktionalen Wirkungsweise vereinfacht über Berechnungsalgorithmen abbilden. Zudem ergeben sich auf der Skala Einschränkungen aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit. Im Modell können nur Größen verrechnet werden, die für große Gebiete flächendeckend zur Verfügung stehen oder sich aus Basisdaten ableiten lassen.

Abb. 11 zeigt die **Haupteinflussfaktoren** die den Grad der Anbindung an Fließgewässer bzw. das Stoffeintragspotential einer Fläche bestimmen. Eine detaillierte tabellarische Aufstellung findet sich im Anhang.

Innerhalb eines Niederschlagsregimes steuern im Wesentlichen die Bodeneigenschaften zusammen mit den Relief- und Nutzungsbedingungen die flächenvariablen Prozesse der Bodenerosion und des oberflächlichen Stofftransportes.

Sofern diese Rahmenbedingungen unverändert bleiben, übernehmen die meist linearen **Raumstrukturelemente** für den Stoffeintrag in Fließgewässer eine besondere Funktion. Raumstrukturen sind topographische Elemente der Landschaft mit anthropogenem Ursprung. Sie können den Bodenabtragsprozess sowie die Bildung von Erosionsspuren beeinflussen und den Verlauf und Umfang des oberflächlichen Abflusses und Stofftransportes verändern. Der Stofftransportpfad stellt die Verbindung zwischen erodierter Fläche und dem Eintragungspunkt am Gewässerrand her. Dadurch beeinflusst sein Verlauf unmittelbar den Anbindungsgrad. Beispielsweise erhöht der Transport über eine weitere Strecke oder die Passage von gering geneigten Geländeauschnitten die Möglichkeit zur Stoffakkumulation. Die Wahrscheinlichkeit des Gewässereintrags bzw. der Flächenanbindungsgrad verringern sich.



**Abb. 11: Wichtige wechselwirkende Einflussparameter der Gewässeranbindung**

Für die Bestimmung eines Übertrittsbereiches in ein Gewässer sind die bergwärts gelegenen Charakteristika des Kleinsteinzugsgebietes des Übertritts zu berücksichtigen, um den Verlauf und die Stofftransportkapazität des Oberflächenabflusses einschätzen zu können. Dies sind z. B. Lage im Formengefüge, Kombination von Tiefenlinien, Hangneigungen und Hangneigungsrichtungen sowie Straßen- und Wegesystem, Gewässerrandstreifen, Uferbankette, bearbeitungsbedingte Leitlinien sowie Fließgewässer- und Grabennetz. Hangabwärts vom Übertrittsbereich sind für den Weitertransport des Bodens Eigenschaften der Gräben bzw. Gewässer von Bedeutung.

Für die Frage der Gewässeranbindung sind diejenigen Raumstrukturen relevant, die den Oberflächenabfluss stark beeinflussen (z.B. Weg, Straße, bearbeitungsbedingte Leitlinien). Da der kanalisierte Oberflächenabfluss für den Prozess des Übertritts von wesentlicher Bedeutung ist (M. BACH u. A. 1994), müssen zur Identifikation stoffliefernder Flächen abflussfördernde und abflusshindernde Strukturelemente mit berücksichtigt werden.

Für den **Gewässeranbindungsgrad** spielen die folgenden, in ihrer prozessualen Reihenfolge aufgeführten **Elemente** eine wesentliche Rolle:

- Mobilisierung der Bodensubstanz durch den Erosionsprozess am Ort der Partikelablösung
- Oberflächlicher Transport der Bodensubstanz gemäß der Boden-, Relief- und Raumstruktursituation
- Eintrag der Bodensubstanz gemäß der Raumstrukturbedingungen im Gewässerrandbereich
- Weitertransport im Graben und Gewässersystem bis ins nächste Fließgewässer gemäß der Durchflussbedingungen.

Der Prozess des Stoffeintrages in Gewässer oder Gräben vollzieht sich im Einzelnen folgendermaßen (Abb. 12): Nach Abzug des Wasservolumens aus Interzeption, Muldenspeicherung, Evapotranspiration und Infiltration steht der effektive Niederschlag für die Bildung des Oberflächenabflusses zur Verfügung (R. DIKAU 1986). Die Bodenerosion, als Prozess der Feststoffmobilisierung, stellt nach dem Niederschlagsereignis das Anfangsglied der Kausalkette „Gewässeranbindung“ dar. Das Ausmaß der Bodenablösung durch Tropfenaufprall bzw. Regenerosion (Splash-Effekt) wird durch das Verhältnis von bodenablösenden Kräften, d. h. der Niederschlagserosivität, zur Bodenablösbarkeit (Erodibilität) bestimmt. Größen wie die Bodenart und die Aggregation steuern wiederum die Erodibilität. Die Aggregatstabilität hängt v. a. vom Gehalt an Ton, Humus, Sesquioxiden, Calcium und von der mikrobiellen Aktivität ab.

Bei zunehmender Wassersättigung des Bodens verringert sich die Kohäsion der Partikel und ermöglicht ihren Zerfall. So kommt es zur selektiven Anreicherung von Feinsubstanz und in Konsequenz zur Verstopfung sickerfähiger Poren (Verschlämmung). Die einige mm-mächtigen Verschlammungsschichten besitzen im Vergleich zum frisch bestellten Acker um mehrere 10er Potenzen geringere ungesättigte Wasserleitfähigkeiten. Sie sind ursächlich für erhöhte Abflussbildung verantwortlich (H. P. BLUME u. a. 1996). Bei ausreichend großem Wasserangebot kommt es im Weiteren zum Abtransport der abgelösten Bodenpartikel (Bodenerosion).

Die durch erosive Niederschläge abgelöste Bodensubstanz kann mit dem **oberflächlichen Wasserfluss** weitertransportiert werden. Der Ablauf des Oberflächenwassers erfolgt grundsätzlich, also im mikroskopischen wie makroskopischen Bereich, entsprechend dem größten Oberflächengefälle. Der Zwischenspeicherung in Kleinstmulden der Bodenoberfläche (Oberflächenrauigkeit) folgt bei Überschreiten des Muldenspeichervolumens der schnelle Anstieg des Abflusses in reliefbedingten Tiefenlinien (C.H. ROTH 1996). Dabei kann der Verlauf des Transportpfades durch die Bearbeitungsspuren auf der Ackerparzelle in seiner Richtung verändert, behindert oder z. T. auch unterbrochen werden.

Die Menge des transportierten Bodens wird von der **Transportkapazität des Oberflächenabflusses** bestimmt. Wenn die Transportkapazität erschöpft ist, kommt es, wie z. B. bei nachlassender Neigung am Hangfuß, zur Deposition. Beim Transport erfolgt ein kontinuierliches Absinken der Partikel durch die Gravitation. Die freiwerdende Transportfähigkeit wird wiederum zur Loslösung und zum Transport anderer Feststoffe nutzbar (N. HAGEN & H.B. KLEEBERG 1993). Oberflächliche Abflussmenge, Sedimentkonzentration, Partikeldurchmesser, Geländeneigung und der auf den Wasserfilm auftreffende Niederschlag determinieren die Transportkapazität (s. J. SCHMIDT 1994, V. HRISSANTHOU 1987).

Nach dem Herantransport der Bodensubstanz an das Gewässer können bei ausreichendem Wasserfluss **Strukturelemente** wie Gewässerrandstreifen, Uferbankett oder Ackerrandfurche überwun-

den werden. Dabei spielt neben der Ausprägung die Orientierung der Raumstrukturen zum dominanten Transportpfad eine wichtige Rolle. Sie bestimmt, ob das Oberflächenwasser vollständig oder teilweise zurückgehalten, umgeleitet oder konzentriert wird.

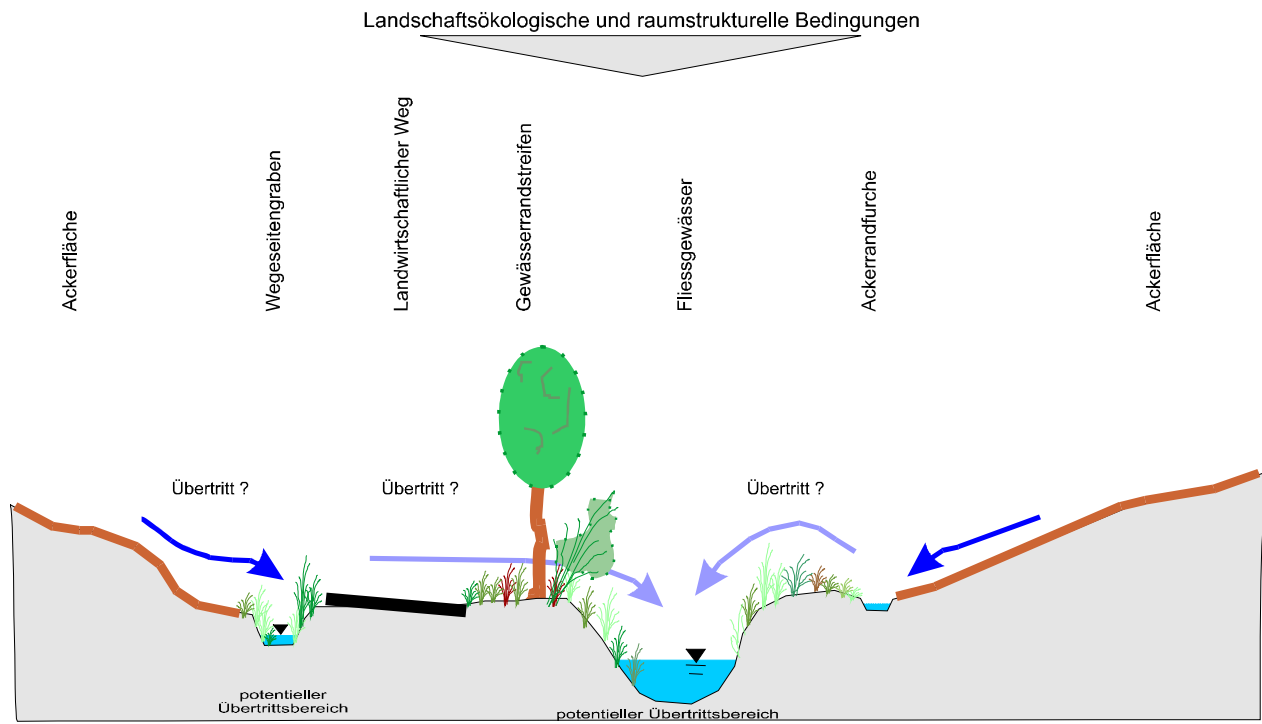


Abb. 12: Typisierter Querschnitt durch einen Übertrittsbereich

Der **Übertritt** findet in einen temporär wasserführenden landwirtschaftlichen Graben oder ein permanentes Fließgewässer statt. In Agroökosystemen sind die Puffer- und die Transformationsfunktion des Bodens durch bewusst eingesetzte Agrochemikalien überlastet. Bei stärkerem Oberflächentransport können die ins Gewässer eingetragenen Stoffe kritische Konzentrationen im Oberflächengewässer um mehrere Potenzen überschreiten (K. AUERSWALD 1992).

In einem gut transportfähigen **Graben** mit ausreichendem Gefälle, hinreichender Wasserführung und geringer Rauigkeit findet der Transport des Feinbodens bis zum nächsten Fließgewässer statt. Bei nachlassender Abflussbildung, geringem Energiegefälle oder starker Verkräutung sedimentiert das eingespülte Feinerdematerial ganz oder teilweise im Graben. Der Anbindungsgrad an Fließgewässer als eine Größe, die die Stoffeintragsgefährdung in die permanenten Fließgewässer ausdrückt, wird demnach auch von den Stofftransportbedingungen im Grabensystem mitbestimmt.

Wie kurz umrissen, beeinflussen eine Vielzahl hochgradig komplexer landschaftsökologischer Prozesse und **Wirkungszusammenhänge** die Ausprägung des Feststoffeintrags in Fließgewässersysteme. Als Folge der prozessualen Wechselwirkungen konnten die Spuren von Bodenerosion und Übertritten in den Testgebieten festgehalten werden. Anhand dieser Spuren erfolgt die Identifikation



von Fließwegen und die Abgrenzung der realen Stoffliefergebiete. Wichtige Ursache-/Wirkungsbeziehungen, die zur Ausprägung der Fließwege und der damit korrespondierenden Lieferflächen führen, können durch die Darstellung der räumlichen Verbreitung von Einflussgrößen (Spuren von Erosion und Übertritten, Raumstrukturen) und der Lieferareale selbst herausgearbeitet werden. Zur genaueren Beschreibung der Einflussprozesse und ihrer Wirkungen sind weitergehende quantitative Analysen (Berechnungen zu Bodenabtrag, Retentionspotential, Lieferflächen-größe etc.) notwendig.

## 4.2. Bodenerosion und Gewässereintrag

Die Bodenerosion in Ausmaß und Verbreitung ist eine Größe, die ein Stoffliefergebiet in seiner Ortslage sowie in seiner Bedeutung für den Feststoffeintrag in die Gewässer entscheidend bestimmt. Über die Erosionsspuren und Übertrittsbereiche lassen sich die Bereiche eines Agrarökosystems abgrenzen, die über laterale Stoffflüsse andere Ökosystemkompartimente in der Nachbarschaft (z. B. Gewässersystem) beeinträchtigen können. Aus Erosionsschadensbildern mehrerer Ereignisse kann man Rückschlüsse auf den Anbindungsgrad bestimmter Flächenbereiche eines Landschaftsausschnittes ziehen.

### 4.2.1. Räumliche Verteilung

Karte 3 und Karte 4 zeigen beispielhaft anhand des Gebietes Adenstedt die räumliche Verteilung der **Erosionsschäden** und Übertrittsbereiche für die kartierten Ereignisse.

#### Die beiden erfassten Abtragsereignisse

Während eines **Schneeschnmelzereignisses** mit zeitweisem Dauerregen im Februar 1996 schmolzen innerhalb weniger Tage ca. 50-60 mm Wasseräquivalent Schnee und liefen auf gefrorenem Boden oberflächlich ab. Ein Ereignis mit vergleichbaren Erosionsschäden tritt nach Aussagen ortskundiger Landwirte nur ca. alle 10-15 Jahre auf. Es handelt sich demnach in Bezug auf Flächenausdehnung und Abtragsmenge um ein großes Erosionsereignis, bei dem die für die regionalen Rahmenbedingungen maximale Anzahl von Übertritten und Übertrittssituationen entstand. Allerdings kam es durch schneebedingten Abflussstau und Überlauf von einigen Gräben und durch den damit verbundenen zufälligen Verlauf der Abflusswege zu einer Erhöhung des „chaotischen“, nicht vorhersagbaren Anteils der Übertritte (R. Duttmann 1999).

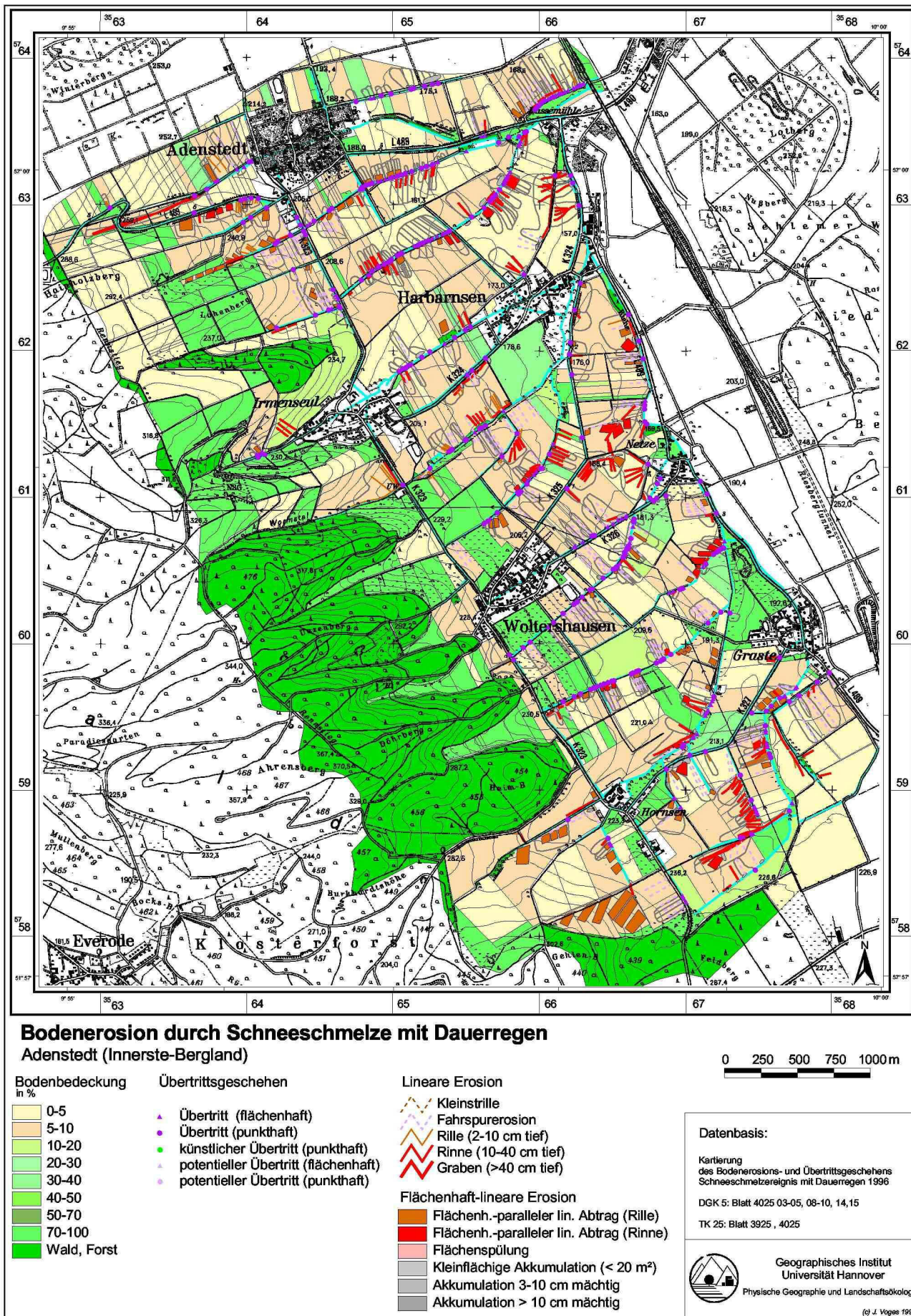
Während eines **Starkniederschlagsereignisses** im Mai 1997 fielen insgesamt 35 mm Regen mit z. T. sehr hoher Intensität in wenigen Stunden. Bei diesem Ereignis waren aufgrund der bereits sehr unterschiedlichen Bodenbedeckung nur die Zuckerrübenschläge von Erosion und Übertritten betroffen. Das Vorkommnis kann als typischer durchschnittlicher Fall eines Starkregenereignisses mit etwa jährlichem Wiederkehrintervall gelten.

### Schneesmelzereignis

Während bezüglich der Bodenerosion bei Starkregen recht genaue Kenntnisse vorliegen, ist zu Qualität und Quantität des Abflusses zur Schneeschmelze weniger bekannt. Aufgrund der Wasserübersättigung und der daraus resultierenden reduzierten Kohäsion nimmt der Sedimentgehalt im Oberflächenabfluss beim Schmelzvorgang mit abnehmender Schneebedeckung stark zu. Außerdem führt in Agrarökosystemen die geringe Bodenbedeckung über Winter zu Bodenfrost bis in große Tiefe. Damit geht im ausgehenden Winter eine gehemmte Infiltrationsfähigkeit des Bodens und eine verstärkte Abflussbildung einher (K. AUERSWALD 1992). Die Scherkräfte des abfließenden Schmelzwassers tragen aber v. a. deshalb so viel Boden ab, weil der Bodenbedeckungsgrad unabhängig von der Kultur auf allen Parzellen minimal ist.

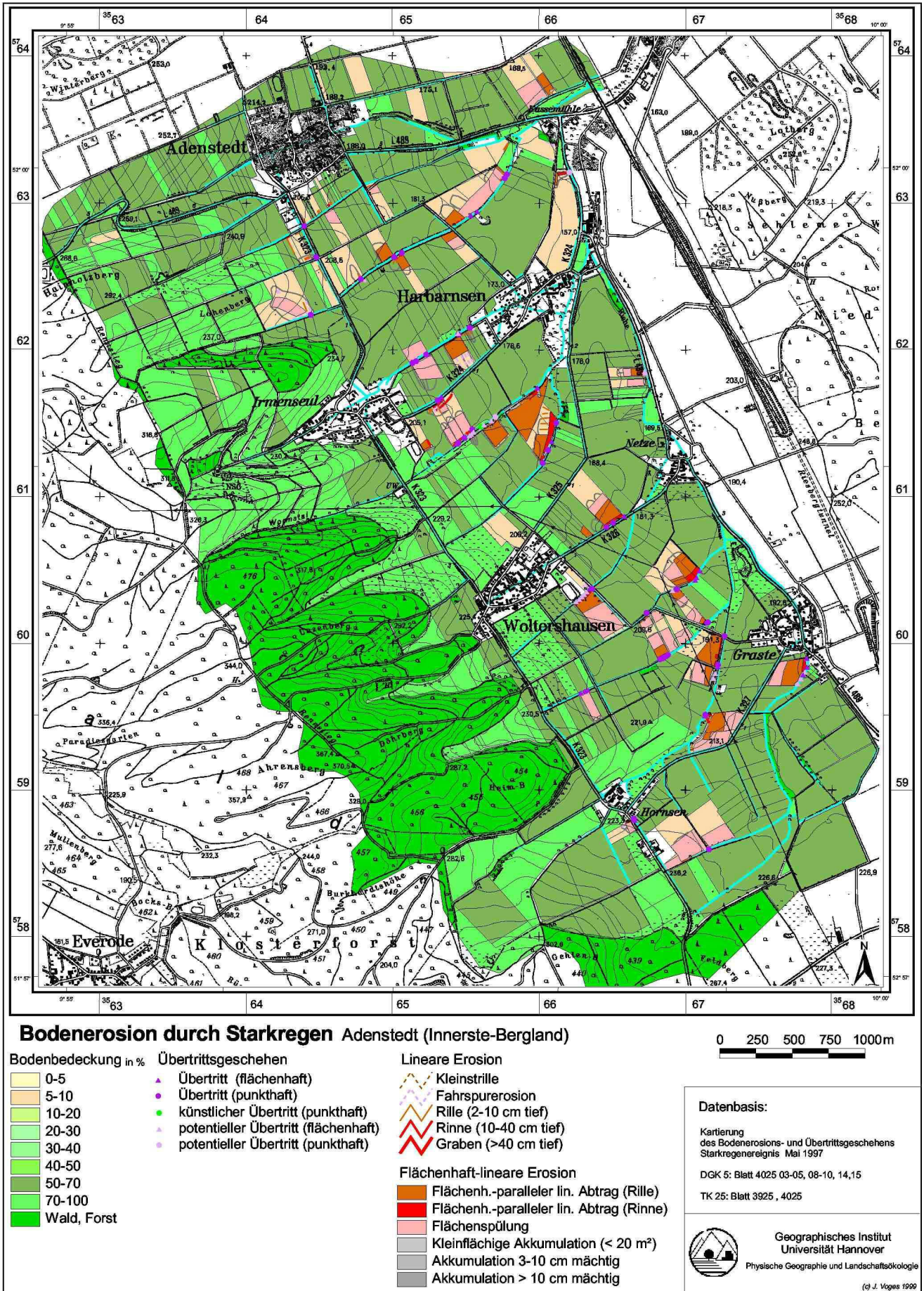
Beim **Winterereignis** (Schneesmelze) sind die **Erosionsschäden** fast über das gesamte Gebiet flächenhaft verteilt. Sie zeigen eine etwas überdurchschnittliche Häufung im Gewässer- bzw. Grabenrandbereich. Beinahe alle Ackerparzellen mit Bodenbedeckungen von 0 bis 10 % sind von Erosion betroffen. Aufgrund von Fremdwasserzufluss bilden sich auch Erosionsformen auf Schlägen mit Bedeckungen von bis zu 40 %. Auf ausgedehnten Schlägen mit größeren Hanglängen treten stärkere Erosionsschäden auf. Sofern die Bodenbedeckung keine stärkere Differenzierung innerhalb benachbarter Parzellen aufweist, können sich die erosiven Hanglängen und damit die Erosionsformen über mehrere Parzellen hinweg erstrecken. Weit verzweigte Erosionssysteme treten am Unterhang bei vielseitig konkav gewölbten Hängen auf. Insgesamt nehmen die Spuren vom Ober- über den Mittelhang hin zu, um sich am Unterhangbereich bei geringerer Hangneigung in Akkumulationszonen aufzulösen. Die Akkumulationen sind umso mächtiger je stärker die Hangneigung und damit die Transportkapazität des Oberflächenabflusses zurückgeht. Flächenhaft-paralleler linearer Abtrag entwickelt sich v. a. auf stärker geneigten Hängen in Zusammenhang mit größeren Transportstrecken. Die Ausrichtung der Erosionssysteme orientiert sich mit am Verlauf der Parzellengrenzen, d.h. der Bearbeitungsrichtung. Im Westen des Gebietes treten die Erosionsspuren aufgrund der hochanstehenden Kreidekalke mit hohen Durchlässigkeiten trotz starker Hangneigungen in ihrer Bedeutung zurück.

Die Zahl der **Übertritte** von Feinboden in das Graben- und Gewässersystem wächst mit Zunahme der Bodenerosionsspuren. Die Übertritte treten häufig im Bereich von Überfahrten zu den Ackerparzellen auf. Technogene Verdichtungen durch Feldüberfahrten und die damit verbundene geringere Porosität des Bodens kann die Infiltrabilität reduzieren und den Oberflächenabfluss fördern (C.H. ROTH 1996). Zudem ist die Retentionsfähigkeit von Stukturelementen wie Ackerrandfurche oder Uferbankett durch die Überführung mit landwirtschaftlichem Gerät eingeschränkt oder zerstört. Die Bedeutung der Übertrittsbereiche für den Feststoffeintrag nimmt mit der Größe des angeschlossenen Erosionssystems zu.



Karte 3: Bodenerosion durch Schneeschmelze mit Dauerregen, Testgebiet Adenstedt





Karte 4: Bodenerosion durch Starkregen, Testgebiet Adenstedt

### Starkregenereignis

Beim Ereignis durch Starkregen erfolgte der Bodenabtrag ausschließlich von gering bedeckten Zuckerrübenparzellen (Karte 4). Auf den Getreideschlägen reicht aufgrund dichter **Bodenbedeckung** von über 50 % und im Maximum 70 % die Erosivität des Gewitterniederschlages nicht aus, um Bodenmaterial zu verlagern. Innerhalb der Getreideschläge erreicht wegen großer Interzeptionsverluste ein Teil des Niederschlages den Boden nicht. Die hohe Bodenrauhigkeit bremst den oberflächlichen Abflussanteil zudem.

Auf den Zuckerrübenparzellen treten Flächenspülungen sehr verbreitet auf. Das **Ausmaß der Erosion** wächst vom Ober- zum Unterhang. Der Bodenabtrag vollzieht sich im Unterhangbereich bis zu recht großen Eindringtiefen (30 cm). Vereinzelt entstehen auch Gräben (>40 cm tief), so dass insgesamt auf den Rübenschlägen mit recht bedeutenden Abtragsraten (10-20 t/ha) zu rechnen ist.

**Übertritte** entstehen in sehr viel geringerer Anzahl als beim Schneeschmelzereignis. Die Eintragsbereiche liegen vornehmlich am Parzellenrand zu benachbarten Getreideschlägen mit dichter Bodenbedeckung. Bisweilen kommen sog. potentielle Übertritte vor, bei denen das transportierte Bodenmaterial im Gewässerrandbereich, 1-2 m vor der Wasserlinie oder Gewässersohle liegen bleibt. Durch das fortgeschrittene Entwicklungsstadium der Vegetationsdecke im Bereich des unbearbeiteten Ufersaumes ist die Bodenrauhigkeit sowie die Bewuchsdichte und damit die Retentionskapazität für Feststoffe am Gewässerrand gegenüber den Ackerparzellen erhöht. Unter Abnahme der Transportkapazität des Oberflächenabflusses akkumulieren die mitgeführten Feststoffe im Vegetationsgürtel.

#### 4.2.2. Abschätzung der Eintragsmenge

Aus den kartierten Erosions- und Akkumulationsformen wurde überschlägig Bodenabtrag und -auftrag berechnet, um daraus die Feststoffeinträge ins Gewässer abzuschätzen. Abtrag und Akkumulation werden jeweils für das Liefergebiet eines Übertrittsbereiches bilanziert. Für jede Lieferfläche errechnet sich daraus die Nettoerosion. Diese Nettoabtragsmenge steht am zugehörigen Übertrittsbereich für den Eintrag ins Graben- und Fließgewässernetz zur Verfügung.

Wegen der Gesamtgröße der Testgebiete konnten nicht für jede Einzelform die Abtragsvolumina exakt im Feld bestimmt werden. Die **Abtragsschätzung** beruht auf vereinfachenden **Annahmen**:

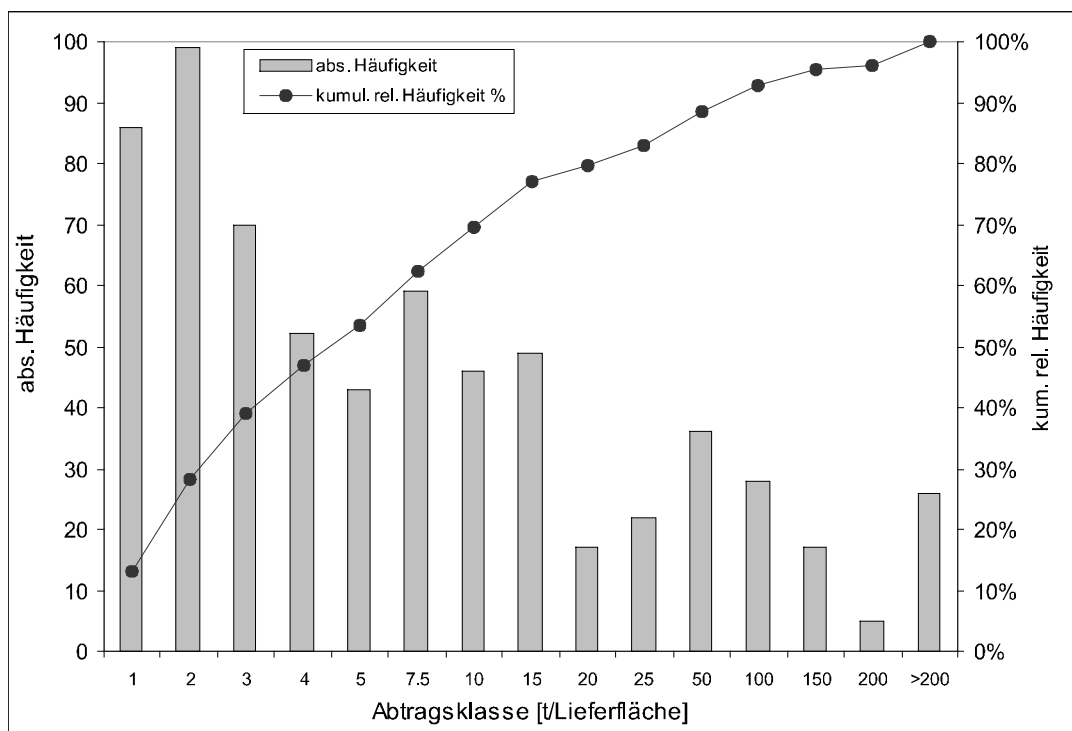
- Die Längen- und Flächenausdehnung von Erosionsformen ist über die Digitalisierung ins GIS ausreichend genau zu erfassen.
- Die Abtragstiefe ist konstant über die gesamte Länge der Erosionsform. Sie beträgt im Mittel:
  - Rille: 6 cm
  - Rinne: 25 cm
  - Graben: 60 cm

- Bei flächenhaft-linearer Erosion weisen 30 % der digitalisierten Fläche Abtragsspuren auf
- Bodenablagerungen weisen durchschnittlich folgende Mächtigkeiten auf:
 

Akkumulationsform	mittlere Mächtigkeit
- <3 cm:	2 cm
- 3-10 cm:	6,5 cm
- >10 cm:	15 cm
- Flächenspülungen haben eine Abtragstiefe von 0,1 cm.

Die Berechnungsergebnisse sind demnach nur als **Schätzungen** zu verstehen, die Größenordnungen angeben und Relativbetrachtungen ermöglichen. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass nur diejenigen Erosions- und Akkumulationszonen in die Berechnung mit einfließen, die sich innerhalb der realen Liefergebiete befinden und demnach über Stofftransportpfade mit einem Gewässer verbunden sind.

Abb. 13 zeigt exemplarisch für das Schneeschmelzereignis die **Häufigkeitsverteilung der Nettoerosion** als Gesamtabtrag in t pro Lieferareal. Die Zahlen drücken aus, welche Feststoffmenge jeweils an dem Übertrittspunkt des Lieferareals für den Eintrag ins Gewässernetz zur Verfügung steht. Nach dem Eintrag in temporär wasserführende Gräben mit verminderter Stofftransportfähigkeit findet zumindest eine teilweise Zwischenakkumulation statt.

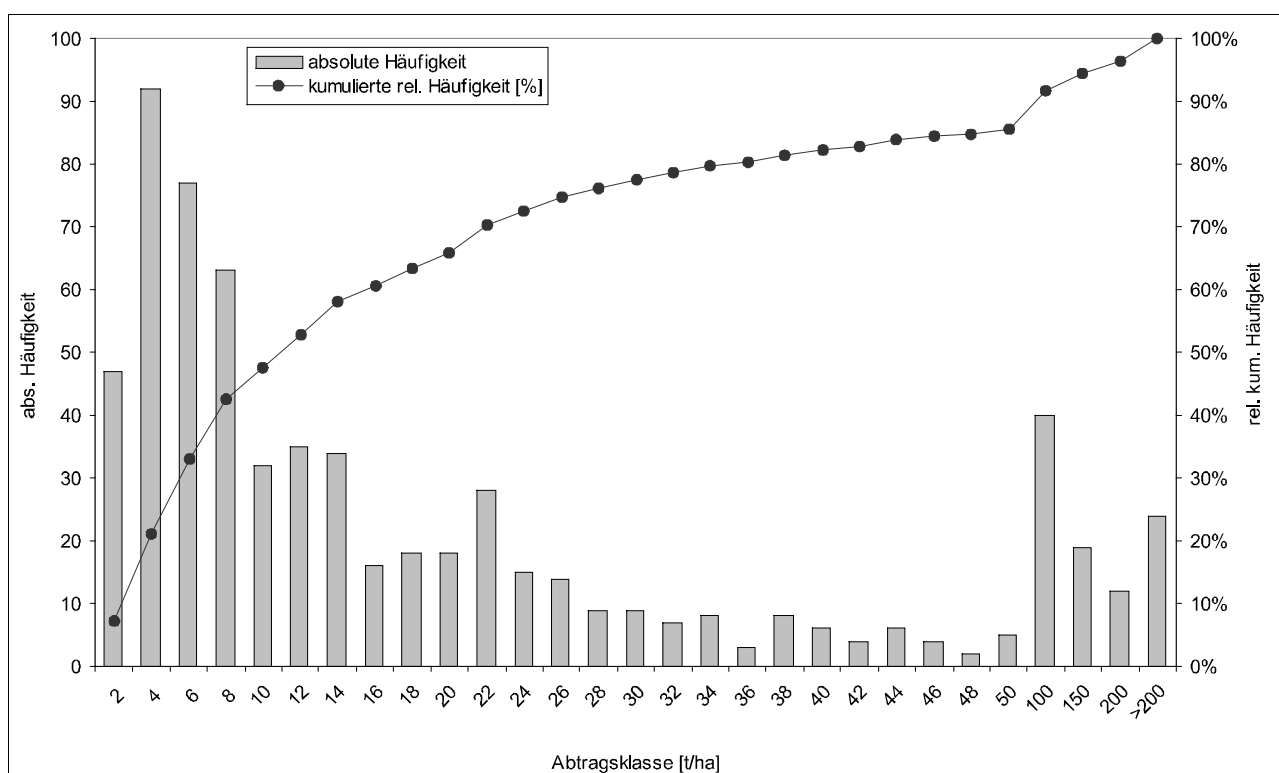


**Abb. 13: Häufigkeiten der geschätzten Eintragsmengen (Nettoabträge) aus den Lieferflächen aller Testgebiete in t pro Liefergebiet (Schneesmelzereignis)**

Die **Gesamtabträge** pro Lieferfläche rangieren im Intervall zwischen einer und mehr als 200 t. Zu gut 60 % liegt die an den Übertritt angelieferte Feststoffmenge unterhalb von 7,5 t. Der Hauptanteil (80 %) der Lieferareale weist Nettoabträge von bis zu 20 t auf. Nur ca. 10 % aller angebundnen Gebiete tragen jeweils mehr als 50 t in das Gewässersystem ein. Diese 10 % der Übertritte verursachen allerdings rund 75 % des gesamten Eintrages in das Graben- und Gewässersystem während des Schneeschmelzereignis. Sie haben einen Anteil an der Gesamtfläche aller Liefergebiete von ca. 21 %.

Für das **Starkregenereignis** ergibt die **Abschätzung** ähnliche Größenordnungen. 75 % des gesamten Stoffeintrages resultieren aus Nettoabträgen von jeweils  $\geq 50$  t pro Lieferareal. Das entspricht knapp 20 % bezogen auf die Gesamtzahl der Übertritte. Die Gebiete haben einen Anteil an der gesamten angebundnen Fläche von rund 34 %. Beim Starkregenereignis sind also insgesamt weniger Gebiete angebundnen; sofern allerdings Einträge stattfinden, liegen sie vergleichsweise hoch.

Die Angabe von **Abtragsraten** erfolgt in der Literatur gemeinhin **bezogen auf eine Flächeneinheit** in t/ha. Die Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Abträge in den Liefergebieten beim Schneeschmelzereignis verdeutlicht Abb. 14.



**Abb. 14: Häufigkeiten der geschätzten Nettoabträge für die Liefergebiete aller Testgebiete in t/ha (Schneeschmelzereignis)**



Die linksschiefe Verteilung zeigt eine stetige Abnahme der Häufigkeiten mit Zunahme der Abtragsraten. In ca. 50 % der angebundenen Gebiete erreichen die Abträge nicht mehr als 20 t/ha. Am häufigsten liegen sie zwischen 4 und 8 t/ha. Nur etwa 20 % der Übertritte weisen ein Liefergebiet mit Abträgen über 50 t/ha auf. Solche Übertritte treten also selten auf, leisten aber einen entscheidenden Beitrag zum Feststoffeintrag in die Fließgewässer.

Demnach begrenzt sich das Problem des Feststoffeintrages in die Gewässer auf sehr wenige hochgradig angebundene Gebiete mit überdurchschnittlicher Größe, Erosionsneigung und Feststofftransportfähigkeit. **Nur ein Fünftel bis ein Drittel der kartierten Liefergebiete liefert den Großteil (75 %) der gesamten eingetragenen Stoffmenge an die Gräben und Fließgewässer.**

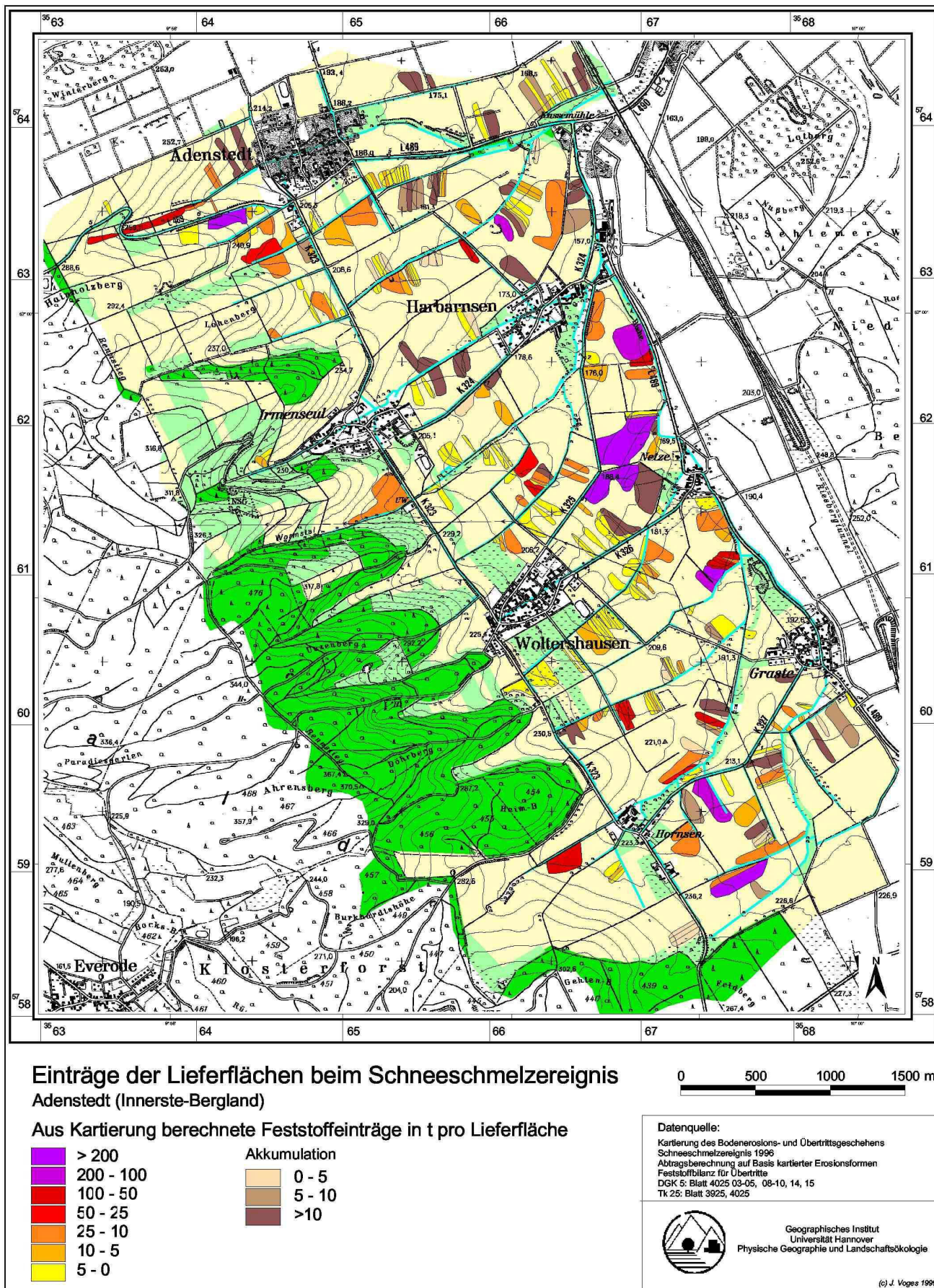
Die meisten Hangeinzugsgebiete der Übertritte (80 %) weisen Stoffeinträge von bis zu 20 t/Lieferfläche auf. Die Abträge liegen innerhalb der Liefergebiete in 80 % der Übertrittsfälle unterhalb von 50 t/ha.

### Räumliche Verteilung

Die **absoluten Abträge** pro Liefergebiet für die Wintererosion dokumentiert Karte 5. In kleinen bis mittleren Hangeinzugsgebieten überwiegen Eintragsraten von 5 bis 25 t pro Lieferareal. In ausgedehnten Arealen sind Nettoabträge von 200 t und mehr möglich. Solche Gebiete befinden sich tendenziell im unteren Teil des Einzugsgebietes. Wegen des gefrorenen Untergrundes griff die Tiefenerosion nicht so effektiv an, was die Abträge begrenzte. Insgesamt nimmt die Menge eingetragener Feststoffe mit der Flächengröße des angebundenen Areales zu. Hohe Eintragsraten entstehen bei Übertritten am Ende ausgeprägter Tiefenlinien.

Zufällig im Gelände verstreut treten für einige Liefergebiete in der Bilanz **positive Nettoabträge**, d. h. Akkumulationszonen, auf. Das resultiert einerseits aus der lokalen Überschätzung der Sedimentmächtigkeiten der Akkumulationen sowie aus der Unterschätzung der Abträge. Andererseits resultieren mitkartierte Akkumulationen z. T. aus Überschwemmungen. Verschneite, zeitweise wasserführende Gräben wiesen durch vereiste Durchlässe stellenweise ein vermindertes Durchflussvermögen auf. Transportierte Schwebstoffe wurden durch Überschwemmung herausgespült und im Gewässerrandbereich wiederum abgelagert. Dieses Sediment stammt also nicht aus dem Liefergebiet mit seinen dazugehörigen Abtragsmengen selbst. Per Saldo ergeben sich so positive Werte.





Karte 5: Sedimenteinträge aus den Lieferflächen beim Schneeschmelzereignis, Gebiet Adenstedt

Trotz der genannten Einschränkungen weisen die **Abtragsbilanzen** einen realistischen Wertebereich auf. R. DUTTMANN (1999) ermittelt im Untersuchungsraum für dasselbe Ereignis Bodenabträge nach der Methode von W. ROHR U. A. (1990) im Feld. Sie sind mit den hier berechneten Erosionsbeträgen vergleichbar. In Tab. 6 sind die mittleren Nettoeinträge für verschiedene Bezugsebenen dargestellt. Auf den angebundenen Flächen erodieren durchschnittlich 23 bzw. 40 t. Im Mittel werden beim **Schneeschnmelzereignis 4,5 t/ha** bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche erodiert. Die Werte liegen nahe bei den Werten, die M. BRAUN U. A. (1991) und V. PRASUHN & M. BRAUN (1994) als Langfristwerte für Abschätzungen des diffusen Stoffeintrags in Gewässer verwenden. Die Höhe der langjährigen mittleren Abträge ist mit denen eines Extremereignisses, wie der Schneeschmelzerosion, mit einer Jährlichkeit von 10 vergleichbar (J. SCHMIDT 1997). Da das Ausmaß der Schäden beim **Starkniederschlag** geringer ist, wurde lediglich knapp die Hälfte (**2,3 t/ha**) erodiert.

	Erosionsereignis	
	Schneeschnmelze	Starkniederschlag
Gesamtabtrag auf Lieferflächen [t/Lieferfläche]	15 420	6 064
Abtrag bez. auf Lieferflächen [t/ha]	23	40
Abtrag bez. auf landwirt. Nutzfläche [t/ha]	4,5	2,3
Abtrag bez. auf Gesamtfläche der Testgebiete [t/ha]	2,9	1,6
Mittlere Akkumulationsrate innerhalb der Lieferflächen [%]	25	

**Tab. 6: Feststoffeinträge aus angebundenen Flächen berechnet aus Erosionsschadenskartierungen (Mittel über alle Testgebiete)**

Die berechneten Mengen werden Netto in den Liefergebieten erodiert und stehen am Übertrittspunkt für den Gewässereintrag zur Verfügung. Nach dem Eintrag in das Gewässersystem kann eine zumindest vorübergehende Sedimentation in Gräben mit geringer Transportkapazität stattfinden.

**Innerhalb der Stoffliefergebiete** werden nach dem Abtragsvorgang nur **25 % zwischengelagert**, d. h. über den Übertrittsbereich der sogenannten Lieferflächen gelangt 75 % der erodierten Feststoffmenge auch tatsächlich in die Fließgewässer und Gräben. Der Akkumulationsanteil der tatsächlich liefernden Flächenbereiche, die ca. 10 % der Gesamtflächen ausmachen, liegt weit unter den Angaben für ganze Wassereinzugsgebiete in der Literatur. TH. MOSIMANN U. A. (1991) geben 80-90 % an, in einer Aufstellung von U. BRAUN U. A. (1991) liegt der Wertebereich für die Ablagerung erodierten Bodenmaterials zwischen 40-80 %. Über den Sedimentlieferungsgrad (sediment delivery ratio), der von der Einzugsgebietsgröße abhängt, errechnet sich für die hier vorliegenden Einzugsgebiete < 5 km<sup>2</sup> Ausdehnung ein Sedimentierungsanteil von ca. 80 % (s. K. AUERSWALD 1989b).

Stoffeinträge sind nur in Gebieten mit erhöhter Abtragsgefährdung, hinreichendem Stofftransportvermögen und besonders exponierter Lage zum Gewässer möglich. Da die erfassten realen Stofflieferareale zudem nur eine begrenzte Flächenausdehnung besitzen, erscheint die Diskrepanz der

ermittelten **Sedimentationsrate** zu den Literaturwerten nicht als Widerspruch. Die Werte in der Literatur sind am Gebietsauslass ermittelt und gelten für Flusseinzugsgebiete. Sie beziehen offsite-Schäden durch Stoffeinträge in das Grabensystem nicht mit ein. Nach dem Eintrag kann ein nicht geringer Feststoffanteil und die daran gebundenen Agrochemikalien im Grabensystem sedimentieren (offsite-Schaden). Die Stoffe erreichen die permanenten Fließgewässer demnach nicht. Das Sediment verbleibt in den Gräben, die deshalb ca. alle 10 Jahre ausgehoben werden müssen.

### Fazit

Der Vergleich beider Ereignisse zeigt die **zeitliche Dynamik des Gewässeranbindungsgrades**. Das Auftreten und Ausmaß von Erosions- und Übertrittsgeschehen hängt stark vom Zeitpunkt des Ereignisses im Jahresverlauf ab. Das Raumverteilungsmuster der Ackernutzung, die aktuellen Kulturfrüchte auf den Parzellen und ihr Entwicklungsstand sowie die Bedingungen im Uferrandbereich unterscheiden sich von Jahr zu Jahr bzw. innerhalb des Jahresverlaufes voneinander. Parzellen, die in einem Jahr Feststoffe an ein Gewässer liefern, sind im nächsten Jahr nicht angebunden. Die Bodenabtragsmenge einzelner Liefergebiete variiert in weiten Grenzen. Insgesamt unterliegt der Feststoffeintrag in die Gewässer einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität. Die Ermittlung der Anbindung allein auf Grundlage des Kartierbogens (Abb. 4) brächte für beide Ereignisse die Identifikation unterschiedlicher Risikoflächen mit wenigen räumlichen Überschneidungen. Es ist also nicht sinnvoll, den Anbindungsgrad ausschließlich aus spezifischen Einzelereignissen abzuleiten.

Zwar vollzieht sich der gesamte Stoffeintrag über viele Eintragsstellen, **für die überwiegende Stoffmenge** (75 %) im Gewässersystem sind aber **nur wenige hochgradig angebundene Gebiete** (20-35 % der Lieferflächen) **verantwortlich**. Um modellgestützte Aussagen zum Anbindungsgrad machen zu können, müssen die Erosionsgefährdung, die Bedingungen für den Stofftransport und die Entfernung des fokussierten Areals zum Gewässer in die Simulation einbezogen werden.

Als **Fazit** für die Modellbildung lässt sich folgendes festhalten. Es reicht nicht aus zu ermitteln, ob eine Fläche angebunden ist oder nicht. Auch der **Grad der Anbindung**, d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit der Stoffe ins Gewässernetz eingetragen werden können, muss ein zentrales Ergebnis der Modellprognose sein.

Ein mittelmaßstäbiges **Modell** zur Bestimmung der Gewässeranbindung muss neben wenigen dynamischen Größen v. a. auch statische bzw. **integrative Parameter** beinhalten. Diese müssen anbindungsrelevante strukturelle Gegebenheiten der räumlichen Vielfalt widerspiegeln. So sind langfristig geltende Modellaussagen zur Wahrscheinlichkeit des Gewässereintrages möglich.

Prinzipiell erweist sich der **Problemlösungsansatz** im Sinne des Konzeptes „**Gewässeranbindung**“ als vielversprechend. Die Selektion eintragliefernder Flächen und die Bestimmung ihrer Relevanz ermöglichen innerhalb eines Flussmanagementsystems eine erhebliche Effizienzsteigerung für die Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Feststoffreduktion aus diffusen Quellen. Dabei werden Aspekte des Bodenschutzes und des Gewässerschutzes berücksichtigt. Es wird möglich die Areale herauszufiltern, die auch tatsächlich für die stoffliche Gewässerbelastung relevant sind. Hier muss ein Einzugsgebietsmanagement ansetzen und durch Abkoppelungsmaßnahmen hochgradig angebundener Gebiete den Stoffeintrag wirksam reduzieren.

Durch modellgestützte Abschätzung der Abtragsraten können die eingetragenen Sedimentmengen für die ausgesonderten Flächenbereiche quantifiziert werden.

### 4.3. Boden

**Beeinflussende Bodenparameter** von Erosion und Oberflächentransport sind v. a. Bodenart, Bodenfeuchte, Humusgehalt und Bodengefüge bzw. Aggregatstabilität. Ihr Einfluss auf die Stoffeintragsgefährdung, d. h. den Anbindungsgrad ist daher zu prüfen.

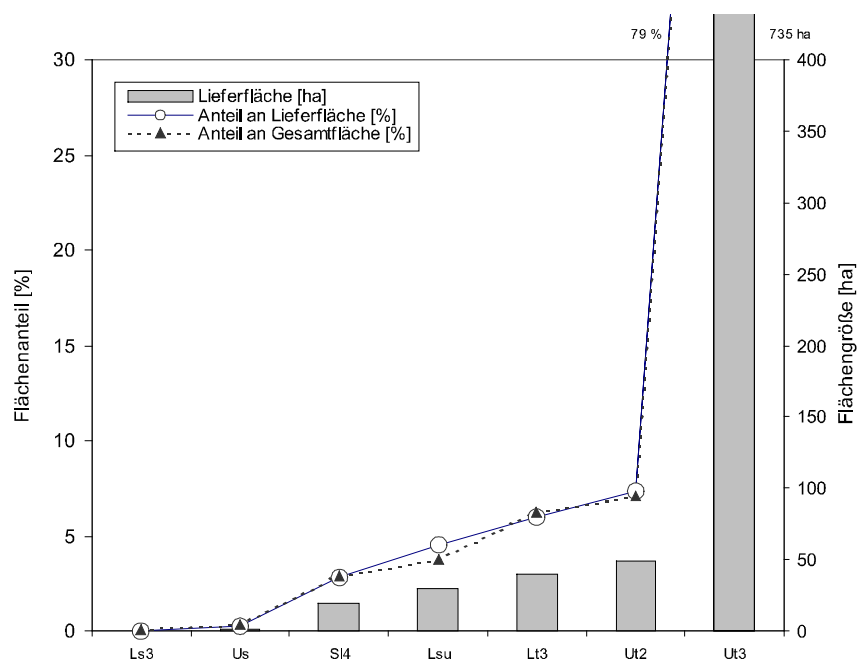
Im mittleren Maßstab setzt die begrenzte Datenverfügbarkeit der Bestimmung dieser Parameter enge Grenzen. Die **Bodenfeuchte** ist für diese Maßstabsebene nur bedingt ableitbar (s. R. DUTTMANN 1999, I.D. MOORE U.A. 1993). **Aggregierung** und **Gefügestabilität** des Bodens sind flächendeckend nicht zu ermitteln. Der **Humusgehalt** liegt auf den für den Gewässereintrag relevanten Ackerflächen auf recht einheitlichem Niveau, so dass kein erheblicher Einfluss auf die Anbindung festzustellen ist.

Die **Korngrößenverteilung** bezeichnet eine Regelgröße der Bodenerodibilität. Sie gilt als ein zentraler Parameter zur Bestimmung der Erodierbarkeit des Bodens in vielen Bodenerosionsmodellen (s. K. AUERSWALD & U. SCHWERTMANN 1988, R. L. BINGNER 1990, H.-R. BORK 1991, H.-R. BORK & A. SCHRÖDER 1996) Die Bodenart ist der wichtigste pedologische Parameter zur Ermittlung des K-Faktors (A. CAPELLE & R. LÜDERS 1985). Sie liegt in der Bodenkarte (BÜK 50) flächendeckend vor.

Stark erodierbare Partikel tragen in stärkerem Maße zum Gewässereintrag bei. Böden mit mittlerer Korngröße im Schluffbereich müssten aufgrund ihrer höheren Erodierbarkeit innerhalb der realen Liefergebiete einen größeren Flächenanteil aufweisen als im Testgebietsdurchschnitt (Abb. 15).

Die Gesamtgröße des angebundeneren Raumes wächst von groben zu feinen Korngrößen deutlich. Lehmig-sandige und lehmig-tonige Böden existieren in eintragenden Bereichen häufiger als schluffig-tonige Substrate. Der relative Flächenanteil der verschiedenen Bodenarten in Liefer- bzw. Testgebieten zeigt kaum Unterschiede.





**Abb. 15: Abhängigkeit der Gesamtflächengröße aller erfassten Liefergebiete von der Bodenart (BÜK 50); Prozentanteile der Bodenarten an den Lieferflächen bzw. an der Testgebietsfläche (Schneeschemelereignis)**

### Fazit

Der Vergleich der relativen prozentualen Anteile der unterschiedlichen **Bodenarten** an den Lieferflächen bzw. am gesamten Testgebiet ergibt **keine signifikanten Unterschiede zwischen Liefer- und Testgebieten**. Die Ursache für Unterschiede der absoluten Flächengrößen liegt in der bevorzugten Ackernutzung auf lößreichen Standorten (Ut2-Ut3). In der Bodenartenverteilung innerhalb der erfassten Lieferareale spiegelt sich lediglich die Bodenartenverteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wider. Unter Ackernutzung stehen vornehmlich Böden aus stark tonigem Schluff. Da **im mesoscale kein Einfluss der Bodenart auf die Flächenanbindung** nachweisbar ist, ist sie im Modellkonzept als Einzelgröße nicht speziell zu berücksichtigen. Die Körnung geht allerdings in Anbindungsgrößen wie die Bodenerosion und die Stofftransportkapazität ein.

### 4.4. Raumstrukturen

Als **lineare Raumstrukturelemente** (lineare Raumstrukturen) werden künstliche linienhafte topographische Elemente im Landschaftsraum bezeichnet. Es lassen sich unterscheiden: Wege und Straßen, Gewässerrandstreifen, Uferbankette, Ackerrandfurchen. Als **flächenhafte Struktur** wirken Bearbeitungsspuren auf allen Parzellen.

Raumstrukturen überprägen die Oberflächenformung und dadurch den Verlauf von Abflussbahnen (s. B. LUDWIG u.A. 1995). Die Einflussstärke auf den Oberflächenabfluss korrespondiert dabei mit

der Stärke der Veränderung auf der Bodenoberfläche. In Zusammenhang mit offsite-Schäden sehen K. AUERSWALD & U. SCHWERTMANN (1990) Forschungsbedarf hinsichtlich der Wirkung von Strukturelementen der Landschaft auf die Stoffverlagerung.

Der Zustand der Landoberflächen stellt einen wesentlichen Bestandteil für die Modellierung der Abflusentstehung dar. **Kleinräumige Oberflächenstrukturen** verursachen stark nicht lineare Effekte für die Abflussbildung. In der neueren Literatur werden diese als wesentliches Problem bei der Parametrisierung des Landoberflächenzustandes bewertet. (A. BRONSTERT U. A. 1998). Obwohl die abflussbeeinflussende Wirkung von Raumstrukturen prinzipiell seit langem bekannt ist (BRONSTERT U. A. 1995, FRIELINGHAUS U. A. 1994, D. BRIESE & CH. ERPENBECK 1986, F. HORLACHER 1985, D. BRIESE 1984), konzentriert sich die Diskussion um die quantitative Wirksamkeit von Raumstrukturen bei Stoffeinträgen auf die zahlenmäßig unbedeutenden Uferstreifen (BACH U. A. 1997, BACH U. A. 1994, FREDE U. A. 1994, K. AUERSWALD & J. HAIDER 1992). Umfassende Konzepte zur Integration von Raumstrukturelementen in die Modellierung des oberflächlichen Abflusses und Stofftransportes fehlen bis heute (s. B. LUDWIG U.A. 1995).

Je nach Zusammenwirken der abflussbeeinflussenden Faktoren im Wirkungsgefüge Relief/Topographie entfalten die Raumstrukturen **abflussfördernde** oder **abflusshemmende Effekte** (z. B. Orientierung zum Transportpfad, Lage im Hangeinzugsgebiet, s. Abb. 26, S. 102). Die Berücksichtigung von abflussbeeinflussenden Raumstrukturelementen ermöglicht demnach Verbesserungen bei der Abbildung oberflächlicher Abflussvorgänge.

Auf der Datengrundlage von Raumstrukturkartierungen ist der Einfluss der **mikroskaligen Strukturelemente** Ackerrandfurche, Gewässerrandstreifen, Uferbankett und Bearbeitungsrichtung auf den Flächenanbindungsgrad zu analysieren. Auf **mesoskaliger Betrachtungsebene** wird der Effekt von Straßen und landwirtschaftlichen Wegen untersucht. Weiterhin ist zu prüfen, auf welche Weise sich bedeutende Raumstrukturelemente in das mittelmaßstäbige Modell integrieren lassen.

#### 4.4.1. Raumstrukturelemente als Einflussfaktoren der Fließwege

##### 4.4.1.1. Raumstrukturelemente im microscale

###### Wirkung linearer Raumstrukturen

Die **Auswirkung der linearen Raumstrukturelemente auf Oberflächenabfluss und Anbindungsgrad** kann nur qualitativ beschrieben werden, da keine Feldmessungen vorliegen. Der Effekt kann *nicht generell* für verschiedene Raumstrukturelemente angegeben werden. Vielmehr hängt er von Wechselwirkungen landschaftsprägender Faktoren mit der Struktur ab. Mikroskalig im Gelände erfassbare Größen, die die Wirkung der Raumstrukturelemente auf den Oberflächenabfluss bestimmen, sind:

- Lage im Reliefformengefüge
- Orientierung der Struktur zum Stofftransportpfad (quer, schräg, parallel)
- Raumstrukturelemente (Gewässerrandstreifen, Uferbankett, Ackerrandfurche)
- Raumstrukturtyp mit Maßen (Höhe, Tiefe, Breite)
- gegebenenfalls Bewuchsdichte und –art (Gräser, Gehölz).

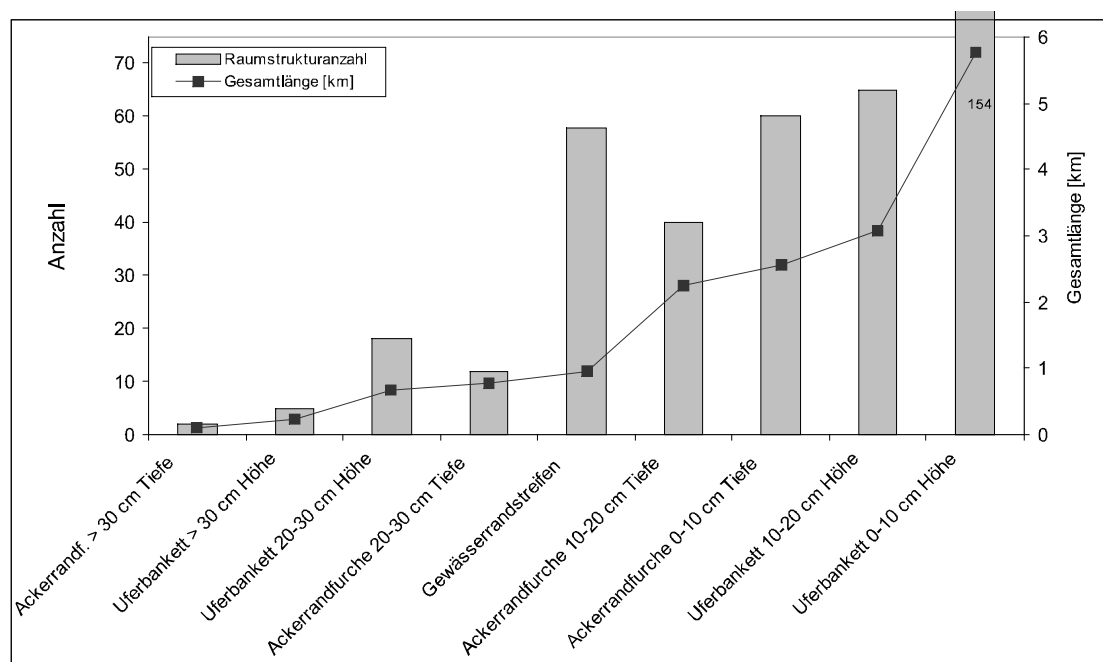
Die Häufigkeitsverteilung der Raumstrukturelemente in den Testgebieten ist in Abb. 16 dargestellt. Die größte **Gesamtlänge** aller **Strukturen** weisen Uferbankette am Gewässerrand mit einer Höhe von 10-20 cm auf. Es folgen Ackerrandfurchen mit einer Tiefe von 10-20 cm. **Uferbankette** finden sich am häufigsten in den Liefergebieten wieder und entfalten ihre Wirkung auf den Oberflächenabfluss am stärksten. Das zahlreiche Auftreten der Strukturen innerhalb der kartierten Einzugsgebiete der Übertritte deutet darauf hin, dass sie die Konzentration des Oberflächenabflusses überwiegend fördern. Folglich entwickelt sich eine größere Transportkapazität, so dass die Feststoffe eher bis in das Gewässer befördert werden.

Die kartierten linienhaften Strukturen Gewässerrandstreifen, Uferbankett und Ackerrandfurche besitzen eine **Gesamtlänge** von 87 km. Dies entspricht ca. 50 % der Gewässerlänge oder einer Strukturichte von 2,3 km/km<sup>2</sup>.

Die **Bedeutung** abflussfördernder Raumstrukturelemente **für Übertritte** ist umso geringer, je größer die Werte der **Reliefparameter** Hanglänge, Hangneigung und Einzugsgebietsgröße sind. Die abflusskanalisierenden Strukturen sind unter extremen Reliefbedingungen für den Stoffeintrag in Gewässer überhaupt nicht mehr notwendig, da der Stofftransport und –übertritt auch ohne abflusssammelnde Wirkung möglich wird. M. PAKOSCH (1996) gibt an, dass bei Hangneigungen < 6 % und Hanglängen ≤ 200 m in ca. 70 % der Übertrittsfälle abflussfördernde Strukturen mitwirken bzw. notwendig sind, während sie bei Hangneigungen > 6 % und Hanglängen > 200 m nur noch in etwa 40 % der Fälle eine Rolle spielen. Abflusshemmende Raumstrukturelemente treten bei geringer Hanglänge und –neigung seltener bei einem Übertritt auf. Sie vermindern die Abflussgeschwindigkeit und verhindern so den Weitertransport der Stoffe bis zum Gewässer. Wenn Hanglänge, Hangneigung und Einzugsgebietsgröße weiter zunehmen, nimmt der Einfluss abflusshemmender Strukturen insgesamt ab. Sofern die Rückhaltefähigkeit der Strukturelemente erschöpft ist, können sie nahezu ungehindert überflossen werden. Solche Schwellenwerte sind nicht definitiv bestimmbar. Sie lassen sich aber in Abhängigkeit vom Aufnahmevermögen der Struktur sowie vom zuströmenden Oberflächenabfluss abschätzen (J. BIERBAUM 2000).

**Gewässerrandstreifen** haben von ihrer Streckenlänge her keine Bedeutung. Kürzere Abschnitte sind relativ häufig in Lieferflächen zu finden, können in diesen Fällen den Übertritt aber nicht verhindern. Daher entfalten sie insgesamt nur eine **geringe Retentionswirkung** auf die transportierten

Stoffe. Dabei ist zu bemerken, dass als Gewässerrandstreifen auch Streifen mit dichtem Gräser- oder Röhrichtbewuchs von ein bis wenigen Metern Breite kartiert wurden. Gewässerrandstreifen mit Strauch- und Baumvegetation und mehreren Metern Breite kommen nur in Einzelfällen in den Testgebieten vor (< 15 %). Für die Frage des Gewässereintrags haben sie daher praktisch keine Bedeutung.



**Abb. 16: Länge und Anzahl linearer Raumstrukturelemente im Gewässerrandbereich der Liefergebiete (Schneesmelzereignis)**

In der Literatur wird z.T. bei Gewässerrandzonen zur Minimierung von erosionsbürtigen Stoffen ein starker Effekt beschrieben (M. BOHL 1986, J. KARL & M. POTZELT 1992). Allein durch die Abstandswirkung verringern Uferstreifen mit mindestens 10 m Breite die Stoffeinträge. Die gepufferten Stoffe können sich im Streifen anreichern und durch Überschwemmungen oder Sickerwasser längerfristig in die Oberflächengewässer gelangen (DVWK 1997). Nach neueren Untersuchungen ist eine nennenswerte **Stoffretention in Uferstreifen** nur messbar, wenn (M. BACH U. A. 1997):

- der Abfluss flächenhaft einströmt
- eine wesentliche Abflussreduzierung im Uferstreifen stattfindet (hoher Grobporenanteil, starke Rauigkeit durch dichten Bewuchs).

Solche Bedingungen existieren nur bei einem minimalen Anteil der Uferstreifen. Die tatsächliche Rückhaltefähigkeit der Randstreifen hängt wesentlich davon ab, ob der Zeitpunkt des Eintragsereignisses vor oder während der Hauptvegetationsperiode liegt. **Bei** dem häufig auftretenden gebündelten Einströmen und **punktuell**em Übertritt des Oberflächenwassers erfolgt im Gewässerrandstreifen gar **kein Rückhalt von Stoffen** und Wasser (M. BACH U. A. 1997).

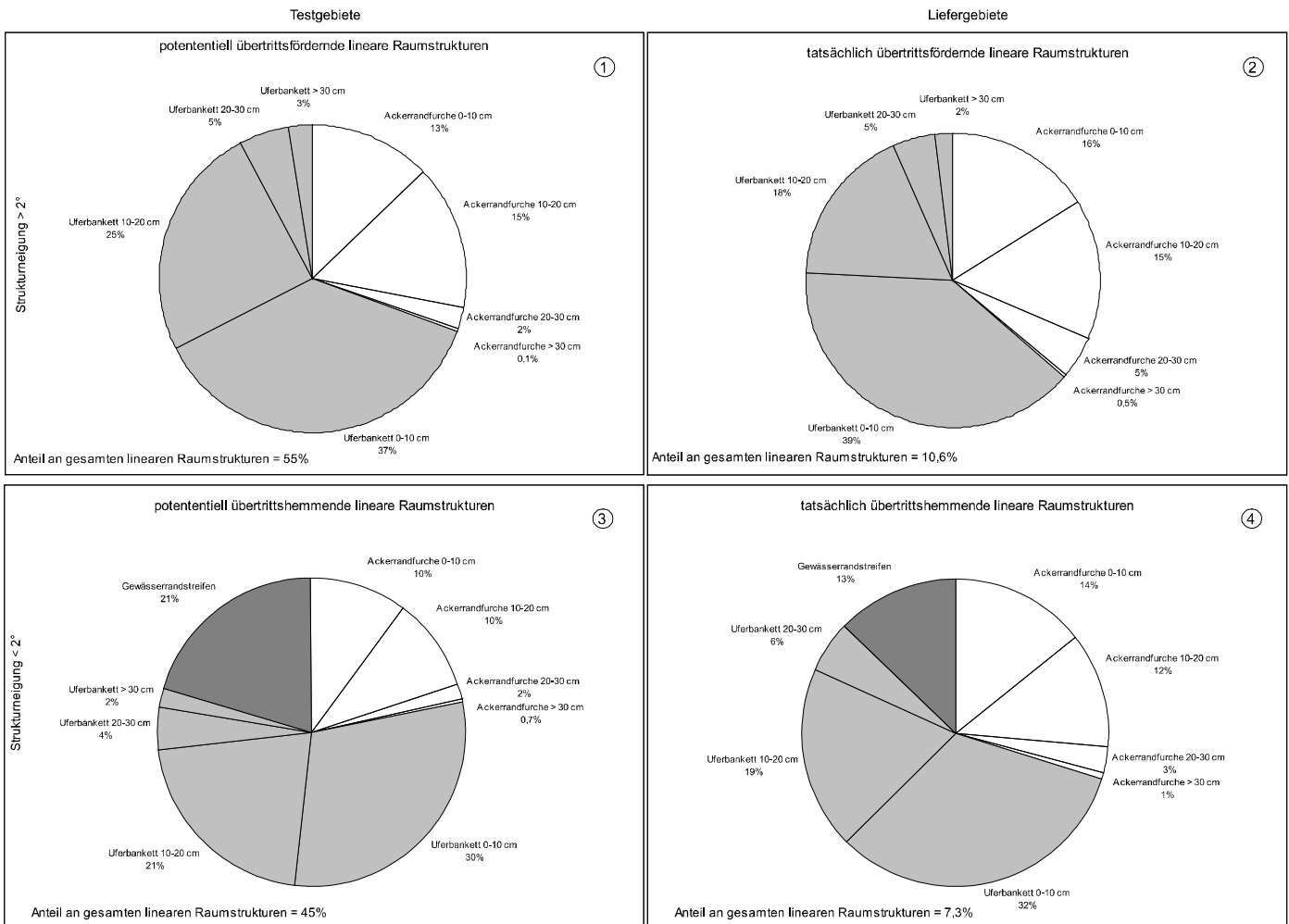


Übertrittsfälle wurden noch bei Gewässerschutzstreifen mit Gehölzbestand von 10 m Breite kartiert. Breitere Streifen mit Stoffeinträgen kamen nicht vor. Wirksamen Schutz vor Gewässereinträgen bieten demnach nur Gewässerrandstreifen mit dichtem Gehölzbewuchs und mehr als 10 m Breite (s. M. PAKOSCH 1996).

Der Flächenverbrauch derartig breiter Gewässerrandstreifen ist sehr hoch. Ihrer **Akzeptanz seitens der Landwirtschaft** ist dies nicht förderlich, sofern die Schutzstreifen nicht an besonders eintragsrelevanten Gewässerbereichen angelegt werden. Ein effizienter Gewässerschutz muss die Lieferzonen sowie die Eintragsbereiche daher möglichst lagegenau prognostizieren, um dort gezielt intensive Streifen anlegen zu können. Gewässerrandstreifen eignen sich u. a. dort, wo weitere ökosystemare Funktionen einer Gewässerlandschaft verwirklicht werden sollen, wie z.B. Lebensraum für Tiere und Pflanzen, Schaffung von Überflutungsraum, Gewässerbeschattung oder höhere Gewässerstrukturvielfalt etc. (DVWK 1997, P. GROSS & K. RICKERT 1994, R. KOLB 1994, H-J. GÄBLER 1991). Um primär die Stoffeinträge zu minimieren, sollte - nach dem Prinzip Gewässerschutz als Bodenschutz - als Maßnahme die Erosionsbekämpfung auf der Fläche vorgezogen werden (M. BACH U. A. 1997, TH. MOSIMANN U. A. 1991).

Die **Wirkung von linienhaften Raumstrukturen** auf das Übertrittsgeschehen lässt sich durch die Analyse ihrer Verteilungen in den Test- bzw. Liefergebieten abschätzen (Abb. 17). Das Vorkommen der Raumstrukturelemente in den Testgebieten bezeichnet den durchschnittlichen „Normalfall“, dasjenige in den Liefergebieten den „Spezialfall“. Über Unterschiede im Auftreten der Raumstrukturelemente in Normal- bzw. Spezialfall lässt sich ihr Einfluss auf den Stoffübertritt abschätzend bewerten.

Die linearen **Strukturen** werden bei Neigungen  $\leq 2^\circ$  als **übertrittshemmend** (abflusshemmend) und diejenigen  $> 2^\circ$  Strukturteilung als **übertrittsfördernd** (abflussfördernd) definiert. Die „**potenziell**“ übertrittsfördernden oder –hemmenden Raumstrukturen verteilen sich über die gesamten Testgebiete. Sie wirken zwar auf den Oberflächenabfluss ein, haben aber keinen Einfluss auf den Stoffeintrag ins Gewässersystem. Die „**tatsächlich**“ abflussbeeinflussenden Strukturen liegen ausschließlich innerhalb der Liefergebiete und wirken dort direkt auf den Eintragsprozess.



**Abb. 17: Anteilverteilung der potentiell (in den Testgebieten) und tatsächlich (in den Liefergebieten) übertrittsfördernden und –hemmenden linienhafte Raumstrukturtypen**

Definitionen:

- Übertrittshemmende lineare Raumstruktur: hat Neigungen  $\leq 2^\circ$ .
- Übertrittsfördernde lineare Raumstruktur: hat Neigungen  $> 2^\circ$ .
- „Potentielle“ übertrittsfördernde oder –hemmende Raumstrukturen sind in den Testgebieten verteilt.
- „Tatsächlich“ übertrittsfördernde oder –hemmende Raumstrukturen liegen ausschließlich innerhalb der Liefergebiete.

Aus der Abbildung lassen sich folgende **Ergebnisse** ableiten:

- Potentielle Strukturen mit übertrittsfördernder und -hemmender Wirkung sind in den Testgebieten nahezu gleichverteilt (45 % zu 55 %) (s. Bild ① und ③).
- Innerhalb der Liefergebiete überwiegen deutlich die übertrittsfördernden Strukturen (11 % zu 7 %) (s. Bild ② und ④).
- Gewässerrandstreifen wirken grundsätzlich übertrittshemmend, wobei sie im Übertrittsfall seltener vorkommen als im Testgebietsdurchschnitt (s. Bild ③ und ④).
- Übertrittsfördernde Strukturen mit geringer Höhe/Tiefe existieren in den Liefergebieten etwas zahlreicher als in den Testgebieten (s. Bild ① und ②).

- Übertrittshemmende Strukturen mit geringer Höhe/Tiefe existieren in den Liefergebieten seltener als übertrittsfördernde (s. Bild ② und ④).
- Hohe Uferbankette und tiefe Ackerandfurchen sind tendenziell übertrittshemmend (s. Bild ② und ④).
- Relativ zum Testgebietsdurchschnitt entfalten Ackerandfurchen häufiger als Uferbankette eine abflussfördernde Wirkung (s. Bild ① und ②).

### Fazit

Die Wirkung linearer Raumstrukturelemente auf oberflächliche Transportprozesse lässt sich durch die Auswertung klar nachweisen. Die Raumstrukturen beeinflussen auch den Flächenanbindungsgrad an die Gewässer. Die Strukturelemente können fördernd oder hemmend auf den Oberflächenabfluss wirken. Sie erleichtern oder erschweren damit den Stoffeintrag (Übertritt) in das Gewässersystem. Die verschiedenen Raumstrukturelemente sind unterschiedlich stark verbreitet. Sie entfalten je nach typischen Eigenschaften (Tiefe, Höhe) eine unterschiedlich starke Wirkung auf die Übertrittswahrscheinlichkeit. Innerhalb der Liefergebiete treten grundsätzlich mehr abflusskanalisierende als abflusshemmende Strukturelemente auf.

### Retentionsfähigkeit linearer Strukturen

Lineare Raumstrukturelemente fungieren nicht nur als kanalisierende Sammler für Oberflächenwasser. Sie können unter entsprechenden Rahmenbedingungen auch zu verstärkter Sedimentation führen und erodiertes Bodenmaterial aufnehmen (Abb. 18).

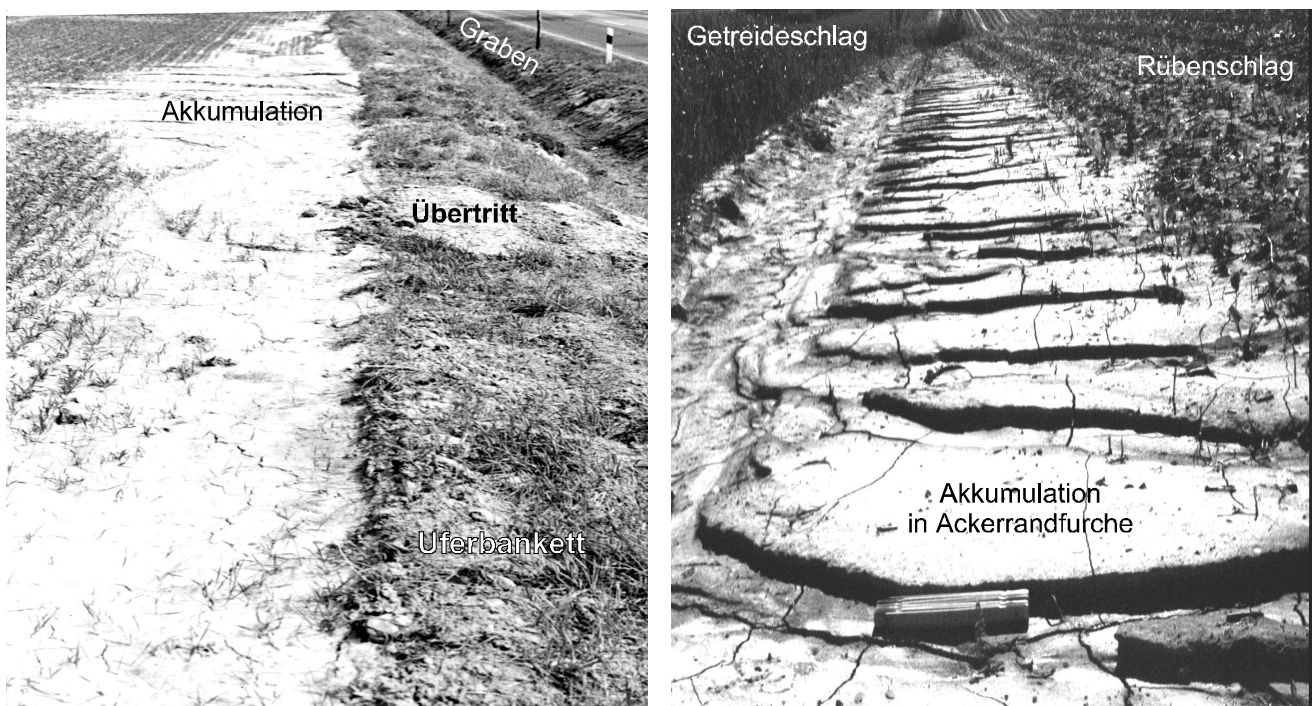


Abb. 18: Feststoffretention vor Uferbankett und in Ackerandfurchen (Testgebiet Nette)

Um die **potentielle Retentionsfähigkeit von Raumstrukturelementen** für Feststoffe abzuschätzen, können folgende **Annahmen** getroffen werden:

- Die Ablagerung von Feinboden sedimentiert die Hälfte der Strukturtiefe bzw. –höhe auf.
- Die Breite der Akkumulationszone vor bzw. in der Struktur beträgt 30 cm.
- Die Akkumulation weist einen idealisierten Rechteckquerschnitt auf.

Die Annahmen begründen sich auf häufig im Feld beobachtete Ablagerungen bei den Raumstrukturelementen der Testgebiete. Es ergeben sich die Retentionsvolumina aus Tab. 7. In den Testgebieten können insgesamt theoretisch 2740 m<sup>3</sup> ( $\approx$  0,7 t/ha) Boden in und vor linearen Raumstrukturen zurückgehalten werden. Unter Berücksichtigung von Strukturelementen mit ausschließlich einer Neigung unter 2 ° ergibt sich für die Strukturen eine geringere Retentionskapazität. Bei solchen Raumstrukturen führt die geringere Hangneigung zu verminderter Schleppkraft des Wassers, zur Verminderung der Transportkapazität des Abflusses und in der Folge zur Sedimentablagerung. Daraus resultiert die Verringerung der Aufnahmekapazität der Raumstrukturelemente auf 1152 m<sup>3</sup> Feinerde ( $\approx$  0,3 t/ha). Dies entspricht ca. **7 % der Abtragsleistung der Schneeschmelzerosion** oder **19 % des Abtrags der Starkregenerosion**. Gemessen am **durchschnittlichen Bodenabtrag** von 4,5 t/ha sind es ebenfalls etwa **7 %**.

Raumstrukturelement	potentielle Retentionskapazität [m <sup>3</sup> ]	
	Gesamtvolumen	Volumen bei Strukturen < 2 ° Neigung
Ackerrandfurche 0-10 cm Tiefe	182	72
Ackerrandfurche 10-20 cm Tiefe	398	138
Ackerrandfurche 20-30 cm Tiefe	95	34
Ackerrandfurche > 30 cm Tiefe	13	5
Uferbankett 0-10 cm Höhe	<b>526</b>	<b>209</b>
Uferbankett 10-20 cm Höhe	<b>721</b>	<b>298</b>
Uferbankett 20-30 cm Höhe	225	92
Uferbankett > 30 cm Höhe	143	56
Gewässerrandstreifen	<b>436</b>	<b>247</b>
<i>Summe</i>	<i>2740</i>	<i>1152</i>

**Tab. 7: Geschätzte Retentionskapazität der linearen Raumstrukturelemente Gewässerrandstreifen, Uferbankett, Ackerrandfurche.**

### Fazit

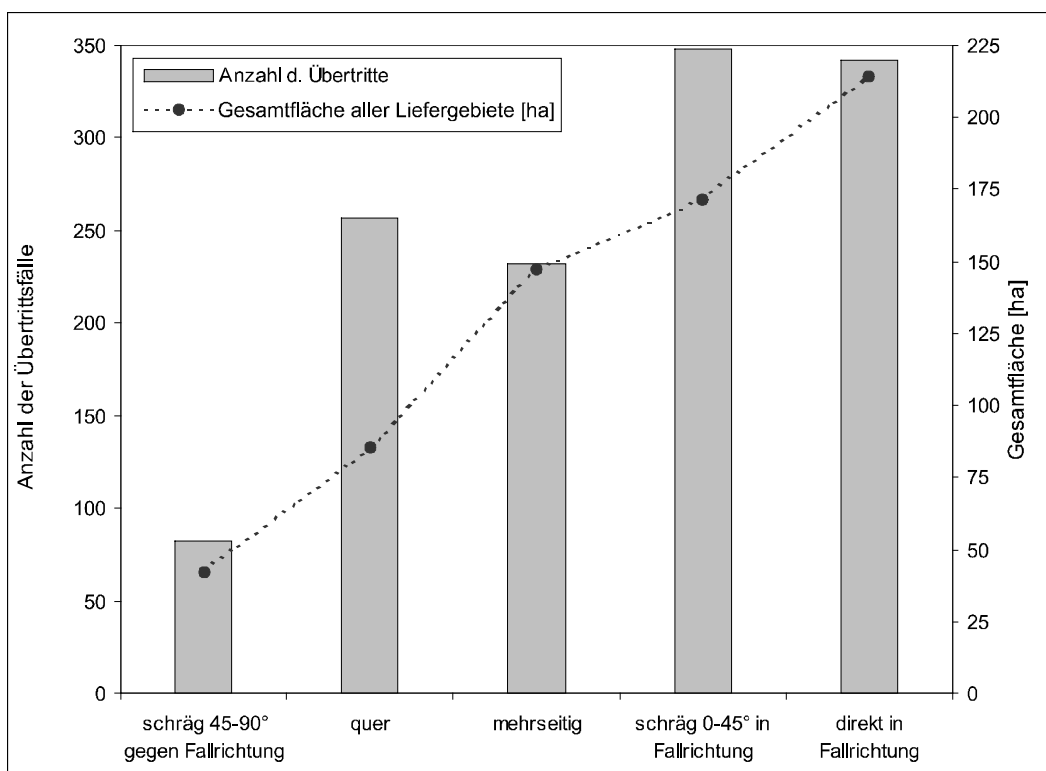
**Lineare Raumstrukturen** können ca. 7 % des durchschnittlichen Abtrags (4,5 t/ha\*a) im Einzugsgebiet zurückhalten. Dabei ergibt sich ihre **Retentionsleistung** weniger aus der hohen Effizienz des Stoffrückhaltes einzelner Raumstrukturelemente, sondern vielmehr aus ihrer verbreiteten Präsenz im Gebiet. Bei einer optimierten Anlage solcher Strukturen erscheint eine Erhöhung der Rückhaltefähigkeit und damit eine Verminderung von Feststoffeinträgen in Gewässer möglich. So sollten bei-

spielsweise tiefe Ackerrandfurchen (>20 cm) nicht in Falllinie liegen. Die Retentionskapazität der gewässerbegleitenden Uferbankette lässt sich durch permanent hohen Gräserbewuchs und die Strukturerrhöhung auf 40 cm über Parzellenhöhe steigern.

### Wirkung flächenhafter Raumstrukturen (Bearbeitungsrichtung)

Die Bearbeitungsrichtung wirkt als **flächenhafte Struktur** auf allen Parzellen in den gesamten Testgebieten abflussverändernd. Sie determiniert die Richtung von Saatrillen, Fahrspuren und bearbeitungsbedingtem Mikrorelief. Fahrspuren gehören bei Intensivlandwirtschaft zu den beachtenswertesten Erosions- und Abflusspfaden (FRIELINGHAUS U. A. 1994).

Den **Einfluss der Bearbeitungsrichtung** auf die Lieferflächengröße bzw. die Wahrscheinlichkeit des Stoffübertritts verdeutlicht Abb. 19. Je mehr die Richtung der Bewirtschaftung von der Falllinie abweicht, um so wirksamer wird die Retention in Kleinststrukturen auf dem Ackerschlag. Parallel dazu vermindert sich die Zahl der Übertrittsfälle und die Gesamtflächenausdehnung der angebotenen Areale. Die Bearbeitung direkt in oder schräg zur Fallrichtung bewirkt eine zusätzliche Bündelung des Abflusses, die zur Zunahme von Bodenerosion und Stofftransport führt. Es entstehen mehr Übertritte und ihre Hangeinzugsgebiete vergrößern sich.



**Abb. 19: Anzahl der Übertritte und die Gesamtflächengröße ihrer Liefergebiete in Abhängigkeit von der Bearbeitungsrichtung (Schneesmelzereignis)**

Als abflussbeeinflussende Raumstruktur wirkt sich die Bearbeitungsrichtung auf die Eintragsbereiche aus. Mit zunehmender Orientierung der Bearbeitungsrichtung an der Falllinie, wachsen die Anzahl der Übertrittspunkte sowie die Flächenausdehnung des angebotenen Stofflieferareals.

**Fazit**

Je weiter die **Bearbeitungsrichtung** von der Hauptfalllinie abweicht, umso kleiner sind die an die Oberflächengewässer angebondenen Areale. Quer- oder Konturbearbeitung reduzieren die Flächenausdehnung der realen Liefergebiete sowie die Häufigkeit von Übertrittsereignissen und damit auch die Feststoffeinträge in Gewässer. Sie sind als Maßnahme geeignet, stoffliche Belastungen der Oberflächengewässer zu vermindern.

**Räumliche Verbreitung von Raumstrukturelementen**

Auf Karte 6 sind die **Raumstrukturen** für das **Testgebiet Adenstedt** exemplarisch dargestellt.

Die größte Verbreitung haben die landwirtschaftlichen Wege. Sie können nur kanalisierend wirken, wenn sie eine Abflussleitbahn schneiden. Werden die Wege beidseitig von Gräben oder Gewässern begleitet, so entfalten sie keinen Einfluss auf den Transportpfadverlauf. Bei einem Großteil der angebondenen Areale sind Raumstrukturelemente in verschiedenem Ausmaß beteiligt. Das Raumverteilungsmuster der linearen Strukturen folgt keiner Regelmäßigkeit. Die Raumstrukturelemente unterliegen einer mehr oder weniger starken Modifikation über die Zeit. Die Anfälligkeit für die zeitliche Veränderung steigt mit der Instabilität des Strukturtyps:

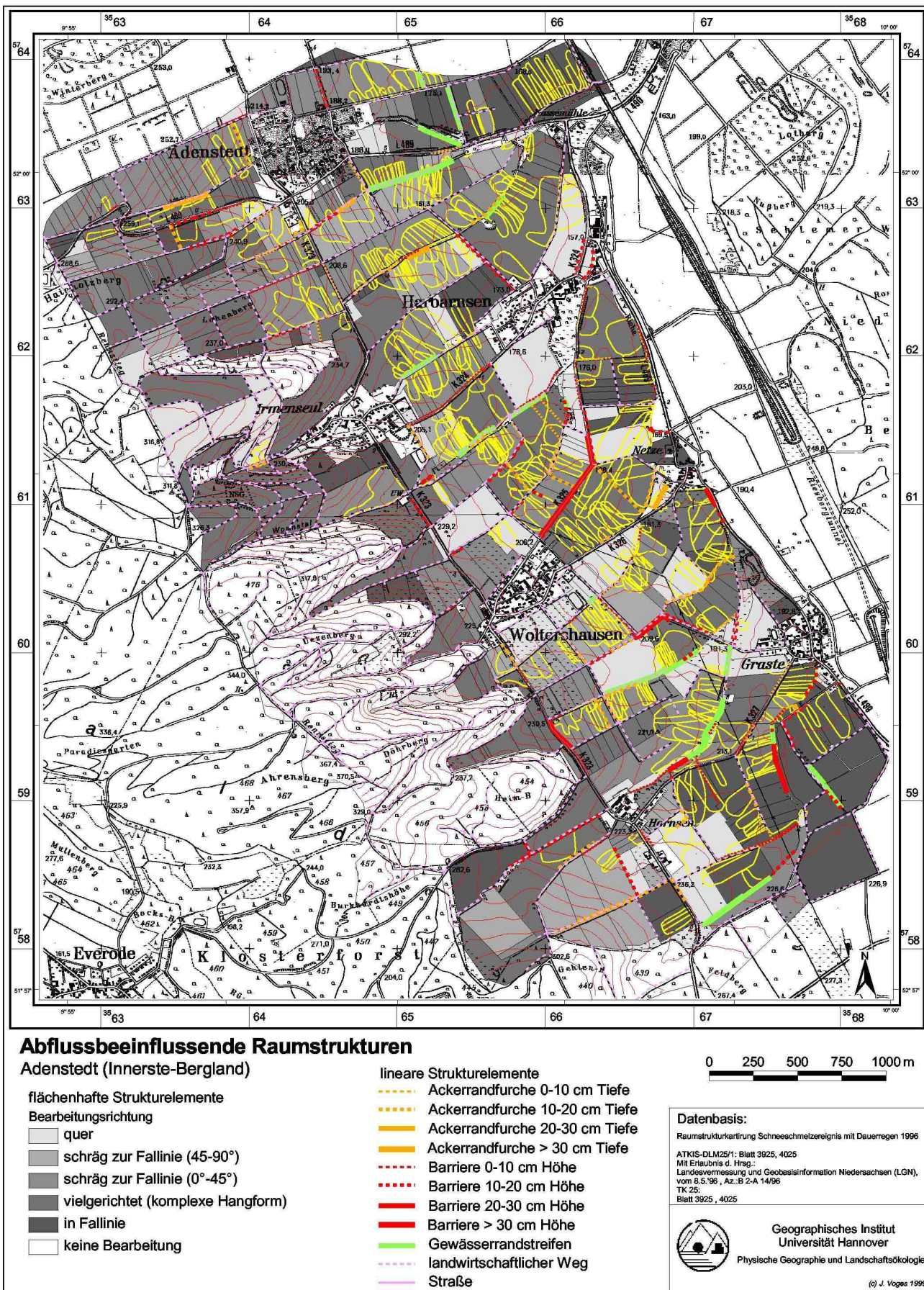
Straße < Weg < Gewässerrandstreifen < Uferbankett < Ackerrandfurche < Bearbeitungsspur.

Die Prognose von Lage und Ausprägung der zeitvarianten linienhaften Raumstrukturelemente Uferbankett, Ackerrandfurche ist nicht möglich. Sie müssen ereignisbezogen vor Ort aufgenommen werden. Die flächig wirkende Bearbeitungsrichtung kann dagegen bei Kenntnis der Parzellengrenzen und der Reliefstruktur in guter Näherung automatisiert abgeleitet werden und in Modellberechnungen einfließen (J. BIERBAUM 2000).

**Fazit**

Für die **mesoskalige Modellierung** ist die Berücksichtigung der **Strukturgrößen** Gewässerrandstreifen, Uferbankett, Ackerrandfurche und Bearbeitungsspur nicht leistbar. Eine flächenhafte Raumstrukturkartierung ist für große Gebiete zu zeit- und kostenintensiv. Die Wirkung der Strukturelemente auf den Oberflächenabfluss und -transport sowie den Stoffeintrag ist zwar bedeutend, kann aber auf der mittleren Maßstabsebene modellbasiert nicht nachvollzogen werden. Flächenhaft verfügbare Basisdaten sowie effektive Erkundungsstrategien existieren z. Z. nicht. Selbst Fernerkundungssysteme der neuesten Generation vermögen die für die Aufnahme der Strukturelemente notwendige Auflösung von weniger als 1 m nicht zu erreichen (KRAMER, H.J: 1994 und [HTTP://WWW.BELSPO.BE/TELSAT/INDEX\\_GE.HTM](http://www.belspo.be/TELSAT/INDEX_GE.HTM)).





Karte 6: Abflussbeeinflussende Raumstrukturen, Testgebiet Adenstedt

#### 4.4.1.2. Raumstrukturelemente im mesoscale

Bei Modellierungen von langfristigen Prozessen im mittleren Maßstab können ausschließlich stark wirksame Raumstrukturen Berücksichtigung finden, deren abflussbeeinflussende Wirkung nur geringen zeitlichen Veränderungen unterworfen ist. Sie müssen außerdem für ein Gebiet von 470 km<sup>2</sup> Größe aus leichtverfügbaren Datenquellen abzuleiten sein.

Im **Digitalen Landschaftsmodell** (DLM 25/1) aus ATKIS sind mit Straßen- und Wegtyp, Nutzungsgrenze sowie Fließgewässer Linieninformation enthalten, die die postulierten Bedingungen erfüllen. Das landwirtschaftliche Wegenetz kann in überwiegend agrarisch genutzten Räumen einen entscheidenden Einfluss auf die Gewässerbefruchtung mit Nährstoffen haben (A. HAMM 1991).

Die genannten Raumstrukturelemente werden in das Modellkonzept für den mittleren Maßstab integriert, um ihren Effekt auf den Stofftransport abzubilden. Dazu gilt es **zu klären**:

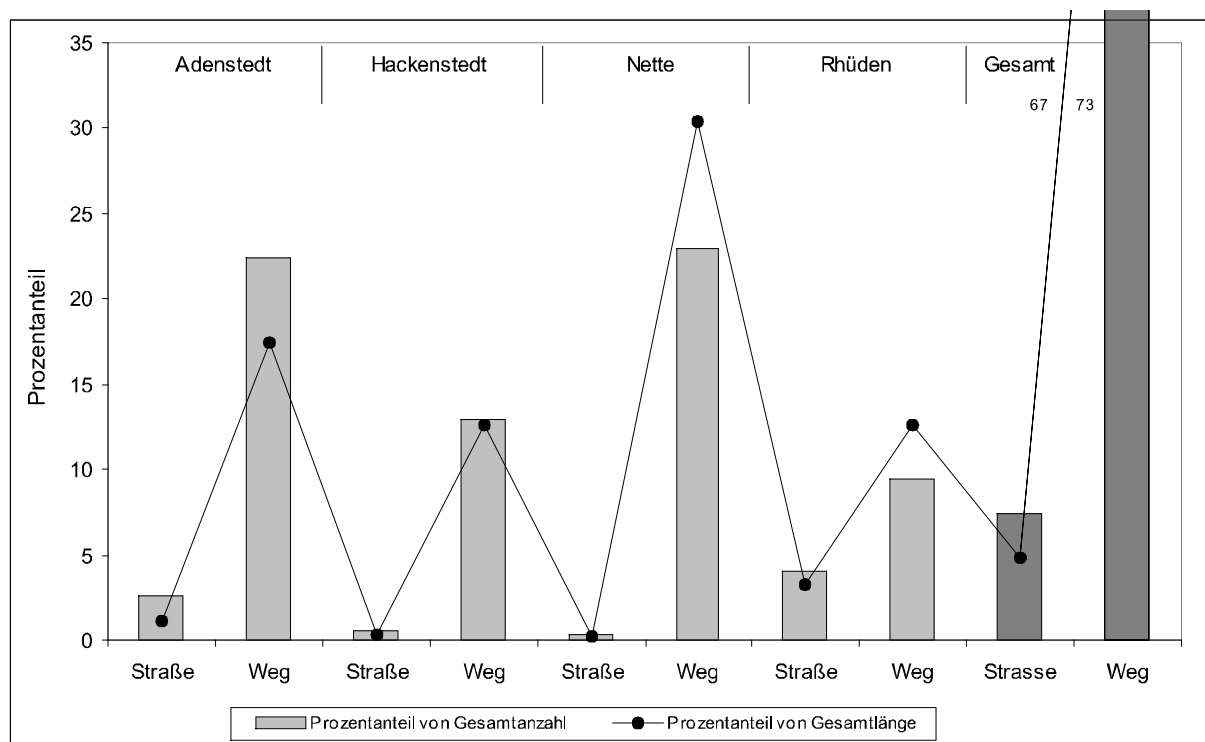
- Wie wirken die unterschiedlichen Raumstrukturelemente des mittleren Maßstabs auf die Eintragshäufigkeit
- Wie lassen sich Raumstrukturelemente des mittleren Maßstabs aus den ATKIS-Daten differenziert nach ihrer Funktion für den Oberflächenabfluss in ein Modell implementieren ?

Das **Ziel** besteht darin, den verschiedenen Linieninformationen aus ATKIS einen Faktorenwert zuzuordnen, der die funktionale Wirkung des Raumstrukturelementes auf den Oberflächenabfluss im Modell abbildet. Die Höhe des Faktorwertes hängt von der Einflussstärke der jeweiligen Raumstruktur auf den Oberflächenabfluss ab.

Abb. 20 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Vorkommen mesoskaliger Raumstrukturelemente (Straße, Weg) und dem Auftreten von realen Liefergebieten. Je zahlreicher eine Struktur innerhalb der Stofflieferareale auftritt, desto eher ist sie einem Stoffeintrag förderlich. Umgekehrt hat eine Struktur einen übertrittshemmenden Effekt, sofern sie selten in einem angebundenes Areal existiert. Die **landwirtschaftlichen Wege** nehmen innerhalb der Lieferflächen in Gesamtanzahl und –länge grundsätzlich eine dominante Stellung ein. **Straßen** kommen in Zusammenhang mit Übertrittsereignissen verhältnismäßig selten vor. Aufgrund der hohen Bodenverdichtung durch Landwirtschaftsfahrzeuge leiten unbefestigte ebenso wie versiegelte Wege das Oberflächenwasser ohne bedeutende Versickerungsraten weiter (BRONSTERT U. A. 1995). Die landwirtschaftlichen Wege sind in über 90 % der Fälle talwärts geneigt (M. PAKOSCH 1996). So strömt das Oberflächenwasser und mitgeführte Schwebstoffe ungehindert auf den Nachbarschlag oder in den begleitenden Graben. Wenn die Wege stärkere Neigungen aufweisen, können sie das Wasser sammeln und kanalisiert weiterführen. Straßen behindern und landwirtschaftliche Wege fördern demnach den Eintrag in die Gewässer. Ausnahmen bestätigen dabei die Regel.



Zwischen den einzelnen **Testgebieten** ergeben sich **Unterschiede** in der Anlage des Verkehrsnetzes. Das Wege- und Straßennetz ist an die spezifischen Erfordernisse des jeweiligen Raumes angepasst. So liegt der Anteil der Übertritte mit Wegeeinfluss beispielsweise im Testgebiet Nette überdurchschnittlich hoch, weil die Wege häufig oberhalb der Begleitgräben quer zur Hangneigungsrichtung verlaufen. Damit kreuzen sie die potentiellen Transportpfade und werden bei Übertritten zwangsläufig überflossen.



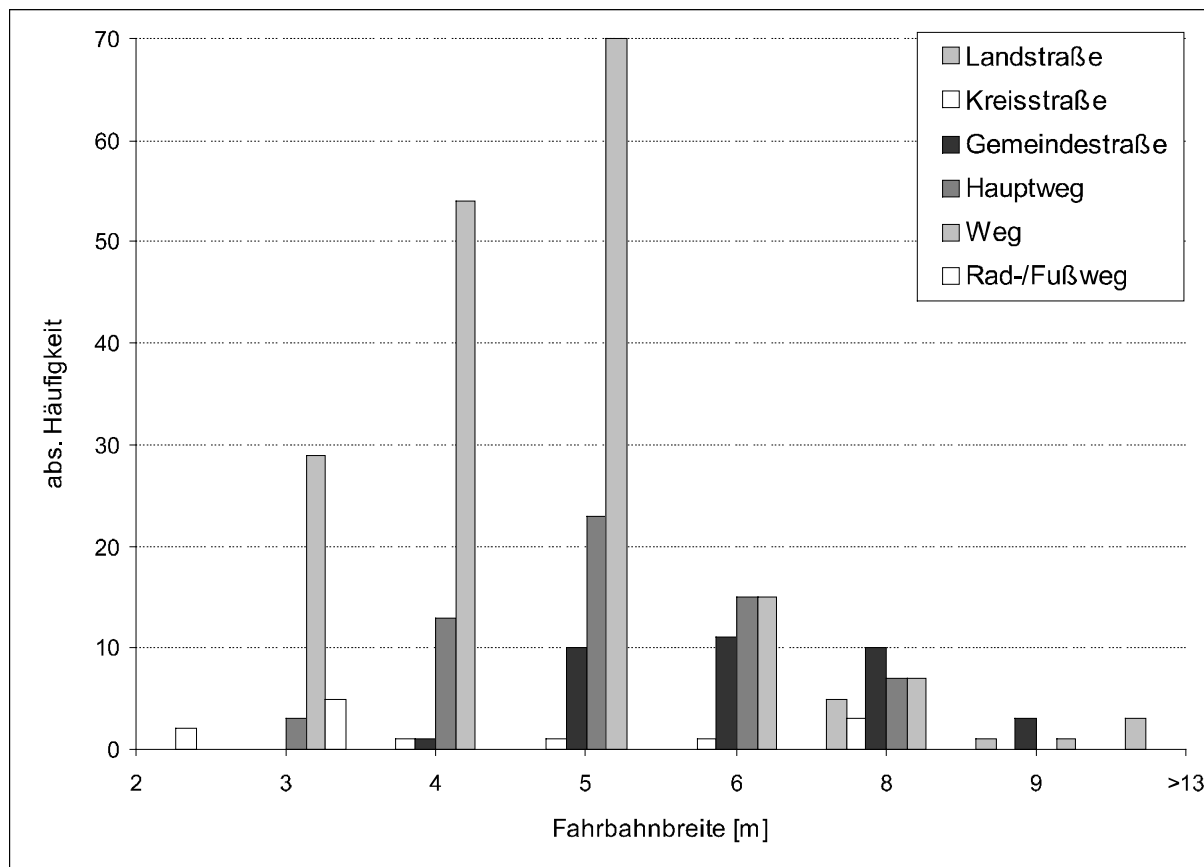
**Abb. 20: Prozentanteile von Gesamtanzahl und -länge der Raumstrukturen Weg und Straße innerhalb der realen Liefergebiete (Schneesmelzereignis; Testgebiete Adenstedt, Hackenstedt, Nette und Rhüden)**

Die aus ATKIS ableitbaren Raumstrukturelemente wirken je nach Typus also unterschiedlich auf den Oberflächenabfluss und auf die Gewässeranbindung. Für die adäquate Abbildung des Raumstruktureffektes im Modell (Parametrisierung) sind die Ergebnisse im Folgenden zu verifizieren.

**Grundlage der Analysen** bilden Daten des Amtes für Agrarstruktur Hannover, die im Zuge von laufenden Flurbereinigungsverfahren innerhalb des Untersuchungsraumes erhoben wurden. Die Daten beinhalten detaillierte Angaben zu Verbreitung und Eigenschaften des Verkehrsnetzes (Fahrbahnlänge, -breite, -belag und -funktion, begleitende Gräben).

Nach Abb. 21 existieren am häufigsten landwirtschaftliche Hauptwege mit Gesamtbreiten von 5 m. Vergleichsweise zahlreich sind Wegebreiten von 3-4 m. Für landwirtschaftliche Hauptwege verschiebt sich die Fahrbahnbreite zu Werten von 5-6 m. Die Fahrbahnbreite der Straßen steigt mit

ihrer Bedeutung für den Individualverkehr. Landstraßen weisen z. T. Breiten von mehr als 13 m auf, Kreisstraßen liegen vornehmlich zwischen 6-8 m Fahrbahnbreite. Insgesamt zeigt sich eine Abhängigkeit der Fahrbahnbreiten von ihrer Verkehrsfunktion sowie der Verkehrsdichte.



**Abb. 21: Absolute Häufigkeit von Fahrbahnkronenbreite für verschiedene Fahrbahntypen in den Flurbereinigungsgebieten Westfeld, Sehlern und Lamspringe (Grunddaten: Amt für Agrarstruktur Hannover)**

Wie Tab. 8 dokumentiert, nehmen die mittleren Kronenbreiten der Fahrbahnen mit ihrer Bedeutung für den Verkehr ab. Parallel dazu vermindert sich die Anzahl der Straßenbegleitgräben kontinuierlich, wobei Straßenabschnitte ohne oder mit 2 Gräben vorkommen können. Verkehrsbedeutende Straßen verfügen fast grundsätzlich über mindestens einen Straßenbegleitgraben. Die wichtigeren öffentlichen Straßen sind grundsätzlich mit einer schweren bituminösen Befestigung ausgestattet, die ein aufwendiges, häufig dammförmig aufgeschüttetes Fundament verlangt (s. K. J. SCHNEIDER 1992). Landwirtschaftliche Wege benötigen ein weniger aufwendiges Fundament. Sie sind in den meisten Fällen mit mittelschweren oder in 32 % der Fälle mit leichten Befestigungen konstruiert. Auf 15 % der Wege liegt keine Befestigung vor.

	Landstraße	Kreisstraße	Gemeinde- straße	landwirt. Hauptweg	landwirt. Weg	Fuß-/ Radweg	
Kronenbreite, gew. Mittel	9.4	7.0	5.9	5.4	4.5	2.8	
min. Grabenanzahl	0	0	0	0	0	0	
max. Grabenanzahl	2	2	2	2	2	0	
mittlere Grabenanzahl	1.7	1.3	0.4	0.6	0.3	0	
Länge [km]	16.1	6.8	24.4	45.7	77.1	4.0	
n	9	6	35	61	177	7	
Befestigungsart	Bauweise	Fahrbahnanteil in %					
schwere Befestigung	Bituminöse Decke	100	100	100	48.0	5.7	-
mittelschwere Befestigung	Bituminöse Decke	-	-	-	45.7	76.6	44.3
leichte Befestigung	Bituminöse Decke	-	-	-	4.9	32.4	37.3
einfache Befestigung	Deckschicht mit o. ohne Bindemittel	-	-	-	-	2.3	18.5
ohne Befestigung	Erdbau	-	-	-	-	15.3	-

**Tab. 8: Eigenschaften der Raumstrukturelemente Straße und landwirtschaftlicher Weg in den Flurbereinigungsgebieten Westfeld, Sehem und Lamspringe (Basisdaten: Amt für Agrarstruktur, Hannover)**

### Fazit

Aus den Untersuchungen der mesoskaligen Raumstrukturelemente lässt sich für die Modellbildung Folgendes ableiten:

- **Landwirtschaftliche Wege** sammeln und kanalisieren prinzipiell das Oberflächenwasser. Sie besitzen eine stark verdichtete Oberfläche mit geringer Wasserdurchlässigkeit. Die relativ geringe Breite und weniger aufwendige Befestigungsart und Bauweise (kein dammförmiges Fundament) vermag zuströmendes Oberflächenwasser nicht zurückzuhalten.
- **Straßen** hingegen halten aufgrund ihres meist gegenüber dem natürlichen Gelände erhöhten Verlaufes (s. K.J. SCHNEIDER 1992) und ihrer großen Fahrbahnbreite ablaufendes Oberflächenwasser grundsätzlich zurück. Sie werden zudem größtenteils von mindestens einem Straßen-graben gesäumt, der die Ableitungsfunktion in das Gewässernetz übernimmt.

Die Raumstrukturelemente sind im ATKIS DLM 25/1 enthalten und daher für große Gebiete flächenhaft verfügbar. Über strukturspezifische Faktorwerte sind sie in ein Modell für den mesoskaligen Bereich integrierbar.

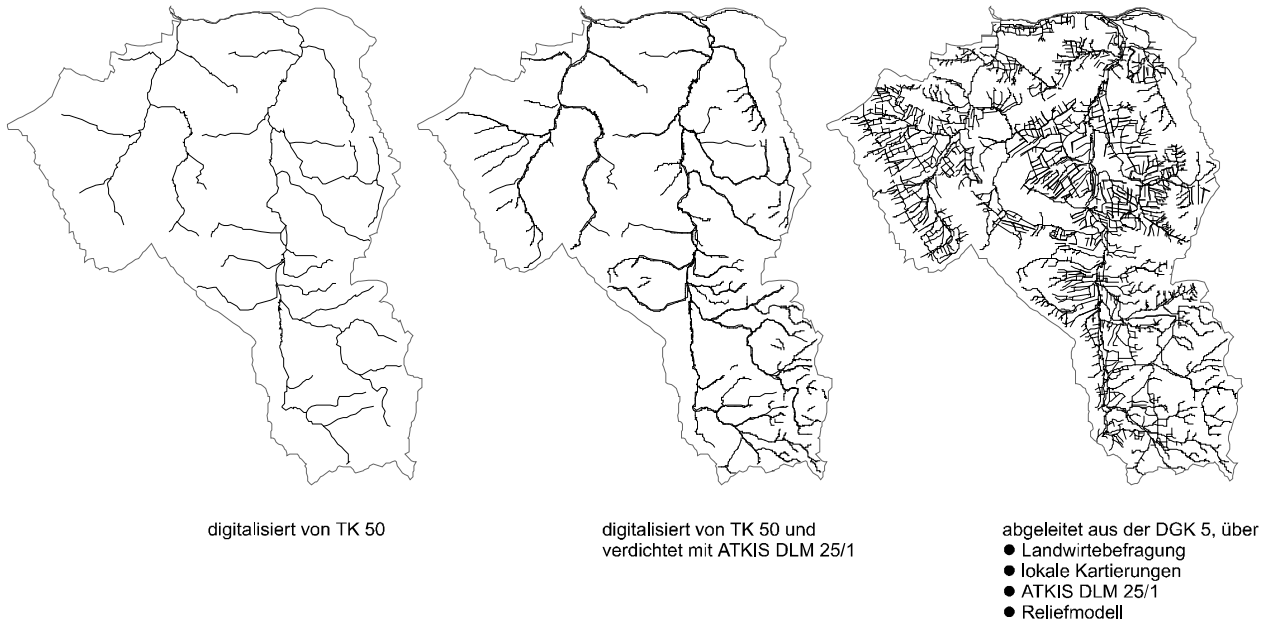
### 4.4.2. Transportbedingungen und Sedimentation im Gewässernetz

#### Gewässerdichte und -typen

Zunächst ist zu klären, welche **Bedeutung** die **Gewässerdichte** für die **Modellierung des Anbindungsgrades** hat. Dazu werden mit Gewässernetzen aus verschiedenen Datenquellen einige Parameter berechnet, die die Gewässeranbindung beeinflussen (Abb. 22). Es zeigt sich eine deutliche Interdependenz aller Parameter von der Dichte des Gewässersystems. Mit zunehmender Ge-

wässerdichte verringern sich mittlere Gewässerdistanz, Einzugsgebietsgröße, Hanglänge, Distanz zum Stofftransportweg sowie Länge des Transportpfades z. T. erheblich. Je genauer das Gewässersystem erfasst wird, desto präziser lassen sich wichtige Parameter der Anbindung ermitteln.

#### Fließgewässerdichte



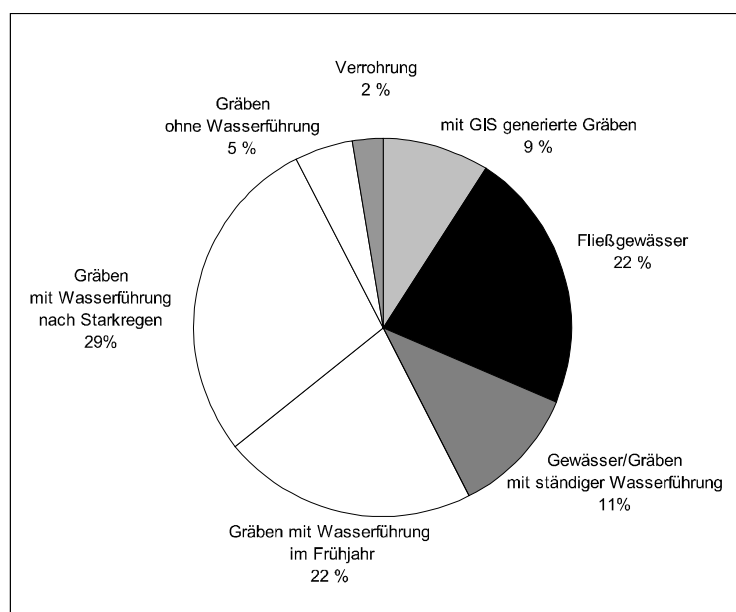
Flusslänge	216 km	373 km	1375 km
Flussdichte	0,5 km/km <sup>2</sup>	0,8 km/km <sup>2</sup>	2,9 km/km <sup>2</sup>
mittlere Gewässerdistanz	1471 m	1071 m	415 m
mittlere Größe der Gewässereinzugsgebietes	12,4 km <sup>2</sup>	5,8 km <sup>2</sup>	0,7 km <sup>2</sup>
mittlere Distanz zum Stofftransportpfad	144 m	143 m	118 m
mittlere Länge des Stofftransportpfades	430 m	367 m	226 m
Übertrittszahl	7307	13 411	5627
mittlere Hanglänge	196 m	189 m	139 m

**Abb. 22: Zusammenhang zwischen dem Umfang berücksichtigter Oberflächengewässer und ausgewählten Anbindungsparametern**

Eine sinnvolle Ableitung der Gewässeranbindung ist daher nur über die hochauflösende Gesamterfassung der Gräben und Fließgewässer im Untersuchungsgebiet möglich. Methodisch kommen zur Erfassung des Vorflutersystems Kartenauswertung, Landwirtebefragung, Kartierung und GIS-gestützte Ableitungsverfahren zum Einsatz (s. Kap. 2.2.4).

Wie oben erläutert, sind die meisten Ackerflächen an künstliche Gräben der Landwirtschaft angebunden. Sie lassen sich im Hinblick auf ihre Transportfähigkeit für Feststoffe in unterschiedliche **Grabentypen** klassifizieren (Abb. 23). Je nach Grabenlage und Einzugsgebietscharakteristika laufen in durchschnittlichen Niederschlagsjahren in den verschiedenen Grabentypen entweder praktisch keine *oder* ausschließlich im abflussreichen Frühjahr *oder* nach jedem intensiven Starkniederschlag nennenswerte Wassermengen ab. Die transportierte bzw. sedimentierte Feststoffmenge korrespondiert wiederum mit der Gesamtdurchflussmenge und der Durchflussrate in einem Graben. Die Durchflussrate in Gräben ist sehr variabel und liegt zwischen < 1 und mehreren 100 l/s (s. M. GALLA 1998). Nur 22 % der Gesamtlänge des Gewässersystems entfallen auf permanente Fließge-

wässer. 11 % sind Gräben mit permanentem Abfluss und einer mit Fließgewässern vergleichbaren Feststofftransportkapazität. Rund zwei Drittel des Gewässernetzes führt dagegen im Jahresverlauf nur zeitweise Wasser.



**Abb. 23: Prozentanteile der Fließgewässer und Gräben an der Gesamtlänge der erfassten Gewässer (Datenquelle: Landwirtebefragung und Kartierung 1996/97)**

### Feststoffretention in Gräben

Nennenswerte Erosionsschäden und Stoffeinträge sind immer an hohen Oberflächenabfluss und an die daraus resultierenden hohen Durchflussraten im gesamten Gewässernetz geknüpft. Nach dem Eintrag in die Gräben erfolgt der **Weitertransport der Feinerde** bis in die permanenten Fließgewässer vornehmlich, solange die Durchflussrate im Grabensystem hoch ist. Schnell rückläufige Durchflussmengen nach Überschreiten des Scheitelwertes der Abflusswelle führen besonders in den temporären Gräben zur Verringerung der Transportkapazität und zur Sedimentation der Partikel. Da die Feststoffe größtenteils erst durch das Grabensystem transportiert werden müssen, beeinflusst die Wasserführung der Gräben auch den Anbindungsgrad an die permanenten Fließgewässer.

Die Fähigkeit, Feststoffe zu transportieren, ist neben quasikonstanten Eigenschaften (Sohlengefälle, Grabenquerschnitt) auch von stark variablen Faktoren, wie Bewuchsdichte und Oberflächenrauigkeit, abhängig. Dazu kommt eine bedarfsorientierte Gewässerpflege (Schlegeln, Auskoffern), die unregelmäßig erfolgt und nicht prognostizierbar ist. Es ist nicht vorherzusagen, welcher Grabenabschnitt zu welchem Termin geschlegelt wird oder nach wieviel Jahren ein Ausbaggern des zusedimentierten Grabenabschnittes notwendig wird. Dies kann zu von Jahr zu Jahr **stark wechselnden Transportbedingungen im Grabennetz** führen (Abb. 24), was sich entsprechend auf den Anbindungsgrad an die permanenten Fließgewässer auswirkt.



Abb. 24: Frisch ausgekoffert, stark verkrauteter und zusedimentierter landwirtschaftlicher Graben

Es bereitet also immense Probleme, den **Stoffanteil** zu **quantifizieren**, der nach dem Übertritt in das Grabensystem tatsächlich bis zum Fließgewässer weitertransportiert wird. Das periodische und episodische Abflussverhalten der Kleinstgewässer ist kaum untersucht (s. M. GALLA 1998), obwohl es zum Verständnis des Entwässerungsvorganges eines Einzugsgebietes und der Entstehung der Abflussganglinie von entscheidender Bedeutung ist.

Eine Überschlagsrechnung belegt, welche **Retentionskapazitäten in den temporären Gräben** verborgen liegen. Das hydrologisch orientierte Einzugsgebietsmanagement kann die Rückhaltefähigkeit der temporären Gräben nutzen, um den Weitertransport eingetragener Stoffe bis zum permanenten Fließgewässer zu verhindern (Tab. 9).

Grabentyp	mittleres Gefälle [%]	Gesamtlänge [km]	theoretisches Retentionsvolumen [m <sup>3</sup> ]	potentielles Retentionsvolumen bis zum Auskoffern [m <sup>3</sup> ]	reales Retentionsvolumen bei häufig auftretender Akkumulationsmächtigkeit von 5 cm [m <sup>3</sup> ]	%-Anteil des realen Retentionsvolumens bei Bodenabtrag von 4,5 t/ha
mit GIS generiert	1.58	125	250871	100348	3136	3
mit Wasserführung im Frühjahr	1.52	299	598633	239453	7483	7
mit Wasserführung nach Starkregen	1.44	388	775523	310209	9694	9
ohne Wasserführung	1.31	71	141596	56638	1770	2
alle zeitw. wasserführenden Gräben		883	1766623	<b>706649</b>	<b>22083</b>	<b>21</b>
Gesamtretenion in t/ha Ackerfläche			<b>76</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	

**Tab. 9: Berechnung von theoretischem, potentiell und realem Retentionsvermögen für eingetragenes Sediment in zeitweise wasserführende Gräben im Gesamtgebiet**

Berechnungsgrundlage: Grabenquerschnitt: Trapez 1:2 (Höhe:Breite), Sohle: 0,5 m, Tiefe: 1 m, ca. 50% des Gesamtvolumens werden vor dem Ausbaggern aufgefüllt.

Retentionsvolumen: theoretisch = Gräben vollständig aufsedimentiert

potentiell = Gräben zu 40 % aufsedimentiert

real = die Hälfte der Sohlenbreite mit 5 cm Sedimentmächtigkeit

Vollständig aufgefüllte, temporär wasserführende Gräben können theoretisch 1,8 Mio m<sup>3</sup> Bodenmaterial (76 t/ha Ackerland) aufnehmen. Laut Landwirtebefragung wird durchschnittlich ca. alle 10 Jahre die Ausbaggerung der Gräben notwendig. Das Sediment hat die Gräben dann mindestens zu 40 % des Volumens aufgefüllt. Unter den Voraussetzungen ergibt sich im gesamten Gebiet ein Rückhalt von potentiell 700 000 m<sup>3</sup> Bodensubstanz. Dies entspricht bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche einer Menge von 30 t/ha in 10 Jahren bzw. von ca. 3 t/ha in einem Jahr.

Die Ablagerungen im Grabensystem zeigen sich in der Geländewirklichkeit allerdings sehr heterogen in Mächtigkeit und Lage. Häufig ist der eingetragene Feinboden nur über kurze Grabenabschnitte verteilt oder bedeckt nur einen Teil der Sohle. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil des Grabenaushubs wird von abgestorbener Pflanzensubstanz gebildet. Legt man eine durchschnittliche Sedimentationsmächtigkeit von 5 cm auf der Hälfte der Grabensohle zu Grunde, errechnet sich ein Rückhalt von jährlich 22 000 m<sup>3</sup> Sediment. Dies entspricht 21 % der im Durchschnitt jährlich erodierenden Bodenmenge (4,5 t/ha • a auf Ackerflächen).

Die temporär wasserführenden Gräben, die zwei Drittel der gesamten Gewässerlänge ausmachen, besitzen ein bedeutendes Rückhaltevermögen. Die Grabenretention bzw. die Transportfunktion der Gräben für Feststoffe wirkt sich auch auf die Anbindung an permanente Fließgewässer aus. Sie darf als Baustein in dem Anbindungsmodell nicht vernachlässigt werden. Als fakultative Maßnahme zur Reduktion des Feststoffeintrages innerhalb hydrologischer Managementsysteme ist der Themenkomplex der Grabenretention und die Möglichkeiten zur Steigerung des Stoffrückhaltes zu diskutieren.

#### Fazit

Für die Modellentwicklung bedeutet dies: Die **exakte Erfassung des gesamten Graben- und Gewässernetzes** ist für die Bestimmung des Anbindungsgrades sehr **wichtig**. Rund **zwei Drittel des gesamten Gewässernetzes** entfällt auf **künstliche Gräben**, die im Jahresverlauf nur zeitweise Wasser führen. Die **zeitweise wasserführenden Gräben** besitzen **ein hohes Speichervermögen für eingetragene Feststoffe** (1-3 t/ha • a). In den Gräben sammeln sich über Jahre beachtliche Sedimentmengen, die ausgebagert werden müssen. Je nach Wasserführung und Durchflussbedingungen weisen die **Gräben unterschiedliche Stofftransportkapazitäten** auf, so dass unterschiedliche Stoffmengen bis in die permanenten Fließgewässer transportiert werden. Die variierenden hydrologischen Rahmenbedingungen des Stofftransportes im Grabensystem müssen in ein Simulationsmodell, das die Anbindung an die ständig wasserführenden Gewässer bestimmt, einfließen. Die Transportprozesse der festen Phase sind in einem permanenten Fließgewässer bereits hoch komplex. In zeitweise wasserführenden Kleinstgewässern oder künstlichen Gräben mit starker Durchflussdynamik ist die Transportkapazität für den mittleren Maßstab (über 3000 Gewässersegmente) nicht berechenbar. Zudem reichen bestehende Messungen zum Durchflussverhalten oder Feststofftransport derartiger Gräben für die Modellierung nicht aus. Der Weitertransport eingetragener Feststoffe im Grabensystem lässt sich bei der Simulation nur abschätzen. Über die Einführung empirischer Faktorwerte wird die **Abschätzung des Stoffretentionspotentials** temporärer Gräben **im Modell** realisiert.

#### 4.5. Räumliche Verteilung, Flächenanteil und –größe der realen Liefergebiete

Nachfolgend werden die aus Geländekartierungen und Befragung abgeleiteten **Hangeinzugsgebiete der Übertrittsbereiche**, d. h. die **realen Liefergebiete**, qualitativ und quantitativ beschrieben. Die stoffliefernden Areale entstehen in Folge von Bodenerosions- und Transportprozessen. Sie sind eingebettet in zeitlich variable sowie quasistatische landschaftsökologische und raumstrukturelle Gegebenheiten des Hangeinzugsgebietes.



Die realen Lieferflächen übernehmen bei der Untersuchung und Modellkonzeption folgende **Funktion**:

- Verortung der Hangeinzugsgebiete von tatsächlichen Übertrittsbereichen
- Grundlage für Analysen von Ursachen und Prozessen des Stoffeintrages
- Bezugsebene für statistische Auswertungen (Häufigkeitsanalysen, Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen)
- Bezugsebene für die Übertragung der Ergebnisse auf die mittlere Maßstabsebene
- Basis für die Ableitung anbindungsrelevanter Modellparameter und
- Ausgangspunkt für den Verknüpfungsalgorithmus der Einzelparameter im Modell.

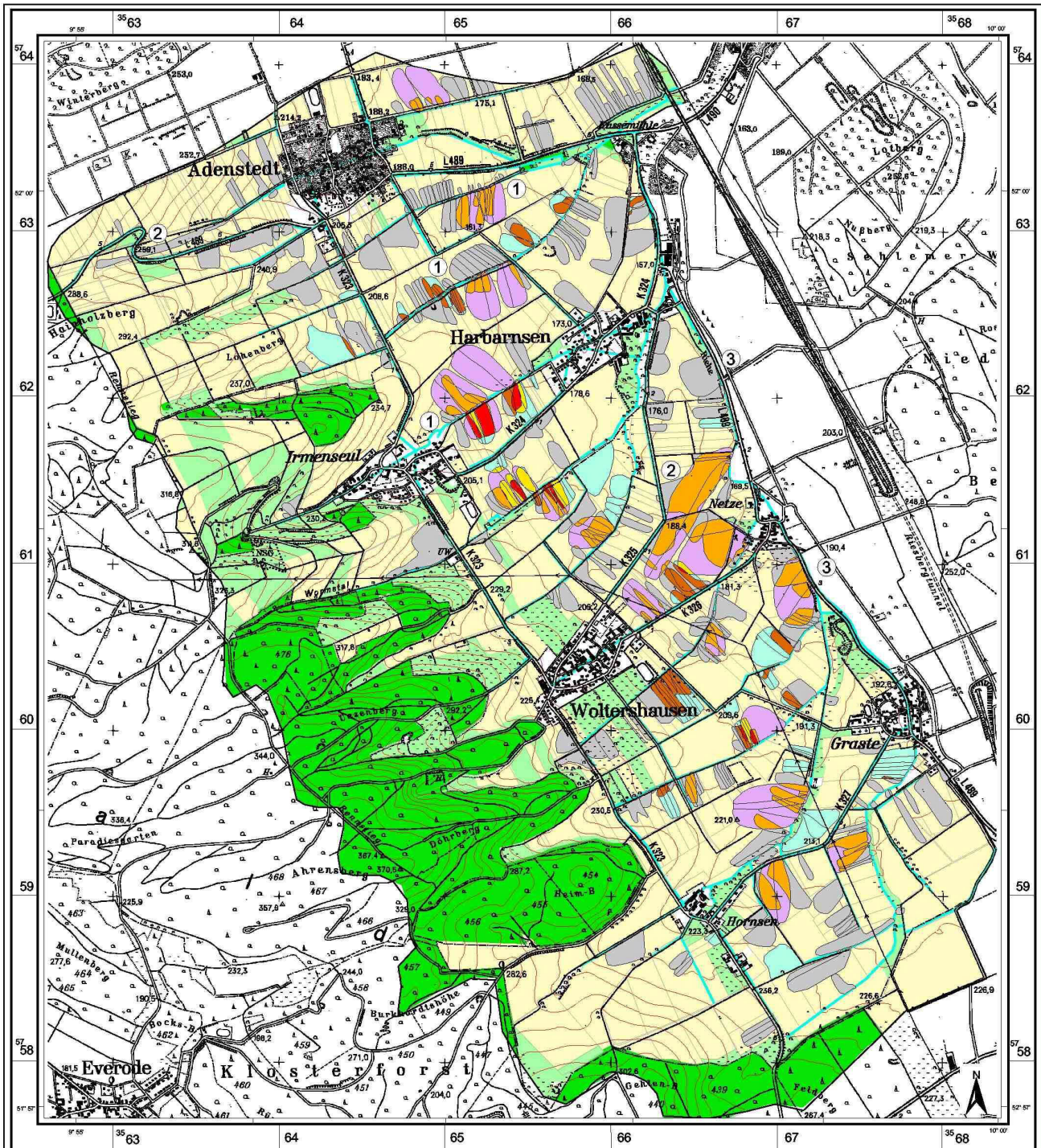
Insgesamt wurden aus dem Schneeschmelzereignis mit zeitweisem Dauerregen im Februar '96, dem Starkregenereignis im Mai '97 und der Landwirtebefragung 1311 Übertrittsfälle unterschiedlicher Bedeutung erfasst und deren Hangeinzugsgebiete abgegrenzt.

#### 4.5.1. Raumverteilungsmuster der realen Lieferflächen

Die **räumliche Verbreitung** der angebotenen Gebiete wird exemplarisch an den Testgebieten Adenstedt und Nette dargestellt.

Karte 7 zeigt die Liefergebiete aus Kartierung und Befragung im Testgebiet Adenstedt. Das Gebiet weist eine bewegte wechselnde Reliefsituation mit ausgeprägten Tiefenlinien auf (Tab. 5). Die Lieferflächen sind über das gesamte Testgebiet verteilt. Ein größerer Anteil der Flächen liegt im unteren Teil des Flusseinzugsgebietes der Riehe (Osten), obwohl die Hangneigungen hier allmählich abnehmen. Die Flächengrößen gestalten sich stark variabel, z. T. gibt es Übertritte mit sehr kleinen Einzugsgebieten.

Die **Ausrichtung der Lieferflächen** orientiert sich an einer Kombination aus dominanter Hangneigungsrichtung und der Bearbeitungsrichtung, die meist parallel zur längsten Parzellengrenze verläuft (Bsp. ① auf der Karte). In Zonen mit stark ausgeprägtem Tiefenlinienprofil wird die Lage beinahe ausschließlich vom Verlauf des reliefbedingten Oberflächenabflusses bestimmt (②). Der Anteil direkter Einträge in die Riehe, als größeres perennierendes Fließgewässer, ist sehr gering (③). Der größere Teil der Einträge gelangt in namenlose Fließgewässer bzw. in künstlich angelegte Gräben mit zeitweiser Wasserführung. Zum Schneeschmelzereignis treten die meisten angebotenen Flächen auf. Die stoffliefernden Gebiete aus der Landwirtebefragung liegen zahlenmäßig darunter, gefolgt von denen des Starkniederschlagsereignisses.



**Liefergebiete aus Kartierung und Landwirtebefragung**

Adenstedt (Innerste-Bergland)

Stofflieferflächen abgegrenzt gemäß der Grunddaten:

- Schneeschmelzereignis mit Dauerregen
- Starkniederschlagsereignis
- Landwirtebefragung

räumlicher Überschneidungsbereich der Lieferflächen aus

- Starkniederschlagsern. und Landwirtebefragung
- Schneeschmelzern. und Landwirtebefragung
- Schneeschmelz- und Starkniederschlagsern.
- Schneeschmelz-, Starkniederschlagsern. und Landwirtebefragung

Flächennutzung

- Acker
- Grünland
- Wald, Forst
- Siedlung
- Gewässer, Graben
- 10 m-Isohypse

0 250 500 750 1000 m

Datenbasis:

Abbildung der Lieferflächen (Oberflächeneinzugsgebiete) mit Hilfe von GIS aus Grunddaten zu Bodenerosion und Überträgen von Schneeschmelzereignis mit Dauerregen Feb. 1996 Starkniederschlagsereignis Mai 1997 Befragung ansässiger Landwirte 1996

DGK 5, Blatt 3926 04, 05, 09-12, 16, 17  
TK 25: Blatt 3925, 4025



Geographisches Institut  
Universität Hannover  
Physische Geographie und Landschaftsökologie

(c) J. Voges 1999

Karte 7: Reale Liefergebiete aus Kartierung und Landwirtebefragung im Testgebiet Adenstedt

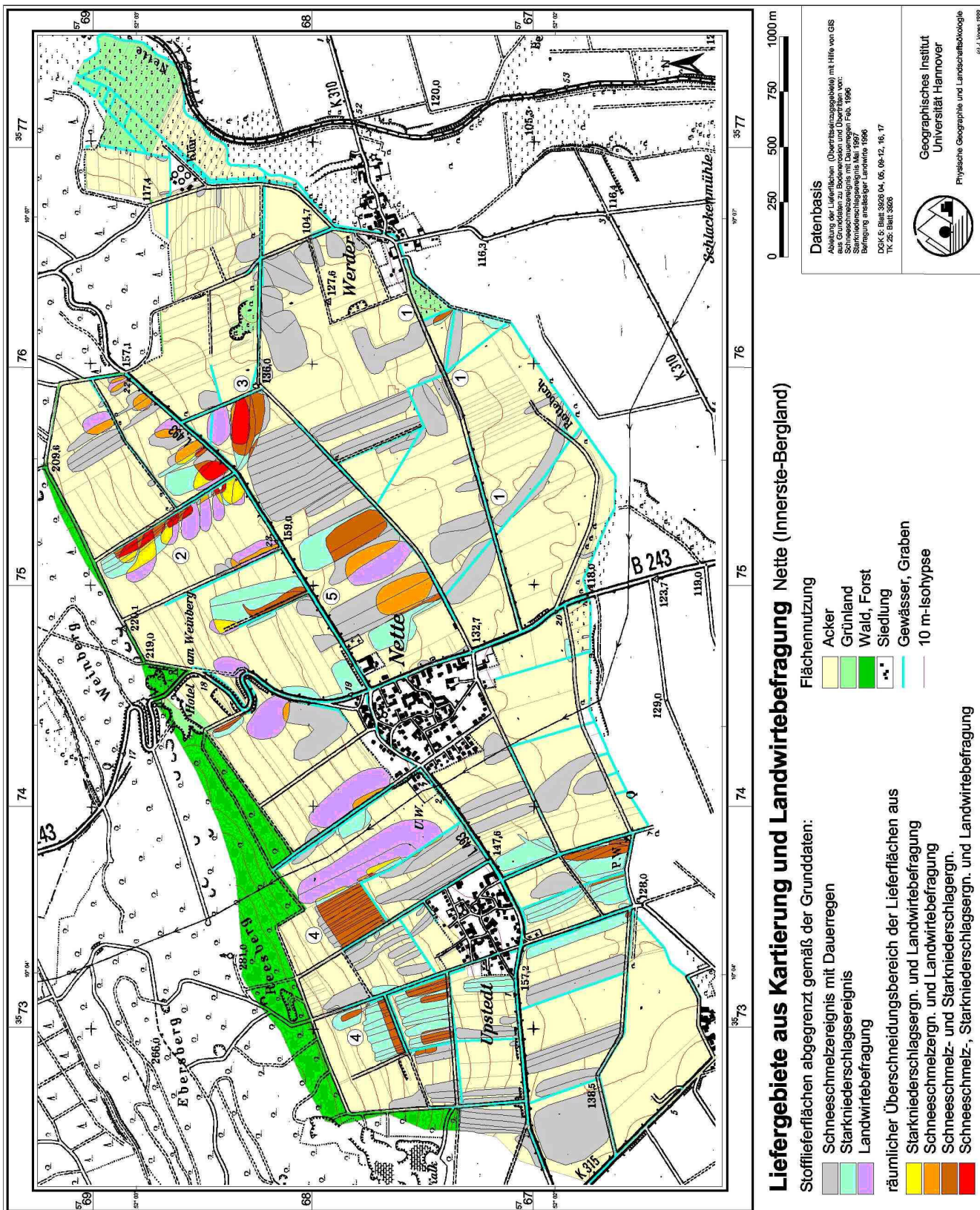
Stellenweise überschneiden sich die Liefergebiete von Schneeschmelz-, Starkniederschlagsereignis und Landwirtebefragung. Diese **räumlichen Überlagerungszonen** gelten als besonders exponiert für den Stoffeintrag. Der Anbindungsgrad liegt sehr hoch, da aus den Flächen auch unter veränderten Rahmenbedingungen wiederholt Stoffe in die Gewässer eingetragen werden. Flächenbereiche mit Lieferflächenüberschneidungen aus zwei Informationsquellen treten häufiger auf. Die Überschneidung von Liefergebieten aller drei Datengruppen kommt sehr selten vor. Die räumliche Lage der angebundenen Flächen hängt von räumlich und zeitlich variablen Größen ab. Die Variation der räumlichen Rahmenbedingungen ruft andere Übertrittspunkte hervor und führt zu Verschiebungen ihrer Einzugsgebietsgrenzen.

Im **Testgebiet Nette** treten die meisten Übertritte im Ober- und Mittelbereich der überwiegend gestreckten Hänge auf (Norden der Karte 8). Der Stoffeintrag erfolgt hier überwiegend in temporär wasserführende Gräben. Im südlichen Bereich nehmen die Neigungen am Unterhang ab, so dass nur wenige Übertritte direkt am Fließgewässer Rottebach liegen. Einige dieser Übertritte treten nur auf, weil von hangaufwärts gelegenen Ackerparzellen Fremdwasser zufließt (Bsp. ① auf der Karte). Aufgrund der geringen Zahl ausgeprägter Tiefenlinien und der eher einfachen Reliefstruktur fließt das Oberflächenwasser meist mehr oder weniger senkrecht in die Gräben ein. Nur selten treten Liefergebiete auf, deren Orientierung von der Haupthangneigungsrichtung (NW-SE) stärker abweicht (②). In den Fällen wirken kleinräumige Reliefformungen und die Bearbeitungsrichtung zusammen auf den Oberflächentransport. Auch hier entstanden die meisten Liefergebiete beim Schneeschmelzereignis. Überschneidungsbereiche von Liefergebieten unterschiedlicher Ereignisse existieren im Bereich von Tiefenlinien (③) sowie in ausgewählten Zonen größerer Hangneigungen (④) und Hanglängen (⑤).

Beim **Starkregenereignis** hängt in allen Gebieten die Längsorientierung der stoffliefernden Flächen besonders stark von der abflussablenkenden Wirkung bearbeitungsbedingter Kleinstrukturen ab. Bei diesem Ereignis orientieren sich die angebundenen Hangeinzugsgebiete fast ausschließlich an der längsten Ausdehnung der Parzellen. Die zusammenströmende Wassermenge aus dem Starkregen reicht nicht aus, um die Bearbeitungsstrukturen zu überfließen oder zu durchbrechen. Sie wirken trotz z. T. abweichender Haupthangneigungsrichtung kanalisierend.

In Adenstedt wie in Nette resultieren die ausgedehntesten Lieferareale aus der Befragung. Die Angaben der Landwirte zum Übertrittsgeschehen erfolgten weniger detailliert. Die Ausdehnung der genannten angebundenen Bereiche wird überschätzt.





Karte 8: Reale Liefergebiete aus Kartierung und Landwirtebefragung im Testgebiet Nette

Bei der **Wintererosion** verteilen sich die Lieferflächen über das gesamte Testgebiet. Es besteht ein großes Spektrum an verschiedenen Flächengrößen mit z. T. sehr kleinen Liefergebieten. Beim Frühjahrsereignis hingegen beschränken sich die Stofflieferflächen eng auf bestimmte Bereiche und ihre Flächenausdehnung ist einheitlicher.

## 4.5.2. Flächenanteile und Flächengröße der realen Liefergebiete

### 4.5.2.1. Flächenanteile

Der tabellarische Vergleich zur **Flächenausdehnung der angebundenen Areale** zeigt für die verschiedenen Datenquellen ein differenziertes Bild (Tab. 10). Im Mittel sind nur 9,3 % der Acker- und Grünlandflächen an Fließgewässer und Gräben angebunden. Das entspricht 6,7 % der Gesamtfläche inklusive Wald- und Siedlungsflächen.

Lieferflächen	Flächengröße [km <sup>2</sup> ]	Anteil an Landwirtschaftsfläche [%]	Anteil an Gesamtfläche [%]
gesamthaft	9,2	23,9	17,3
Schneeschnmelzereignis	6,6	17,2	12,5
Starkregenereignis	1,5	3,9	2,8
Landwirtebefragung	2,6	6,7	4,9
<b>Mittelwert</b>	<b>3,1</b>	<b>9,3</b>	<b>6,7</b>
<i>Überschneidungsbereich der Liefergebiete aus</i>			
Schneeschnmelz- $\cap$ Starkregenereign. $\cap$ Landwirtebefragung	0,1	0,3	0,2
Schneeschnmelz- $\cap$ Starkregenereign.	0,5	1,2	0,9
Schneeschnmelzereign. $\cap$ Landwirtebefragung	1,0	2,5	1,8
Starkregenereign. $\cap$ Landwirtebefragung	0,2	0,6	0,4

**Tab. 10: Flächenausdehnung der erfassten Liefergebiete und Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (alle Testgebiete)**

Durch die additive Verknüpfung aller Datenquellen ergeben sich sämtliche Areale, die bei mindestens einem Ereignis als Stofflieferant fungierten. Auf diese Weise lassen sich alle spezifischen Raumsituationen erfassen, die zu einem Übertritt führen können. Insgesamt knapp 24 % der Landwirtschaftsfläche übernehmen eine Feststofflieferfunktion. Alle diese eintragsrelevanten Bereiche sind auch für Prognosen bzw. die Modellbildung zu berücksichtigen.

Mit 17 % entstand der größte Anteil der Lieferflächen beim Großereignis der Schneeschnmelze. Dies ist die vierfache Größe der durch Starkregen hervorgerufenen Liefergebiete. Ein Extremereignis, bei dem die angebundene Fläche den Wert von knapp 20 % überschreitet, ist sehr unwahrscheinlich. **In durchschnittlichen Jahren wird die Größe des angebundenen Teils im Bereich des Starkregenereignisses (knapp 4 %) liegen.** Die genaue Ausdehnung der angebundenen Areale hängt von dem

Bodenbedeckungsgrad bzw. dem Entwicklungsstadium der Kulturfrüchte ab. Der Flächenanteil aus der Befragung bildet mit 6,7 % eine Mittelstellung.

Die Analyse der **Überschneidungsbereiche der Lieferflächen aus verschiedenen Ereignissen** ergibt Folgendes: Ca. 0,5 km<sup>2</sup> bzw. 1,2 % der Landwirtschaftsfläche liefern in *beiden* Untersuchungsjahren Stoffe an die Fließgewässer. Dies entspricht nur 7 % von allen Lieferflächen des Schneeschmelzereignisses. Postuliert man dazu noch, dass die gleichen Standorte auch über die Befragung als Liefergebiete identifiziert wurden, reduziert sich der gemeinsame Flächenanteil auf 0,3 %.

Die Flächenanteile lassen sich auch als statistische Häufigkeit des Auftretens bzw. Ausbleibens von eintragenden Arealen interpretieren. In diesem Sinne kann man die Zahlen als **Anbindungswahrscheinlichkeit** bezeichnen. Liegen keine Vorinformationen über einen Gebietsausschnitt hinsichtlich seiner Raumausstattung vor, außer der Flächennutzung „Acker“, so beträgt die **durchschnittliche Wahrscheinlichkeit der Anbindung etwa 9 %**. Bei einem Niederschlagsereignis kann folglich für eine beliebige ackerbauliche Nutzfläche der Stoffeintrag ins Gewässernetz mit einer Wahrscheinlichkeit von knapp 10 % prognostiziert werden.

#### Fazit

Daraus geht klar hervor, dass im Durchschnitt nur eine **sehr begrenzte Fläche für die Gewässerbelastungen** mit Feststoffen verantwortlich ist (ca. 5 %). Einzelne Großereignisse verursachen außergewöhnliche Gewässereinträge bzw. –belastungen. Sie führen zur Anbindung von bis zu einem Fünftel der Agrarfläche.

In Abhängigkeit von den besonderen Rahmenbedingungen variiert bei einzelnen Ereignissen die genaue räumliche Lage der Übertritte und der realen Liefergebiete stark voneinander. **Räumliche Überschneidungen** von Liefergebieten unterschiedlicher Erosionsereignisse kommen nur sehr begrenzt auf 1-7 % der angebundenen Flächen vor.

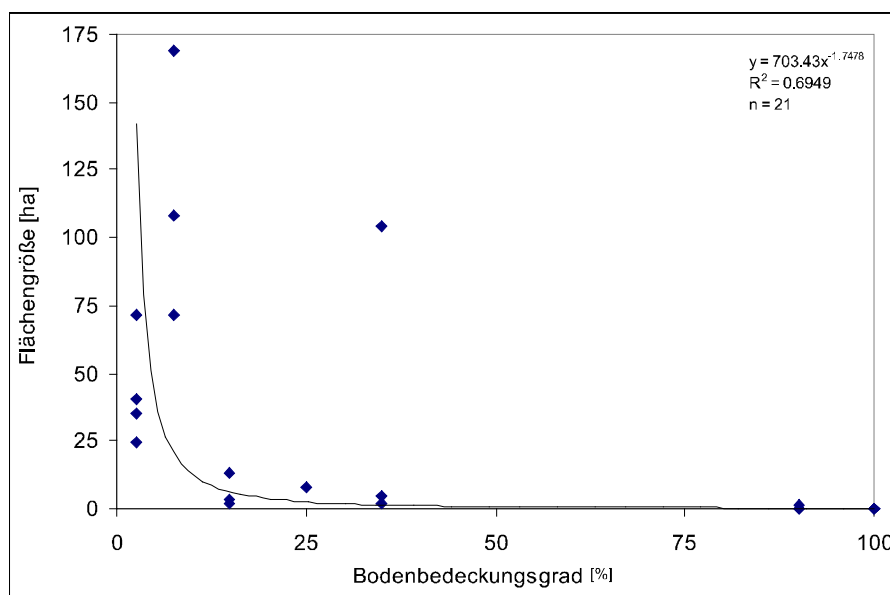
Die durchschnittliche **Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages** aus Agrarflächen liegt bei 9 %.

Die Veränderlichkeit von Bewuchsdichte, Ausprägung und Wirkung der Raumstrukturelemente sowie von Prozessen der oberflächlichen Abflussbildung führt zu stark **zeitvariablen Anbindungsbedingungen**. Dadurch wird die Prognose lieferrelevanter Gebiete für Einzelereignisse ohne detaillierte raumbezogene Information zu Oberflächen- und Abflusssituation erschwert. Die Modellierung von Stoffab- und Stoffeinträgen auf der Grundlage von spezifischen Einzelereignissen ist konzeptionell für die Ableitung der Gewässeranbindung ungeeignet. Somit führt der Einsatz komplexer, physikalisch begründeter Erosions- und Stofftransportmodelle nicht weiter.

### Abhängigkeit der Lieferflächengröße von der Bodenbedeckung

Aufgrund der flächenhaft geringen Bodenbedeckung auf den Ackerparzellen sowie aufgrund der geringen Bewuchshöhen im Gewässerrandbereich ruft die Schneeschmelzerosion größere Lieferareale hervor als die begrenzt wirkende Starkregenerosion.

Zwischen der klassifizierten **Bodenbedeckung** und **Flächengröße der Lieferareale** besteht eine **Regressionsbeziehung** (Abb. 25). Die negativ exponentielle Beziehung ist bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,7 signifikant. Je spärlicher der Boden bewachsen ist, desto ausgedehntere Gebiete liefern Stoffe an die Gewässer. Dies belegt die Abhängigkeit eines ereignisbezogen ermittelten Anbindungsgrades von der aktuellen Gebietssituation.



**Abb. 25: Regressionsbeziehung von Bedeckungsgrad und Flächengröße der realen Liefergebiete (Schneesmelzereignis)**

#### Fazit

Die Größe der angebundenen Ackerfläche nimmt mit zunehmender **Bodenbedeckung** ab. Durch Zwischenfruchtanbau oder die Reduktion des Anteils langsam bodenbedeckender Hauptkulturen in der Fruchtfolge lassen sich die Feststoffeinträge in die Gewässer verringern. Für die Ermittlung der Gewässeranbindung als einer langfristigen Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von Stoffeinträgen eignet sich die ereignisbezogene Modellierung nicht.

#### 4.5.2.2. Flächengröße einzelner Lieferflächen

Die mittlere **Lieferflächenausdehnung** liegt bei ca. 0,4 ha (Tab. 11). Für die verschiedenen Testgebiete unterscheiden sich die Liefergebiete im Mittel um bis zu 0,3 ha voneinander. In Hackenstedt bestehen im Durchschnitt grundsätzlich die kleinsten, in Rhüden die größten Lieferflächen. Im Maximum erreichen einzelne Übertritte eine Einzugsgebietsgröße von 25-85 ha. Die relative prozen-

tuale Standardabweichung liegt mit ca. 60 % relativ hoch, d. h. die Spannbreite in der Flächenausdehnung der liefernden Gebiete ist relativ weit.

In Rhüden wie in Adenstedt treten z. T. große Neigungen in Verbindung mit konkaven Hangformen auf. Dadurch fließen große Wassermengen z. T. auch über mehrere Schläge oberflächlich zusammen und bilden Übertritte mit ausgedehnten Einzugsgebieten aus. Auf den geraden gestreckten Hängen in Nette entstehen die größeren Liefergebiete durch große Hanglängen und den zumeist flächenhaften Wasserabfluss. Das Testgebiet Hackenstedt gestaltet sich strukturierter und weniger weiträumig. Es ergeben sich geringere Parzellengrößen und Hanglängen, so dass die Hangeinzugsgebiete insgesamt kleiner sind. Dies schlägt sich auch in der Größe der Liefergebiete nieder.

Informationsquelle	Testgebiet	$\bar{x}$ [m <sup>2</sup> ]	s [m <sup>2</sup> ]	CV [%]	Max [m <sup>2</sup> ]
Schneeschnmelzereignis	Adenstedt	4038	6736	60.0	69012
	Hackenstedt	3313	4936	67.1	53313
	Nette	4073	7368	55.3	83145
	Rhüden	6305	9505	66.3	84021
Starkregeneignis	Adenstedt	2837	5384	52.7	47938
	Hackenstedt	1743	2827	61.7	23141
	Nette	2114	3993	52.9	23728
alle	Adenstedt	4072	6989	58.3	69012
	Hackenstedt	3153	4765	66.2	53313
	Nette	3759	7243	51.9	83145
	Rhüden	7341	10758	68.2	84021
gesamthaft		<b>4152</b>	<b>7277</b>	<b>57.1</b>	<b>84021</b>

Tab. 11: Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Maximalwert für die Flächengrößen der Liefergebiete

### Typen von Lieferflächen

Die Übertritte lassen sich mithilfe von statistischen Lage- und Streuparametern genauer charakterisieren (Tab. 12). Dazu erfolgt eine Einteilung der Übertritte in Typen, die die jeweilige Kategorie des Eintragungswässers (Graben- bzw. Gewässertyp) sowie die Art des Übertrittsbereiches (punkt-, flächenhaft) beinhaltet. Dies ergibt folgende **Befunde**:

#### Lieferflächentypen des Schneeschnmelzereignisses:

- Die meisten Übertritte erfolgen punkthaft.
- Die **angebundene Gesamtfläche** von Hangeinzugsgebieten punktueller Übertritte ist am größten.

Eine Ausnahme bildet das Testgebiet Nette, wo der Stoffübertritt hauptsächlich flächenhaft verläuft.

- **Anzahl und Fläche** von Übertritten in Entwässerungsgräben dominieren.



- Einzugsgebiete der punktuellen Übertritte sind meistens größer als die der flächenhaften. Eine Ausnahme bildet Nette, wo der Stofftransport und –übertritt auf gestreckten Hängen eher flächenhaft verläuft.
- Die mittlere **Größe der Lieferflächen** liegt je nach Testgebietsstruktur zwischen 0,4 und 1 ha, im Maximum werden 45 bis 55 ha, vereinzelt auch über 80 ha erreicht.
- Die **Streuung der Flächenausdehnung** (s) der angebotenen Gebiete liegt mit 0,2 bis 3,8 ha sehr hoch.
- Im Mittel weisen die Liefergebiete in Adenstedt die größte Ausdehnung auf. Das häufige Auftreten von ausgeprägten Tiefenlinien führt zur Kanalisierung des Oberflächenabflusses, so dass Stoffe über große Distanzen transportiert werden. Die Liefergebiete sind dementsprechend ausgedehnter. Die Parzellengrößen liegen in Adenstedt mit durchschnittlich 2,1 ha über denen von Nette (1,6 ha) Rhüden (1,4 ha) und Hackenstedt (1,2 ha). In Rhüden kommen mit maximal 36 ha ebenso wie in Adenstedt (56 ha) sehr große Schläge vor (zum Vergleich: andere Gebiete ca. 20 ha). Dies erklärt die im Vergleich zu Nette und Hackenstedt größeren Liefergebiete. Die Möglichkeit der Bildung großer Hangeinzugsgebiete wächst also mit der Parzellenausdehnung, da dann große zusammenhängende Flächen gleichen Bodenbearbeitungszustandes und Bodenbedeckungsgrades entstehen.
- Im Gebiet Adenstedt ist die Mehrheit der stoffliefernden Flächen an Fließgewässer angebunden (n=225). Dabei erweist sich die Gesamtgröße der Einzugsgebiete der Übertritte in Gewässer bzw. in Gräben als etwa ausgeglichen. Dies ist auf den hohen Anteil an Fließgewässern insgesamt und an steilen Reliefs in der Nähe der Fließgewässer zurückzuführen.
- In Nette wird wegen des eher flächenhaften Oberflächenabflusses und der häufig quer zur Haupthangneigungsrichtung verlaufenden Gräben und Fließgewässern ein bedeutender Anteil an flächenhaften Übertritten konstatiert.
- Potentielle sowie künstliche Übertritte sind in Anzahl und Fläche unbedeutend.

#### **Lieferflächentypen des Starkregenereignisses:**

- Es treten insgesamt kleinere Lieferflächengrößen auf als beim Schneeschmelzereignis. Ursache ist der höhere räumliche Differenzierungsgrad der strukturellen Rahmenbedingungen (z. B. Bodenbedeckung, -feuchte, -struktur).
- Die mittlere Ausdehnung der Liefergebiete weicht nur wenig von der der Schneeschmelzerosion ab.
- Wiederum stellen die punktuellen oder flächenhaften Übertritte in Gräben die zahlen- und flächenmäßig größte Gruppe.
- Direkte Stoffübertritte in Fließgewässer sind unbedeutend.
- Die Testgebiete unterscheiden sich hinsichtlich der mittleren und gesamten Ausdehnung der stoffliefernden Flächen.
- Potentielle Übertritte, d. h. Fälle, in denen die abgetragene Bodensubstanz am Rand der Gewässer- oder Grabenböschung liegen bleibt, aber nicht eingetragen wird, sind relativ häufig.

Erosionsereignis	Einzugsgebiet des Übertrittstyp	A d e n s t e d t						H a c k e n s t e d t						N e t t e						R h ü d e n						
		Gesamtfläche [m²]	$\bar{x}$ [m²]	s [m²]	Min [m²]	Max [m²]	n	Gesamtfläche [m²]	$\bar{x}$ [m²]	s [m²]	Min [m²]	Max [m²]	n	Gesamtfläche [m²]	$\bar{x}$ [m²]	s [m²]	Min [m²]	Max [m²]	n	Gesamtfläche [m²]	$\bar{x}$ [m²]	s [m²]	Min [m²]	Max [m²]	n	
Schneeschmelze	Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)	980500	9904	11034	205	53402	99	804912	6144	7928	35	55128	131	461598	5561	8224	88	44623	83	768228	7682	8086	383	46745	100	
	Übertritt in <b>Fließgewässer</b> (punkthaft)	904264	6459	11513	114	124456	140	101038	8420	5778	474	18036	12	159942	6954	7144	369	28847	23	108915	27229	38225	1561	84021	4	
	Übertritt in <b>Fließgewässer</b> (flächenhaft)	340767	4314	4894	110	28260	79	32326	3233	2141	1006	6867	10	296153	12876	16662	769	83145	23							
	Übertritt in <b>Graben</b> (flächenhaft)	245208	4904	4904	71	22068	50	223518	4383	4944	168	27168	51	635408	9484	7271	752	36049	67	502762	6364	9420	752	74475	79	
	pot. Übertritt in <b>Fließgewässer</b> (flächenhaft)	3343	557	187	366	813	6																			
	künstlicher Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)							1538	1538		1538	1538	1	10731	1192	967	133	2891	9	873	873		873	873	1	
	künstlicher Übertritt in <b>Fließgew.</b> (punkthaft)													32589	10863	18171	358	31845	3							
	Übertritt in Gully, Einlaufschacht (punkthaft)																				23706	11853	14578	1544	22161	2
Starkniederschlag	Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)	278421	7734	8297	1562	43286	36	72118	6556	7400	1119	25901	11	173260	5414	6770	96	24613	32							
	Übertritt in <b>Graben</b> (flächenhaft)	239173	9966	9878	821	47938	24	91017	6501	6491	940	24777	14	374995	8333	10467	232	58730	45							
	potentieller Übertritt in <b>Graben</b> (flächenhaft)	119895	6310	4334	851	20332	19	7873	2624	203	2396	2784	3	13721	6861	5345	3081	10640	4							
	Übertritt in <b>Fließgewässer</b> (punkthaft)	12416	6208	6022	1950	10467	2							7407	3704	1134	2902	4505	2							
	potentieller Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)	8863	4432	572	4027	4836	2																			
	künstlicher Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)	4523	4523		4523	4523	1																			
	Übertritt in <b>Fließgewässer</b> (flächenhaft)	784	784		784	784	1	23095	3849	1379	1893	5498	6	55363	7909	5270	3699	19318	7							
	künstlicher Übertritt in <b>Graben</b> (punkthaft)							9817	9817		9817	9817	1	9659	4829	6094	520	9139	2							
Befragung	Übertritt (nicht differenziert)	1105689	23035	16985	5521	93664	48	514251	15583	8413	4196	41788	33	424488	17687	14687	4114	58618	24	530413	26521	19295	6660	93684	20	

Tab. 12: Lage- und Streuparameter zur Flächenausdehnung verschiedener Einzugsgebiete der Übertrittstypen (Lieferflächentypen)

### Lieferflächentypen aus der Befragung:

- Die Gesamtfläche der Liefergebiete aus der Landwirtebefragung nimmt eine Mittelstellung zwischen Extrem- und Durchschnittsereignis ein.

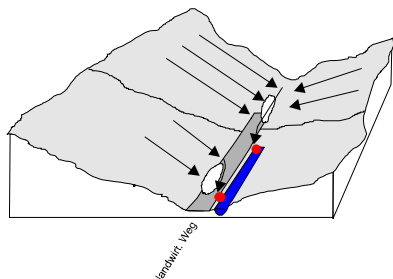
#### Fazit

Bei der **Ausprägung der angebundenen Flächen** bestehen Unterschiede zwischen den Testgebieten. Die Differenzierungen in der Größe der Liefergebiete resultieren vornehmlich aus der variablen Reliefsituation (Hangformung, Tiefenlinie, Hangeinzugsgebietsgröße usw.) und den unterschiedlichen raumstrukturellen Bedingungen (Verbreitung, Dichte sowie Orientierung von Verkehr und Gewässernetz, Parzellenanordnung, bearbeitungsbedingte Leitlinien usw.) der verschiedenen Gebiete. In Abhängigkeit von der spezifischen Gebietssituation haben z.T. nicht punktuelle sondern flächenhafte Übertritte eine größere Bedeutung für den gesamten Stoffeintrag. Ebenso überwiegen in Einzelfällen die direkten Übertritte in die Fließgewässer vor denjenigen in die Gräben. Die **Variabilität der Liefergrößen** ist auch innerhalb eines eng begrenzten Raumes hoch. Die Lieferflächengrößen zeigen zudem eine zeitliche Veränderlichkeit je nach Ausmaß des Erosionsereignisses.

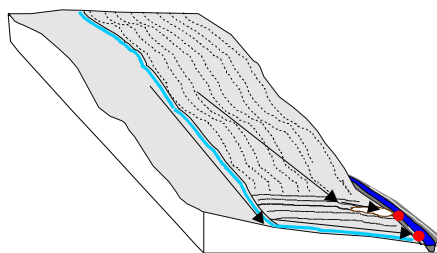
#### 4.5.3. Übertrittstypisierung

Über Einzelauswertungen der Kartierungen können auf Grundlage von häufig wiederkehrenden Raumsituationen acht **Übertrittstypen** mit jeweils zwei Varianten ausgewiesen werden (Abb. 26).

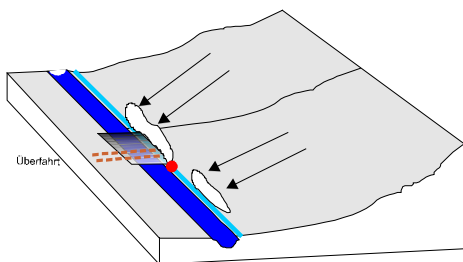
Der effektive Stoffeintrag in Gewässer erfolgt überwiegend über den punktuellen Eintrag (s. BLUME U. A. 1996). Flächenhafte Übertritte bzw. Stofflieferungen existieren vor allem bei dichter Vegetation im Gewässerrandbereich seltener (s. M. BACH U. A. 1997). Die Kanalisierung des oberflächlichen Überschusswassers stellt dabei einen wesentlichen Prozess beim Stofftransport dar. Sie ist meistens für einen Übertritt von erodierter Feinerde in ein Fließgewässer oder einen künstlichen Graben verantwortlich. Die Bündelung erfolgt entweder durch eine quer-konkave Reliefformung oder -und dies ist sehr viel häufiger- durch kanalisierende Oberflächenstrukturen. Dazu gehören im wesentlichen die Ackerrandfurche, gewässerbegleitende Uferbankette und Kleinstrukturen der Bodenbearbeitung (Saatreihen, Fahrspuren, Pflugfurchen u.ä.). Flächenhafte Übertritte, die ohne abflussfördernden Einfluss von Strukturen auftreten, gibt es nur in Einzelfällen. Die Raumstrukturen können in unterschiedlichem Winkel zum Transportpfad liegen. Sie können das Wasser-/Schwebstoffgemisch entweder in gleicher Richtung bevorzugt bündeln, mehr oder weniger von der Haupthangneigungsrichtung umlenken oder bei unzureichendem Retentionsvermögen (d. h. geringer Höhe oder Tiefe) überströmt oder durchbrochen werden. Auf landwirtschaftlichen Wegen, die zumeist von einem Graben begleitet werden, kann sich leicht Wasser sammeln, bevor es durch nicht prognostizierbare kleine Geländedepressionen in den Graben übertritt.



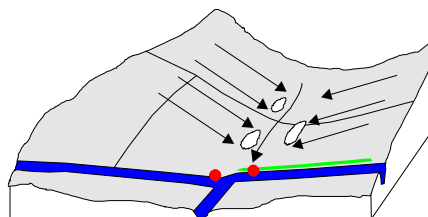
- Landwirtschaftlicher Weg**
- als Abflussleitbahn im Bereich einer Tiefenlinie
  - als bevorzugter Transportpfad mit Sammelfunktion



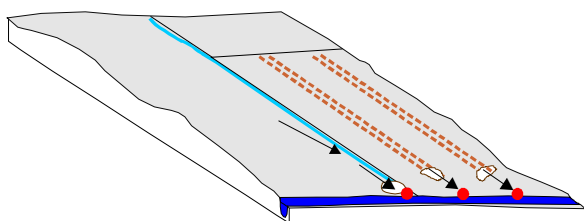
- Umlenkung des Abflusspfades**
- durch Vorgehende in Falllinie
  - durch Ackerrandfurche in Falllinie



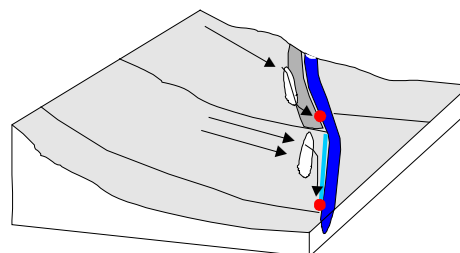
- Unterbrechung von Raumstrukturelementen**
- Bodenverdichtung und Neigung zum Gewässer im Bereich einer Überfahrt
  - durch zufällige Bedingungen



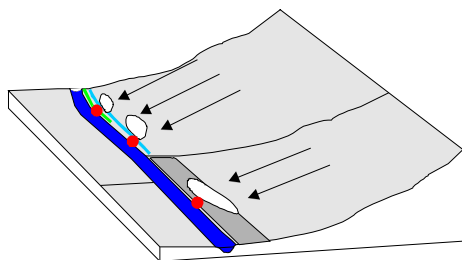
- Abflussbündelung in Tiefenlinie**
- Übertritt ohne Abflusshindernisse
  - Übertritt selbst bei Gewässerrandstreifen



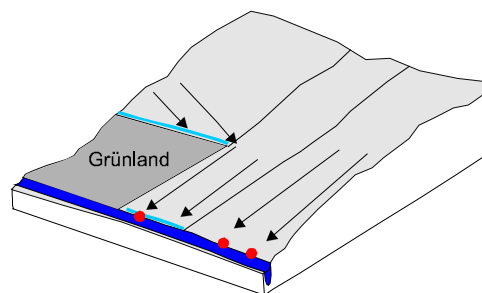
- Raumstrukturelemente in Richtung vom Transportpfad**
- Übertritt am Ende von Fahrspuren
  - Übertritt am Ende von Ackerrandfurchen



- Raumstrukturelemente schräg zum Transportpfad**
- Abfließen entlang von Wegesranden
  - Konzentration von Oberflächenabfluss in Ackerrandfurchen oder entlang von Uferbanketten



- Raumstrukturelemente quer zum Transportpfad**
- Überfließen von zum Gewässer geneigten Wegen
  - Überfließen von Ackerrandfurchen, Barrieren oder Gewässerrandstreifen mit unzureichendem Retentionsvermögen



- Oberflächenabfluss ungehindert oder mit Fremdwasserzufluss**
- häufig flächenhafter Übertritt bei Fehlen abflusshemmender Strukturen
  - Übertritt mit Abflussförderung durch Fremdwasserzufluss

Legende			
	Schlaggrenze		Bearbeitungsstruktur
	Gewässer/Graben		Bodenerosion, Oberflächenabfluss
	Ackerrandfurche, Uferbankett		Akkumulation
	Gewässerrandstreifen		Übertritt

Abb. 26: Häufige Übertrittssituationen typisiert auf Grundlage von 1100 Übertrittsfällen

## 4.6. Zusammenfassung und Fazit

Im vorangegangenen Kapitel sind Auswertungen zum Prozess des Feststoffeintrags in Gewässer dargestellt. Sie gründen sich zum Großteil auf Daten aus eigenen Felderhebungen, sind aber auch durch Informationen amtlicher Quellen ergänzt. Damit liegt erstmalig eine Untersuchung vor, die den oberflächlichen Stoffeintrag in die Gräben und Fließgewässer unter realen Geländebedingungen umfassend beobachtet (über 1100 Übertrittsbereiche), um daraus verallgemeinernde Rückschlüsse auf das Risiko des Stoffeintrages bestimmter Flächenbereiche zu ziehen.

Zunächst geht es bei der Untersuchung (Felddatenerhebung und Datenauswertung) ganz allgemein um ein verbessertes Prozessverständnis des Übertrittsgeschehens:

- Wie vollzieht sich der Übertritt in das Gewässer
- Welche Größen beeinflussen die Übertrittsereignisse im Wechselwirkungsgefüge des Landschaftsraumes ?

Es geht also darum herauszuarbeiten, welche Einflussfaktoren für den Eintrag relevant sind, aber im Hinblick auf die Modellierung auch, was modelltechnisch im mesoscale realisierbar ist.

Die Analysen zeigen ganz deutlich: Das Problem des partikulären Stoffeintrages in die Gewässer beschränkt sich auf sehr wenige ausgewählte Flächenbereiche eines Flusseinzugsgebietes. Im Durchschnitt wird aus knapp 5 % der Gesamtfläche Bodensubstanz an die Gewässer geliefert. Die genaue räumliche Lage der Liefergebiete ist bei einzelnen Ereignissen sehr unterschiedlich. Die Hangeinzugsgebiete der Übertritte erreichen nur eine mittlere Größe von knapp einem halben Hektar. Über die Prognose dieser Risikobereiche und gezielte Maßnahmen in der Fläche oder im Gewässerbereich lässt sich die Effizienz eines Einzugsgebietsmanagements zur Reduktion des Stoffeintrages erheblich steigern. Das Problem des diffusen Stoffeintrages über das Oberflächenwasser erscheint vor diesem Hintergrund lösbar.

Die wichtigsten Ergebnisse in der **Zusammenfassung**:

- Bodenerosion, Oberflächenabfluss, Oberflächentransport bis in das Graben- und Gewässernetz, Raumstrukturen als abflussbeeinflussende Elemente und Weitertransport im Grabensystem sind prinzipiell für den Stoffeintrag, d. h. für den Gewässeranbindungsgrad relevante Größen.
- Die Gesamtheit der den diffusen Stoffeintrag beeinflussenden Einzelprozesse und ihrer Wechselwirkungen zeigt sich als hochgradig komplexes Gefüge und ist modellseitig im mittleren Maßstab unmöglich abzubilden.
- Ausmaß und Verbreitung der Bodenerosion variiert je nach Rahmenbedingungen stark. Die Erosion bestimmt die Ortslage und Bedeutung eines Liefergebietes hinsichtlich der eingetragenen Feststoffmenge entscheidend mit.

- 60 % der Lieferflächen tragen bis zu 7,5 t in das Gewässer- und Grabensystem ein; 10 % der Übertritte verursachen 75 % des gesamten Eintrages und bilden ein Fünftel der gesamten an gebundenen Fläche.
- Auf der agrarischen Nutzfläche werden beim Großereignis (Schneesmelze im Februar) etwa 4,5 t/ha, beim Starkniederschlagsereignis (Mai) ca. 2,3 t/ha erodiert.
- Nur 25 % des erodierten Bodens werden innerhalb der Lieferareale wieder akkumuliert.
- Die Bodenart (aus der BÜK 50) hat keinen Einfluss auf die Anbindung.
- Je näher die flächenhafte Raumstruktur „Bearbeitungsrichtung“ in Falllinie liegt, umso höher liegt die Anzahl der Übertritte und umso größer sind ihre Hangeinzugsgebiete.
- Lineare Raumstrukturelemente beeinflussen den Oberflächenabfluss und damit die Gewässeranbindung. Nach abnehmender Einflusstärke geordnet sind dies: Uferbankett, Ackerrandfurche, Gewässerrandstreifen.
- In den Liefergebieten treten abflussfördernde Strukturen häufiger auf als abflusshindernde.
- Lineare Raumstrukturen können transportierte Feststoffe zurückhalten. Sie nehmen nach Schätzungen im Durchschnitt Sedimentmengen von knapp 10 % des Abtrags eines Erosionsereignisses auf.
- Ein Modell des mittleren Maßstabs kann nur sich wenig verändernde Raumstrukturelemente, wie Wege und Straßen, berücksichtigen: Wege wirken dabei abflussfördernd, Straßen abflusshemmend.
- Die detaillierte Erfassung des gesamten Gewässer- und Grabensystems ist Voraussetzung für die Bestimmung des Gewässeranbindungsgrades. Künstliche Gräben machen zwei Drittel der gesamten Länge des Gewässersystems aus.
- In temporär wasserführenden Gräben kann eingetragener Feinboden sedimentieren. Die Retentionsfähigkeit beträgt bezogen auf die Ackerfläche etwa 1 t/ha\*a oder 21 % des mittleren Abtragsvolumens.
- Im Mittel liefern 9 % der gesamten Ackerfläche Stoffe an die Gewässer.
- Bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen sind größtenteils verschiedene Flächenbereiche im Agrarraum angebunden. Räumliche Überschneidungen der realen Lieferflächen verschiedener Ereignisse kommen nur auf ca. 1 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche vor.
- Die mittlere Einzugsgebietsgröße eines Übertritts beträgt 0,4 ha, der Variationskoeffizient liegt mit 60 % hoch.
- Die Größe der Lieferflächen wächst mit abnehmendem Bodenbedeckungsgrad.
- Die Übertritte erfolgen meist punktuell in die künstlichen Gräben.
- Durch Unterschiede in der Gebietsstruktur (Anlage des Wege- und Straßennetzes, Gewässer- und Grabensystem, Parzellierung, Reliefierung) ergeben sich Unterschiede in Bezug auf die Eigenschaften der Lieferflächen (Größe, Anzahl, Übertrittsart, -typ).
- Entsprechend verschiedener charakteristischer Raumkonstellationen lassen sich acht häufig wiederkehrende Übertrittssituationen identifizieren (Abb. 26).

## 5. IDENTIFIKATION DER MODELLPARAMETER FÜR DIE SIMULATION DER GEWÄSSERANBINDUNG

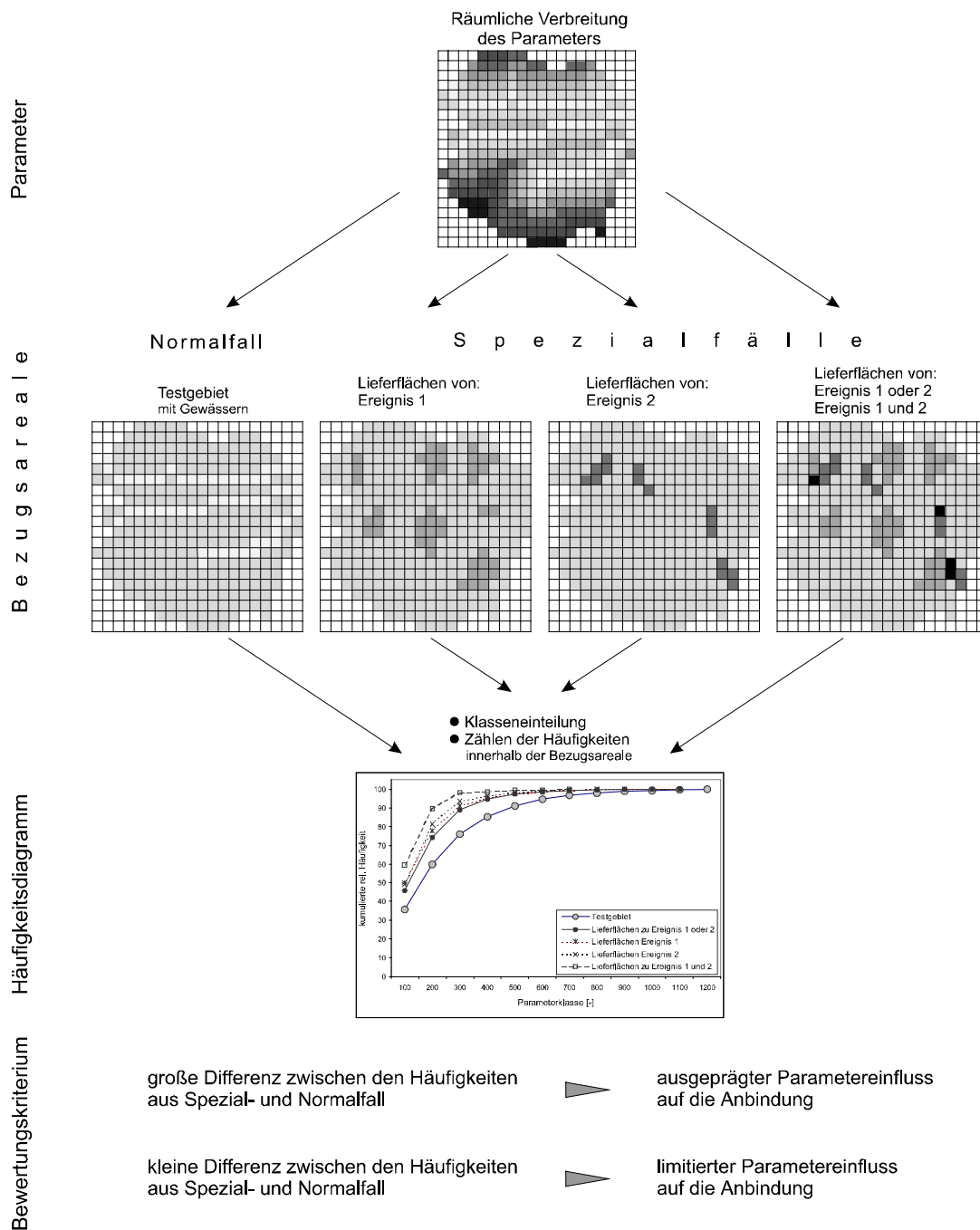
### 5.1. Prinzip

Wie im vorangehenden Kapitel dargestellt, spielen für Feinerdeeinträge in Fließgewässer eine Reihe von Einflussfaktoren von mitunter sehr kompliziert ablaufenden Prozessen eine Rolle. Die Prozesswirkungen können kleinräumig variieren und müssen auf mikroskaliger Ebene beschrieben werden. Die **Prozessfaktoren** hängen z. T. von zufällig auftretenden (chaotischen) Einflüssen ab, die nicht prognostizierbar sind. Solche kleinräumig wirkenden Einflüsse lassen sich nur abbilden, wenn die dazu notwendigen Strukturdaten durch ereignisorientierte Geländeerhebungen erfasst werden. Ein empirisch-statistisches Modell des mittleren Maßstabs kann Einflüsselemente, deren Abbildung eine Vielzahl von Detaildaten benötigt, nicht berücksichtigen.

Das Modell für die langfristig geltenden Simulationen muss auf **Parameter** zurückgreifen, die für die Flächenanbindung relevant, aber auch operationalisierbar sind. Diese unveränderlichen Größen müssen sich aus den wenigen Grunddaten kalkulieren lassen, die für die mesoskaligen Gebietsgrößen flächenhaft zur Verfügung gestellt werden können. Weiterhin ist es wichtig, dass mithilfe der Parameter diejenigen Prozesse mit hinreichender Genauigkeit beschrieben werden können, die für die Gewässeranbindung eine wesentliche Bedeutung haben.

Das **Ziel** der Untersuchung besteht also darin, für die Modellierung geeignete Parameter zu identifizieren, die aus flächenhaft verfügbaren Daten abzuleiten sind und die den Anbindungsgrad zu charakterisieren vermögen. Damit wird der Schritt der Parametrisierung vollzogen.

Im Folgenden wird untersucht, ob und inwieweit sich theoretisch für die Modellierung taugliche Parameter eignen, die auf unterer Maßstabsebene ermittelten realen Lieferareale durch bestimmte Wertausprägungen abzubilden. Methodisch wird damit ein **Upscaling-Schritt** vollzogen, der induktiv von der spezifischen Situation in den aufgenommenen realen Lieferflächen zu brauchbaren Resultaten im mesoscale (Gesamtgebiet) führen soll. Auf Basis statistischer Analysen und Zusammenhänge werden die relevanten Modelleingangsgroßen, die sog. Anbindungsparameter identifiziert. Das Ziel des Verfahrens ist die Regionalisierung, d. h. eine räumliche Übertragung der Anbindungsparameter auf eine hinsichtlich der räumlichen Bedingungen ähnliche Lokalität auf höherer Maßstabsebene (s. A. Becker 1992). Aufbauend auf die Auswertungen wird in Kapitel 6 ein Modellkonzept präsentiert.



**Abb. 27: Prinzip der Häufigkeitsanalyse zur Bewertung der Bedeutung von Anbindungsparametern**

Mit GIS-gestützten Berechnungsmethoden (Kap. 6) wurden **Parameter** zur **Reliefbeschreibung**, zum **Oberflächenabfluss** und zur **Bodenerosion** errechnet und die Häufigkeit ihres Auftretens in den Gebieten ermittelt. Der Vergleich der relativen Häufigkeiten der Parameterwerte innerhalb der Liefergebiete (Spezialfall) mit den durchschnittlich in den Testgebieten unter Ackernutzung vorkommenden Frequenzen (Normalfall) ermöglicht Rückschlüsse auf die Einflussstärke des betrachteten Parameters für die Gewässeranbindung (Abb. 27). Die erfassten Lieferflächen besitzen spezifische Eigenschaften, die sie für den Feststoffeintrag besonders prädestinieren. Aufgrund dieser



besonderen Eigenschaften treten Übertritte in das Gewässersystem auf. Nicht angebundene Flächen besitzen Eigenarten, die den Stoffeintrag in die Gewässer verhindern. Zwar sind viele Prozesse und Einflussfaktoren im mesoscale nicht abbildbar, dennoch muss sich durch prozessintegrierende oder -simplifizierende Parameter die besondere „Qualität der Lieferfläche“ nachweisen lassen. Je stärker die Abweichung der Werteausprägung innerhalb der an Gewässer angebotenen Flächen von der Durchschnittsverteilung in den Testgebieten ausfällt, um so bedeutender ist der Einfluss des betreffenden Parameters auf den Anbindungsgrad. Eine **große Differenz** zwischen der Häufigkeit in den Liefergebieten und in den Testgebieten bedeutet einen **ausgeprägten Parametereinfluss** auf die Anbindung. Eine kleine Differenz zwischen den Häufigkeiten in den Liefergebieten und in den Testgebieten hingegen belegt den limitierten Parametereinfluss auf die Eintragsgefährdung.

Die folgenden **Diagramme** zeigen auf der Abszisse jeweils den Parameter und auf der Ordinate die kumulierte relative Häufigkeit. Die Linien repräsentieren die Frequenz des Parameters innerhalb einer Klasse für verschiedene Bezugsareale. Für jedes Bezugsareal erfolgt die Auszählung der Elemente jeder Klassenstufe. Die Signaturen bedeuten:

- normalerweise im Gebietsdurchschnitt auftretende Häufigkeit (Normalfall),
- Häufigkeit in *denjenigen* Lieferflächen, die über mind. eine Informationsquelle identifiziert wurden
- strichliert x, +, \* Häufigkeit in den Lieferflächen aus je einer Informationsquelle (Starkregen-, Schneeschmelzereignis oder Befragung)
- strichliert □, ■ Häufigkeit der Lieferflächenbereiche, die über mehrere Informationsquellen (Kartierung und Befragung) erfasst wurden (räumliche Überschneidungen).

Ein Parameter mit folgender Häufigkeitsdifferenz zwischen Normal- und Spezialfall gilt definitionsgemäß als:

- unbedeutend  $\leq 5$  %-Punkte,
- gering bedeutend  $> 5 - 10$  %-Punkte,
- bedeutend  $> 10$  %-Punkten.

Die gesetzten Schwellenwerte leiten sich aus der Spannweite der auftretenden Häufigkeitsdifferenzen ab.

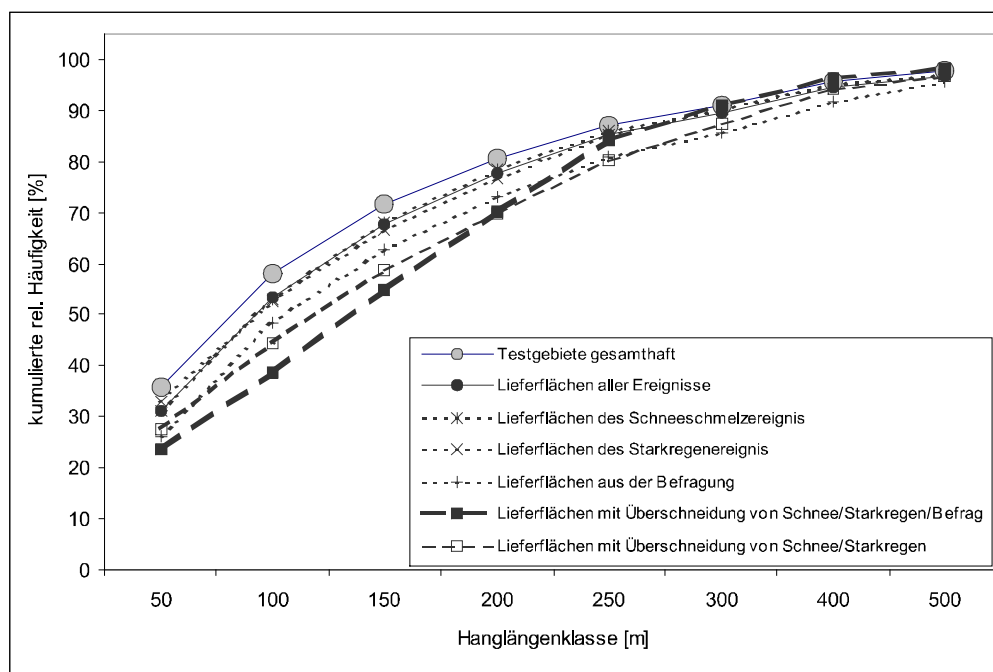
## 5.2. Relief

### Hanglänge

Die Hanglänge zählt zu den wichtigsten Einflussgrößen von Bodenerosionsprozessen. Die Abtragsgefährdung steigt grundsätzlich mit der erosiven Hanglänge (R. DIKAU 1986, T.J. TOY 1977). Über einfache Algorithmen der Reliefanalyse errechnet sich die Hanglänge aus dem DGM.

Die relativen Häufigkeiten der kleinen Hanglängenklassen innerhalb der Stoffliefergebiete liegen durchschnittlich um 10 %-Pkt. unterhalb von denen des Gesamtdurchschnittes (Abb. 28). Die Häufigkeitsunterschiede belegen den Einfluss der Hanglänge auf die Eintragsgefährdung noch deutlicher, wenn man die wiederholt als angebunden identifizierten Flächenbereiche betrachtet (25 %-Pkt.). Kurze Hänge kommen demnach in den Liefergebieten seltener vor als im Gebietsdurchschnitt auf Ackerflächen. Diese Tendenz stellt sich bis zu einer Hanglänge von 200 m sehr deutlich dar. Im Gebietsdurchschnitt liegt die Hanglänge am häufigsten zwischen 50 und 100 m (stärkste Steigung). Die Ortslagen, die über alle Datenquellen als eintragsrelevant identifiziert wurden, weisen meistens weit größere Hanglängen von 150-200 m auf. Oberhalb von einer Hanglänge von 350-400 m sind nur noch unbedeutende Unterschiede zwischen Normal- und Spezialfall feststellbar.

Die Einfluss der Hanglänge auf die Eintragsgefährdung begründet sich folgendermaßen. Die Hanglänge bestimmt wesentlich die Größe des Einzugsgebietes eines Standortes. Damit beeinflusst sie das oberflächlich ablaufende Wasservolumen, das seine kinetische Energie z. T. beim Abtrag und Transport von Bodensubstanz verbraucht. Mit der Abflussmenge erhöht sich auch die Stofftransportkapazität, so dass das erodierte Material bis zum Gewässersystem transportiert wird. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages in die Gewässer.



**Abb. 28: Relative Häufigkeiten der berechneten Hanglängen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

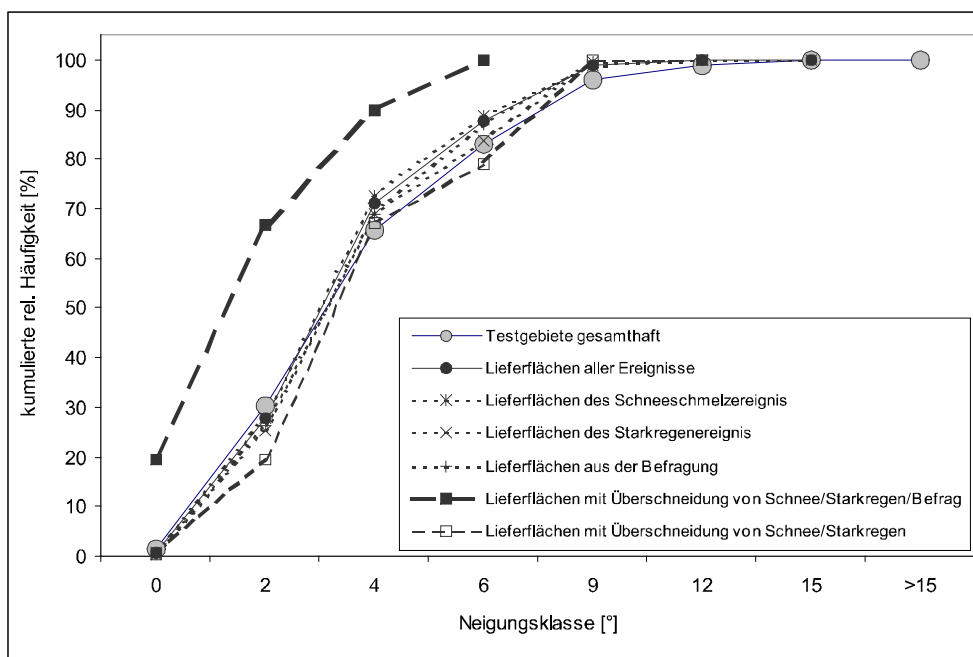
## Fazit

Insgesamt existieren innerhalb der Liefergebiete in Gegenüberstellung mit dem Testgebietsdurchschnitt weniger kurze und mehr lange Hänge. Die **Hanglänge** ist als Einflussparameter für die Bestimmung des Anbindungsgrades bedeutend. Sie ist aus dem DGM flächenhaft für den mesoscale errechenbar und wird in das Modellkonzept integriert.

## Hangneigung

Mit Zunahme der Hangneigung steigt die Fließgeschwindigkeit von Oberflächenwasser und damit die transportierbare Stoffmenge. Insofern ist die Neigung für die Abschätzung des Stoffeintragsrisikos relevant. N. FELDWISCH (1995) findet in Felduntersuchungen eine signifikante Beziehung zwischen der Hangneigung einerseits und der Abtragsmenge und Sedimentkonzentration andererseits.

Die Kurvenverläufe der relativen kumulierten **Häufigkeiten der Hangneigung** für die verschiedenen Bezugsareale zeichnen folgendes Bild (Abb. 29).



**Abb. 29: Relative Häufigkeiten der berechneten Neigung im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

Ein Großteil der angebundenen Flächen besitzt Hangneigungen von  $> 0-6^\circ$ , weil innerhalb dieser Neigungsspanne die meisten Flächen mit ackerbaulicher Nutzung liegen. Die Unterschiede zwischen Durchschnittverteilung und spezieller Häufigkeitsverteilung in den Liefergebieten sind insgesamt relativ gering (5-10 %-Pkt.). Im Gebietsdurchschnitt kommen mehr niedrige und weniger hohe Neigungsstufen vor als in den Lieferflächen. In den Arealen, die bei beiden Erosionsereignissen Stoffeinträge verursachten, finden sich stark geneigte Hänge besonders häufig. Der Einfluss der Neigung auf die Anbindung ist in solchen Arealen „gering bedeutend“. Völlig ebene Flächen existie-

ren in stoffliefernden Arealen etwas seltener als im Gebietsdurchschnitt. Raumbereiche mit ständiger Stofflieferfunktion weisen ein sehr geringes Neigungsspektrum auf (0-6 °). Für diese Bereiche, die als hochgradig Eintragsrelevant gelten, lässt sich eine starke Bedeutung auf den Anbindungsgrad konstatieren (Differenz 10-20 % Pkt.). Oberhalb von 15 ° Gefälle gibt es keine angebundene Ackerflächen mehr, da hier Grünland oder Waldnutzung dominiert.

### Fazit

Die Häufigkeitsanalysen zur Bedeutung der **Neigung** für die Generierung stoffliefernder Gebiete ergeben je nach Bezugsareal bzw. Bewertungsgrundlage differenzierende Resultate. Für Gebietsausschnitte mit hochgradigem Risiko der Stofflieferung spielt die Neigung eine bedeutende Rolle. Sofern Raumbereiche nur einmal als reale Lieferfläche identifiziert wurden, ist eine geringe Bedeutung des Parameters für die Anbindung festzustellen. Im Zuge der GIS-gestützten Reliefanalyse lässt sie sich mit hoher Qualität aus dem DGM flächenhaft zu Verfügung stellen. Die Hangneigung bildet eine Grundgröße zur Beschreibung von Reliefeigenschaften eines Standortes und wird daher in das Modell zur Bestimmung der Gewässeranbindung integriert.

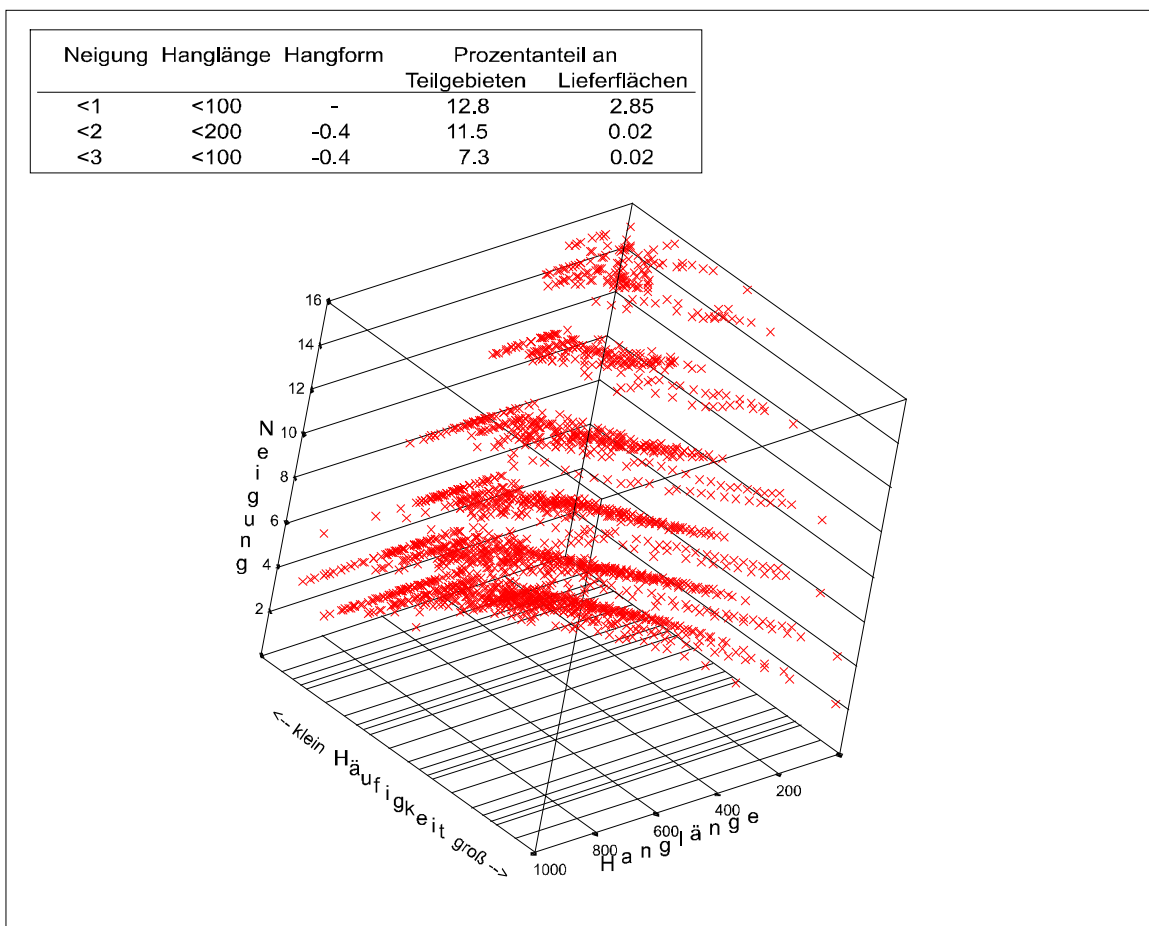
### Kombination von Hangneigung und -länge

Verschiedene Einzelparameter der Gewässeranbindung können miteinander verknüpft und die Häufigkeit ihres kombinierten Auftretens ermittelt werden. Die Häufigkeitsanalyse von Parameterkombinationen erlaubt Rückschlüsse auf das Zusammenspiel interdependenter Anbindungsparameter.

Abb. 30 dokumentiert die Häufigkeiten aus der **Kombinationen** von Hangneigungs- mit Hanglängenklassen.

Es fällt auf, dass bestimmte Kombinationen aus Neigung und Länge im Testgebietsdurchschnitt sehr viel häufiger auftreten als andere. Kurze und gering geneigte Hänge findet man häufiger als steile lange Hänge. Sehr große Neigungen treten nur in Zusammenhang mit kurzen Hängen auf. Sehr lange Hänge (bis 1000 m) sind nur noch bei relativ geringen Neigungen (2-4 °) anzutreffen. Derartig große Längen werden nur am Unterhang, wie z. B. im Auenlagen erreicht, wo die Hänge verflachen.

In Hinblick auf die Bestimmung der Flächenanbindung stellt sich die Frage, ob bestimmte Kombinationen der beiden Reliefparameter existieren, die in den erfassten Liefergebieten seltener oder gar nicht zu finden sind.



**Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der Kombination von Hangneigung und –länge für die gesamten Testgebiete**

Die angefügte Tabelle verdeutlicht, dass bestimmte Kombinationen von Hangneigung und –länge in den Lieferflächen im Vergleich zu den Testgebieten stark unterrepräsentiert sind. So charakterisieren beispielsweise Neigungen  $< 1^\circ$  und Hanglängen  $< 100$  m einen Anteil von fast 13 % die Hänge in den Testgebieten, aber nur 3 % der Hänge in den realen Lieferflächen. Flächen mit entsprechender Ausstattung aus Hangneigung und –länge zeichnet demnach ein reduziertes Risiko der Stofflieferung aus.

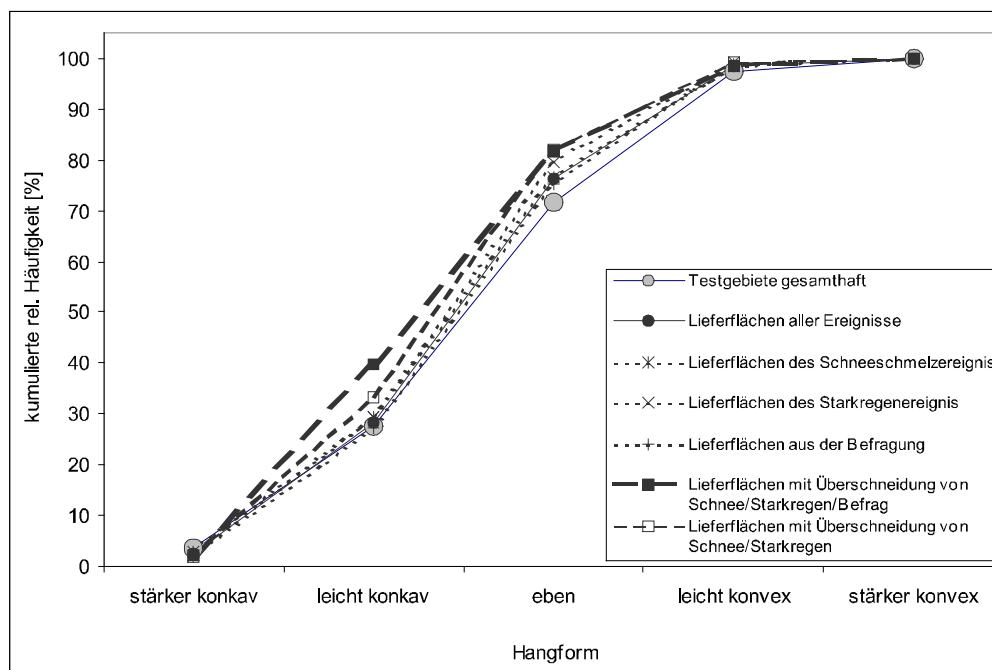
### Fazit

Bestimmte **Kombinationen aus Hanglänge und –neigung** ( $< 1^\circ$  und  $< 100$  m,  $< 2^\circ$  und  $< 200$  m,  $< 3^\circ$  und  $< 100$  m und konkavem Hang) sind in den realen Stoffliefergebieten zahlenmäßig sehr stark unterrepräsentiert. Es wird angenommen, dass diese Kombinationen aus Hanglänge und -neigung häufig nicht in den angebundenen Gebieten liegen, weil sie aufgrund ihrer Reliefeigenschaften vielfach zur Akkumulation von transportierten Feststoffen führen. Im Modell werden diese Raumbereiche als **potentielle Akkumulationszonen** verankert und mit einer reduzierten Eintragswahrscheinlichkeit verbunden.

## Hangform

In Abhängigkeit von der Hangform strömt Oberflächenwasser zusammen oder auseinander. Konkav geformte Hänge begünstigen die Akkumulation von erodierter Feinerde. Im Bereich von ausgeprägten Tiefenlinien findet eine verstärkte Erosion und an ihrem Ende häufig der Stoffeintrag ins Gewässer statt. Insofern beeinflusst die Hangform die Anbindung von Ackerflächen an Gewässer.

Wie in Abb. 31 illustriert, unterscheidet sich das Vorkommen der Hangformen innerhalb der eintragsrelevanten Gebiete nur in geringem Umfang vom Durchschnitt der Testgebiete. Es gibt allerdings eine leichte Verschiebung zu konkaven Hangformen, d. h. solchen Bereichen, in denen sich vermehrt Oberflächenwasser sammeln bzw. kanalisiert abfließen kann. Diese Tendenz wird, bei Betrachtung derjenigen Raumsegmente besonders deutlich, die bei mehreren Ereignissen als lieferrelevant identifiziert wurden. Der Parameter ist für diese Bereiche gering bedeutend für die Anbindung (5-10 %-Pkt.).



**Abb. 31: Relative Häufigkeiten der berechneten Hangformen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

## Fazit

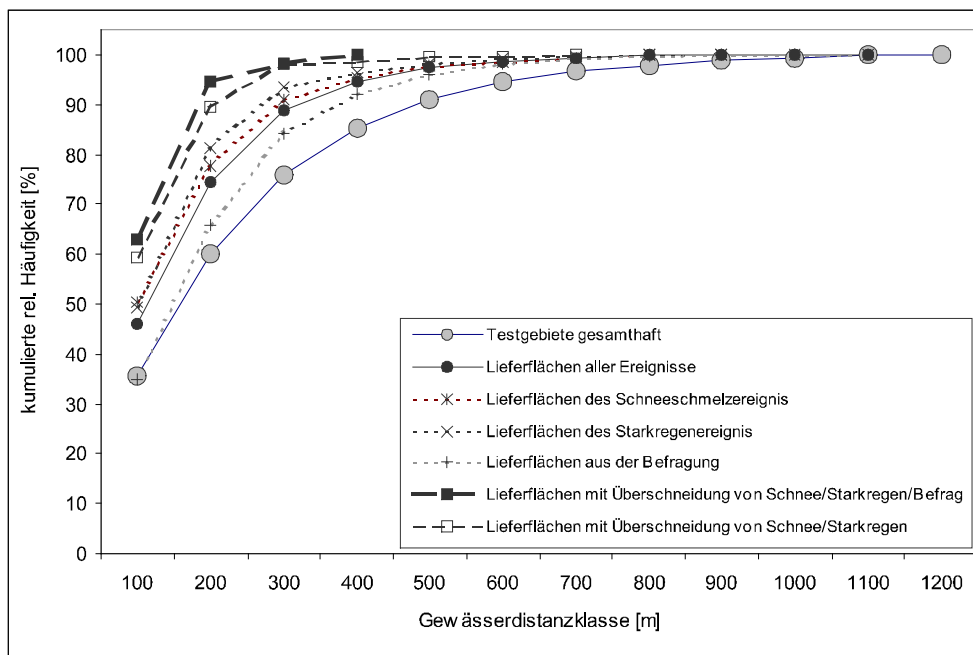
Es besteht nur ein geringer Zusammenhang zwischen dem Parameter **Hangform** und dem Anbindungsgrad. Lediglich in wiederholt wirksamen Lieferzonen existieren überdurchschnittlich viele Hangformungen mit Wassersammelfunktion. Die Hangform ist aber für die Ermittlung von potentiellen Akkumulationsflächen notwendig. Einfache GIS-Funktionen berechnen sie flächendifferenziert aus dem DGM. Daher wird die Hangform als Anbindungsparameter im Modell verankert.

### Entfernung zum Graben bzw. Fließgewässer (Gewässerdistanz)

Die Bedeutung der Distanz zum Graben oder Fließgewässer (Distanz zum Gewässer) resultiert zwingend aus dem Prozess des Stoffübertrittes. Da die Liefergebiete grundsätzlich an ein Gewässer grenzen, müssen gewässernahe Bereiche im Einzugsgebiet des Übertrittes überrepräsentiert sein.

Der Einfluss der Entfernung eines Gebietsausschnittes vom Graben- und Fließgewässersystem tritt sehr deutlich hervor (Abb. 32). In Liefergebieten sind geringe Distanzen zum Gewässer von weniger als 200 m mit bis zu 35 % Abweichung sehr viel häufiger als im Gebietsdurchschnitt.

Drei Viertel der eintragenden Flächen liegen in der Zone bis 200 m vom Gewässerrand entfernt, über 90 % finden sich im Abstand bis 300 m. Oberhalb 700 m Gewässerdistanz existieren ausschließlich Lieferflächen, die über die Befragung oder das Schneeschmelzereignis ausgeschieden wurden. Der Anbindungsgrad einer Fläche hängt demnach stark von der Entfernung zum Gewässer ab. Dies unterstreicht den Stellenwert, den ein präzise erfasstes Gewässersystem für die Prognose der Flächenanbindung darstellt.



**Abb. 32: Relative Häufigkeiten der berechneten Entfernung zum Gewässer- und Grabensystem im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

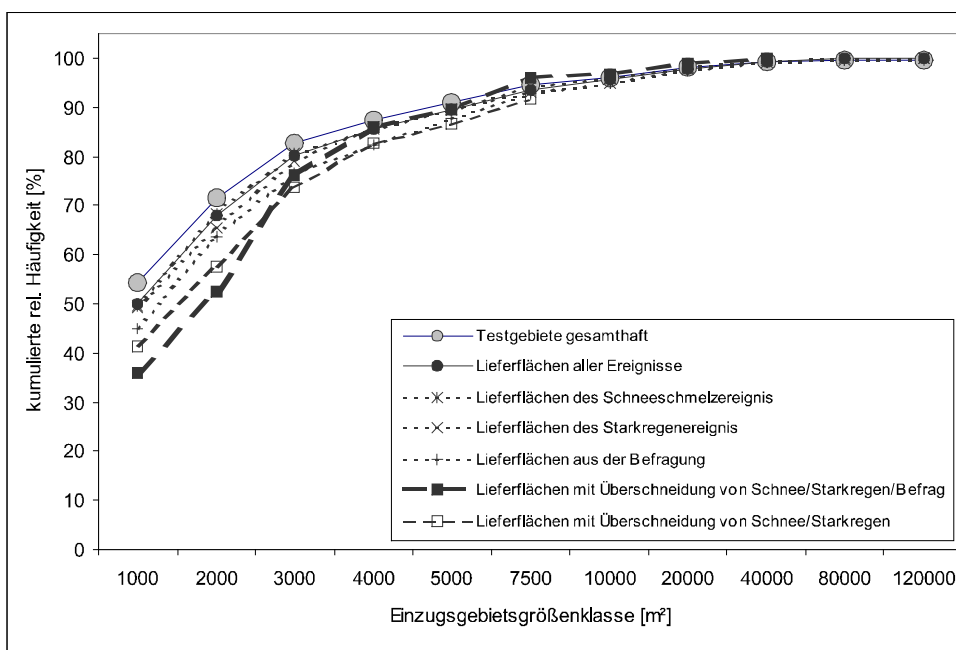
#### Fazit

Die **Distanz zum Graben bzw. Fließgewässer** übt einen sehr starken Einfluss auf die potentielle Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages aus. Sie ist somit ein unverzichtbarer Anbindungsparameter, der im Prognosemodell flächenhaft zur Verfügung gestellt wird .

### Hangeinzugsgebietsgröße

Die Betrachtung der Einzugsgebietsgröße eines Hanges als Anbindungsparameter erfolgt aufgrund der nachstehenden Annahme. Mit Zunahme der Größe des angeschlossenen Gebietes nimmt die zusammenströmende Wassermenge zu. Es erhöht sich sowohl die Erosionsgefährdung als auch die Transportkapazität des Oberflächenabflusses und damit die potentielle Lieferfähigkeit des betrachteten Standortes.

Abb. 33 verdeutlicht, dass die in den Liefergebieten auftretenden Hangeinzugsgebiete im Vergleich zum Gebietsmittel grundsätzlich größer ausfallen. Mit zunehmender Flächengröße eines Hangeinzugsgebietes wächst also das Potential eines Raumbereiches, an ein Gewässer angebunden zu sein. Die Abweichungen zwischen Normal- und Spezialfall sind bei den kleineren Hangeinzugsgebieten bis 3000 m<sup>2</sup> Flächenausdehnung deutlicher (10 %) als bei den größeren Hangeinzugsgebieten (5 %). Für besonders häufig stoffliefernde Flächenbereiche wachsen die Unterschiede stark an (20 %), d. h. der Parametereinfluss wird wichtiger.



**Abb. 33: Relative Häufigkeiten der berechneten Einzugsgebietsgrößen im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

#### Fazit

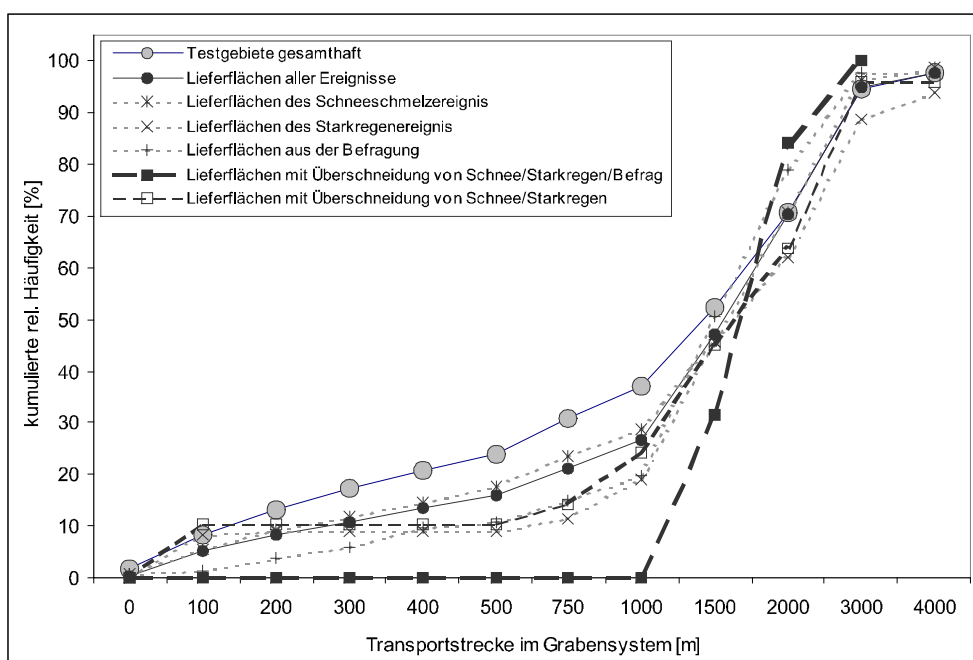
Zwischen der **Größe des Hangeinzugsgebietes** und der Anzahl bzw. Größe stoffliefernder Areale besteht ein Zusammenhang. Mit Zunahme der Hangeinzugsgebietsgröße steigt die Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages in die Gewässer. Der Einfluss dieses Parameters auf die Flächenanbindung wird umso prägnanter je kleiner ein Hangeinzugsgebiet ist. Oberhalb von 0,5 ha Einzugsgebietsgröße kann man keine signifikante Wirkung auf den Anbindungsgrad mehr feststellen. Die Berücksichtigung im Modell ist notwendig. Mehrere gekoppelte Algorithmen berechnen den Parameter aus dem DGM.



## Transportstrecke im Grabensystem

Laut Kapitel 4 erfolgen die meisten Stoffeinträge in künstliche Gräben mit zeitweiser Wasserführung. Direkte Übertritte in permanente Fließgewässer treten relativ selten auf. Die Gräben liegen orographisch meist im oberen Teil der Einzugsgebiete, wo eine erhöhte Geländeneigung die Bodenerosion und den Stofftransport begünstigt. Der überwiegende Teil der Liefergebiete muss demnach aufgrund ihrer Lage im Einzugsgebiet eine größere Entfernung von den Fließgewässern aufweisen.

Die Häufigkeitsverteilungen für Testgebiete und Lieferflächen hinsichtlich der Fließstrecke innerhalb des Grabensystems bis zum nächsten permanenten Fließgewässer differieren stark voneinander (Abb. 34).



**Abb. 34: Relative Häufigkeiten der berechneten Transportstrecke im Grabensystem bis zum nächsten Fließgewässer im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

Der Einfluss des Parameters „Fließstrecke im Grabennetz“ wächst zunächst stetig von 100 m bis 1000 m Entfernung zum Fließgewässer, um danach wieder abzunehmen. Die Stärke des Parametereinflusses manifestiert sich in großen Häufigkeitsunterschieden von über 20 %. Die Abnahme der Häufigkeitsunterschiede deutet darauf hin, dass der Anteil der Ackerflächen im oberen Bereich des Flusseinzugsgebietes ab- und die Flächenausdehnung von Grünland oder Waldflächen zunimmt. Es stehen also weniger Flächen bereit, die potentiell Stoffe liefern können. Folglich geht auch die Zahl der realen Liefergebiete zurück. Noch klarer erkennbar ist die Bedeutung des Parameters bei Betrachtung der Flächenausschnitte, die immer Stoffe ins Gewässersystem eintragen (Abweichung bis 35 %).

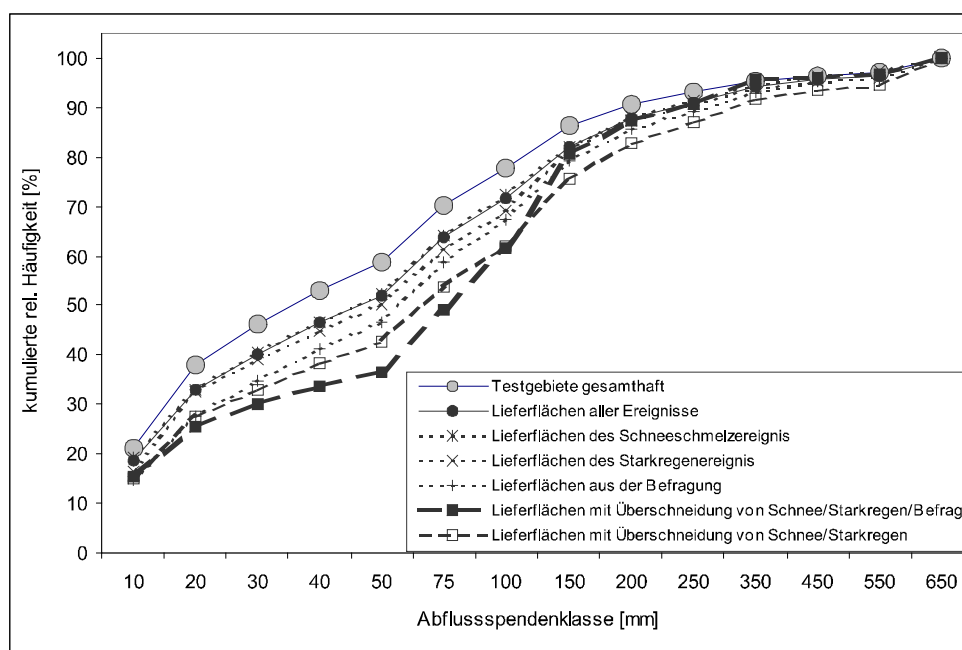
Dabei ist zu bedenken, dass das in die Gräben eingetragene Sediment z. T. nicht vollständig weitertransportiert wird. Dementsprechend kann der Anbindungsgrad an die Fließgewässer nicht linear mit der Transportstrecke bis zum Fließgewässer zunehmen.

### Fazit

Der Parameter **Transportstrecke im Grabensystem** (Entfernung zum Fließgewässer) weist einen klaren Zusammenhang mit der Existenz von Stofflieferflächen auf. Mit einem Anteil von 80-90 % liegt ein Großteil der Liefergebiete relativ weit oben im Bacheinzugsgebiet, 750 m und mehr vom permanenten Fließgewässer entfernt. Lieferflächen in unmittelbarer Nähe der Fließgewässer (100 m) sind selten zu finden (10 % der Fälle). Modellseitig ist der Parameter folglich zu implementieren. Allerdings muss der reduzierte Weitertransport im Grabensystem mit zeitweiser Wasserführung Berücksichtigung finden. Daher vollzieht sich die Integration des Parameters in das Modell über einen empirischen Reduktionsfaktor, der den ursprünglich generierten Anbindungsgrad modifiziert (Kap. 6.8). Die Größe „Transportpfad“ im Grabensystem ist kumulativ über die Länge der kaskadenartig verknüpften Gewässerabschnitte zu errechnen.

### 5.3. Menge der Direktabflussspende

Der Oberflächenabfluss bildet das Medium für den Stofftransport auf der Bodenoberfläche. Bei Zunahme der direkten Abflussmenge vergrößert sich die Stofftransportkapazität (höheres Energiegefälle, höhere Turbulenz und Fließgeschwindigkeit), so dass größere Sedimentmengen verlagert und ins Gewässer eingespült werden können.



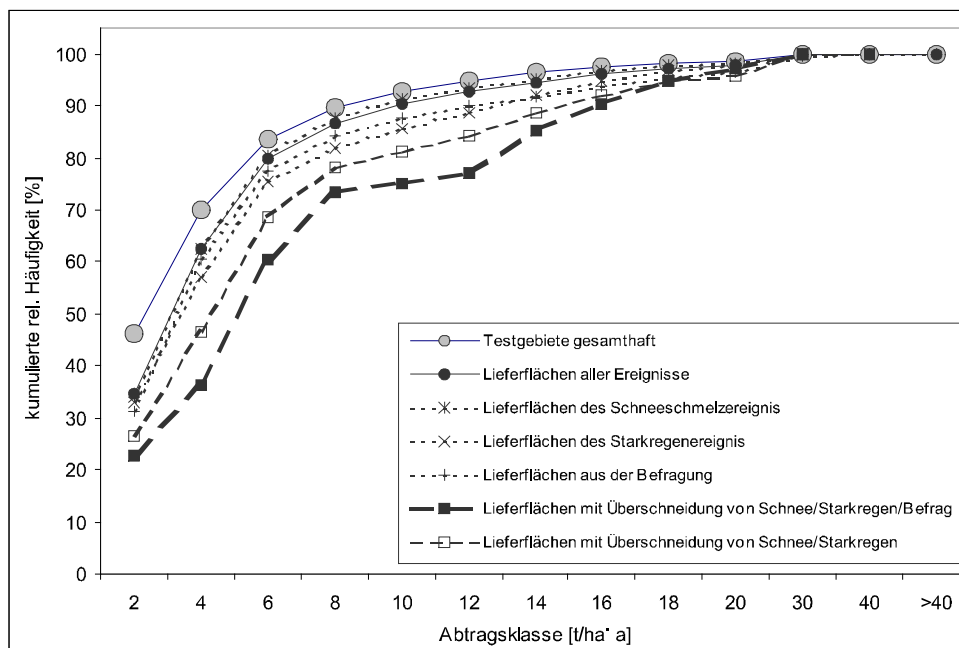
**Abb. 35: Relative Häufigkeiten der berechneten Direktabflussspenden im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

## Fazit

Die **Direktabflusspende** ist in den angebotenen Arealen grundsätzlich höher, geringe Abflüsse treten dort seltener auf als im Gebietsmittel. Der Zusammenhang ist signifikant. Somit ermöglicht die Berechnung des Oberflächenabflusses Aussagen über die Möglichkeit einer höheren oder niedrigeren Anbindung an die Gewässer. Der Parameter lässt sich flächendifferenziert für große Gebiete mithilfe der Reliefanalyse (z. B. T.G. FREEMAN 1991), der Generierung eines repräsentativen Starkniederschlages und des SCS CN-Verfahren abschätzen (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972).

## 5.4. Bodenerosion

Die Bodenerosion bildet die Grundvoraussetzung für den Feststoffeintrag in die Oberflächengewässer. Durch den Abtrag wird die Bodensubstanz bereitgestellt, die potentiell die Gewässer verunreinigen kann. Erosionsbekämpfungsmaßnahmen führen zu einer Verminderung des diffusen Stoffeintrages (K. AUERSWALD 1993). Das Ausmaß der Abtragsvorgänge auf Grundlage von Modellberechnungen der ABAG (U. SCHWERTMANN U.A. 1987) muss sich auf die Ausprägung der Stofflieferflächen auswirken, so dass Liefergebiete bevorzugt in Zonen starker Erosion entstehen.



**Abb. 36: Relative Häufigkeiten der berechneten Abträge im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

Die **Häufigkeitsunterschiede** für den geschätzten **flächenhaften Bodenabtrag** zeigt einen signifikanten Zusammenhang zwischen Anbindungsgrad und den jährlichen Abtragsraten (Abb. 36). Die Abträge liegen innerhalb stoffliefernder Flächen höher als im Durchschnitt. Je nach Datengruppe treten Abtragsmengen von 2 bis 14 t/ha in den Lieferarealen 10-30 % häufiger auf als durchschnitt-

lich in den Testgebieten. Für Bereiche mit Abträgen oberhalb von 18 t/ha lassen sich keine wesentlichen Unterschiede mehr feststellen. Sie sind von ihrem Gesamtflächenanteil her aber unbedeutend. Die Kurve für die ständig eintragsrelevanten Flächenbereiche weist einen auffallend starken Anstieg im Intervall zwischen 12 und 16 t/ha  $\cdot a$  auf. Das deutet darauf hin, dass sich Zonen besonders hoher Erosionsgefährdung mit den Lieferflächenbereichen sehr partiell überschneiden. Die Abtragsmodellierung gibt die Raumposition der als angebunden kartierten Gebiete nur unpräzise wieder. Das Erosionsmodell basiert auf empirisch-statistischen Zusammenhängen und auf stark vereinfachten Prozessabbildungen. Erfasste stoffliefernde Flächen und stark erosionsgefährdete Flächenausschnitte sind deshalb nur partiell kongruent.

### Fazit

Die modellgestützte Abschätzung der **Bodenerosionsgefährdung** leistet für das Modell einen wichtigen Beitrag zum Parameterkatalog anbindungsrelevanter Größen. Die Bedeutung des Parameters wird umso größer, je weiter man den Stofflieferbereich hinsichtlich seines Anbindungsgrades spezifiziert. So ergibt sich für einmalig identifizierte Lieferflächen eine geringere Parameterbedeutung als für die ständig eintragenden Areale. Die langfristige Bodenerosion wird im Modell auf der Grundlage der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (SCHWERTMANN U. A. 1987) für die mittlere Maßstabsebene errechnen.

## 5.5. Stofftransport

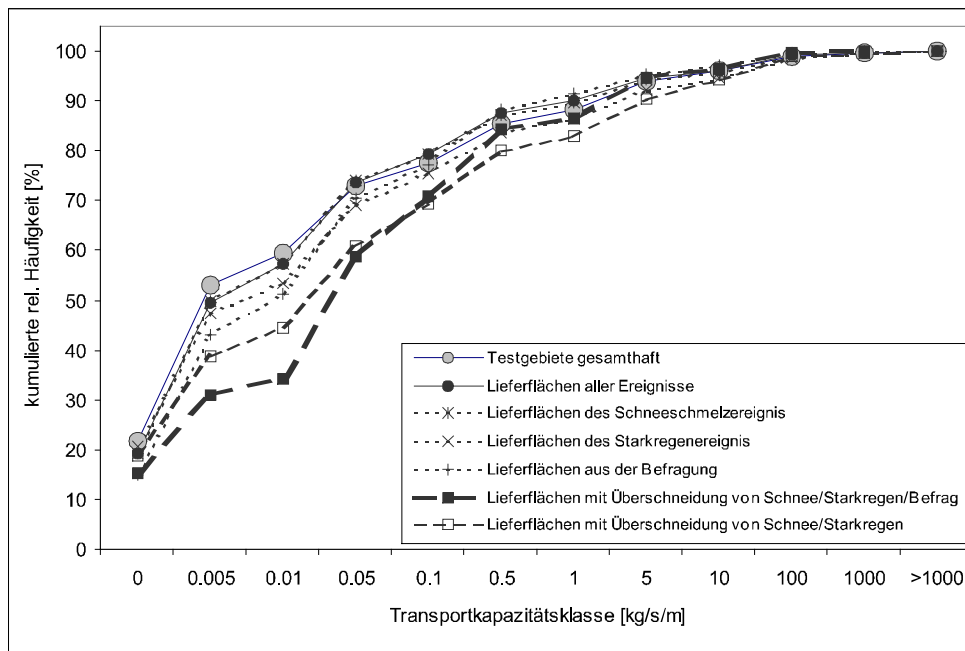
Zur Beurteilung des Einflusses des Stofftransportvorganges auf den Anbindungsgrad sollen die Transportkapazität des Oberflächenabflusses und die Entfernung der betrachteten Rasterzelle zum generierten Transportpfad analysiert werden.

### Transportkapazität

Eine ausreichende Stofftransportkapazität ist Bedingung dafür, dass die erodierten Bodenpartikel während des Transportprozesses in Schwebelage gehalten und nicht sedimentiert werden. Somit bildet sie die Basis für den Herantransport der Stoffe an die Gewässer. Die Transportkapazität hängt im wesentlichen von der abfließenden Wassermenge, der Oberflächenneigung und der Bodenrauigkeit ab. In den modellierten Raumbereichen mit hoher Kapazität zum Feststofftransport müssen sich überdurchschnittlich viele reale Liefergebiete finden.

Die beobachtete Einflussstärke des Parameters Transportkapazität variiert in Abhängigkeit der berücksichtigten Bezugsareale (Abb. 37). Unter Einbeziehung sämtlicher Liefergebiete liegt der Unterschied zwischen stoffliefernden Arealen und Durchschnittsfläche unterhalb der Signifikanzgrenze. Werden nur die wiederholt identifizierten Lieferareale berücksichtigt, tritt die Bedeutung sehr klar hervor (bis knapp 30 %-Pkt. Abweichung). Am zahlreichsten finden sich in den angebundenen Gebieten Transportkapazitäten von 0,005 bis 0,001 kg/s/m. Der ausgeprägte Anteil der Lieferbereiche,

die praktisch kein Stofftransportpotential aufweisen, überrascht (15-20 %). Theoretisch kann auf den Flächen kein wesentlicher Partikeltransport stattfinden. Für diese Raumbereiche sind Areale hoher berechneter Transportkapazität nicht mit den realen Transportpfaden kongruent. Ursächlich hängt das mit der begrenzten Qualität der Grunddaten des Reliefmodells (Rasterweite ursprünglich 50 m) zusammen. Bei der Reliefanalyse treten dadurch Fehler bei der Generierung von Richtung und Menge des Oberflächenabflusses auf. Diese Ungenauigkeit wirkt sich auch auf die Prognose der Stofflieferareale aus.



**Abb. 37: Relative Häufigkeiten der berechneten Transportkapazität des Oberflächenabflusses im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

### Fazit

Insgesamt bildet der Parameter **Transportkapazität des Oberflächenabflusses** einen wichtigen Baustein für die Frage der Ableitung der Gewässeranbindung und wird daher in das Modell eingeführt. In besonders relevanten Bereichen mit häufiger Stofflieferfunktion zeigt sich ein sehr viel deutlicherer Parametereinfluss als bei Flächenbereichen, deren Lieferfunktion nur einmal festgestellt werden konnte. Die Transportkapazität ist nach einem vereinfachten Verfahren von J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995) für große Gebiete abschätzbar.

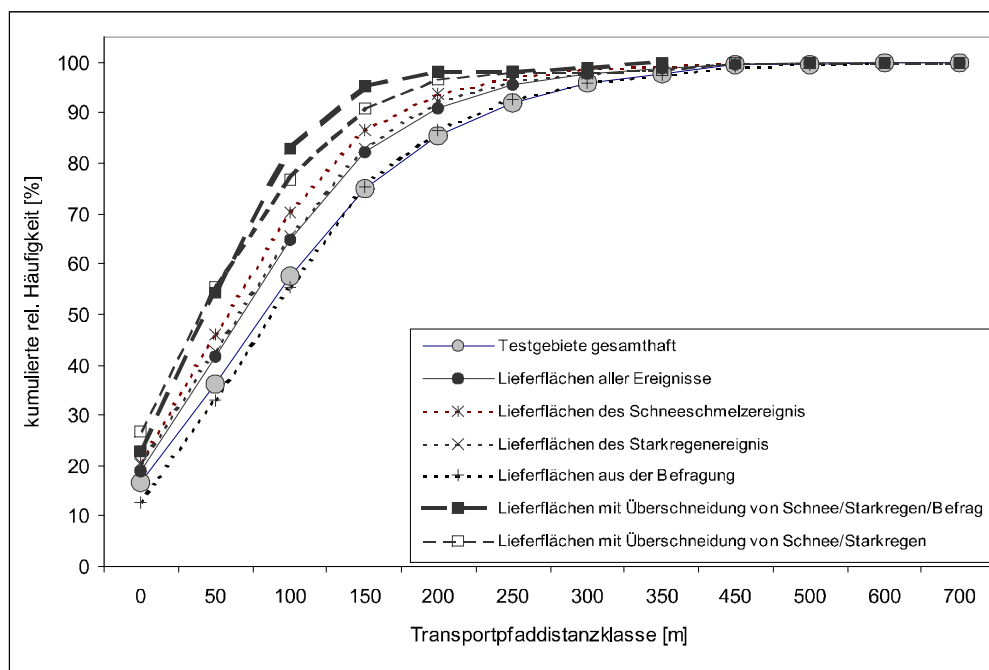
### Entfernung zum Transportpfad (Transportpfaddistanz)

Der Stofftransport vollzieht sich hauptsächlich im Bereich mit gebündelt strömendem Oberflächenwasser, dem Stofftransportpfad. Bei flächenhaftem Abfluss erreichen die Transportraten weit geringere Werte. Der Abflusspfad beginnt unterhalb der Wasserscheide und endet am Gewässerrand. Je weiter der Abstand vom generierten Transportpfad wird, umso geringer ist die Möglichkeit, dass ein

Bodenteilchen zunächst bis zum Abflusspfad und dann weiter zum Gewässer gelangt. Im Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Spezial- und Normalfall muss sich dieser Zusammenhang niederschlagen.

In Abb. 38 ist für alle Datengruppen klar die geringere Entfernung der Liefergebiete von den generierten Transportpfaden im Vergleich zum Gebietsdurchschnitt zu erkennen. Die über die Befragung identifizierten Lieferflächen bilden eine Ausnahme und zeigen keine Abhängigkeit. Solche Gebiete können in vielen Fällen erheblich von den berechneten Stofftransportpfaden entfernt liegen, da die Flächenausdehnung der Lieferzonen von den Landwirten häufig überschätzt wurde. Etwa 90 % der Rasterzellen innerhalb der angebotenen Areale weisen einen Transportpfaddistanz von bis zu 150 m auf. Im Gebietsdurchschnitt wird diese summierte Häufigkeit erst bei 300 m erreicht. Der engste Zusammenhang zwischen Transportpfaddistanz und Anbindungsgrad errechnet sich wiederum für Areale, die mehrfach als Stofflieferbereiche ermittelt wurden (Häufigkeitsdifferenzen bis 25 %).

Die Beobachtungen lassen sich durch die **Analyse der Transportpfaddichte** im Lieferareal bzw. im Testgebiet klar bestätigen. Die Transportpfaddichte kann als ein Flächenanteil der als Pfad generierten Rasterzellen pro betrachteter Bezugsfläche aufgefasst und in Prozent ausgedrückt werden. Der Zusammenhang zwischen Anbindungsgrad und Transportpfad drückt sich in einer erhöhten Transportwegdichte innerhalb der Liefergebiete gegenüber dem Gebietsmittel aus.



**Abb. 38: Relative Häufigkeiten der Entfernung der Liefergebiete vom berechneten Transportpfad im Testgebietsdurchschnitt und innerhalb der realen Liefergebiete (Kartierung/Befragung)**

Die Transportpfaddichte liegt über alle Lieferflächen absolut um ca. 15 %-Pkt. höher als im Testgebietsdurchschnitt (Dichte von 4,3 zu 3,7). Eine hohe Zahl an errechneten Transportpfaden in einem Hangeinzugsgebiet bedeutet demnach ein erhöhtes Risiko des Stoffeintrages in das Gewässersystem und folglich ein erhöhten Anbindungsgrad.

### Fazit

Über die Ableitung der **Entfernung zum Transportfad (Transportpfaddistanz)** lässt sich ein Modellparameter formulieren, mit dem Rückschlüsse auf den Anbindungsgrad eines Raumausschnittes gezogen werden können. Mit abnehmender Entfernung des Standorts zum Transportfad sowie mit steigender Transportpfaddichte wächst die Wahrscheinlichkeit, sich innerhalb eines angebundenes Flächenbereiches zu befinden, signifikant. Das Modellkonzept muss die Größe „Transportpfaddistanz“ als Einflussparameter der Flächenanbindung an Gewässer berücksichtigen. Sie ist über mehrere Berechnungsalgorithmen aus der hydrologischen Modellierung und auf Grundlage eigener Entwicklungen aus dem DGM flächenhaft bereitzustellen.

## 5.6. Modellparameter und Anbindungswahrscheinlichkeit

Im vorangegangenen Kapitel wurden wichtige Einflussparameter zur Bestimmung der Flächenanbindung an Gewässer identifiziert. Die Parameter erfüllen die Forderung nach Modelltauglichkeit, d. h. sie sind operationalisierbar und flächenhaft in räumlicher Differenzierung für den mesoscale bestimmbar. Der Schritt der **Parameteridentifikation**, d. h. das Erkennen und die Auswahl der für die Modellierung der Gewässeranbindung relevanten Parameter, ist damit vollzogen.

Für die Bestimmung des Anbindungsgrades ist es aber von Belang, welche Einflussstärke die verschiedenen Parameter ausüben und ob sie sich hinsichtlich ihres **Wirkungsgrades** in eine Reihenfolge bringen lassen. Denn für die Modellentwicklung ist ein Verfahren notwendig, dass es ermöglicht, einerseits die wesentlichen Einflussgrößen der Anbindung zu integrieren und diese andererseits zu einem geeigneten Gesamtgleichungssystem zusammenzubringen.

Die Bedeutung der im GIS berechneten Parameter für den Gewässeranbindungsgrad lässt wie folgt ableiten. Man berechnet die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Liefergebiet auftritt, sofern der Parameterwert einen bestimmten Wert einnimmt. Die Höhe dieser sogenannten **bedingten Wahrscheinlichkeit** verändert sich bei Variation des Parameterwertes. Sie gibt Auskunft darüber, bei welchem Wert Raumelemente bevorzugt angebunden sind bzw. unter welchen Bedingungen (Parameterwerten) die Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages in die Gewässer unbedeutend wird (Tab. 13).

Neigung [°]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Hanglänge [m]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Hangform	bedingte Wahrscheinlichkeit	Einzugsgebiets- größe [m <sup>2</sup> ]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Transportpfad- distanz [m]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Transportstrecke im Grabensystem- [m]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Gewässerdistanz [m]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Abflussspende [mm]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Abtrag [t/ha a]	bedingte Wahrscheinlichkeit	Transportkapazität [kg/s/m]	bedingte Wahrscheinlichkeit
2	0.22	100	0.22	konkav +	0.10	2000	0.26	50	0.28	100	0.12	200	0.29	20	0.21	4	0.29	0.005	0.24
4	0.29	150	0.25	konkav	0.07	3000	0.26	100	0.27	200	0.11	300	0.23	30	0.22	6	0.31	0.01	0.29
6	0.23	200	0.28	konkav -	0.17	4000	0.27	150	0.24	300	0.10	400	0.15	40	0.23	8	0.28	0.05	0.30
9	0.21	250	0.31	konkav --	0.26	5000	0.28	200	0.20	400	0.13	500	0.11	50	0.24	10	0.27	0.1	0.31
12	0.08	300	0.32	gestreckt	0.26	7500	0.30	250	0.17	500	0.13	600	0.09	75	0.25	12	0.28	0.5	0.26
15	0.00	400	0.34	konvex--	0.21	10000	0.29	300	0.14	750	0.13	700	0.10	100	0.26	14	0.30	1	0.21
>15	0.00	500	0.36	konvex-	0.13	20000	0.28	350	0.11	1000	0.15	800	0.08	150	0.29	16	0.37	5	0.19
		>500	0.32	konvex	0.06	40000	0.31	450	0.13	1500	0.23	900	0.03	200	0.32	18	0.36	10	0.20
				konvex+	0.00	80000	0.31	500	0.17	2000	0.21	1000	0.02	250	0.33	20	0.30	100	0.26
				konvex++	0.00	120000	0.20	600	0.17	3000	0.17	1100	0.02	350	0.35	30	0.47	1000	0.27
						>120000	0.09	700	0.15	4000	0.16	>1100	0.00	450	0.34	40	0.17	>1000	0.10
								800	0.22	>4000	0.16			550	0.32	>40	0.19		
								>800	0.00					>550	0.30				

**Tab. 13: Bedingte Wahrscheinlichkeiten ausgewählter Anbindungsparameter**

Unter der Bedingung, dass der Parameter den entsprechenden Wert einnimmt, ist die Fläche mit der errechneten Wahrscheinlichkeit am Stoffeintrag beteiligt bzw. an ein Gewässer angebunden.

Die nachfolgenden Wahrscheinlichkeitsangaben für die Einzelparameter sind vor dem Hintergrund zu betrachten, dass ohne zusätzliche Vorinformation die Anbindungswahrscheinlichkeit eines beliebigen Flächenausschnitts mit agrarischer Nutzung durchschnittlichen bei knapp 0,1 liegt (4.5.2.1).

Liegt die **Neigung** an einem beliebigen Punkt im Untersuchungsgebiet im Intervall 2 bis 4 °, so erreicht die statistische Wahrscheinlichkeit den Maximalwert von 0,29. Bei geringerer aber auch höherer Hangneigung vermindert sich die Wahrscheinlichkeit, sich in einem Stofflieferungsareal zu befinden. Weil im eintragsrelevanten Gewässerrandbereich häufig Hangverflachungen vorkommen, erreicht die Übertrittswahrscheinlichkeit bei relativ niedrigem Gefälle vergleichsweise hohe Werte. Die geringe Wahrscheinlichkeit bei sehr starken Neigungen hängt mit der Abnahme der ackerbaulich genutzten Fläche unter solchen Reliefbedingungen zusammen. Zudem liegen Flächen mit extremen Gefälle im Allgemeinen recht weit vom Gewässer entfernt. Prägnant zeigt sich die Abnahme der Anbindungswahrscheinlichkeit bei Neigungen von 0-2 °, bei denen die nachlassende Schleppekraft des Oberflächenabflusses den Weitertransport bis ins Gewässer erschwert.

Mit wachsender **Hanglänge** nimmt das Eintragspotential eines Standortes kontinuierlich um 16 %-Pkt. zu, so dass Zonen mit Hanglängen von 500 m die maximale Wahrscheinlichkeit aufweisen (0,36). Längen bis 50 m besitzen noch eine Anbindungswahrscheinlichkeit von 0,2. Die Hangeinzugsgebiete der Übertritte können folglich bereits am Oberhang ansetzen, sofern bei ausreichendem Abflussvolumen Erosion und Stofftransport einsetzen. Da die Existenz von Hängen mit mehr als 500 m Erstreckung in den Liefergebieten immer seltener wird, sinkt auch die bedingte Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages für solche Raumlagen.



Beim Parameter **Hangform** steigt für leicht konkave und gestreckte Hänge die Wahrscheinlichkeit des Gewässeranschlusses auf den Maximumwert (0,26). Ein Standort mit einer solchen Hangwölbung weist ein erhöhtes Stofflieferrisiko auf. Stark konkave und stark konvexe Hangformen kommen insgesamt selten vor und erreichen nur eine niedrige Wahrscheinlichkeit.

Wachsende **Größen des Hangeinzugsgebiets** bis zu einer Ausdehnung von 800 000 m<sup>2</sup> bedeuten für einen Fläche einen nahezu beständigen Zuwachs der Eintragswahrscheinlichkeit von 0,22 bis 0,31. Auch Hangeinzugsgebiete geringer Größe (1000 m<sup>2</sup>) können bereits an Gewässer angeschlossen sein und führen deshalb zu einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit (0,22). Die extreme Flächenausdehnung des Hangeinzugsgebietes ist sehr selten und deutet auf eine verminderte Anbindungswahrscheinlichkeit hin.

Mit der Nähe eines Gebietes zum berechneten **Transportpfad** erhöht sich die Möglichkeit des Stoffeintrages zunehmend. Bei den geringsten Entfernungen bis 50 m werden die höchsten Wahrscheinlichkeiten (0,28) erreicht. Oberhalb von 500 m Transportpfaddistanz steigt die Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages wieder leicht an. Dieser ungewöhnliche Anstieg lässt sich mit einem eher zufälligen Phänomen erklären. Im großen Abstand von den generierten Transportpfaden können bereits wieder benachbarte Liefergebiete liegen, was zum Wahrscheinlichkeitsanstieg führt. Liegt der Flächenausschnitt weiter als 800 m von der Abflussbahn entfernt, können keine Stoffe mehr das Gewässersystem erreichen. Diese Flächen sind vollständig vom Fließgewässer abgekoppelt.

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten des Modellparameters „**Entfernung vom Graben** bzw. **Fließgewässer**“ (Gewässerdistanz) weisen eine ähnliche Struktur wie die der Transportpfaddistanz auf. Mit Abnahme der Gewässerentfernung geht die kontinuierliche Zunahme des Eintragsrisikos einher. Kontinuierlich wächst der Anbindungsgrad zwischen von 1100 bis 100 m Entfernung zum Eintragspunkt um 31 %-Pkt. Er erreicht maximal einen Erwartungswert von 0,31. Aus Flächen oberhalb eines Gewässerabstandes von 1100 m sind keine Einträge mehr zu erwarten. Sie sind vollständig vom Fließgewässer abgekoppelt.

Die Wahrscheinlichkeit der Flächenanbindung steigt bei Zunahme der direkten **Abflusspende** von 10 auf 350 mm um 13 %-Pkt.. Im Maximum liegt die Eintragsgefährdung bei 0,35. Oberhalb von 350 mm verringert sie sich wiederum, weil nur noch wenige Fälle mit so hohen Abflüssen innerhalb der erfassten Lieferflächen existieren. Je größer also das Volumen des Oberflächenabflusses, um so höher liegt der Anbindungsgrad. Da im Randbereich der realen Liefergebiete geringe Abflussraten recht häufig auftreten können, ist die Wahrscheinlichkeit auch für niedrige Abflüsse (10 mm) noch relativ hoch (0,22).

Für die geschätzten **Bodenabträge** präsentieren sich die Wahrscheinlichkeitswerte recht differenziert. Die höchste Anbindungswahrscheinlichkeit der Parameter überhaupt wird bei 30 t/ha  $\cdot$  a errechnet. Das Eintragungspotential eines Standortes wächst mit zunehmenden jährlichen Abtragshöhen, wobei sich ein wellenförmiger Anstieg zeigt. Zwischen 6 und 12 sowie oberhalb von 30 t/ha  $\cdot$  a geht die Anbindungswahrscheinlichkeit phasenweise zurück. Offensichtlich überdecken sich die Areale großer Abträge räumlich nur teilweise mit den realen Liefergebieten (s. Kap. 5.4). Die Ursachen der Schwankungen liegen im vereinfachenden Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Abträge (ABAG), das bestimmte Einflussprozesse der Entstehung der Erosion nicht berücksichtigt. Im großen Maßstab bei der Geländekartierung bzw. der Ableitung der realen Lieferflächen sind diese Einflussprozesse mit erfasst.

Die **Transportkapazität** des Oberflächenabflusses liefert einen ähnlichen Wahrscheinlichkeitsverlauf wie der flächenhafte Abtrag. Zunächst ergibt sich eine leichte Zunahme des Anbindungsgrades bis zur Exspektanz von 0,31. Danach erfolgt ein Abfall der Wahrscheinlichkeit mit zwischenzeitlichem Wiederanstieg bis zum Minimum von 0,1. Die Gründe hierfür entsprechen denen, die beim Abtrag genannt wurden. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeitsamplitude ist die Bedeutung des Parameters gering einzustufen.

Die **Transportstrecke im Grabensystem** gibt die Entfernung des Eintragungspunktes (Übertritt) vom nächstgelegenen permanenten Fließgewässer innerhalb des Grabensystems wieder. Bei Ansteigen der Distanz erhöht sich die Anbindungswahrscheinlichkeit bis zum Maximum von 0,23 bei einer Fließstrecke von 1500 m, um danach wieder leicht abzufallen. Die Lieferflächen liegen offensichtlich orographisch relativ weit oben in den Flusseinzugsgebieten vornehmlich an künstlichen Gräben. Dort treten hohe Neigungen mit großen Hanglängen und Einzugsgebietsgrößen sowie mit intensiver Ackernutzung auf. Das führt zu erhöhter Abflussbildung und Erosionsgefährdung. Weil der direkte Übertritt in ein Fließgewässer selten auftritt, liegt die Wahrscheinlichkeit nur bei 0,05.

## 5.7. Reihung der Modellparameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Flächenanbindung

Auf Grundlage des Maximalwertes der bedingten Wahrscheinlichkeit lassen sich die verschiedenen Einflussparameter hinsichtlich ihres Stellenwertes für die Gewässeranbindung differenzieren und in eine Reihenfolge bringen. Zwei Bewertungskriterien bilden die Basis dieser Reihung:

- das absolute Maximum der bedingten Wahrscheinlichkeit
- die Gesamthäufigkeitsabweichung zum Testgebietsdurchschnitt (Normalfall).

### Kriterium: Maximum der bedingten Wahrscheinlichkeit

Die absolute maximale Wahrscheinlichkeit ist als Kriterium für die Zuordnung des Parameteranges geeignet, weil sie zeigt, wie weit ein einzelner Parameter den Flächenanbindungsgrad im Maximum

zu steigern vermag. Entsprechend der **Parameterbedeutung** ergibt sich die Reihung aus Tab. 14 (s. auch Tab. 13).

Die berechnete Abtragsmenge übt mit deutlichem Abstand vor allen anderen Parametern den größten Einfluss auf den Flächenanbindungsgrad an Gräben und Fließgewässer aus. Hanglänge und Abflussmenge zeigen kaum Unterschiede in ihrer Bedeutung. Die Unterschiede zwischen den Rängen vier (Gewässerdistanz, Einzugsgebietsgröße, Transportkapazität, Transportpfaddistanz) und fünf (Hangneigung) sind ebenfalls noch recht gering. Der Parameter Transportstrecke im Grabensystem weist eindeutig den geringsten Einfluss auf den Anbindungsgrad auf. Z. T. sind die Bedeutungsunterschiede zwischen einzelnen Modellparametern zwar erkennbar, aber in ihrer Ausprägung doch relativ gering. Die Parameter lassen sich daher in drei **Hauptgruppen** zusammenfassen: Sie werden begrenzt von den Wahrscheinlichkeiten 1. Gruppe  $> 0,4$ ; 2. Gruppe  $0,3-0,4$ ; 3. Gruppe  $0,2-0,3$ .

Rang	Bewertungskriterium			
	Absolutes Maximum der bedingten Wahrscheinlichkeit der Anbindung		Häufigkeitsabweichung zur Durchschnittsverteilung	
1	Abtrag	0,47	Transportstrecke im Grabensystem	481
2	Hanglänge	0,36	Gewässerdistanz	349
3	Abflussspende	0,35	Abtrag	333
4	Gewässerdistanz, Einzugsgebietsgröße, Transportkapazität, Transportpfaddistanz	0,31	Hangneigung	281
5	Hangneigung	0,29	Transportkapazität, Abflussspende	227
6	Hangform	0,26	Transportpfaddistanz	217
7	Transportstrecke im Grabensystem	0,23	Hanglänge, Einzugsgebietsgröße	191
8		-	Hangform	145

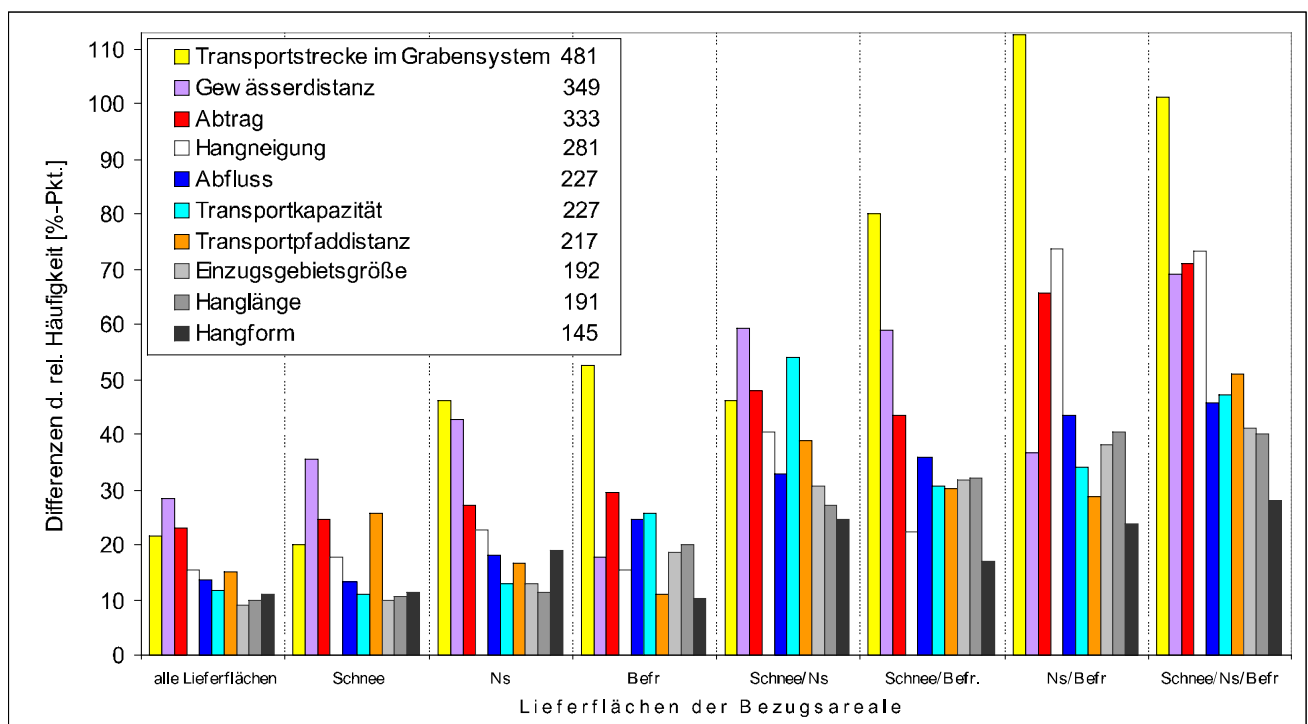
**Tab. 14: Reihung der Modellparameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Flächenanbindung nach verschiedenen Bewertungskriterien**

#### **Kriterium: Gesamthäufigkeitsabweichung zum Testgebietsdurchschnitt**

Die Reihung der Modellparameter der Anbindung hinsichtlich ihres Einflussgewichts nach dem Kriterium der „maximalen Gesamtabweichung der relativen Häufigkeiten“ geschieht folgendermaßen: Für jede Klasse eines Einzelparameters werden die Differenzen der relativen Häufigkeiten in den Stofflieferflächen und im Gebietsdurchschnitt bestimmt. Durch Addition der klassenspezifischen Häufigkeitsdifferenzen ergibt sich die Gesamtsumme der Häufigkeitsabweichungen für jeden Modellparameter. Die Berechnung erfolgt zunächst differenziert nach den verschiedenen Datengruppen (Schneesmelz-, Starkniederschlagsereignis sowie Befragung). Das Zwischenergebnis sind Häu-

figkeitsunterschiede differenziert nach Datengruppen (Bezugsarealen). Durch Summenbildung dieser Häufigkeitsdifferenzen über alle Datengruppen ergeben sich **parameterspezifische Gesamthäufigkeitsdifferenzen**. Sie stehen als Indikator für die Gesamtheit der Abweichungen vom Testgebietsdurchschnitt (Normalfall). Die Gesamthäufigkeitsabweichung zur Durchschnittsverteilung fasst damit die Besonderheiten eines Parameters über alle verfügbaren Datengruppen in einem einzigen Wert zusammen. Die Bedeutung eines Modellparameters wächst direkt proportional zur Gesamthäufigkeitsdifferenz.

Je nach Betrachtungsareal wechselt die Bedeutung der Parameter z. T. erheblich (Abb. 39). Die Transportstrecke im Grabensystem bzw. die Distanz zum Gewässer sowie der Abtrag weisen immer eine hohe Häufigkeitsabweichung auf, können also als bedeutender Modellparameter bezeichnet werden. Für die Hangform berechnet sich hingegen eine geringe Differenz vom Gebietsdurchschnitt; sie ist eine wenig relevante Größe. Die Größen Hanglänge, Hangneigung, Transportkapazität, Abflussmenge, Transportpfaddistanz und Einzugsgebietsgröße liegen von ihrer Bedeutung im Mittelfeld der Parameterskala. Allgemein wächst die Abweichung für sämtliche Parameter mit zunehmender Spezifizierung des Bezugsareals. Einmalig identifizierte Lieferflächen weisen eine geringere Häufigkeitsabweichung auf als mehrfach angebundene Areale.



**Abb. 39: Gesamtabweichungen vom Testgebietsdurchschnitt für ausgewählte Anbindungsparameter**

Mit Zunahme der Differenz der relativen Häufigkeiten steigt die Bedeutung des Parameters für die Modellbildung. Zahlenwerte bezeichnen die Gesamtsumme aller Häufigkeitsdifferenzen als Grundlage der Parameterreihung.

Schnee=Schneeschnelzereignis, Ns=Starkniederschlagsereignis, Befr=Landwirtebefragung

Wird die Summe der Gesamtheit der Häufigkeitsdifferenzen von der Gebietsnorm als Indikator für die **Wichtigkeit des Parameters** verwendet, so entsteht die Reihenfolge der Anbindungsparameter gemäß Tab. 14. Der Modellparameter „Transportstrecke im Grabensystem“ erzeugt mit deutlichem Abstand die stärkste Wirkung auf den Anbindungsgrad. Die Gewässerdistanz bildet zusammen mit dem Abtrag die zweite Einflussgruppe. Zur Gruppe mit mittlerem Einfluss zählen: Hangneigung, Abflussmenge, Transportkapazität und –pfaddistanz. An letzter Position der Reihung liegen Hanglänge und Einzugsgebietsgröße sowie, mit nochmals geringerer Wirksamkeit auf den Anbindungsgrad, die Hangform. Auch hier lassen sich die Parameter zu Gruppen zusammenfassen, deren Grenze die parameterspezifische Gesamthäufigkeitsdifferenz bildet: 1. Gruppe > 400; 2. Gruppe 300-400; 3. Gruppe 200-300; 4. Gruppe < 200.

### Fazit

Die Gegenüberstellung der beiden **Rangfolgen** verdeutlicht, dass sich die Anbindungsparameter nicht eindeutig nach ihrer Bedeutung für den Gewässeranbindungsgrad in einer Ordinalskala sortieren lassen (Tab. 14). Je nach Beurteilungsmethodik ergeben sich Unterschiede in der Reihenfolge der Wichtigkeit für den Anbindungsgrad. Die Größe „Transportstrecke im Grabensystem“ rangiert sogar einmal auf dem höchsten und einmal auf dem niedrigsten Rang der Bedeutungsskala. Die Unterschiede des Bewertungskriteriums fallen für einige Modellparameter vergleichsweise gering aus, so dass die Erstellung einer definitiven Reihung der einzelnen Parameter erschwert wird. Bestimmte Parameter weisen aber in beiden Bewertungsschemata gleichsinnig einen starken (z. B. Abtrag) bzw. einen schwachen (z. B. Hangform) Einfluss auf den Anbindungsgrad an die Gewässer auf.

Das Parameterensemble muss deshalb weiter gruppiert werden, um eine vereinfachte Wirkungsreihe zu erstellen. Werden die Parameter in drei **Relevanzgruppen** eingeteilt, so ergibt sich nach abnehmender Bedeutung geordnet:

1. Gewässer-/Grabendistanz, Abtrag, Abflusspende
2. Einzugsgebietsgröße, Transportkapazität, Transportpfaddistanz, Hanglänge
3. Hangneigung, Hangform.

Für die **Modellierung** sind alle anbindungsrelevanten Einflussparameter miteinander in Zusammenhang zu stellen, um daraus das Gesamtkonstrukt „Fließgewässeranbindung“ zu ermitteln. Dazu ist ein Verknüpfungsalgorithmus erforderlich. Aufgrund der Komplexität der prozessualen Zusammenhänge im Wechselwirkungsgefüge landschaftsökologischer und raumstruktureller Rahmenbedingungen sind die Auswirkungen von Veränderungen der Modellparameter auf die Stoffeintragsgefährdung in Gewässer kaum überschaubar. Die Variation eines Parameters kann synergetische Effekte auf den Anbindungsgrad, aber teilweise auch Wirkungen auf andere Einflussparameter nach

sich ziehen. Dadurch wird die Möglichkeit begrenzt, die Ursachen für die Unterschiede im berechneten Anbindungsgrad zu identifizieren bzw. zu trennen.

Die **Verknüpfung der Modellparameter** kann nicht durch die Bestimmung ihres Faktorwertes in Abhängigkeit von ihrem Rangplatz und die Erstellung einer Additionsreihe aus den Einzelparametern vorgenommen werden. Nachdem der analytische Teil der Modellbildung in Form der Identifikation und Wirksamkeitsprüfung der Parameter erfolgreich durchgeführt wurde, kann der synthetische Teil der Modellbildung nicht in Form einer Parameterverknüpfung auf Basis einer Reihung erfolgen (s. N. BARTELME 1994).

Für die Bestimmung eines **Algorithmus zur Verknüpfung der Anbindungsparameter** ist vielmehr ein anderes Verfahren erforderlich. Der hier verwendete Konzeptansatz für das Modell bezieht alle wesentlichen Einflussgrößen der Flächenanbindung ein und verknüpft sie über statistische Zusammenhänge miteinander. Die Bedeutung der einzelnen Parameter für den Anbindungsgrad einer Fläche wurde in diesem Kapitel nachgewiesen. Mithilfe eines Regressionsverfahrens lässt sich ein Verknüpfungsalgorithmus ermitteln, durch den die raumdifferenzierte Angabe einer Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages möglich wird (s. Kap. 6.9).

## 6. KONZEPTION DES MODELLS ZUR BESTIMMUNG DER GEWÄSSERANBINDUNG

### 6.1. Allgemeine Bemerkungen

Ein ökologisches Simulationsmodell ist eine simplifizierte Abbildung einer Vorstellung von der Natur. Es abstrahiert, idealisiert und diskretisiert die Realität (C.A. ZEHNDER 1987). Es muss daher von der Wirklichkeit wegführen, um Aufbau, Verhalten oder Funktionen von geoökologischer Realität durchschaubar zu machen (H. LESER 1997, B. RAPPE 1995). Diese Realität lässt sich als Landschafts-ökosystem abbilden. Dabei wird die Systemabbildung u.a. durch den gewählten Betrachtungsmaßstab und die für den Kernprozess relevanten Merkmale charakterisiert (TH. MOSIMANN 1997 u. 1984). Das Konzept des Computermodells, als weiterer Abstraktionsstufe, muss sich an der anvisierten Maßstabsebene orientieren. Denn für die verschiedenen Maßstabsbereiche existieren jeweils skalenangepasste Modelle, die sich hinsichtlich Komplexität, Datenanforderung und Ergebnissenauigkeit voneinander unterscheiden (R. DUTTMANN 1999).

Das Modell muss als zweckbezogene Abbildung eines landschaftsökologischen Systems folgende Voraussetzungen erfüllen (TH. MOSIMANN 1997):

- Kopplung an eine Raumeinheit
- Betrachtung von Prozessen in raumrelevanter Größenordnung
- Flächendeckende Erfassung von Parametern
- Berücksichtigung zentraler Größen in ihrer Gesamtwirkung
- Betrachtung von Nachbarschaftswirkungen (z. B. Stofftransportprozesse auf der Bodenoberfläche und im Gewässer).

Das Modell zur Bestimmung des Gewässeranbindungsgrades soll für Flusseinzugsgebiete des mittleren Maßstabs eine flächenhafte raumdifferenzierte Abschätzung zur Möglichkeit der langfristigen Feststofflieferung aus erosionsgefährdeten Agrarflächen in Fließgewässer erlauben. Die Datenverfügbarkeit und –qualität für mehrere hundert km<sup>2</sup> große Gebiete sowie die Forderung nach Praxistauglichkeit schränkt die Komplexität des Modells ein. Die Modellparameter müssen aus wenigen flächenhaft verfügbaren Grundgrößen ableitbar sein. Nicht zuletzt ist bei der Konzeption mittelmaßstäbiger Modelle das Problem langer Rechenzeiten und hohen Speicherbedarfs zu berücksichtigen.

### Modelleinordnung

Entsprechend seiner Konzeptionierung handelt es sich nach der **Modellklassifikation** von R. BILL (1996) um ein einfaches empirisches Wahrscheinlichkeitsmodell, das punktförmig (rasterorientiert) arbeitet. Das Modell produziert ein zweidimensionales Ergebnis, modellintern werden Aspekte einer 3D-Flächenmodellierung berücksichtigt (s. R. BILL & D. FRISCH 1991).

Dem Modell liegt ein stochastischer Ansatz zugrunde, d. h. die Komponenten des Modellsystems sind nicht deterministisch miteinander verbunden. Die Modellkonzeption basiert auf Anfangshypothesen, die aus Literaturrecherche und Geländeerfahrung abgeleitet wurden, also empirischen Ursprungs sind. Es kann als einfaches räumliches Wahrscheinlichkeitsmodell bezeichnet werden. Denn es fand eine Untersuchung der räumlichen Verteilung von Variablen statt, wobei die Abweichung der tatsächlichen Häufigkeitsverteilungen von Anbindungsparametern innerhalb der eigen-erhobenen Liefergebiete von den durchschnittlichen Verteilungen der Testgebiete statistisch analysiert wurde. Die Datendiskretisierung erfolgt über ein Rasterkonzept. Bei den Berechnungen erfolgt der Zugriff auf die verschiedenen in Rasterlayern abgelegten Inputgrößen, so dass separat für jede Rasterzelle die Algorithmen durchgerechnet werden. In diesem Sinne lässt sich von einem punktförmigen Modell sprechen (s. R. BILL 1996).

### **Modellumsetzung**

Das Modell nutzt als GIS-Aufsatz Funktionsumfang und Ressourcen des Informationssystems. Es ist vollständig in die GIS-Umgebung integriert, d. h. die Ableitung der Gebietsparameter und die eigentliche Simulation erfolgen in einem System (s. D. I. MÜLLER-WOHLFEIL & S. MIELBY 1998). Das Modell wurde mit dem GIS Arc/Info<sup>®</sup> für Workstations unter UNIX über die Makroprogrammiersprache AML (Arc Macro Language) sowie über Datenbankapplikationen (MS Access<sup>®</sup>, Dbase<sup>®</sup>) auf dem PC unter Windows 95/NT realisiert. Das GIS Arc/Info<sup>®</sup> eignet sich insgesamt gut für hydrologische Modellsysteme (J. J. WARWICK & S. J. HANESS 1994). Es ist ein effektives Werkzeug für die Analyse von Einzugsgebieten und für das pre-processing (Datenaufbereitung) bei der Prozessmodellierung (P. KOVAR 1997). Die Visualisierung der Berechnungen und die Kartenerstellung erfolgt wegen der größeren Bedienerfreundlichkeit und Flexibilität in ArcView<sup>®</sup>, das mit dem GRID-Aufsatz Spatial Data Analyst sowie dem TIN-Aufsatz 3D Analyst ausgestattet ist.

Das Modell ist modular aufgebaut. Für die Berechnungen der verschiedenen Teilprozesse, die den Anbindungsgrad wesentlich beeinflussen, stehen im GIS einzelne Programmeinheiten (AMLs) zur Verfügung. Die Teilmodule können einzeln oder größtenteils automatisiert nacheinander über ein übergeordnetes Steuerungsmodul aufgerufen werden. Ein Großteil der Berechnungen erfolgt rasterbasiert mit dem Teilmodul GRID über integrierte Kommandos und Funktionen sowie über Befehlskombinationen. Dieser Grundansatz ermöglicht eine effektive programmtechnische Umsetzung, da die gängigen Grundfunktionen des GIS nicht neu programmiert werden müssen. Die Parametrisierung bestimmter Datengruppen wurde über simple Datenbankapplikationen (SQL-Statements) realisiert.



## 6.2. Modellstruktur

### Modellhypothesen

Hypothese	Berechnungsverfahren	Erläuterung
<b>überprüfte Annahmen</b>		
Die <b>langjährige mittlere Abtragsmenge</b> eines Raumausschnittes beeinflusst den Anbindungsgrad, da sie die potentiell für den Gewässereintrag verfügbare mobilisierte Bodenmenge darstellt.	ABAG (U. Schwertmann u. a. 1987)	Ein Raumausschnitt mit einer niedrigen Neigung, Feststoffe zu mobilisieren, d. h. mit geringer Erosionsanfälligkeit, trägt selbst kaum Feststoffe in ein Fließgewässer ein, er hat einen geringen Anbindungsgrad.
Die komplexe <b>Reliefsituation</b> in Form der Faktoren Gewässerdistanz, Einzugsgebietsgröße, Hangneigung, Hanglänge und Hangform beeinflusst den Anbindungsgrad eines Raumausschnittes.	Reliefanalyse	Die Reliefparameter, die aus dem DGM abgeleitet werden können, beeinflussen den oberflächlichen Transportweg von Wasser und Boden. Der Verlauf des Transportpfades muss zur Bestimmung des Anbindungsgrades nachvollzogen werden.
Lineare <b>Raumstrukturelemente</b> der Landschaft (Gewässer- und Verkehrsnetz) beeinflussen den Anbindungsgrad über eine Veränderung der oberflächlichen Abfluss- und Transportpfade.	Raumstrukturintegration	Raumstrukturen können je nach Lage zum oberflächlichen Abflusspfad und nach ihrem Typus den Verlauf und die Konzentration des Abflusses stark verändern. Sie müssen in das Reliefmodell integriert werden, um den Transportpfad realitätsnäher abbilden zu können.
Die <b>Menge des Direktabflusses</b> beeinflusst über das Potential, Feststoffe zu transportieren, die in die Gewässer eingetragene Stoffmenge, d. h. den Anbindungsgrad.	Curve-Number-Verfahren (Soil Conservation Service 1972)	Je nach oberflächlich anfallender Wassermenge, die entsprechend der Relief- und Raumstrukturbedingungen hangabwärts fließt, können unterschiedlich viel Feststoffe im Einzugsgebiet transportiert und ins Gewässer eingetragene werden
Das <b>Transportpotential des Oberflächenabflusses</b> für Feststoffe beeinflusst die oberflächlich transportierte und damit die ins Gewässer eingetragene Stoffmenge, d. h. den Anbindungsgrad.	Stofftransportpotential (J. Schmidt 1994 u. M. v. Werner 1995)	Des Feststoffeintrag in die Oberflächengewässer ist von der Transportkapazität des Oberflächenabflusses abhängig. In Leitbahnen des oberirdischen Abflusses ist diese besonders hoch.
<b>Areale</b> mit Eigenschaften jenseits bestimmter Grenzwerte für Abtragsmenge, Abflussmenge, Transportpfaddistanz, Gewässerdistanz oder Transportstrecke im Grabensystem sind vom Gewässersystem <b>abgekoppelt</b> .	abgekoppelte Areale	Sofern ein Parameterwert außerhalb bestimmter Maximalwerte (z. B. Gewässerdistanz > 1250 m) liegt, können diese Flächenbereiche keine Feststoffe an die Gewässer liefern.
<b>hypothetische Annahmen</b>		
Die Kombination von bestimmten Werten für Hangneigung, -länge und -form führt zur <b>Akkumulation</b> von Feststoffen und damit zur Verringerung des Anbindungsgrades	potentielle Akkumulationszonen	Durch die verminderte Schleppkraft des Oberflächenwassers kommt es bei geringer Hangneigung und -länge zur Ablagerung von Bodenmaterial. Konkave Hangformen begünstigen diesen Prozess.
Der <b>Feststofftransport in temporären Gräben</b> ist entsprechend der Ausstattung des Grabenabschnittes unterschiedlich stark ausgeprägt. Er beeinflusst damit den Anbindungsgrad an Fließgewässer. Die Einflussfaktoren des Transportes sind: Wasserführung, Gefälle, Fließgeschwindigkeit, Direktabfluss und Scheitelabfluss nach Starkniederschlag.	Grabenretentionspotential	Gräben haben eine unterschiedlich große Fähigkeit, eingetragene Feststoffe weiterzutransportieren. Je weiter eine potentiell angebundene Ackerfläche im oberen Teil des Einzugsgebietes liegt und je geringer der Abfluss Q in den Gerinnen und Gräben im Jahresverlauf, um so weniger Feststoffe werden ins nächste größere Fließgewässer eingetragene.

**Tab. 15: Hypothesen zum empirischen Modell zur Bestimmung des Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer im mittleren Maßstab (1 : 25 000-50 000)**

Die Einflussfaktoren der Gewässeranbindung lassen sich über eine logistische Regressionsanalyse miteinander verknüpfen. Darüber wird für jede Raumposition der Anbindungsgrad in Form einer Wahrscheinlichkeitsaussage ableitbar

Da es sich um einen empirisch-statistischen Modellansatz handelt, sind für die Konzeption Grundannahmen erforderlich. Die **Grundthesen** stützen sich auf die Analysen zum Prozessgeschehen von Einflussgrößen des Stoffeintrages und die Wirkungsweise der Modellparameter (Kap. 4 und 5). Zu Grundannahmen hinsichtlich der Prozesskomplexe Bodenerosion, Relief, Raumstruktur, Oberflächentransport, Grabentransport und der Methodik der Parameterverknüpfung gibt eine Hypothesentabelle Auskunft (Tab. 15).

### Modellaufbau

Abb. 40 zeigt die Modellkonzeption. Das **Modellkonzept** stützt sich auf die Eingangshypothesen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren Inputdaten sind die Modellbausteine sowie ihre Grundstruktur festgelegt. Die Berechnungsalgorithmen sind im GIS- bzw. Datenbankmanagementsystem umgesetzt.

Aus Basisdaten von ATKIS DLM 25/1 und DGM 50, BÜK 50 und Werten von DWD-Niederschlagsstationen werden als zentrale Prozessgrößen integrative Parameter ermittelt und miteinander gekoppelt. Die einzelnen **Teilschritte** der Modellierung sind kurz zusammengestellt (Abb. 40):

- Zunächst erfolgt die Zusammenstellung und Überführung der Basisdaten in ein lesbares GIS-Format.
- Bei Verfahren der Raumstrukturintegration werden die Strukturelemente (Gewässersystem und Verkehrsnetz) in das DGM integriert, so dass ihre Wirkung auf den Oberflächenabfluss bei den weiteren Berechnungen mit einfließt.
- Reliefanalyse: Berechnung von Hangneigung, Hanglänge, Hangform, Einzugsgebietsgröße, Gewässerdistanz. Wichtige Teilschritte der Reliefanalyse beruhen auf Überlegungen und Algorithmen von T. G. FREEMAN (1991), D. D. GREENLEE (1987) und L. E. BAND (1993).
- Die Abtragsmenge wird mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung abgeschätzt (W. WISCHMEIER & D. SMITH 1978, SCHWERTMANN U. A. 1987).
- Die Menge des Oberflächenabflusses wird mit dem SCS Curve-Number-Verfahren bestimmt (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972, in Ergänzung DVWK 1984, U. MANIAK 1992).
- Für das Stofftransportpotential wird einerseits die Transportkapazität des Oberflächenabflusses nach J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995) und andererseits die Entfernung zu den generierten potentiellen Transportwegen berechnet.
- Anhand von Kriterien, die eine Flächenanbindung ausschließen, werden Raumbereiche eliminiert und mit dem Merkmal „abgekoppelt“ (d. h. keine Anbindung) versehen.
- Die Verknüpfung aller kalkulierten Parameter erfolgt mit einem Regressionsverfahren, über das die Wahrscheinlichkeit der Anbindung (Flächenanbindungsgrad) in Prozent berechnet wird.
- Retentionspotential in Gräben: Für Einzugsgebiete von Grabenabschnitten mit geringer Schleppkraft erfolgt eine Reduzierung der Anbindungswahrscheinlichkeit entsprechend ihrer Entfernung zum Fließgewässer.

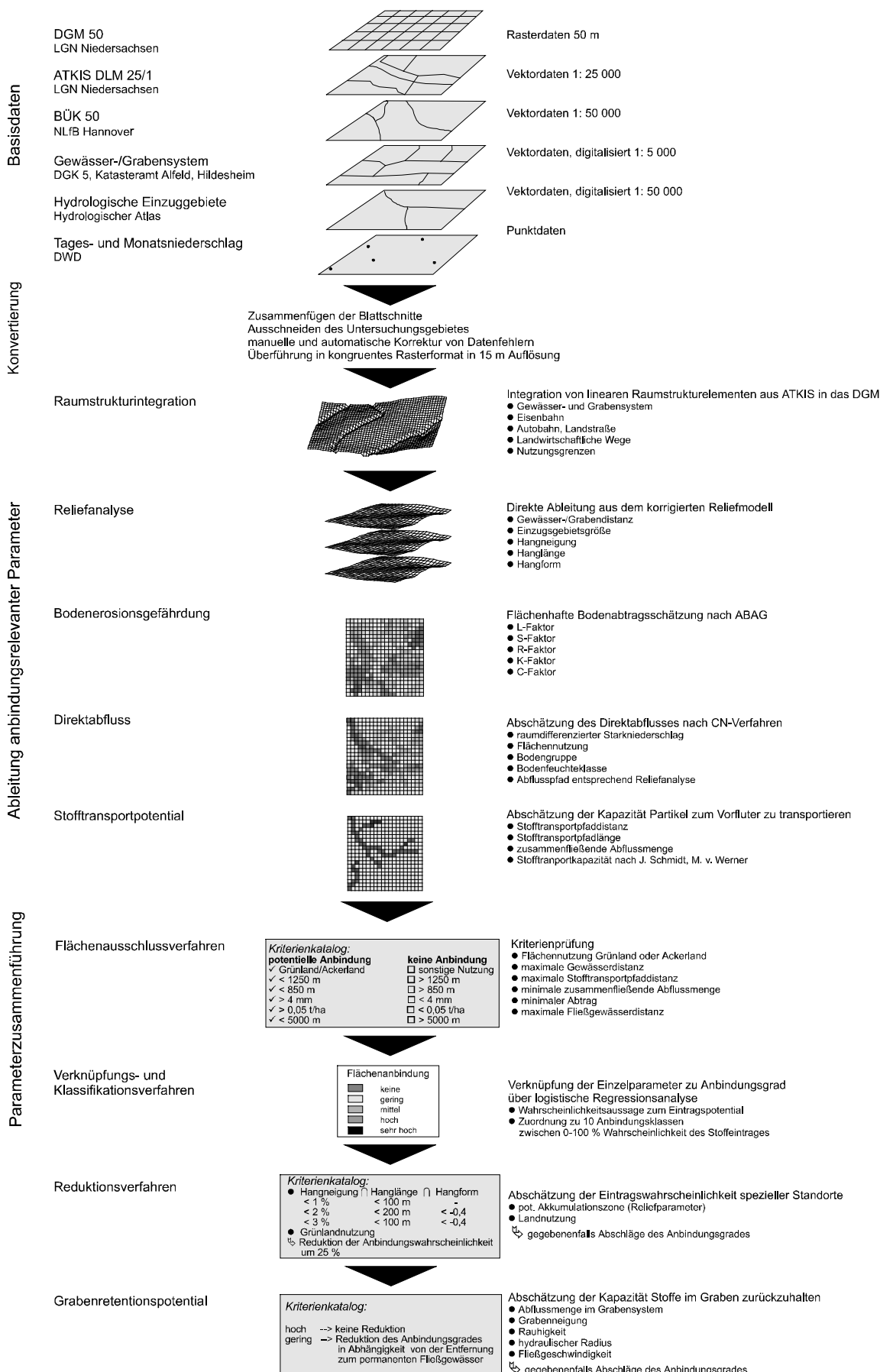


Abb. 40: Konzeption des Modells zur Bestimmung des Anbindungsgrades erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer

### 6.3. Reliefanalyse

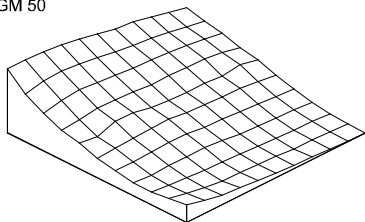
Im Folgenden sind die aus dem digitalen Geländemodell abgeleiteten **Berechnungsalgorithmen** der Parameter dargestellt und erläutert. Ansätze zur rasterbasierten Oberflächenanalyse sind zahlreich beschrieben (K.J. Beven & I.D. Moore 1994, M. LEMBERT U. A. 1994, L.E. BAND 1993, B. MERKEL & B. SPERLING 1993, W.P.A. VAN DEURSEN & J.C.J. KWADIJK 1993, H. DÜSTER & R. WEINGARTNER 1993).

- Hangform [-]: Wölbung der Geländeoberfläche. Für jede Rasterzelle wird in einem Fenster von 3 mal 3 Zellen ein Polynom 4ter Ordnung an die Geländeoberfläche gefittet. Der Zahlenwert der berechneten Hangform ist die 2. Ableitung der Oberflächen, d. h. die Neigung der Hangneigung.
- Hangneigung [°]: Oberflächengefälle von jeder Zelle zu ihrer Nachbarzelle. Errechnet als der maximale Gradient der Höhenänderung jeder Zelle zu ihren acht Zellennachbarn.
- Abflussrichtung [-]: Die Fließrichtung aus einer Zelle zum steilsten Gefälle ihrer Nachbarzellen. Sie berechnet sich nach Richtungswert = Höhenänderung : Entfernung zum Zellenzentrum • 100
- Hanglänge [m]: Entfernung von der Wasserscheide zum Übertrittspunkt in ein Gewässer gemessen entlang der generierten Fließstrecke. Der Abflusspfad wird hangabwärts verfolgt und die Rasterweiten  $a$  bzw. deren Diagonale  $a \cdot \sqrt{2}$  nacheinander für jede Zelle aufaddiert.
- Einzugsgebietsgröße eines Hangabschnittes [m<sup>2</sup>]: Die Größe des hangaufwärts liegenden Einzugsgebietes einer Rasterzelle. Sie wird durch Kumulieren des Rasterflächeninhaltes von einer Zelle zur nächsten kalkuliert, d. h. jede Ergebniszelle trägt die Zahl des Flächeninhaltes ihres realen Einzugsgebiets.
- Generierung der oberflächlichen Stofftransportpfade zum Gewässer [-]: Die Hangabschnitte (Rasterflächen) mit einer Einzugsgebietsgröße von mehr als 1 ha werden definiert als potentielle Stofftransportwege, da sie eine erhöhte Erosionsgefährdung und Transportbereitschaft aufweisen. Nach einer simplen Grenzwertabfrage erfolgt für die betroffenen Zellen die Zuordnung eines definierten Zahlenwertes.
- Gewässerdistanz [m]: Abstand zum nächsten Fließgewässer oder Graben entlang dem hangaufwärtsgerichteten Verlauf der Oberflächenabflusses.
- Transportpfaddistanz [m]: Abstand zum nächsten generierten Transportpfad entlang dem hangabwärtsgerichteten Verlauf der Oberflächenabflusses. Rechentechnisch die Umkehrung der Hanglänge.
- Potentieller Übertrittspunkt [-]: Schnittpunkt vom generierten Transportpfad mit dem Gewässersystem. Die Raumposition des potentiellen Übertrittspunktes wird über ein Selektionsverfahren mithilfe mehrerer Masken berechnet.

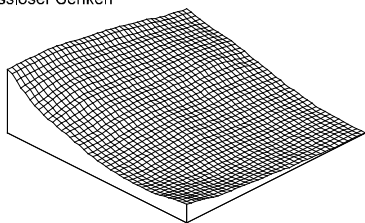
### 6.4. Integration von linearen Raumstrukturelementen in die Abbildung des Reliefs (Raumstrukturintegration)

Lineare Raumstrukturelemente beeinflussen Oberflächenabfluss (Verlauf, Menge), Bodenerosionsgefährdung (erosiver Hanglänge), Reliefparameter (Gewässerdistanz, Hanglänge, Einzugsgebietsgröße) und Stofftransportpotential (Transportpfad, -pfaddistanz, -kapazität). Das Modell berücksichtigt diesen Effekt auf den Flächenanbindungsgrad.

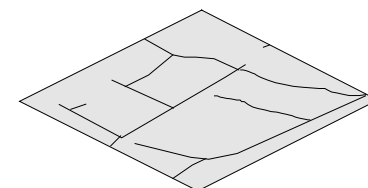
DGM-Rohdaten im 50 m Raster  
z.B. ATKIS DGM 50



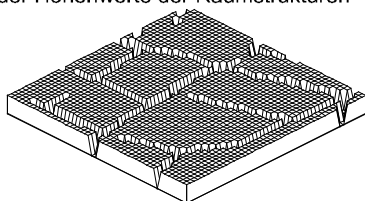
Automatische Fehlerkorrektur  
Auffüllen abflussloser Senken



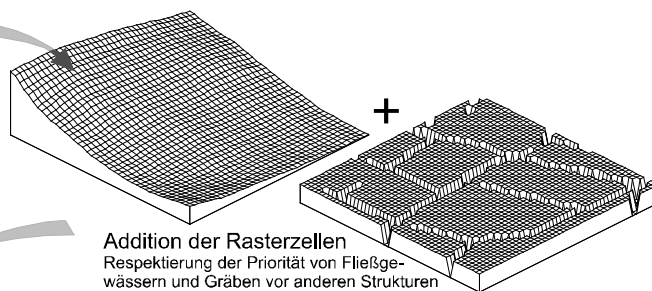
Wahl einer geeigneten Rasterweite  
TIN-Interpolation mit Oberflächenglättung  
Kriterien:  
● Generalisierung der Raumstrukturbreite  
● Versteilung des Reliefs  
● Speicherverfügbarkeit



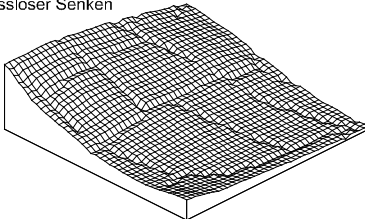
Aufrastern der Höhenwerte der Raumstrukturen



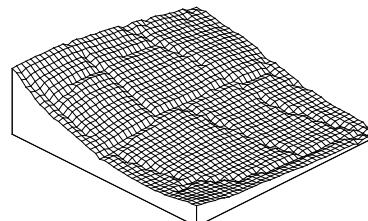
Linieninformation der Raumstrukturelemente  
Zuweisung von Höhenwerten je nach Funktionsweise



Automatische Fehlerkorrektur  
Auffüllen abflussloser Senken



Addition der Rasterzellen  
Respektierung der Priorität von Fließgewässern und Gräben vor anderen Strukturen



Hydrologisch korrektes Höhenmodell mit integrierten linearen Raumstrukturelementen  
Optimierung von Anbindungsparametern, wie:  
● Steuergrößen der Bodenerosion  
● Lage und Verlauf oberflächlicher Transportpfade  
● Einzugsgebietskenngrößen  
● Transportgrößen des Gewässer- und Grabensystems

Abb. 41: Prinzip der Integration von Raumstrukturen in ein digitales Geländemodell

Die Modellabbildung erfolgt durch die **Integration von linearen Raumstrukturelementen** in das DGM (B. LUDWIG U. A. 1995). Die Methodik wird für den mittleren Maßstab mit Linienelementen aus ATKIS DLM 25/1 und mit dem abgeleiteten Graben- und Fließgewässersystem angewendet. Sie lässt sich aber prinzipiell auch für Strukturen anderer Skalen einsetzen (s. J. BIERBAUM 2000).

Die **modelltechnische Umsetzung** vollzieht sich über mehrere Teilschritte (Abb. 41). Zunächst wird eine dem Modellziel adaptierte Rasterauflösung festgelegt. Die Interpolation erfolgt linear mit einer der Reliefformung angepassten Glättungsfunktion. Entsprechend ihrer Funktion erhalten die linearen Raumstrukturelemente spezifische Attributwerte. Abflusshemmende Strukturen bekommen positive, abflussfördernde negative Werte (Tab. 16). Durch Experimentieren mit verschiedenen Varianten für die Strukturhöhen wurde eine Variante ermittelt, die in der Fläche morphologisch plausible Resultate erzeugt. Die applizierten Attribute werden aufgerastert und zu dem ursprünglichen, korrigierten DGM addiert, wobei die wirkungsvollsten Strukturen vor weniger bedeutenden Priorität genießen. Aus rechentechnischen Gründen muss das Modell den ungehinderten Abfluss von Zelle zu Zelle gewährleisten. Um eine störungsfreie Abflussmodellierung zu garantieren, füllt ein Algorithmus abflusslose Senken auf.

Nutzung (ATKIS-Objektart))	Funktion	Fahrbahnbreite nach Gebietsangaben	Fahrbahnbelag nach Gebietsangaben	Geländehöhendifferenz für lineares Raumstrukturelement		
				Variante mit zu geringem Einfluss	Modell- variante	Variante mit zu starkem Einfluss
Straße	Bundesautobahn	20	sb	+0.4	+0.5	+0.6
Straße	Bundesautobahn	20	sb	+0.4	+0.5	+0.6
Straße	Bundesstraße	15	sb	+0.2	+0.3	+0.4
Straße	Landes-/Staatsstrasse	9,4	sb	+0.3	+0.4	+0.5
Straße	Kreisstraße	7,0	sb	+0.2	+0.3	+0.4
Straße	Gemeindestraße	6,0	sb	+0.1	+0.2	+0.3
Straße	Sonstige Straße	5,6	sb/msb	-0.1	-0.2	-0.3
Straße	Sonstige Straße	5,4	sb	+0.2	+0.3	+0.4
Weg	Sonstiger Weg	4,5	msb/lb/keine	-0.1	-0.2	-0.3
Straßenkörper	Bundesstraße	15	sb	+0.4	+0.5	+0.6
Straßenkörper	Bundesautobahn	20	sb	+0.5	+0.6	+0.7
Fahrbahn	Bundesautobahn	9,4	sb	+0.75	+1	+1.25
Schienenbahn	Eisenbahn	20	sb	+0.5	+1	+1.5
Bahnkörper	Eisenbahn	20	sb	+1.5	+2	+2.5
Bahnstrecke	Eisenbahn	20	sb	+0.5	+1	+1.5
Tunnel	Tunnel	20	sb	-0.1	-0.2	-0.3
Brücke, Unterführung	Brücke	20	sb	-0.2	-0.3	-0.4
Strom, Fluss, Bach	-	-	-	-3	-3	-3
Graben, Kanal	-	-	-	-3	-3	-3
Nutzungsgrenzen	-	-	-	-0.05	-0.1	-0.15

sb: schwere Befestigung  
 msb: mittelschwere Befestigung  
 lb: leichte Befestigung  
 keine: keine bauliche Befestigung

**Tab. 16: Geländehöhendifferenz linearer Raumstrukturelemente aus ATKIS DLM 25/1 zur Integration in das DGM**

Damit entsteht ein Rasternetz aus Höheninformationen, das ein hydrologisch korrigiertes Abflussverhalten abzubilden vermag. Der GIS-Funktionsumfang zur hydrologischen Oberflächenanalyse bleibt auch bei Einbeziehung der Raumstrukturen in vollem Umfang nutzbar. Der modellierte Oberflächenabfluss verläuft entsprechend der speziellen Strukturfunktion vor (abflusshemmend) bzw. in (abflussfördernd) dem Raumstrukturelement.

Das **Graben- und Fließgewässersystem** ist derart in das DGM integriert, dass

- sämtliches Oberflächenwasser im darüberliegenden Hangeinzugsgebiet in den Gewässerabschnitt einströmen (Übertritt) und
- die zusammenströmenden Wassermengen innerhalb des Gewässersystems bis zum Gebietsauslass weiterfließen kann (Kaskadierung des Durchflusses).

Die **Problematik der Methode** liegen in der Datenstruktur des Rasteransatzes begründet. Zum einen kommt es durch den Vorgang der Aufrasterung zu einer vereinfachten Abbildung der Raumstrukturcharakteristika. Die Strukturbreite entspricht also dem konstanten Wert der Zellenweite. Liegen Vektoren verschiedener Raumstrukturen eng beieinander, kommt es infolge von Rasterüberlagerung zur Elimination von weniger relevanten Strukturen. In Abhängigkeit von der gewählten Gitterauflösung sind also nur Raumstrukturen mit einer begrenzten Dichte abzubilden. Die mögliche Auflösung hängt wiederum von den Speicherressourcen ab. Zum anderen zieht der Effekt der Reliefverteilung durch die Verfeinerung der Rasterauflösung eine gewisse Modifikation der Grunddaten nach sich.

## 6.5. Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung

Der Flächenanbindungsgrad soll eine mittlere Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages in die Fließgewässer bezeichnen. Dafür ist die Abschätzung des langjährigen mittleren Bodenabtrags Voraussetzung.

Die Langzeitsimulation über einen Zeitraum von mehreren Jahren ist mit **komplexen physikalischen Bodenerosionsmodellen** für Einzelereignisse (z. B. CREAMS, EROSION 3D, WEPP, LISEM etc.; s. H.R. BORK & A. SCHRÖDER 1996) nicht realisierbar. Ohne weitgehende Vereinfachungen lassen sich die umfangreichen Eingangsdaten für die chorische Dimension nicht bereitstellen. Ob sich unter diesen Bedingungen durch den Einsatz eines physikalischen Erosionsmodells die Qualität des Ergebnisses überhaupt steigern lässt, erscheint zweifelhaft.

Für die **Einschätzung der mittleren Gefährdung** ist vielmehr ein Modell zur Abschätzung derjenigen Bodenmenge notwendig, die langfristig erodiert und die im langjährigen Mittel für den Eintrag in das Gewässer zur Verfügung steht. Aufgrund der Einzugsgebietsgröße und der geringen Auflösung der Grunddaten, können dazu nur wenige Eingangsparameter zur Verfügung gestellt werden.

Aus diesen Gründen ist nur ein statistisch-empirisches Bodenerosionsmodell geeignet, das auf der Langzeitbeobachtung aufbaut und daraus wenige Erosionsparameter ableitet. Ein weitverbreitetes empirisches Modell, das in zahlreichen Anwendungen erprobt wurde, ist die Universal Soil Loss Equation (USLE) nach W. WISCHMEIER & D. SMITH (1978) und in ihrer Adaption an deutsche Raumverhältnisse die **Allgemeine Bodenabtragungsgleichung** (ABAG) (U. SCHWERTMANN U. A. 1987). Die ABAG gilt als das einzige Modell zur Abschätzung der flächenhaften Erosion, das „wissenschaftlich gut abgesichert und praxistauglich“ ist (TH. MOSIMANN 1995, S. 4). Sie ermöglicht die Erosionsabschätzung unter den geforderten Voraussetzungen. Das Blackbox-Modell fußt auf folgender Grundgleichung:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Gl. 4}$$

- A : Langjähriger, mittlerer Bodenabtrag [t/ha • a]
- R : Regenfaktor; Gebietsspezifische Erosivität der Niederschläge [N/h]
- K : Bodenerodierbarkeitsfaktor; jährlicher Abtrag eines bestimmten Bodens auf dem Standardhang pro R-Faktoreinheit [(t/ha)/(N/h)]
- L : Hanglängenfaktor; Abtrag einer beliebigen Hanglänge in Relation zu der des Standardhanges von 22 m [-]
- S : Hangneigungsfaktor; Abtrag einer beliebigen Hangneigung in Relation zu der des Standardhanges von 9 % [-]
- C : Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor; Abtrag einer beliebigen Bewirtschaftung in Relation zu dem des Standardhanges mit Schwarzbrache [-]
- P : Erosionsschutzfaktor Abtrag beliebiger Schutzmaßnahmen in Relation zu denen des Standardhanges mit Falllinienbearbeitung ohne Schutzmaßnahmen [-]

Mit einigen **Modifikationen** lassen sich auch größere Einzugsgebiete mit GIS modellieren, dabei werden Grundüberlegungen von H. HENSEL & H.-R. BORK 1988 aufgegriffen. Aufgrund seiner Größe gestaltet sich das Einzugsgebiet in Hinblick auf Relief-, Boden- und Niederschlagsbedingungen heterogen. Da das Prinzip der Abtragschätzung der ABAG auf der Einzelbeurteilung von homogenen Gesamthängen bzw. von Einzelparzellen beruht, ist für ihre Adaption in ganzen Einzugsgebieten eine besondere Methodik zur GIS-basierten automatisierten Ermittlung der Einzelfaktoren notwendig.

### 6.5.1. LS-Faktor

Die Faktoren Hangneigung und -länge gehören zu den sensitivsten Parametern der ABAG (K. AUERSWALD 1987). Die automatisierte Berechnung des LS-Faktors bzw. der **erosiven Hanglänge** bereitet besondere Schwierigkeiten. Die große Varianz der Reliefparameter, wie Neigung, Form, Länge und Exposition des Hanges fügen sich zu dem komplexen Gesamtstruktur „Hang“ zusammen, das nur schwer mit einem GIS digital gesamthaft zu charakterisieren ist.

Nach U. SCHWERTMANN U. A. (1987) errechnet sich der LS-Faktor für einen homogenen Hang wie folgt:



$$LS = \left( \frac{1}{22} \right)^m \cdot (65,41 \cdot \sin^2 \alpha + 4,56 \cdot \sin \alpha + 0,065) \quad \text{Gl. 5}$$

- LS : Topographiefaktor [-]  
 l : erosive Hanglänge [m]  
 m : Hanglängenexponent [-]  
 $\alpha$  : Hangneigung [°]

Die einfache Mittelwertbildung der Eingangsgrößen über den Hang führt zu unkorrekten Ergebnissen (H. HENSEL & H.-R. BORK 1988). Nach folgender Formel sollen hangfußnahe Abschnitte bei der Berechnung ein größeres Gewicht erhalten, da sie den Bodenabtrag stärker beeinflussen (U. SCHWERTMANN U. A. 1987) als oberhangnahe Bereiche:

$$W_i = \frac{i^{(m+1)} - (i-1)^{(m+1)}}{X^{(m+1)}} \quad \text{Gl. 6}$$

- $W_i$  : Wichtungsfaktor des Teilstücks  
 i : Nr. des Teilstücks von der Wasserscheide bis zum Graben/Gewässer  
 m : Hanglängenexponent für die mittlere Neigung des Gesamthangeinzugsgebietes  
 X : Anzahl der Teilstücke im Hangeinzugsgebiet ( $X = (\text{max. Hanglänge/Zellenweite}) + 1$ )

Anschließend müssen die LS-Faktoren mit den Wichtungsfaktoren multipliziert und zum LS-Faktor des Gesamthanges zusammengefasst werden:

$$LS_{W_i} = \sum_1^i (LS_i \cdot W_i) \quad \text{Gl. 7}$$

- $LS_{W_i}$  : LS-Faktor des Hangeinzugsgebietes (gewichtet)  
 $LS_i$  : LS-Faktor des Teilstücks i  
 $W_i$  : Wichtungsfaktor des Teilstücks

Da die separierte Berechnung für als Einheit betrachtete Einzelhänge im GIS kaum zu realisieren ist, wurde eine spezielle Berechnungsmethode angewandt, die einerseits Bereiche am Hangfuß stärker berücksichtigt und andererseits die Lage von Hangabschnitten im Reliefformengefüge einbezieht.

Statt Einzelhängen werden ganze **Hangeinzugsgebiete** von Graben- bzw. Fließgewässerabschnitten betrachtet. Sie bilden die Grundlage der Flächenanbindung. Um eine größtmögliche Differenzierung zu erreichen, werden die Hangeinzugsgebiete in 15 • 15 m große Teilflächen (Raster) diskretisiert und diese zu homogenen Hangabschnitten deklariert. Die LS-Faktoren werden einzeln für jeden dieser Hangbereiche berechnet und gemäß ihrer Lage in der Hangabfolge betrachtet. Da die ABAG eine summarische Betrachtung von Einzelhängen bzw. -hangeinzugsgebieten postuliert,

ist der LS-Faktor für jede Rasterzelle als Mittelwert des oberhalb gelegenen Hangeinzugsgebietes (upslope area) zu ermitteln.

Die erosive **Hanglänge** (L-Faktor) errechnet sich als Entfernung zwischen Wasserscheide, hangaufwärts liegendem Gewässer, Wald- oder Siedlungsflächen und dem jeweils betrachteten Hangabschnitt. Die Berechnung erfolgt bis zum nächsten Gewässer oder Graben, von da an beginnt die Berechnung erneut und damit die Hanglänge wieder bei 0 m. Der Verlauf des Oberflächenabflusses entsprechend dem größten Gefälle von einer Rasterzelle zur nächsten wird durch den Algorithmus nachvollzogen. Da die Hanglänge für jeden Hangabschnitt (Rasterzelle) berechnet wird, nimmt sie vom Oberhang bis zum Hangfuß stetig zu. Die geforderte Gewichtung ist somit bereits integraler Bestandteil des Berechnungsalgorithmus.

Da bei Feldbegehungen in den Testgebieten keine Hanglängen oberhalb 1000 m vorkamen, wird die maximale mögliche Hanglänge per Definitionem auf diesen Wert fixiert. Aufgrund der Überschätzung der Hanglänge bei GIS-gestützten Rechnungen und um die zunehmende Möglichkeit der Zwischenakkumulation bei wachsendem Hangeinzugsgebiet zu berücksichtigen, wird die Hanglänge durch die Hälfte des Einzugsgebietes jeder Rasterzelle dividiert. Damit soll die Zunahme der Wahrscheinlichkeit von erosionsmindernden Hangformen und Zwischenakkumulationen bei größeren Hanglängen berücksichtigt werden, die bei einer Einzelschlagbetrachtung zur Begrenzung der erosiven Hanglänge führen würde. Die Annahme stützt sich auf Überlegungen von K. AUERSWALD (1989a), der mit der Angabe einer sediment delivery ratio die zunehmende Wahrscheinlichkeit der Akkumulation bei wachsender Größe des Einzugsgebietes nachvollzieht.

Die Berechnung der **Hangneigung** (S-Faktor) erfolgt getrennt für jedes Hangsegment (Rasterzelle) als maximale Änderung des Höhenwertes zu den Nachbarhangbereichen. Im GIS werden dazu um die Zentralzelle 3 • 3 Nachbarzellen betrachtet und nach trigonometrischen Gesetzen der maximale Neigungswinkel errechnet.

Der **Hanglängenexponent**  $m$  wird ebenfalls aus den arithmetischen Mittelwert der Neigung im gesamten Hangeinzugsgebiet des jeweiligen Hangabschnittes abgeleitet.

Um Ablagerungen innerhalb eines Hangeinzugsgebietes zu simulieren, werden über einen einfachen Algorithmus optional Bereiche, die bei bis zu 200 m (bzw. 100 m) Hanglänge weniger als 0,5° Gefälle bzw. bei konkaver Hangform bis zu 1° (bzw. 2°) Gefälle aufweisen, als **potentielle Akkumulationsbereiche** ausgewiesen. Durch die Berücksichtigung dieser Akkumulationszonen berechnen sich andere erosive Hanglängen. In einer Schleife erfolgt die neuerliche Berechnung des LS-Faktor. Da jeweils bis zur Akkumulationszone bzw. von der Akkumulationszone beginnend gerechnet wird, verändern sich sämtliche erosiven Hanglängen und damit wiederum sämtliche LS-Faktoren im Untersuchungsgebiet.

### 6.5.2. R-Faktor

Die Niederschlagserosivität lässt sich durch den R-Faktor kennzeichnen (s. U. SCHWERTMANN U. A. 1987). Der R-Faktor wird im GIS aus dem regionalisierten mittleren Jahresgebietsniederschlag abgeleitet. Dabei wurden Überlegungen zu einem kombinierten Regressions-Interpolationsverfahren zur Regionalisierung des mittleren Jahresniederschlages von C. RUHE (1997) mit Ergebnissen von P. SAUERBORN (1994) zur Regionalisierung der Regenerosivität miteinander verknüpft in eine Methodik zur GIS-gestützten Generierung eines flächendifferenzierten R-Faktors zusammengeführt.

Dem Niederschlag kommt als auslösender Faktor von Oberflächenabfluss und Bodenerosion im Wirkungsgefüge des Landschaftshaushaltes für die Problematik der Gewässeranbindung eine besondere Funktion zu (G. RICHTER 1998). Er ist im mittleren Betrachtungsmaßstab großer Einzugsgebiete zeitlich und räumlich aufgrund des Einflusses von großräumig wirkenden Klimafaktoren, wie Luv- bzw. Lee- sowie Massenhebungseffekte im Bereich von stärkeren Höhenunterschieden stark variabel. Bei den Kartierungen wurden im Gebiet auch kleinräumig für Einzelereignisse starke Niederschlagsvariabilitäten hinsichtlich der Erosivität festgestellt. W. WERNER & H. P. Wodsak (1994) sehen Forschungsbedarf für die Bemessung der räumlichen Verteilung und Struktur erosionsauslösender Niederschläge, um die Kalkulation der Nährstoffeinträge über einzelne Eintragsquellen zu optimieren. Da die Niederschlagserosivität zudem eine Eigenschaft des Geoökosystems ist, auf die anthropogen kein Einfluss genommen werden kann, wird auf ihre Ermittlung besonderen Wert gelegt.

Das entwickelte Regionalisierungsverfahren ermöglicht die Ableitung die Erosivität der Niederschläge (R-Faktor) raumdifferenziert und in hoher Auflösung aus flächendeckend leicht verfügbaren Grunddaten. Folgende Größen gehen in das Verfahren ein:

- stationäre Niederschlagswerte,
- digitale Geländehöhendaten sowie
- Regressionsbeziehungen zwischen mittlerer Jahresniederschlagssumme und der Regenerosivität (bundesweit verfügbar).

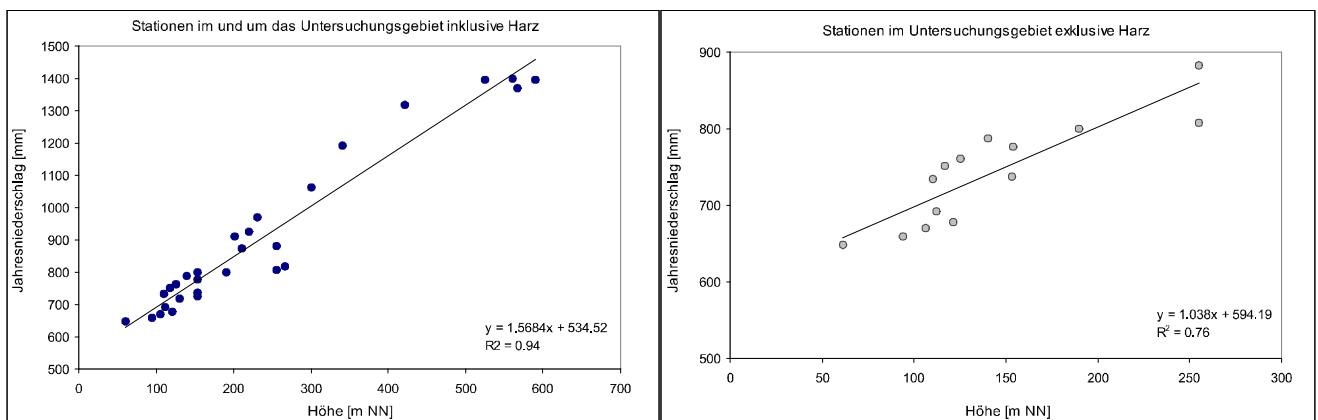
Die Raumverteilung der mittleren Jahresniederschläge wird für das Gesamtgebiet über ein kombiniertes **Regressions-Interpolationsverfahren** in Anlehnung an C. RUHE (1997) abgeleitet. Aus der jährlichen mittleren Niederschlagssumme lässt sich die Ausprägung des R-Faktors über regionspezifische Regressionsbeziehungen ableiten (P. SAUERBORN 1994).

Die **Grundüberlegung** beruht darauf, dass in chorischer Dimension die Niederschlagsverteilung mit der Geländehöhe korreliert. Zunächst wird der Höheneinfluss aus dem Jahresniederschlag herausgerechnet, indem die Niederschlagsstationen quasi auf Meeresniveau verschoben werden. Mit diesen noch von lokalen Klimaeinflüssen geprägten Niederschlagswerten erfolgt nun eine Interpolation mittels Kriging (zu geostatistischen Verfahren s. J. VOGES 1994). Anschließend transformiert ein

Algorithmus die interpolierten Niederschlagssummen wieder auf die reale Geländehöhe zurück. Dadurch sind sowohl regionale als auch geländehöhenabhängige Effekte auf die Niederschlagshöhe einbezogen. Es entsteht ein diskretisiertes Rasterbild von der Niederschlagsverteilung, bei dem jeder Rasterzelle in Abhängigkeit des regionalen Niederschlagsregimes und der Geländehöhe ein spezifischer Niederschlagswert zugeordnet ist.

Die Methodik von C. RUHE wurde in zwei Punkten erweitert. Zum einen wird der steile Gradient des Niederschlagsanstiegs bzw. -abfalls an Höhenzügen durch die Mittelwertbildung zwischen der Rasterzelle an der Stelle  $x$  und ihren acht Nachbarzellen abgeschwächt (filtering). Unnatürliche kleinräumig Sprünge der Niederschlagssummen treten nicht mehr auf. Zum anderen finden Luv- und Leeeffekte von größeren Höhenzügen über eine Erhöhung der Niederschlagssumme an niederschlagsexponierten Zonen Berücksichtigung.

Abb. 42 dokumentiert eine lineare Beziehung zwischen Geländehöhe und mittlerem Jahresniederschlag. Bei Berücksichtigung der Niederschlagsstationen vom Harz zeigen sich die Folgen der starken Massenhebungseffekte am Harzrand deutlich. Sie führen zur erhöhten Steigung der Regressionsgerade. Finden nur die Stationen in Tallagen und am Harzrand Eingang in die Regressionsrechnung, sinkt die Steigung auf 1.



**Abb. 42: Regression der Höhe und der mittleren Jahresniederschlagssumme für 29 Stationen im und um das Untersuchungsgebiet**

Eine zu große Steigung der Regressionsgerade ( $\geq 1$ ) führt zu einer Überschätzung des Gebietsniederschlags, weil der großräumige Klimaeinfluss des Harzes ein zu starkes Gewicht bekommt (C. RUHE 1997). Da zudem die für die Anbindungsmodellierung relevanten Ackerflächen vornehmlich im Ebenenbereich liegen, wird die Steigung auf 0,9 festgelegt.

Die Integration von **Luv- und Leeeffekten auf den Niederschlag** ist folgenderweise realisiert. Aus dem DGM errechnet sich zunächst die Hangneigungsrichtung. Da Windgeschwindigkeiten keine Abhängigkeit mit der Niederschlagshöhe zeigen, sondern beliebig zwischen 0 und 14 m/s streuen, können keine

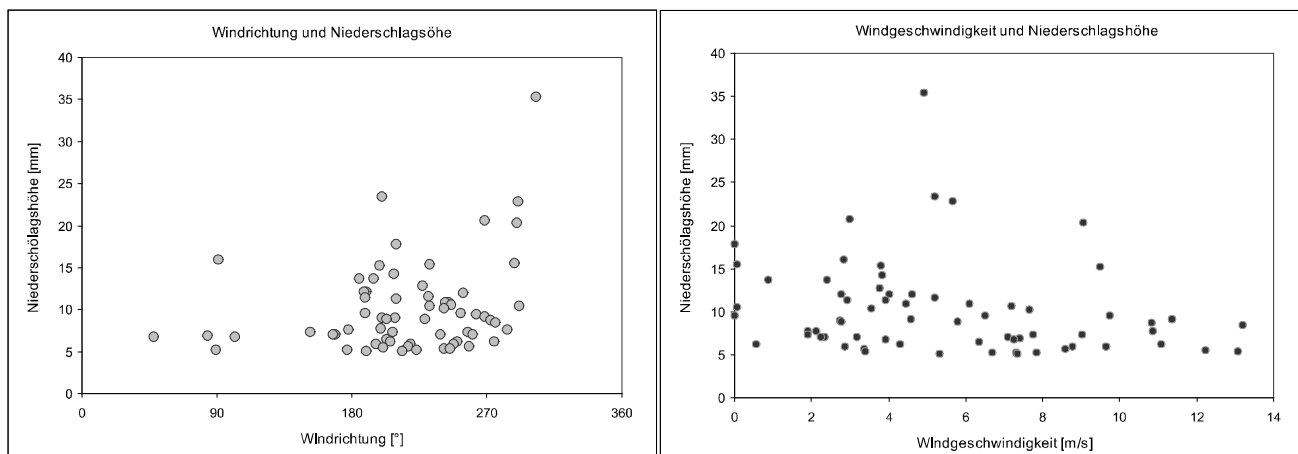
für die Niederschlagshöhe spezifischen Reichweiten der Leeabschattung abgeleitet werden (Abb. 43). Daher erhalten im Modell die Luvhänge, d. h. diejenigen die bei höheren Tagesniederschlägen (>10 mm) in der Hauptwindrichtung (180-270°) exponiert liegen, pauschal 25 mm oder 2,5-5 % mehr Niederschlag.

Aus dem raumdifferenzierten Gebietsniederschlag im Jahresmittel lässt sich der **R-Faktor** berechnen. Die **Regressionsgleichung** zur Ermittlung des R-Faktors für Niedersächsische Verhältnisse lautet (P. SAUERBORN 1994):

$$RF_{xy} = 0,0783 \cdot NS_{xy} - 12,98 \quad \text{Gl. 8}$$

$RF_{xy}$  : R-Faktorwert an den Raumkoordinaten xy

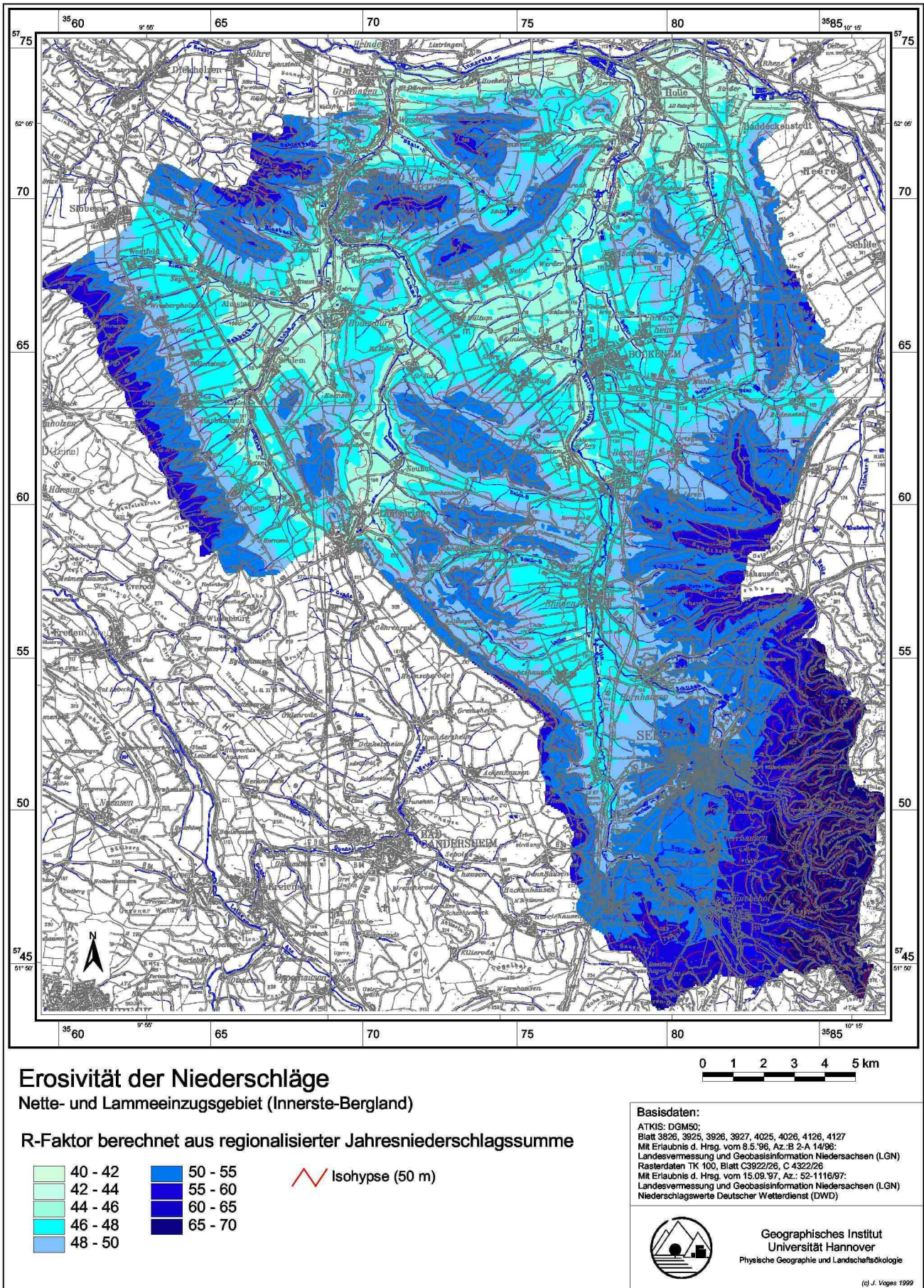
$NS_{xy}$  : mittlere Jahresniederschlagssumme an den Raumkoordinaten xy [mm]



**Abb. 43: Beziehung von Windrichtung, -geschwindigkeit und Niederschlagshöhe für Tagesniederschlagswerte > 5 mm (Klein Ilde, Zentralambergau)**

Für den südniedersächsischen Raum ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den aus Jahresniederschlägen sowie Regressionsbeziehung abgeleiteten und den exakt berechneten R-Faktorwerten (P. SAUERBORN 1994). Die beschriebene Methodik ist daher geeignet, eine größere räumliche Differenzierung und Genauigkeit der R-Faktorwerte zu erreichen. So wird der stärkeren Reliefierung der Mittelgebirgsschwelle Rechnung getragen (Karte 9). Gut erkennbar sind die Effekte der Höhenzüge auf die Erosivität der Niederschläge aufgrund von vermehrtem Steigungsregen.

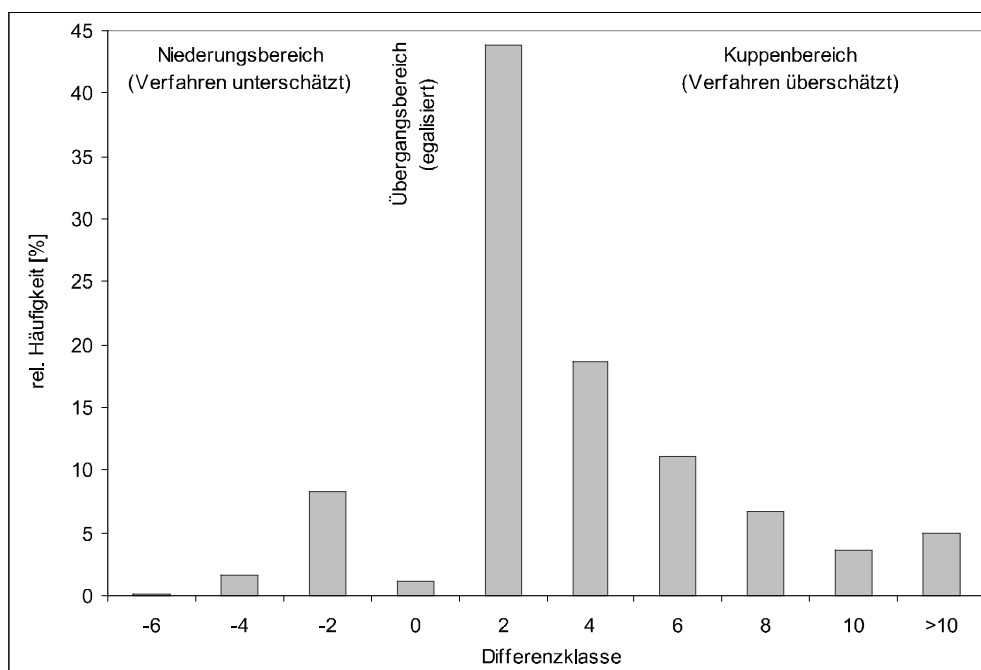




Karte 9: Regionalisierter R-Faktor



Der Vergleich mit den interpolierten R-Faktoren auf Grundlage der Isoeroden-Karte nach P. SAUERBORN (1994) zeigt für den stärker landwirtschaftlich genutzten Raum eine recht gute Übereinstimmung, sofern der Achsenabschnitt um 7 mm Jahresniederschlag, das entspricht weniger als 1% des Jahresniederschlages, nach oben verschoben wird (Abb. 44). Aufgrund der Integration des Höheneinflusses auf den Niederschlagserosivität werden bei dem Verfahren im Vergleich zu den R-Faktoren nach P. SAUERBORN die Niederungsbereiche unterschätzt und die Höhenzüge überschätzt. Damit müssen die Abtragsraten bei Berechnung mit der hier vorgestellten Methode in den vornehmlich ackerbaulich genutzten Niederungen etwas niedriger und am Rand der Höhenzüge höher ausfallen.



**Abb. 44: Unterschiede zwischen den R-Faktor-Werten nach P. SAUERBORN 1994 und den nach der Regressions-/Interpolationsmethode ermittelten Werten**

### 6.5.3. K- und C- Faktor

Der **K-Faktor** wird aus den Daten der Bodenübersichtskarte 1 : 50 000 (BÜK 50) abgeleitet. Die Bodenarten werden nach dem Korngrößendreieck der KA 4 (AG BODEN 1994) in Korngrößen und Prozentanteile aufgetrennt. Der Feinsandanteil wird nach statistischer Auswertung von Korngrößenanalysen aus Bodenproben des zentralen Ambergau für die verschiedenen Bodenartenklassen abgeschätzt. Er liegt im Mittel bei 3,4 Massenprozent mit einer Standardabweichung von 0,7 Massen-%. Das Verhältnis Schluff zu Feinstsand liegt im Mittel bei 20:1 mit  $s = 6,7$ . Die berechneten K-Faktoren werden durch Angaben von TH. MOSIMANN & M. RÜTTIMANN (1996) validiert.

Der **C-Faktor** wird über die Bodennutzung aus ATKIS DLM 25/1 und Daten des statistischen Landesamtes sowie den Ergebnissen der Landwirtebefragung zur Fruchtfolge ermittelt. Danach werden

80-90 % der Ackerflächen mit den Kulturarten Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrübe bestellt. Die Flächenanteile der Kulturen liegen bei 50% Winterweizen, 20 % Wintergerste, 30% Zuckerrübe. Aus Tabellen für Südniedersachsen nach TH. MOSIMANN & M. RÜTTIMANN (1996) wird der Fruchtfolgefaktor abgeschätzt. Die Grünland und Gartenlandflächen des DLM 25/1 werden als Kunstwiesen und Grünbrachen eingestuft.

Da das gesamte Graben- und Gewässersystem im Modell integriert ist, gestaltet sich das Untersuchungsgebiet kleinparzelliert. Die Einzugsgebiete der Gewässerabschnitte liegen für Ackernutzung im Mittel unter 0,3 km<sup>2</sup> Größe. Die Flächenausdehnung der Bodentypen- bzw. Nutzungsklassen mit durchschnittlich 1,49 km<sup>2</sup> bzw. 0,34 km<sup>2</sup> liegen relativ dazu höher. Die Heterogenität innerhalb der Hangeinzugsgebiete hinsichtlich Nutzung bzw. Bodenart ist also begrenzt. Der Umfang von Flächenüberschneidungen (kleinere Geometrien) bleibt gering, so dass keine nennenswerten Auswirkungen auf die Abtragsberechnungen zu erwarten sind. Dementsprechend erfolgt keine Gewichtung des K-, und C- -Faktors innerhalb der Hangeinzugsgebiete.

## 6.6. Abschätzung des oberflächlichen Abflusses

Das Ausmaß des Stofftransportes zum Fließgewässer wird zunächst vom **Volumen des Direktabflusses** bei einem erosiven Starkniederschlagsereignis bestimmt. Modellseitig muss dazu der Transformationsvorgang vom Gebietsniederschlag in den direkten Abflussanteil nachvollzogen werden.

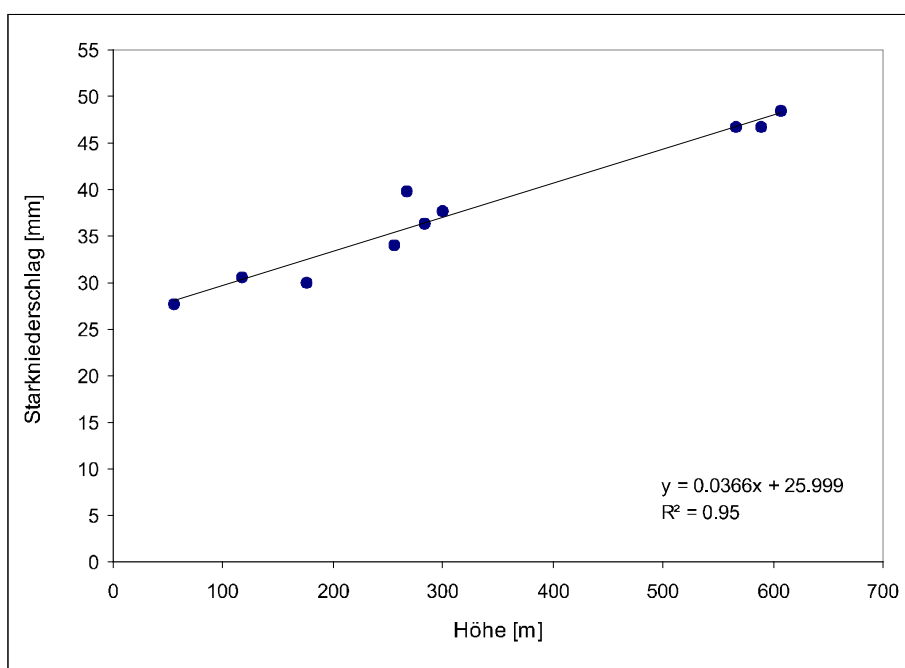
Im Anbindungsmodell findet das Curve-Number-Verfahren (CN) des US Soil Conservation Service (SCS) Anwendung (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972). **Ziel** der Prozedur ist es, den abflusswirksamen Anteil des Niederschlags (Effektivniederschlag) in Abhängigkeit von der Höhe eines Starkniederschlags und von den gebietsspezifischen Parametern für Boden und Vegetation abzuschätzen, wenn keine Niederschlag-Abfluss Aufzeichnungen vorliegen. Das Verfahren ist sehr verbreitet, wurde in zahlreichen Publikationen beschrieben und z. T. mit Modifikationen für deutsche Räume angewendet (s. LUTZ 1985, M. RODE 1995, S. GRUNWALD 1997, R. DUTTMANN 1999). Darüberhinaus ist es im Niederschlag-Abflussmodul vom Agricultural Nonpoint Source Pollution Model (AGNPS) (YOUNG U. A. 1987) und in CREAMS (W.G. KNISEL 1980) implementiert. Der DVWK empfiehlt nach vergleichenden Untersuchungen verschiedener Niederschlag-Abflussmodelle die modifizierte CN-Methode für Einzugsgebiete ohne Messungen (DVWK 1991).

Die Höhe des Direktabflusses korreliert mit der Höhe und Intensität des Niederschlags. Da Stoffeinträge an das Eintreten von Starkniederschlägen gekoppelt sind, gilt es zunächst die räumliche Verteilung eines repräsentativen gebietstypischen Starkniederschlags zu simulieren.



### 6.6.1. Ermittlung des Gebietsniederschlags für ein repräsentatives Extremereignis

Das **Grundprinzip** entspricht dem des oben beschriebenen Regressions-Interpolationsverfahrens. Als Grundlage für die Regressionsanalyse sowie die Kriginginterpolation fungieren repräsentative Starkniederschläge, die regional unterschiedliche Werte aufweisen. Die einzelnen Niederschlagswerte berechnen sich für jede Messstation als Mittelwert aus den 50 höchsten Tagesniederschlägen einer 25-jährigen Regenaufzeichnung. Nach der Geländeerfahrung treten im Durchschnitt 1-2 Starkregenereignisse pro Jahr auf, die mit relevanten Stoffeinträgen in die Gewässer verbunden sind. Die absolute Höhe der gemittelten Starkregen im Gesamtgebiet schwankt zwischen 30,6 in Hildesheim und 48,4 mm/d in Braunlage. Die Starkniederschläge weisen mit einem  $R^2$  von 0,95 eine signifikante Höhenabhängigkeit auf (Abb. 45).



**Abb. 45: Regression der Höhenlage zum arithmetischen Mittel der 50 größten Niederschlagsereignisse aus 25 Jahren von ausgewählter Klimastationen in und um den Untersuchungsraum (Grunddaten: DEUTSCHER WETTERDIENST 1980-95)**

Nach Kriging-Interpolation und Rücktransformation auf die natürliche Geländehöhe entsteht für das Gesamtgebiet ein hochaufgelöstes Rastergitter der raumdifferenzierten Starkniederschlagsverteilung. Basierend auf mittleren realen Regenhöhen repräsentiert dieser Gebietsniederschlag ortstypische Starkniederschläge. Der Mittelwert des generierten Starkniederschlages über das Gebiet liegt bei 35 mm, je nach Höhenlage werden im Minimum 30 und maximal 53 mm erreicht.

Weil konvektive Starkregen nie die Ausdehnung großer Einzugsgebiete erreichen können, wurden die Teileinzugsgebiete der Fließgewässer voneinander entkoppelt. Die zelluläre Erscheinung eines Gewitterregens kann aufgrund dieses Postulates die Ausdehnung eines elementaren Fließgewäs-

sereinzugsgebietes erlangen, weitet sich aber nicht über seine Grenzen aus. Oberflächlich und im Gewässersystem abfließendes Niederschlagswasser kann demnach die separierten Grenzen der Teileinzugsgebiete nicht überschreiten. Dies ist aus zwei Gründen erforderlich:

- Der Direktabfluss im Graben- und Fließgewässersystem, der für die Abschätzung der Stoffretentionsfunktion im Gewässer bedeutend ist, kumuliert nur bis zum Auslass des Teileinzugsgebietes. So wird im Modell die Berechnung unrealistisch hoher Direktabflüsse für orographisch tiefergelegene Flussabschnitte verhindert.
- Für eine Wasserscheide (Bergrücken) ist die Ableitung des Anbindungsgrades genaugenommen nicht möglich. Der hydrologische Modellierungsalgorithmus betrachtet diesen Bereich als eine Grenzlinie mit undefinierter Fließrichtung und kann ihn daher keinem Hangeinzugsgebiet zuordnen.

### 6.6.2. Ermittlung der direkten Abflussmenge

Beim CN-Verfahren ist der Direktabfluss vom Niederschlag und dem zu bestimmenden **CN-Wert** abhängig (DVWK 1984).

$$N_d = f(N, CN) \quad \text{Gl. 9}$$

$N_d$  : abflusswirksamer Niederschlag [mm]

$N$  : Starkniederschlagshöhe [mm]

$CN$  : Curve Number [-], abhängig von Gebietskenngrößen;  $CN = f(\text{Bodenart, Bodennutzung, Vorregen, Jahreszeit})$

Im CN-Wert gehen wichtige Wirkungsprozesse der Abflussbildung auf. Er ist ein Maß für das maximale Speichervermögen  $S$  in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, der Bodennutzung und dem Vorregen. Der CN-Wert liegt tabellarisch vor und kann über die Zuordnung der Raumeinheiten zu Bodennutzung und Bodengruppe ermittelt werden.

Mithilfe der räumlichen Verschneidung der Flächen aus Boden- und Flächennutzungsinformation entstehen kleinste Geometrien, die für die CN-Wert Bestimmung als homogene Areale deklariert werden. Weder die Parzellierungsstruktur noch die Verbreitung der aktuellen Anbaukulturen liegt für das Gesamtgebiet vor. Da die CN-Werte nur für Einzelkulturen existieren, werden sie für die langfristige Modellierung des Anbindungsgrades entsprechend der Fruchtfolgeanteile im Gebiet gewichtet gemittelt (Tab. 17). Die Zuordnung zu den Bodengruppen geschieht als Einzelfallbeurteilung der vorkommenden Bodentypen aus Informationen der BÜK 50. Berücksichtigung finden die Bodenart, die Lagerungsdichte sowie die aus der KA 4 (AG BODEN 1994) abgeleitete gesättigte Wasserdurchlässigkeit (kf-Wert).

Da im Untersuchungsraum vornehmlich ländliche Siedlungen existieren, wird für die ATKIS-Nutzung „Wohnbebauung“ von einem Versiegelungsanteil von 30 % ausgegangen (W. LUTZ 1984) und der CN-Wert dem Flächenanteil gemäß auf 80-93 errechnet.

Aufgrund der Bedeutsamkeit des feuchteren Frühjahres für den Gewässereintrag erodierter Partikel, wurde die **Bodenfeuchteklasse** pauschal auf II gesetzt. Das entspricht einem Vorregen von 15-30 mm innerhalb der fünf vorangegangenen Tage (DVWK 1984).

Bodennutzung, Objektart aus ATKIS	CN-Wert			
	Bodengruppe			
	A	B	C	D
Ackerland	67	78	86	89
Getreide	64	76	84	88
Zuckerrübe , Hackfrucht	70	80	87	90
bewuchsfreie Fläche	77	86	91	94
Grünland	39	61	74	80
Wald Forst	36	60	73	79
Strom, Fluss, Bach	100	100	100	100
Gehölz	45	66	77	83
Heide	50	58	71	78
Moor	45	48	61	68
Binnensee, Stausee, Teich	1	1	1	1
Fläche gemischter Nutzung	59	74	82	86
Gartenland	50	58	71	78
Sonderkultur	55	60	73	79
Wohnbaufläche	80	87	91	93
Campingplatz	50	58	71	68
Grünanlage	50	58	71	78
Sportanlage	82	89	93	94
Fläche z.Zt. unbestimmbar	80	80	80	80
undurchlässige Fläche	100	100	100	100

- Gruppe A:** Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbefechtung, z. B. tiefgründige Sand- und Kiesböden;  
**Gruppe B:** Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tief- bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z. B. Sandböden, Löß, (schwach) lehmiger Sand;  
**Gruppe C:** Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, z. B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm;  
**Gruppe D:** Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel.

**Tab. 17: Verwendete CN-Werte in Abhängigkeit von Bodengruppe und ATKIS-Bodennutzung in der Bodenfeuchteklasse II**

Nachdem für alle homogene Flächen der CN-Wert parametrisiert ist, lässt sich der **Gebietsrückhalt** sowie der **Anfangsverlust** raumdifferenziert errechnen (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972).

$$S = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \cdot 25,4$$

dabei berechnet sich der Anfangsverlust des Niederschlages nach:

$$I_a = 0,03 \cdot S \quad \text{Gl. 11}$$

S : Gebietsrückhalt [mm]

CN : Curve Number [-]

$I_a$  : Anfangsverlust [mm]

In Abweichung von den ursprünglichen Werten für die USA, wird der Anfangsverlust von 0,2 auf  $0,03 \cdot S$  gesetzt (s. M. RODE 1995). Für Niederschläge von weniger als 50 mm Höhe kalkuliert das CN-Verfahren zu geringe Abflusswerte (W. LUTZ 1984, DVWK 1991). Der tatsächliche Abflussbeiwert wird in der Regel um 8 bis 14 CN-Werte unterschätzt, ein verringerter Anfangsverlust ergibt bessere Resultate (U. MANIAK 1992). Mit der getroffenen Einstellung nähern sich die ermittelten Anfangsverluste bodentypologisch vergleichbarer Ackerstandorte (2-4 mm) den Werten von W. LUTZ (1984) an.

Der **Direktabfluss** errechnet sich dann aus (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972):

$$Q_d = \frac{(N - I_a)^2}{N + S - I_a} \quad \text{Gl. 12}$$

$Q_d$  : Anfangsverlust [mm]

N : Starkniederschlag [mm]

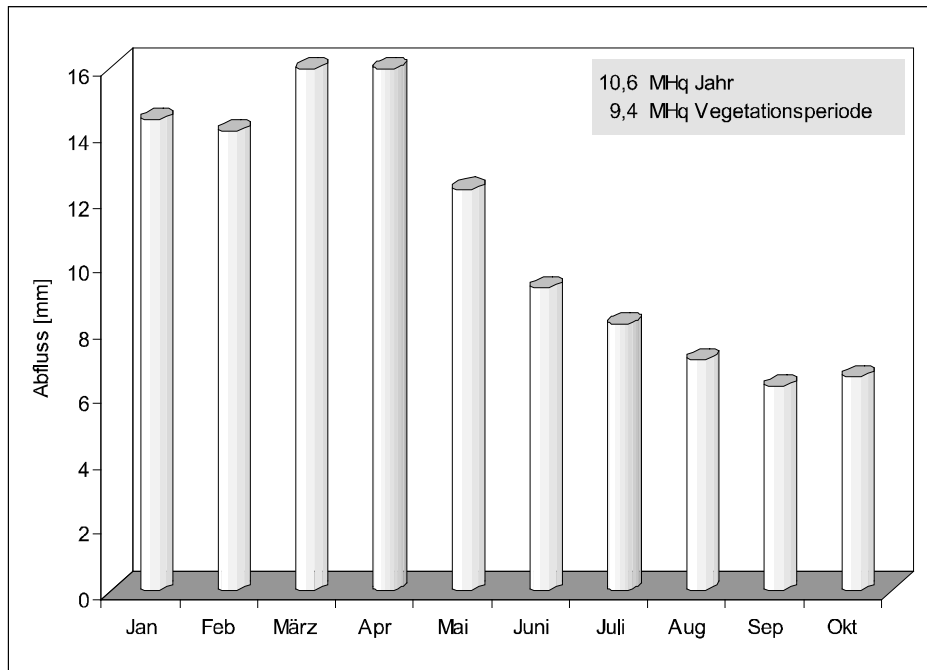
$I_a$  : Anfangsverlust [mm]

S : Gebietsrückhalt [mm]

Die **Berechnung des Direktabflusses** nach SOIL CONSERVATION SERVICE 1972 ergibt für die gebietstypische Fruchtfolgegestaltung im Mittel eine Abflussbildung von 9,6 mm. Zum Vergleich wird die mittlere monatliche Hochwasserdurchflussspende (MoMHq) herangezogen, die als mittlerer oberer Grenzwert der Gebietsabflüsse Ausdruck von primär direkt ablaufenden Niederschlägen ist. Die mittlere monatliche Hochwasserabflussspende (10,6 mm) dokumentiert die ausreichende Annäherung der Simulationsberechnungen an die hydrologischen Gebietseigenschaften (Abb. 46).

Im Jahresmittel liegt die Abflussspende am Pegel Östrum bei 10,6 mm. Für die hinsichtlich der Bodenerosion relevantere Vegetationsperiode vermindert sie sich auf 9,4 mm. Für Messungen am Pegel Derneburg steigt der Abfluss auf 12,5 mm an. Dies bestätigt, dass das CN-Verfahren den Abfluss tendenziell unterschätzt (U. MANIAK 1992).

Die Erhöhung des Abflusses in den Monaten April und Mai resultiert aus dem geringen Speicherungsvermögen der Landschaft in Verbindung mit einer verstärkten Starkniederschlagsneigung. Die Abflusszunahme lässt sich mit der Modellierung von Direktabflüssen bei unbedeckter Bodenoberfläche unter Ackernutzung nachvollziehen. Dabei liegt das Gebietsmittel um 11,9 mm. Insofern ist die verwendete Methode in Verbindung mit der Starkniederschlagsgenerierung und Modifizierungen des CN-Verfahrens geeignet, den Direktabfluss im mesoscale hinreichend genau zu modellieren.



**Abb. 46: Mittlere monatliche Abflusspende (MoMHq) am Pegel Östrum exemplarisch für Testgebiet Adenstedt (Grunddaten: STAWA Hildesheim)**

Bei geneigten Hängen verbleibt überschüssiges Oberflächenwasser nicht am Ort, sondern fließt in Richtung des größten Gefälles. Die Abflussrichtung berechnet sich nach dem D 8 Algorithmus als Himmelsrichtung jeder Rasterzelle zu ihrem tiefsten hangabwärts gelegenen Nachbarn (T. G. FREEMANN 1989, D. D. GREENLEE 1987). Um das Volumen der zusammenströmenden Wassermenge abzuschätzen, werden die auf jeder Rasterzelle gebildeten Abflussanteile mithilfe einer Kaskadierung nach Maßgabe der Abflussrichtung kumulativ aufaddiert (L.E. BAND 1993). Per Definitionem fließen auf Ackerflächen 100 % und auf Waldflächen 25 % des effektiven Niederschlages ab. Als Ergebnis liegt ein Raster vor, in dem jede Zelle den Wert des effektiven Abflusses korrespondierend zum entstehenden Direktabfluss und zur Hauptabflussrichtung trägt.

### 6.7. Abschätzung der Transportkapazität des Oberflächenabflusses

Der modellierte Direktabfluss aus Starkregen eignet sich, die potentielle Höhe der Stofftransportkapazität bei eintragsgefährdenden Niederschlagsreignissen diskret für jeden Rasterpunkt zu quantifizieren.

Der Berechnungsansatz zur Ableitung der Transportkapazität des Oberflächenabflusses beruht auf dem Konzept von J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995). Er beinhaltet physikalisch begründete Prozessbeschreibungen und ist als Teilmodell „Transport der Partikel“ im Bodenerosionsmodell EROSION-3D (E-3D) integriert.

Bei E-3D handelt es sich um ein komplexes, deterministisch numerisches Simulationsmodell, das die Erosion als Folge eines einzelnen Regenschauers berechnet. Anwendungen von E-3D sind in H. KRYSIAK (1995), V. WICKENKAMP (1995), M. V. WERNER (1995) dokumentiert. Da das Modell keine Option der Langzeitsimulation bietet, kann es in seiner Gesamtheit nicht als Baustein für die Ermittlung des Anbindungsgrades verwendet werden

Der **Vorteil** bei der Berechnung der Transportkapazität von E-3D im Vergleich zu anderen Erosionsmodellen besteht in der vergleichbar geringen Zahl an Eingangsdaten und in der Berücksichtigung der vertikalen Strömungskomponente des auftreffenden Niederschlages. Bei dünn-schichtigen Abflüssen (z. B. im Wasserscheidenbereich) sowie bei hoher Niederschlagsintensität ist die vertikale Strömungskomponente in starkem Maße von der zunehmenden Turbulenz durch die Einwirkung der Regentropfen mitbestimmt (J. SCHMIDT 1994). N. HAGEN & H.B. KLEEBOG (1993) beklagen, dass die bis dahin entwickelten Modellansätze für relativ tiefe, mäßig geneigte Gerinne konzipiert sind. Sie dürfen daher nicht a priori für den Flächenabfluss mit äußerst geringen Wassertiefen herangezogen werden. Die Integration von Effekten des aufschlagenden Niederschlages ist erforderlich. Denn bedeutende Übertrittsphänomene mit hohen Eintragungsmengen entstehen überwiegend bei extremen Niederschlagsintensitäten.

Die geringe Qualität der Basisdaten des Gesamtgebietes erfordert **Vereinfachungen bei den Inputdaten**.

- Der Starkniederschlag fällt mit konstanter Intensität innerhalb einer Stunde. Diese Zeitdauer führt zu plausiblen Niederschlagsintensitäten (s. SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 1996).
- Der Oberflächenabfluss läuft in einer Konzentrationszeit von 2 Tagen vollständig ab (C. RUHE 1996); modelliert wird zeitinvariant, summativ für einen Abflusszeitraum von 10 Sekunden.
- Die Transportkapazität wird nur für *einen* repräsentativen Hauptkorngrößendurchmesser berechnet.

Es folgt die Beschreibung der **Gleichungssysteme**, die im Modell zur Bestimmung der Gewässeranbindung implementiert sind. Sie bilden ein eigenes Teilmodul, das die Algorithmen über integrierte GIS-Funktionen und eigene Befehlsketten umsetzt.

Die Transportkapazität des Abflusses ergibt sich aus (J. SCHMIDT 1994):

$$q_s = c_{\max} \cdot \rho_p \cdot q \quad \text{Gl. 13}$$

$q_s$  : Feststoffmassenstrom [kg/(m·s)]

$\rho_p$  : Partikeldichte [kg/m<sup>3</sup>]

$q$  : Abflussrate [m<sup>3</sup>/s]

Die Eingangsgrößen der Transportkapazität ergeben sich aus (J. SCHMIDT 1994):

$$c_{\max} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi_q + \varphi_r}{\rho_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot v_p^2} \quad \text{Gl. 13}$$

- $c_{\max}$  : maximale Konzentration bei Transportkapazität  
 $\kappa$  : Depositionskoeffizient als Faktor [-] (empirisch = 1000)  
 $\varphi_q$  : Impulsstrom der Oberflächenströmung  
 $\varphi_r$  : Impulsstrom des aufprallenden Regens  
 $\rho_p$  : Partikeldichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\Delta x, \Delta y$  : Breite, Länge des betrachteten Hangsegmentes [m]  
 $v_p$  : Sinkgeschwindigkeit [m/s]

Der durch die Oberflächenströmung übertragene Impulsstrom ist definiert als:

$$\varphi_q = q \cdot \rho_q \cdot v_q \cdot \Delta y \quad \text{Gl. 14}$$

- $\varphi_q$  : Impulsstrom der Oberflächenströmung  
 $q$  : Abflussrate [m<sup>3</sup>/(m·s)]  
 $\rho_q$  : Flüssigkeitsdichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $v_q$  : mittlere Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses [m/s]  
 $\Delta y$  : Breite des betrachteten Hangsegmentes [m]

mit

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot \alpha^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 15}$$

und

$$\delta = \left[ \frac{q \cdot n}{\alpha^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}} \quad \text{Gl. 16}$$

- $n$  : Rauigkeitsbeiwert [s/m<sup>1/3</sup>]  
 $\alpha$  : Hangneigung [-]  
 $\delta$  : Schichtdicke des Abflusses [m]

Der durch den Tropfenaufprall übertragene Impulsstrom ist definiert als:

$$\varphi_r = r_a \cdot \Delta y \cdot \Delta x \cdot \rho_r \cdot v_r \cdot \sin \alpha (1 - C_L) \quad \text{Gl. 17}$$

- $\varphi_r$  : Impulsstrom des Niederschlags  
 $r_a$  : Niederschlagsintensität bezogen auf die Hangneigung [m/s]  
 $\rho_r$  : Flüssigkeitsdichte des Niederschlags [kg/m<sup>3</sup>]  
 $v_r$  : mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen [m/s]  
 $\alpha$  : Hangneigung [-]  
 $C_L$  : Bodenbedeckungsgrad [-]  
 mit  $r_a = r \cdot \cos \alpha$   
 $r$  : Niederschlagsintensität [m/s]

Gl. 18

und mit der Abschätzung von LAWS & PARSONS 1943 (zit. n. SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 1996).

$$v_r = 4,5 \cdot r^{0,12} \quad \text{Gl. 19}$$

$r$  : Niederschlagsintensität [mm/h]

Die Sinkgeschwindigkeit wird nach Stokes berechnet:

$$v_p = \frac{1}{18} \cdot \frac{D^2 \cdot (\rho_p - \rho_q) \cdot g}{\eta} \quad \text{Gl. 20}$$

$v_p$  : Sinkgeschwindigkeit [m/s]

$D$  : Korndurchmesser [m]

$\rho_p$  : Partikeldichte [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_q$  : Flüssigkeitsdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  : Erdbeschleunigung [m<sup>2</sup>/s]

$\eta$  : Viskosität der Flüssigkeit [kg/(m·s)]

Bodennutzung (Objektart aus ATKIS)	Rauigkeit [s/m <sup>3</sup> ]
Ackerland	0.03
Getreide	0.032
Zuckerrübe	0.017
ohne Bodenbedeckung	0.015
Grünland	0.032
Wald, Forst	0.9
Gehölz	0.9
Heide	0.3
Moor	0.9
Sonderkultur	0.16
Fläche z.Zt. unbestimmbar	0.5
Wohnbaufläche	0.9
Sportanlage	0.24
Gartenland	0.4
Grünanlage	0.24
Campingplatz	0.24
Strom, Fluss, Bach	1E-10
Binnensee, Stausee, Teich	1E-10

**Tab. 18: Für die Flächennutzungen aus ATKIS verwendete Rauigkeiten nach MANNING (Grunddaten: SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 1996)**

Die Bodenrauigkeit entstammt dem Handbuch zu EROSION-3D (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 1996) (Tab. 18). Das gewogene Mittel der Rauigkeitswerte gemäß den Flächenanteilen der Kulturen bildet für Ackerstandorte die Grundlage. Eine weitere Simulationen ordnet den zufällig über das Gebiet verbreiteten Einzelkulturen spezifische Rauigkeitswerte zu (s. Kap. 8.1).



Der Hauptkorngrößendurchmesser lässt sich für jede Bodeneinheit aus der Bodenart der BÜK 50 als Modalwert der Korngrößenverteilung abschätzen. Die Menge des Oberflächenabflusses ergibt sich aus der räumlichen Verteilung des mit dem CN-Verfahren ermittelten kumulierten Abflussvolumens in 10 s Auflösung.

## 6.8. Stoffretentionspotential von Gräben

Die modellgestützte Ermittlung des Feststoffaustrages aus ganzen Flusseinzugsgebieten in Abhängigkeit von Klimadaten und Gebietseigenschaften ist bis heute nicht möglich (W. WALTHER 1995). Das empirische Schätzverfahren „Stoffretentionspotential von Gräben“ hat die **Aufgabe**, den Rückhalt von eingetragenen Feststoffen in zeitweise wasserführende Gräben abzuschätzen. Das Modell zur Ermittlung der Gewässeranbindung unterscheidet auf diesem Weg zwischen fließgewässernahe- und -fernen Stoffeinträgen. Dahinter steht die Annahme, dass fließgewässernahe Einträge das Fließgewässer selbst und zusätzlich fernere Ökosysteme (Seen, Meere) stärker mit Stoffe belasten können. In das Grabensystem eingetragene Partikel sedimentieren demgegenüber in den künstlichen Gräben und verbleiben teilweise auch dort.

Im ersten Schritt des Verfahrens erfolgt zunächst die **Selektion von Gräben** mit geringer Stofftransportfunktion. Durch Multiplikation mit einem **Reduktionsfaktor** wird der ursprüngliche Anbindungsgrad ihrer Einzugsgebiete vermindert. Da die Menge des sedimentierten Materials mit der Größe des Flusseinzugsgebietes steigt (I. ICHIM 1990), hängt die Höhe des Faktors von der Entfernung des betrachteten Grabenabschnitts vom nächsten permanenten Fließgewässer (Transportstrecke im Grabensystem) ab. Die folgenden aus Beobachtungen resultierenden Kriterien identifizieren im Modell Gräben mit geringer Transportfunktion für Feststoffe:

- Gefälle < 0,8 ‰
- Durchflussmenge aus Direktabfluss 0 - 7500 m<sup>3</sup>/2d
- Fließgeschwindigkeit 0 - 3,0 m/s
- Scheitelabfluss 0,1 m<sup>3</sup>/s
- Wasserführung periodisch oder episodisch

Für die selektierten Gewässer wird die Entfernung vom nächsten permanenten Fließgewässer innerhalb des Gewässernetzes berechnet. Mit zunehmender Fließlänge bzw. Distanz steigt die Möglichkeit der Sedimentation in den zeitweise wasserführenden Gräben an. Der Effekt wird simuliert, indem der Anbindungsgrad (A) ausgedrückt in Prozent eine **Verminderung** ( $F_{red}$ ) **pro** Längeneinheit der **Transportstrecke im Grabensystem** ( $S_{fl}$ ) erfährt. Der Reduktionsfaktor ( $F_{red}$ ) kommt im Wassereinzugsgebiet des jeweiligen Grabenabschnittes zum Einsatz:

$$A_{red} = A + F_{red}$$

wobei:

$$F_{\text{red}} = S_{\text{fl}} \cdot -0,01$$

Gl. 22

$A_{\text{red}}$  : reduzierter Anbindungsgrad (inkl. Berücksichtigung des Stoffretentionspotential von Gräben)

$A$  : Anbindungsgrad

$F_{\text{red}}$  : Reduktionsfaktor

$S_{\text{fl}}$  : Transportstrecke im Grabensystem

Um die Grenzscharfe zwischen den Gewässereinzugsgebieten, die die Selektionskriterien erfüllen, und den umliegenden Flächen abzumildern, wurden die Werte der Aussengrenzen mit den Nachbarzellen (Filter 5x5 Zellen) gemittelt. So wird ein gleichmäßigerer Übergang zum Umfeld erreicht und damit ein natürlicherer Grenzverlauf simuliert. Eine absolut scharf verlaufende Grenzlinie würde suggerieren, dass ein Zustrom von Stoffen aus Flächen jenseits dieser Grenze unmöglich ist. Dies ist jedoch nicht mit Gewissheit auszuschließen

Die **Eingangsgrößen** für das Selektionsverfahren berechnen sich folgendermaßen.

- Das **Gefälle** errechnet sich als mittlere Höhendifferenz über den betreffenden Gewässerabschnitt.
- Die **Direktdurchflussmenge** ergibt sich aus dem im CN-Verfahren bestimmten Direktabfluss, der kumulativ im Graben- und Gewässersystem abläuft.
- Die mittlere **Fließgeschwindigkeit** wird allgemein errechnet nach (DVWK 1988):

$$v_m = k_{\text{St}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Gl. 23

$v_m$  : mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

$k_{\text{St}}$  : Manning-Strickler-Beiwert [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ]

$R$  : hydraulischer Radius [m]

$I$  : Gefälle[-]

Der **hydraulische Radius** ( $R$ ) kann aus der Wassertiefe  $h$  nach H. BRETSCHNEIDER U. A. (1993) für Rechteckgerinne kalkuliert werden:

$$h = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}}$$

Gl. 24

$h$  : Wasserstand [m]

$Q$  : Durchflussmenge [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$b$  : Gerinnebreite [m]

$g$  : Erdbeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

Aus Daten von Befragung und Grabenstrukturkartierung lassen sich für die verschiedenen Grabentypen die **Rauhigkeits-** und **Gerinneparameter** nach DVWK (1990) definieren (Tab. 19).

Gewässertyp	Profilform	$k_{st}$	R	A	U
Fließgewässer	Kasten	40	0.33	0.9	2.7
Gewässer/Graben mit ständiger Wasserführung	Kasten	35.5	0.22	0.4	1.8
Graben mit Wasserführung nach Starkregen	Trapez	33.5	0.44	0.59	1.35
Graben mit Wasserführung im Frühjahr	Trapez	31	0.47	0.56	1.21
Graben ohne Wasserführung	Trapez	28.5	0.51	0.54	1.07
Verrohrung	Kreis	83	0.55	0.36	0.64

$k_{st}$ : Manning-Strickler-Beiwert, R: hydraulischer Radius, A: Durchflussfläche, U: benetzter Umfang

**Tab. 19: Rauigkeitsparameter für verschiedene Grabentypen. Abgeleitet nach DVWK (1990), Daten der Landwirtebefragung und Gewässerkartierung für die Gewässertypen; (Angaben für mittlere Verhältnisse)**

- Der **Scheitelabfluss** ist abhängig von Einzugsgebietsform und -größe. Die Modellalgorithmen CREAMS und AGNPS enthalten folgende Formel (R.E. SMITH & J.R. WILLIAMS 1980):

$$Q_{\max} = 3,79 \cdot A_{EO}^{0,7} \cdot J^{0,16} \cdot \left( \frac{Q_D}{25,4} \right)^{(0,903 \cdot A_{EO}^{0,017})} \cdot \left( \frac{L^2}{A_{EO}} \right)^{-0,19}$$

$Q_{\max}$  : Scheitelabfluss [m<sup>3</sup>/s]

$A_{EO}$  : Einzugsgebietsfläche [km<sup>2</sup>]

I : Vorflutergefälle [%]

$Q_D$  : Direktabfluss [mm]

L : Längster Fließweg der in Zelle entwässert [km]

- Die **Wasserführung** der Gräben ergibt sich aus verifizierten Resultaten der Landwirtebefragung für alle Gräben im Gesamtgebiet.

Versuche den Feststofftransport mit einem hydrologischen Transportmodell von C.T. YANG zu berechnen (DVWK 1988), ergaben keine befriedigenden Resultate. Der häufig verwendete empirische Ansatz der sediment delivery ratio (Sedimentlieferungsgrad) zur Abschätzung der Feststoffeintragsmenge (K. AUERSWALD 1989, Hamm 1991) eignet sich nicht für die Anbindungsmodellierung. Die Beobachtung, dass mit zunehmender Größe des Flusseinzugsgebietes die Stofflieferungsraten abnehmen, d. h. die Wahrscheinlichkeit der Zwischenablagerung steigt, resultiert aus Messungen in permanenten Fließgewässern. Der Feststoffeintrag in künstliche Gräben lässt sich mit dem Verfahren nicht ermitteln. Diese Einträge führen aber ebenfalls zu offsite Schäden und sind daher zu berücksichtigen.

## 6.9. Klassifikationsverfahren zur Ermittlung des Gewässeranbindungsgrades

**Ziel** des Klassifikationsverfahrens ist einerseits, die berechneten Einzelgrößen zu verknüpfen, und andererseits, eine Ergebnisgröße abzuleiten, die für Flussgebiete im mittleren Maßstab einen effektiven Überblick über den Anbindungsgrad von erosionsgefährdeten Agrarflächen an die Fließgewässer ermöglicht. Die Ergebnisgröße soll den Anbindungsgrad in Form einer Wahrscheinlichkeits-

aussage ausdrücken. Sie bildet weiterhin die Grundlage für Modifikationen auf Flächenbereichen mit speziellen Eigenschaften (potentielle Akkumulationszonen, abgekoppelte Areale, Grünlandflächen).

Ausgehend von der Forderung, alle anbindungsrelevanten Parameter zu respektieren, sind zehn Größen miteinander mathematisch in Verbindung zu setzen. Unter den Größen gibt es einige prozessintegrative Summenparameter (z. B. Bodenabtrag), die auf weiteren Einflussparametern aufbauen. Ferner können die Wertebereiche einzelner Parameter einige Zehnerpotenzen auseinander liegen (z. B. Abtrag, Gewässerdistanz). Dies führt in der Gesamtheit zu einer recht großen Unübersichtlichkeit. Ein Verknüpfungsalgorithmus lässt sich demnach nicht auf empirischem Wege herleiten. Diese Art der Ableitung enthält im übrigen immer eine gewisse Willkürlichkeit. Daher wird der Verknüpfungsalgorithmus über eine standardisierte Methode ermittelt, die basierend auf statistischen Gesetzmäßigkeiten ein fundiertes Ergebnis errechnet.

### 6.9.1. Verknüpfung der Einzelparameter

Der **Verknüpfungsalgorithmus** der Einzelparameter basiert auf statistischen Berechnungen innerhalb der logistischen Regressionsanalyse (Kap. 0). Das Ergebnis ist eine prozentuale Wahrscheinlichkeitsangabe zur Anbindung von erosionsgefährdeten Ackerflächen an Gewässer. Hohe Werte des Anbindungsgrades bedeuten für die Rasterzelle eine große Wahrscheinlichkeit, dass erosionsbürtige Stoffe in einen Graben oder ein Fließgewässer übertreten. Eine niedrige Anbindungswahrscheinlichkeit steht für die reduzierte Stofflieferfunktion des betreffenden Raumsegmentes. Das Verfahren prüft, in welcher Weise die Anbindungsparameter zueinander in Relation gesetzt werden müssen, um aus der Parameterkombination die realen Liefergebiete zu modellieren. Das Fitting des Regressionsmodells vollzieht sich mit dem Ziel, möglichst viele reale Lieferareale korrekt zu prognostizieren. D. h. die Ableitung des Verknüpfungsalgorithmus der Parameter erfolgt optimiert auf Basis eines statistisch abgesicherten Berechnungsverfahrens.

Die Vorteile der Ableitung des Verknüpfungsalgorithmus auf Grundlage der logistischen Regressionsanalyse sind:

- Möglichkeit einer kontinuierlichen (zellenbezogenen) Raumaussage zum Anbindungsgrad
- Möglichkeit der Unterscheidung verschiedener Raumbereiche (Rasterzellen) hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Stofflieferung (Relation der Lieferrelevanz)
- Berücksichtigung lokaler Wechselwirkungen zwischen den Anbindungsparametern
- Algorithmus ableitbar auf Grunddaten aus der tatsächlichen Geländebeobachtung (reale Lieferflächen)
- Berechnungsergebnis auf Grundlage statistischer Gesetzmäßigkeiten  $\Rightarrow$  hohe Objektivität

Zudem besteht die Möglichkeit, bei Modellerweiterungen weitere Parameter zu integrieren, ohne dass die Gesamtkonzeption verändert werden muss. So ließe sich im unteren erweiterten meso-scale (0,1 – 1 km<sup>2</sup>; s. A. BECKER 1992) beispielsweise der Parameter Bearbeitungsrichtung in die Berechnung der Anbindungswahrscheinlichkeit integrieren.

Die statistische Analyserechnung ergibt die nachfolgenden Formeln, die in den Modellläufen zur Bestimmung des Anbindungsgrades an Gewässer verwendet werden:

$$p_A = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{Gl. 25}$$

mit

$$z = G_D \cdot -0,0032 + S_D \cdot 0,0012 + Q_d \cdot 0,000021 + E \cdot 0,1125 + A_{EO} \cdot -0,0001 + H_L \cdot 0,0037 + H_N \cdot -0,1084 + T \cdot -0,000062 + H_F \cdot 0,0886 + 0,1 \quad \text{Gl. 26}$$

$p_A$  : Anbindungsgrad, Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages in Gewässer [%]

$G_D$  : Gewässerdistanz [m]

$S_D$  : Stofftransportpfaddistanz [m]

$Q_d$  : Direktabflussvolumen [mm]

$E$  : Erosion, flächenhaft [t/ha · a]

$A_{EO}$  : Hangeinzugsgebietsgröße [m<sup>2</sup>]

$H_L$  : Hanglänge [m]

$H_N$  : Hangneigung [m]

$T$  : Transportkapazität [kg/s · m]

$H_F$  : Hangform [-]

Die Werte der Koeffizienten und der Konstante bilden das Ergebnis der logistischen Regressionsanalyse. Ein negativer Koeffizient steht grundsätzlich für eine Verringerung der Anbindungswahrscheinlichkeit durch den Parameter. Ein großer Koeffizientwert repräsentiert einen starken Einfluss auf den Anbindungsgrad. Bei der Interpretation der Koeffizienten innerhalb der Parameterreihe sind allerdings die oben erwähnten starken absoluten Werteunterschiede der verschiedenen Einzelparаметer zu berücksichtigen.

Entsprechend den statistischen Grundlagen des Regressionsmodells sind Rasterzellen als „angebundenes Areal“ definiert, wenn die kalkulierte Wahrscheinlichkeit gleich oder größer als 50 % ist. Solche Areale liefern aufgrund ihrer Struktur überdurchschnittlich häufig Stoffe an die Gewässer. Sie sind für den überwiegenden Anteil der stofflichen Gewässerbelastung verantwortlich. Die Flächenbereiche lassen sich über dieses Verfahren aber grundsätzlich viel weitgehender hinsichtlich ihrer Relevanz für die Stofflieferung differenzieren. Diskret für jede Rasterzelle wird in Abhängigkeit der Parameterausprägungen und ihrer Kombination die Bedeutung der Einzelzelle für den Stoffeintrag in Form der Wahrscheinlichkeitsaussage berechnet.

Wahrscheinlichkeitswerte unter 50 % Eintragswahrscheinlichkeit gelten aus statistischen Gründen definitionsgemäß als nicht angebunden. Dies bedeutet allerdings nicht, dass diese Flächen in keinem Fall Stoffe an die Gewässer liefern können. Der prognostizierte Stoffeintrag aus solchen Gebieten kommt lediglich seltener vor als im Durchschnitt. Für stoffliche Belastungen in den Gräben und Fließgewässern haben sie nur eine untergeordnete Bedeutung. Mit sinkendem Wahrscheinlichkeitswert verringern sich auch prognostizierte Stofflieferungen.

## 6.9.2. Identifikation abgekoppelter Areale und potentieller Akkumulationszonen

### Abgekoppelte Areale

Ein Grenzwertverfahren dient der **Identifikation von offensichtlich abgekoppelten Flächenbereichen**. Innerhalb der realen Liefergebiete kommen bestimmte Extremwerte der Parameter nicht vor. Rasterzellen, die Parameterwerte jenseits dieser Extrema aufweisen, können nicht zum Gewässereintrag beitragen und gelten daher als definitiv abgekoppelt.

Minima bzw. Maxima der Anbindungsparameter werden für die Lieferareale aus Kartierung und Befragung berechnet. Rasterzellen mit Werten jenseits der Extrema gehören in keinem erfassten Fall zu einem realen Liefergebiet und sind daher in der Simulation ebenfalls als „nicht angebunden“ definiert. Durch die Extremwertbetrachtung im großen Maßstabsbereich ist die Identifikation von abgekoppelten Arealen im Gesamtgebiet möglich. Liegen im Gesamtgebiet Rasterzellen außerhalb des als „angebunden“ definierten Parameterintervalls, werden diese Zellen vom Modell als abgekoppelt ausgewiesen und mit der Wahrscheinlichkeit des Bodeneintrags von 0 belegt.

Nachfolgende **Grenzwerte** resultieren aus der Geländebeobachtung und gelten als Kriterien für die Ausweisung von Gebieten ohne Stofflieferfunktion („definitiv abgekoppelte Areale“):

- Flächennutzung weder Acker noch Grünland
- Direktabfluss < 4 mm
- Hangform stark konvex (> 1,1)
- flächenhafter Bodenabtrag < 0,023 t/ha·a
- Gewässerdistanz > 1250 m
- Stofftransportpfaddistanz > 850 m.

Die genannten Ausschlusskriterien haben für die landschaftsökologischen Rahmenbedingungen des Untersuchungsraumes Gültigkeit. Dabei sind die von regionalen Einflüssen geprägte Gebietsbeschaffenheit (z.B. Klima, Boden, Relief) sowie die speziellen Raumstrukturbedingungen (Anordnung von Gewässer- und Verkehrsnetz, Parzellierung etc.) für den Stoffeintrag von Bedeutung. Bei der Übertragung der Grenzwerte auf andere Regionen ist dies zu berücksichtigen.

### Potentielle Akkumulationszonen

Gebiete mit bestimmten **Reliefbedingungen** hinsichtlich Hanglänge, -neigung und -form tragen seltener zum Feststoffeintrag ins Gewässer bei (Kap. 5.2). Sie besitzen daher im Vergleich zu anderen Flächen mit sonst gleicher Parameterausstattung einen geringeren Anbindungsgrad. Das Modell berücksichtigt dieses Phänomen durch die Ausweisung von „potentiellen Akkumulationszonen“.

Am Hangfuß im Bereich der Fließgewässer existieren häufig breitere Auenbereiche mit geringer Erosionsgefährdung und Hangneigung, an denen erodierte Feinerde aus dem Hangeinzugsgebiet sedimentieren kann. Sie weisen ein geringes Eintragspotential auf und sind vom Anbindungsgrad daher geringer einzustufen als andere gewässernahe Standorte. Ähnliche Akkumulationsbedingungen können sich bei Verflachungen am Hang ergeben. Aus diesen Gründen wird für solche potentielle Akkumulationszonen grundsätzlich eine Verringerung der Anbindungswahrscheinlichkeit um 25 % vorgenommen. Eine „**potentielle Akkumulationszone**“ ist **definiert durch** drei logische UND-Konditionen der folgenden Größen, die über ODER-Bedingungen verknüpft sind:

- Hangneigung  $< 1 \%$   $\cap$  Hanglänge  $< 100$  m
- Hangneigung  $< 2 \%$   $\cap$  Hanglänge  $< 200$  m  $\cap$  stark konvexe Hangform ( $> -0,4$ )
- Hangneigung  $< 3 \%$   $\cap$  Hanglänge  $< 100$  m  $\cap$  stark konvexe Hangform ( $> -0,4$ )

Z. T. treten die ausgewiesenen Akkumulationsbereiche lokal eng begrenzt in Hängen auf. Hier bilden sie die erhöhte Möglichkeit der Zwischenakkumulation im Hangeinzugsgebiet ab. Die Prognosegenauigkeit des Modells konnte durch die Implementierung des Bausteins „potentielle Akkumulationszonen“ um einige Prozentpunkte verbessert werden.

### 6.9.3. Kalibrierung des Modells

Die Kalibrierung des Modells erfolgt nach zwei **Kriterien**:

- Zum einen findet ein Vergleich zwischen den Rasterzellen der realen Lieferflächen und denjenigen der prognostizierten angebotenen Flächen statt. Darüber lässt sich die **Treffergenauigkeit** der Modellsimulation innerhalb der Testgebiete ableiten. Die Treffergenauigkeit ausgedrückt in Prozent bildet die Basis zur Beurteilung der Modellgüte. Dabei wird die Erfolgsquote der korrekten Prognose von angebotenen und nicht angebotenen Arealen beurteilt. Über Variation des Verknüpfungsalgorithmus lässt sich die Treffergenauigkeit und damit die Modellierungsqualität optimieren.
- Zum anderen wird der simulierte Anbindungsgrad in Testgebieten und im Gesamtgebiet einer **Plausibilitätsprüfung** unterzogen. Dies gibt Aufschluss über Raumbereiche mit zu hohem bzw. zu niedrigem modelliertem Anbindungsgrad und ermöglicht eine Anpassung des Verknüpfungsalgorithmus. Ein wichtiges Qualitätskriterium der Modellierung bildet hier der Gesamtflächenanteil der generierten Lieferflächen.

Die 1100 in den Testgebieten erfassten Lieferflächen dienen, in diskretisierter Form als Rasterzellen, dem Vergleich mit dem Modellergebnis. Der eigentliche Kalibrierungsvorgang vollzieht sich im Verknüpfungsalgorithmus über die Veränderung einzelner oder mehrerer Koeffizienten der Anbindungsparameter sowie der Konstante.

Als Grenze zwischen „Fläche ist angebunden bzw. ist nicht angebunden“ wird vereinfachend die Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrags von 50 % verwendet (Kap. 6.9.1).

#### 6.9.4. Qualität der Modellaussage

Tab. 20 dokumentiert die Ergebnisse des Kalibrierungsvorganges anhand einiger Modelleinstellungen. Die **Extremvarianten** 1 und 2 unter- bzw. überschätzen den angebundenen Flächenanteil weit. Mit den Simulationseinstellungen von Variante 1 generiert das Modell insgesamt die meisten Flächen korrekt als angebunden/nicht angebunden (74 % Trefferquote). Dabei wird nur ein sehr geringer Teil als angebunden identifiziert. Der weitaus überwiegende Teil des guten Gesamtergebnisses resultiert aus der richtigen Prognose der unbedeutenden *nicht* angebundenen Areale. Bei der Extremvariante 2 liegen die Verhältnisse genau umgekehrt. Die Trefferquote liegt sehr viel niedriger; 43 % der angebundenen Areale werden korrekt prognostiziert. Davon entfällt jeweils die Hälfte auf die angebundenen bzw. nicht angebundenen Bereiche. Problematisch ist die aus den Modelleinstellungen resultierende starke Überschätzung des angebundenen Flächenanteils. D. h. durch die Ausdehnung der prognostizierten angebundenen Areale steigt der Anteil der Rasterzellen, die räumlich richtig als angebunden abgebildet werden. Über weitere Variationen gelangt man zu einer optimierten Einstellung der Modellvarianten.

Der Verknüpfungsalgorithmus für die „**Grundeinstellung des Modells**“ wird so kalibriert, das 14 % der Liefergebiete korrekt prognostiziert werden. Zusammen mit der richtigen Vorhersage nicht angebundener Areale erreicht das Modell insgesamt in 62 % der Rasterzellen richtige Ergebnisse. Die höhere Trefferquote dieser Simulation bei den prognostizierten Lieferflächen resultiert aus der Ausdehnung der angebundenen Raumbereiche auf Kosten von nicht angebundenen Arealen. Im gesamten Modellgebiet vollzieht sich quasi eine Grenzverschiebung aller prognostizierten Liefergebiete nach aussen (vgl. Balloneffekt). Dies führt zu einer Überschätzung des simulierten Lieferflächenanteils von 37 % der Ackerfläche (real 24 %).



<b>Extremvariante 1</b>						
mit unterschätztem Gebietsanteil an angebundenen Flächen (6,8%)						
	Bezugsbasis: Agrarfläche		Lieferflächen um P=10% gebuffert		Bezugsbasis: Gesamtfläche	
richtigerweise erkannt als	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
nicht angebunden	110676	71.0	114528	73.4	175645	79.5
angebunden	5014	3.2	10279	6.6	5014	2.3
<b>Trefferquote</b>		<b>74.2</b>		<b>80.0</b>		<b>81.8</b>
fälschlicherweise erkannt als						
nicht angebunden	33630	21.6	29090	18.7	33630	15.2
angebunden	6657	4.3	3015	1.9	6657	3.0
<b>Fehlerquote</b>		<b>25.8</b>		<b>20.6</b>		<b>18.2</b>
<b>Extremvariante 2</b>						
mit überschätztem Gebietsanteil an angebundenen Flächen (69)						
	Bezugsbasis: Agrarfläche		Lieferflächen um P=10% gebuffert		Bezugsbasis: Gesamtfläche	
richtigerweise erkannt als	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
nicht angebunden	33491	21.5	61383	39.4	98460	44.6
angebunden	34706	22.3	36903	23.7	34706	15.7
<b>Trefferquote</b>		<b>43.7</b>		<b>63.0</b>		<b>60.3</b>
fälschlicherweise erkannt als						
nicht angebunden	3938	2.5	1862	1.2	3938	1.8
angebunden	83842	53.8	59367	38.1	83842	37.9
<b>Fehlerquote</b>		<b>56.3</b>		<b>39.3</b>		<b>39.7</b>
<b>Modellvariante Grundeinstellung</b>						
mit leicht überschätztem Gebietsanteil an angebundenen Flächen (37%)						
	Bezugsbasis: Agrarfläche		Lieferflächen um P=10% gebuffert		Bezugsbasis: Gesamtfläche	
richtigerweise erkannt als	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
nicht angebunden	74697	47.9	103033	66.1	139666	63.2
angebunden	21774	14.0	32242	20.7	21774	9.9
<b>Trefferquote</b>		<b>61.8</b>		<b>86.7</b>		<b>73.1</b>
fälschlicherweise erkannt als						
nicht angebunden	16870	10.8	7092	4.5	16870	7.6
angebunden	42636	27.3	15637	10.0	42636	19.3
<b>Fehlerquote</b>		<b>38.2</b>		<b>14.6</b>		<b>26.9</b>
<b>Modellvariante inklusive abgekoppelter Areale und pot. Akkumulationszonen</b>						
mit realistischem Gebietsanteil an angebundenen Flächen (28%)						
	Bezugsbasis: Agrarfläche		Lieferflächen um P=10% gebuffert		Bezugsbasis: Gesamtfläche	
richtigerweise erkannt als	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
nicht angebunden	86496	55.5	106709	68.4	151465	68.6
angebunden	17798	11.4	27583	17.7	17798	8.1
<b>Trefferquote</b>		<b>66.9</b>		<b>86.1</b>		<b>76.6</b>
fälschlicherweise erkannt als						
nicht angebunden	20846	13.4	11061	7.1	20846	9.4
angebunden	30837	19.8	10624	6.8	30837	14.0
<b>Fehlerquote</b>		<b>33.1</b>		<b>13.9</b>		<b>23.4</b>

**Tab. 20: Prognosequalität des Anbindungsmodells: Absolut- und Prozentangabe von Treffer- und Fehlerquote**

Die Angaben resultieren aus dem zellenbezogenen Vergleich von realen und simulierten angebundenen bzw. nicht angebundenen Gebieten (Grenzwert: 50 % Wahrscheinlichkeit)

Die Extremvarianten dokumentieren exemplarisch den Kalibrierungsvorgang

Durch Integration der Verfahren zur Identifikation von abgekoppelten Arealen und potentiellen Akkumulationszonen in den Modellalgorithmus überschätzt das Simulationsmodell die angebundene Fläche weniger stark. Denn beide Verfahren führen grundsätzlich zu einer Verminderung des Anbindungsgrades. Die Ergebnisse sind in Tab. 20 unter „Modellvariante inklusive abgekoppelter Areale und pot. Akkumulationszonen“ zusammengefasst. Die Einführung von **abgekoppelten Raumausschnitten** bringt eine Modellverbesserung um 0,5 %-Punkte. Die Berücksichtigung von **potentiellen Akkumulationsbereichen** steigert die Qualität der Modellprognose um weitere 4,6 %-Punkte. Damit lässt sich die Modellpräzision auf insgesamt knapp 67 % steigern. Die als angebundene deklarierte Flächengröße (28 %) nähert sich damit an die tatsächliche Flächenausdehnung der realen Lieferareale an. Durch diese Modelleinstellungen wird ein Kompromiss zwischen der Richtigkeit der simulierten angebundene Gesamtfläche (Flächengenauigkeit) und dem Anteil räumlich korrekt wiedergegebener Liefergebiete geschlossen (Lagegenauigkeit).

Um die Modellqualität abschließend zu beurteilen, sollte man sich den folgenden Sachverhalt vor Augen führen: Eine reale Lieferfläche ist durchschnittlich ca. 0,004 km<sup>2</sup> groß. Die Größe der gesamten Ackerfläche im Gebiet beträgt 185 km<sup>2</sup>. Eine zu modellierende Lieferfläche hat also eine Größe von ca. 1/40 000stel der für Gewässereinträge potentiell verfügbaren Gesamtfläche. Dies verdeutlicht die Problematik der lage- und flächengenauen Bestimmung des Anbindungsgrades.

Diesem Sachverhalt wird durch die „Bufferung“ der Lieferareale Rechnung getragen. Man betrachtet die Wahrscheinlichkeit von 50 % dazu nicht als fixe Grenze zwischen angebunden/nicht angebunden, sondern gewährt einen Übergangsbereich von 10 % Wahrscheinlichkeit, in dem die Modellprognose definitionsgemäß als richtig gewertet wird. Folglich werden Gebiete nun ab 40 % als angebunden deklariert. Damit steigt die Berechnungsgüte des Modells auf 18 % richtige Vorhersagen.

### **Kalibrierung des Modells für andere Gebiete**

Der Kalibrierungsvorgang gestaltet sich aufgrund des simplen Klassifikationsansatzes im **Modell** als sehr einfach. Dies ist ein Vorteil für den Modelleinsatz in anderen Gebieten. So lassen sich je nach Gebietscharakteristik bestimmte Parameter besonders gewichten, indem man ihre Koeffizienten verändert. Sofern in einer Region beispielsweise dem Abtrag gegenüber der Transportpfaddistanz eine größere Bedeutung zukommt als im vorliegenden Untersuchungsraum, kann der Abtragskoeffizient leicht erhöht werden. Zudem lässt sich je nach Zielsetzung der Modellprognose durch eine Veränderung der Regressionskonstante (Verschiebung) der simulierte angebundene Flächenanteil problemlos reduzieren oder erweitern (Kap. 7.2). Sind z. B. für geplante Schutzmaßnahmen nur Flächenbereiche mit extrem hohem Anbindungsgrad relevant, lassen sich diese durch Verschiebung der Konstante (z. B.  $-0,1$ ) leicht ermitteln.

## 7. MODELLBASIERTE BESTIMMUNG DER ANBINDUNG VON ACKERFLÄCHEN AN FLIESSGEWÄSSER FÜR DAS INNERSTEGEBIET

### 7.1. Raumverteilungsmuster wichtiger Einzelgrößen

Auf die kartographische Darstellung der aus der Reliefanalyse errechneten Anbindungsparameter (Gewässerdistanz, Transportpfaddistanz, Transportstrecke im Grabensystem, Einzugsgebietsgröße, Hangneigung, -länge, und -form) wird verzichtet. Die Darstellung ihrer Raumverteilungsmuster ist für das Verständnis des Modellergebnisses „Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer“ nicht notwendig.

#### 7.1.1. Bodenerosionsgefährdung

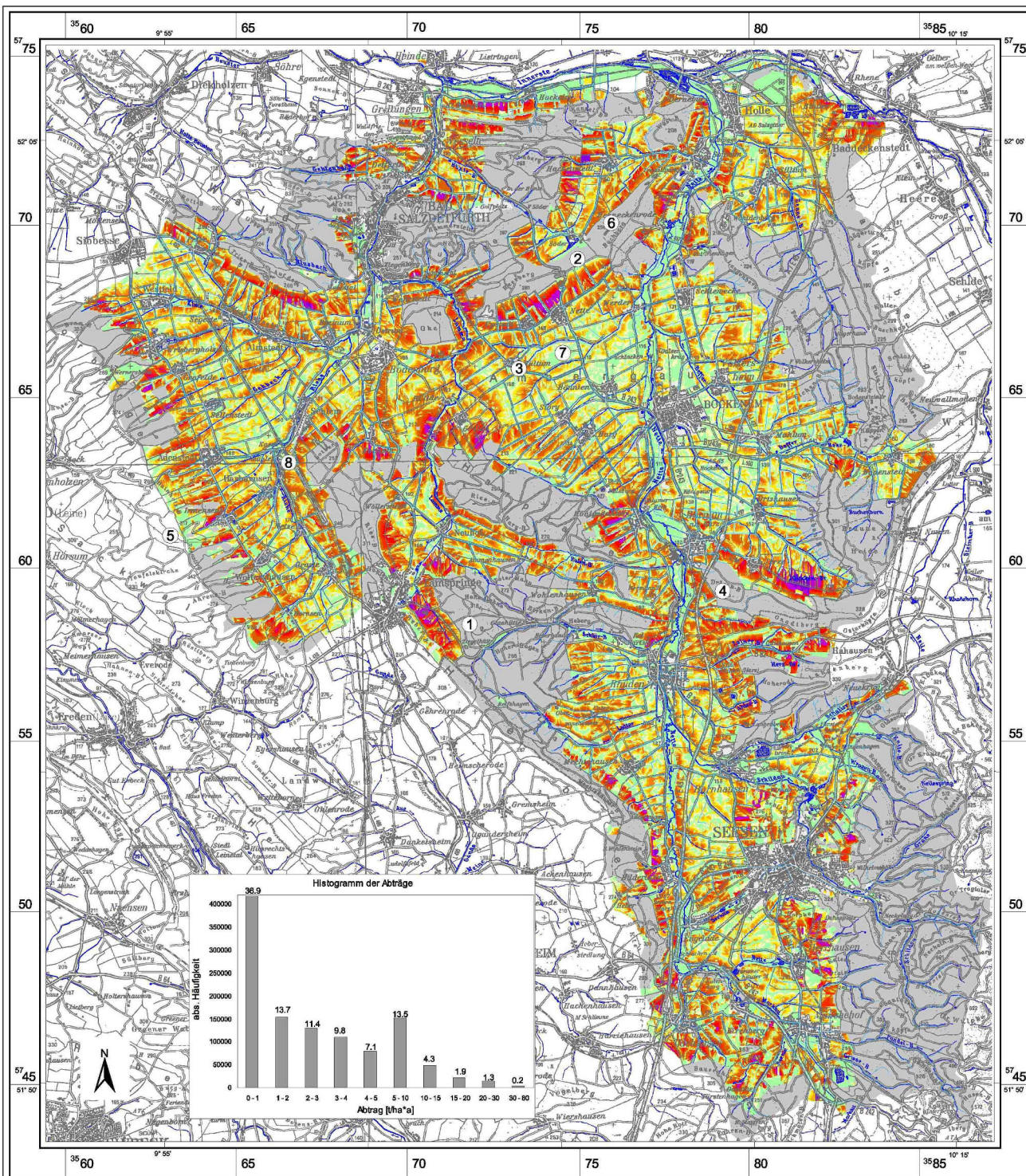
Karte 10 zeigt für das Gesamtgebiet die nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung berechnete Bodenerosionsgefährdung als Abtragsmenge in  $t/ha \cdot a$ .

In den zentralen Beckenlagen landwirtschaftlicher Nutzung treten geringe bis mittlere **Abträge** auf. Ein recht großer Anteil der Ackerfläche zeigt eine geringe Erosionsgefährdung mit tolerablen Abträgen bis zu  $1 t/ha \cdot a$  (s. TH. MOSIMANN 1991). Dazu gehören v. a. die Auenlagen (Bsp. ④ auf der Karte), Bereiche im Umfeld von Wäldern und Siedlungen (⑤) sowie schmale gewässerbegleitende Zonen (③). Der überwiegende Anteil im Gebiet weist Erosionsraten von 2-10 t auf. Hierbei handelt es sich v. a. um Mittelhangbereiche. An ausgewählten Stellen meist im Beckenrandbereich auf Schichtstufenhängen und in ausgeprägten Tiefenlinien können z. T. sehr große Bodenmengen erodieren. Extreme Abträge von mehr als  $30 t/ha \cdot a$  sind an wenigen exponierten Hängen möglich (①). Im Mittel liegen die Abträge auf Ackerflächen bei  $3,6 t/ha \cdot a$ .

Die räumliche Differenzierung des **K-Faktors** wirkt sich nicht sichtbar auf die modellierte Abtragsmenge aus. Der Einfluss des flächendifferenzierten **R-Faktors** lässt sich nicht eindeutig nachweisen. Einerseits liegen auf den Bergkuppen im Bereich sehr hoher R-Faktorwerte häufig Wald- bzw. Grünlandflächen. Insgesamt fällt der Gradient des R-Faktors innerhalb der Ackernutzung relativ gering aus. Andererseits überlagert der dominante Effekt hoher Hangneigungen in diesem Bereich die geringere Wirkung steigender R-Faktorwerte. Sein Effekt auf das Simulationsergebnis ist im Vergleich zu anderen ABAG-Faktoren gering und daher nicht direkt nachweisbar.

Als wesentliche Faktoren determinieren Hanglänge und -neigung (**LS-Faktor**) die Bodenerosionsgefährdung im Modell. Mit zunehmender Entfernung von Arealen ohne Erosionsgefährdung (Wald, Siedlung) steigt der Abtrag mit wachsender erosiver Hanglänge besonders bei höheren Hangneigungen schnell an (②). Das Modell simuliert die wachsende herabfließende Wassermenge durch die stetige Erweiterung des Hangeinzugsgebietes. Daraus resultiert die Zunahme der erosiven Hanglänge und damit der Erosionsneigung. Sehr hohe Abträge sind immer an starke Neigungen und große Hanglängen gekoppelt. Sie treten daher hauptsächlich im mittleren bis oberen Bereich von Schichtstufen und -kämmen auf.



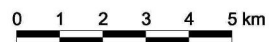


**Bodenabtrag nach ABAG**  
 Nette- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)

Abtrag in t pro ha und Jahr



- hoher Versiegelungsgrad
- keine Bodenerosionsgefährdung
- Gewässer, landwirt. Graben



Basisdaten:  
 ATKIS: DLM25/1, DGM50;  
 Blatt 3826, 3925, 3928, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 8.5.'96, Az.: B 2-A 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Rasterdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
 Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 15.09.'97, Az.: 52-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BÜK 50: Blatt L 3924, L 3926, L 4124, L 4126  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLfB)



Geographisches Institut  
 Universität Hannover  
 Physische Geographie und Landschaftsökologie

(c) J. Voges 1999

Karte 10: Bodenerosionsgefährdung nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG)

Häufig sind die Gewässer von einem schmalen Band mit geringen Abträgen begleitet. Jeder Graben und jedes Fließgewässer ist im Modell als unüberwindbares Abflusshindernis definiert. Die künstlich angelegten Gräben orientieren sich nur wenig an den natürlichen Entwässerungsstrukturen der Landschaft. Sie kreuzen daher häufig die vom Modell generierte Hauptabflussrichtung. Bei natürlichen Fließgewässern können Ausbau und Begradigung ähnliche Effekte hervorrufen. Hangabwärts hinter den Gewässern beginnt das Modell neu zu rechnen, so dass die erosive Hanglänge zunächst bei 0 m liegt. Die Abtragsraten liegen damit ebenfalls bei 0 und steigen hangabwärts langsam wieder an.

In den über das Höhenmodell generierten Tiefenlinien werden die Feststoffe bevorzugt erodiert und durch zusammenfließendes Wasser transportiert. In diesen Bereichen liegen auch die berechneten Abträge deutlich höher, da der Algorithmus zur Ableitung des L-Faktors den Fließpfad nachvollzieht (⑥). Zum Hangfuß hin reduziert sich wiederum die Bodenerosionsgefährdung, weil hier konkave Hangformen mit nachlassenden Hangneigungen einhergehen (⑦).

Bei sehr geringen Neigungen wie im Auenbereich der permanenten Fließgewässer sind die Abträge unbedeutend. Zudem liegen hier mit größerer Verbreitung die stets gut bedeckten Grünlandflächen. Desgleichen ist die Bodenerosion an den meist flacheren Geländekuppen geringer, da hier die erosiven Hanglängen kürzer ausfallen (⑧).

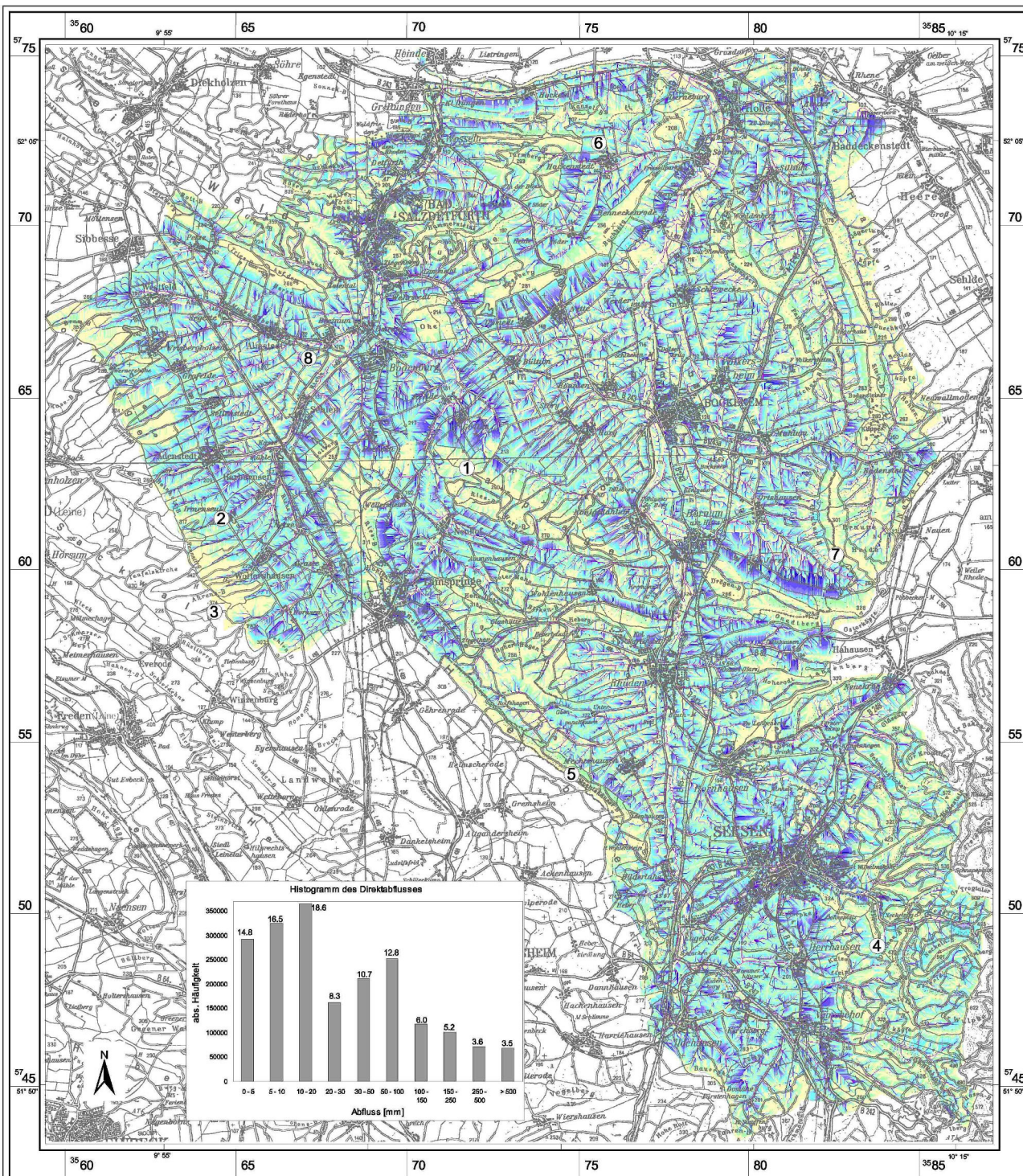
#### **Fazit**

Die ABAG liefert insgesamt plausible Ergebnisse im Gesamtgebiet. Die Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung in der Fläche ist für große Gebiete möglich. Es lassen sich gefährdete von weniger gefährdeten Raumarealen trennen und ihr Gefährdungsgrad relativ zueinander ablesen. Für im Gelände gefundene Flächen mit hohen Abträgen berechnet die ABAG ebenfalls eine erhöhte Erosionsgefährdung. Berechnete langjährige mittlere Erosionsraten (Flächenerosion) und kartierte Abträge aus Einzelereignissen (v. a. lineare Erosion) lassen sich dagegen nicht miteinander korrelieren. Das verwendete Modell erlaubt die Erosionsabschätzung für den mittleren Maßstab allerdings in ausreichender Auflösung.

#### **7.1.2. Direktabfluss**

Auf Karte 11 ist der über die CN-Methode (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972) abgeschätzte Direktabfluss für das Gesamtgebiet dargestellt. Auslöser des Abflusses ist ein flächendifferenzierter repräsentativer Starkniederschlag von 30-53 mm, dessen Menge von der Geländehöhe und lokalen Einflüssen abhängt.

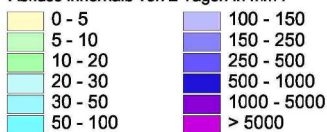




### Direktabfluss nach Starkniederschlag Netze- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)

Direktabfluss aus flächendifferenziertem Starkniederschlag von 30-53 mm nach modifiziertem SCS Curve-Number-Verfahren

Abfluss innerhalb von 2 Tagen in mm :



**Basisdaten:**

ATKIS: DLM25/1, DGM50:  
Blatt 3826, 3925, 3928, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 8.5.96, Az.: B 2-A 14/96:  
Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
Rasterdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 15.09.97, Az.: 52-1116/97:  
Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
BLK 50: Blatt L 3924, L 3926, L 4124, L 4126  
Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLFB)



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

(c) J. Voges 1999

Karte 11: Direktabfluss nach Starkniederschlag, abgeleitet über modifiziertes SCS-Curve-Number-Verfahren

Die **räumliche Verteilung des Direktabflusses** zeigt ein stark differenziertes, fein aufgegliedertes Erscheinungsbild. Das Verbreitungsmuster ist geprägt von der Flächennutzungsverteilung, lokalen Unterschieden in der Niederschlagshöhe und langfristig konstanten Größen, wie der großräumigen Reliefformung. Gebündelter Oberflächenabfluss zeigt sich allorts durch strahlenförmig verlaufende Linien mit erhöhten Abflussvolumina. An den Schnittpunkten von kanalisiertem Abfluss und den Graben- und Fließgewässern ist mit einer erhöhten Eintragsgefährdung zu rechnen (potentieller Übertrittsbereich). Mit sinkender Entfernung eines Raumbereiches (Rasterzelle) zur Abflussbahn und zum Gewässer steigt die Wahrscheinlichkeit der Stofflieferung.

Der **Einfluss der Flächennutzungsverteilung** ist an den waldbedeckten Höhenzügen am reduzierten Direktabflussanteil festzustellen (Bsp. ③ auf der Karte). Aufgrund der starken Zunahme der Niederschlagsmenge am Harzrand (Steigungsregen) erscheint die Verringerung des Abflusses im Waldgebiet hier nicht so ausgeprägt (④).

Die **Menge des Abflusses** korreliert mit dem höhenabhängigen Starkregen. Höhere Niederschläge fallen besonders an den steilen Luvhängen, so dass unter Ackernutzung ein stärkerer Direktabfluss entsteht (①). Dabei nimmt die Wassermenge mit steigender Größe des Hangeinzugsgebietes permanent bis zum nächsten Gewässer zu. In diesen eher flächenhaft abgebildeten Bereichen ist eine erhöhte Gefahr von Stoffübertritten gegeben (②).

Besonders ausgeprägte Abflüsse entstehen, wenn große Hangeinzugsgebiete mit Ackernutzung vorliegen, an die sich ausgeprägte Tiefenlinienbereiche anschließen (⑦). Im Gewässerrandbereich solcher Hänge muss mit einer erhöhten Eintragsgefährdung gerechnet werden. Auf den Kuppen der Schichtstufen mit agrarischer Nutzung wird der Beginn der Abflussbildung durch die zunächst geringen Abflusswerte illustriert. Sie liegen im Bereich der Ausgangswerte von 5 mm und steigen hangabwärts kontinuierlich an (⑧). Prognostizierte Stoffübertritte treten im Bereich hoher Transportkapazitäten unter agrarischer Nutzung auf.

Sobald der effektive Niederschlag in das **Graben- und Gewässernetz** eingeflossen ist, strömt es weiter bis zur Grenze des jeweiligen Fließgewässereinzugsgebietes. Dabei werden flussabwärts gelegene Zuströme aus angrenzenden Flächen und aus Gewässern kaskadenförmig aufaddiert. Dies führt im Gewässernetz nach kurzer Fließstrecke zu Direktabflüssen von mehr als 5 m<sup>3</sup> (⑤). Das Modell simuliert auch den weiteren Abfluss der Wassermengen durch die Siedlungsgebiete (⑥).

### Fazit

Die Modellierung nach dem modifizierten CN-Verfahren ergibt ein in der Raumdifferenzierung plausibles Ergebnis zum **Direktabfluss** im Gesamtgebiet. Anhand von gemessenen mittleren Hochwasserabflussspenden konnten die simulierten Gebietsabflüsse eines imitierten Starkniederschlags-



ereignisses validiert werden (Kap. 6.6.2). Durch Berechnungen innerhalb der Reliefanalyse wird die Fließrichtung des abströmenden Effektivniederschlages integriert und die Abflussmenge kaskadenartig kumuliert. Das Modell vermag Zwischenspeicherung oder Versickerung auf dem Weg bis zum Gewässer nicht abzubilden. Da die Fließstrecken bzw. -zeiten wegen der hohen Gewässerdichte begrenzt sind, erscheint der Mangel für die Abflusssimulation im mittleren Maßstabsbereich tolerierbar.

### 7.1.3. Transportkapazität des Oberflächenabflusses

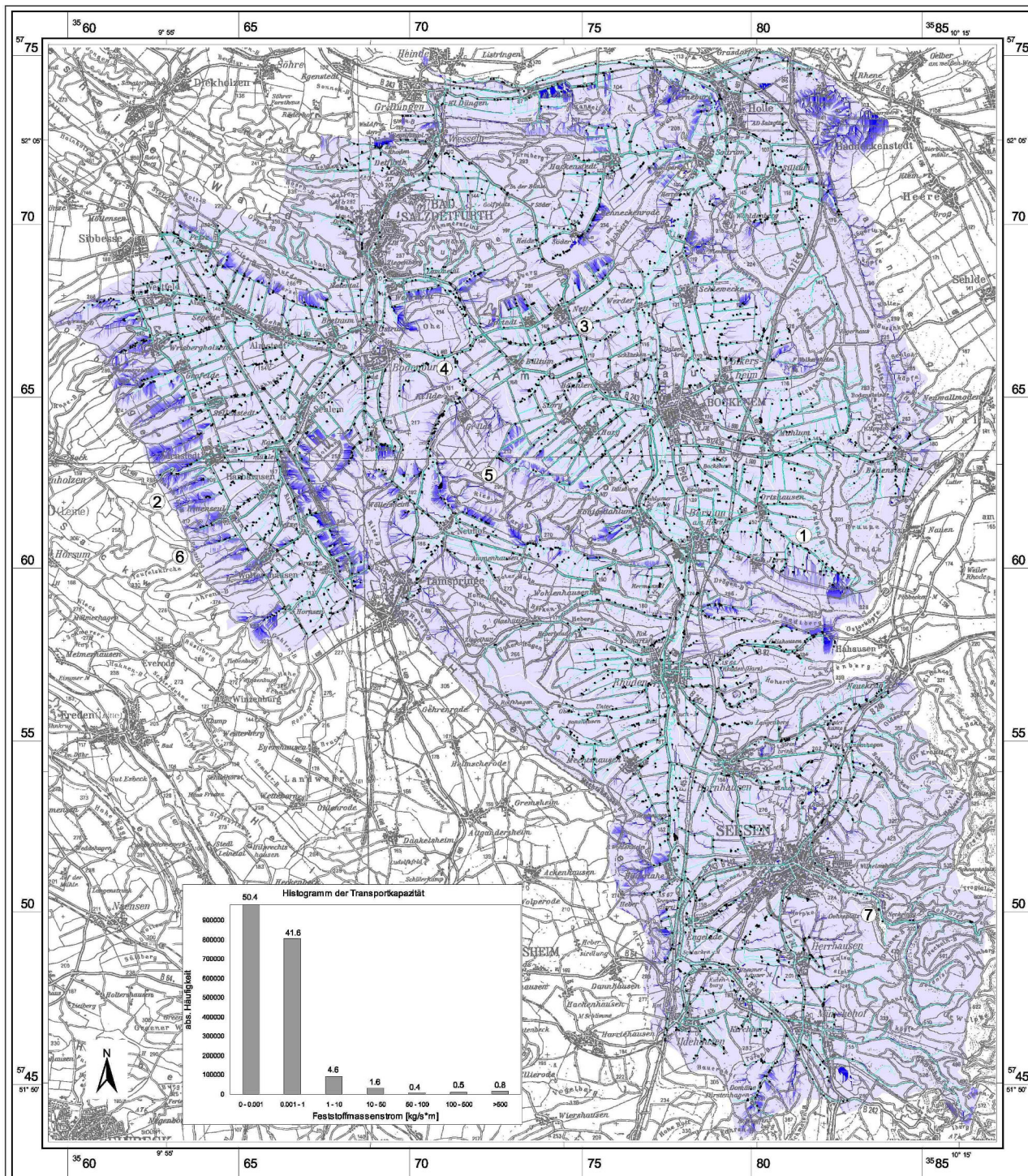
Wie aus Karte 12 hervorgeht, zeigt im Vergleich zu den vorangegangenen Prozessgrößen die **Transportkapazität des Oberflächenabflusses** eine geringere räumliche Differenzierung. In einem Gebiet mit einheitlich geringer Transportkapazität treten einigen linienhafte Zonen mit stark erhöhten Werten des Feststoffmassenstromes auf. Diese Bereiche besitzen meistens eine linienhafte Ausprägung mit den höchsten Werten sowie dem Endpunkt am Gewässerrand (Bsp. ① auf der Karte). Hier besteht eine starke Gefährdung des Stoffeintrages (Übertritt). Hangaufwärts gelegene Zonen mit hoher Transportkapazität bilden dabei Areale mit gesteigerter potentieller Stofflieferfähigkeit.

Nur in wenigen Bereichen existieren ausgedehnte zusammenhängende Areale mit großer Transportkapazität. Es treten sehr viel stärkere räumliche Gradienten zwischen hohen und niedrigen Werten auf als bei den Bodenerosions- und Abflussmengen. Ein sprunghafter Anstieg des Transportvermögens von einer zur nächsten Rasterzelle ist möglich. Der simulierte effektive Stofftransport bleibt im Reliefformengefüge auf wenige ausgewählte Pfade beschränkt.

Da die Simulation für eine mittlere **Rauhigkeit und Bodenbedeckung** von 10 % vorgenommen wurde, sind keine Wertedifferenzierungen des Massenstromes aufgrund der Parzellenanordnung erkennbar. Ein **bodenartenabhängiges Raummuster** der Transportkapazität lässt sich nicht deutlich erkennen, zumal die größten Körnungsunterschiede zwischen Beckenlagen und bewaldeten Höhenzügen ohne Erosionsgefährdung bestehen.

Starke Hangneigungen rufen eine verstärkte Fließgeschwindigkeit und Schleppkraft des Oberflächenwassers hervor, so dass die höchsten Transportkapazitäten bei ausgedehnten Hangeinzugsgebieten mit hoher mittlerer Neigung entstehen (②). Sonst liegt auf Ackerflächen im Regelfall der **Feststoffmassenstrom** zwischen 1 g und 10 kg/m · s (③). In seltenen Fällen werden auf Ackerflächen höhere Werte errechnet, wobei die Ursachen hierfür vor allem in der absoluten Wassermenge zu suchen sind (④). Sehr evident nimmt die Transportkapazität mit wachsender Fließlänge vom Oberhang zum Hangfuß zu, bis eine klar definierbare Abflussbahn erkennbar wird (⑤). Die Geländetiefenlinien zeigen aufgrund ihrer natürlichen Sammelfunktion für Oberflächenwasser auch eine stark erhöhte Stofftransportkapazität (⑥). Das modellierte Feststofftransportvermögen liegt auf den waldbedeckten Flächen grundsätzlich, d. h. auch am regenintensiveren westlichen Harzrand, auf unterstem Niveau (⑦).





### Transportkapazität des Oberflächenabflusses Netze- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)

Transportkapazität des Oberflächenabflusses bei Starkregen von 30-53 mm/h nach vereinfachtem Verfahren von J. Schmidt (1994), M. v. Werner (1995)

- Feststoffmassenstrom in kg/(m²s) :
- 0 - 0.001
  - 0.001 - 1
  - 1 - 10
  - 10 - 50
  - 50 - 100
  - > 100
- potentieller Eintragsbereich
- Übertritt (generiert)

Basisdaten:  
 ATKIS: DLN25/1, DGM50;  
 Blatt 3826, 3925, 3926, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrsq. vom 8.5.96, Az.: B 2-A 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Rasterdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
 Mit Erlaubnis d. Hrsq. vom 15.09.97, Az.: 52-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BDK 50: Blatt L 3924, L 3925, L 4124, L 4125  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLfB)



Geographisches Institut  
 Universität Hannover  
 Physische Geographie und Landschaftsökologie

(c) J. Voges 1999

Karte 12: Transportkapazität des Oberflächenabflusses nach vereinfachtem Verfahren von J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995)

## Fazit

Über die **Abschätzung der Transportkapazität** besteht die Möglichkeit, sehr selektiv sowohl die besonders transportrelevanten Raumlagen (Stofftransportpfade) als auch die potentiell extrem gefährdeten Übertrittsstellen mit hoher Punktgenauigkeit herauszuschälen. Für die modellbasierte Prognose der Lieferwahrscheinlichkeit von Gebietsausschnitten kann der Stofftransportpfad als Verbindungsglied zwischen dem Areal mit erhöhter Erosionsgefährdung und dem Gewässereintragsbereich interpretiert werden. Besondere Bedeutung erlangt die Stofftransportkapazität, wenn die Modellierung dynamisiert werden soll, indem für ein Extremereignis die Raumverbreitung verschiedener Bewuchsdichten und Bodenrauhigkeiten integriert wird. Zur Bestimmung des aktuellen Verteilungsmusters der Bodenbedeckung ließen sich bei Gebieten dieser großen Ausdehnung GIS-basierte Auswertungssysteme für Satellitenbilder heranziehen (s. M. KAPPAS 1994).

### 7.1.4. Stoffretentionspotential von Gräben

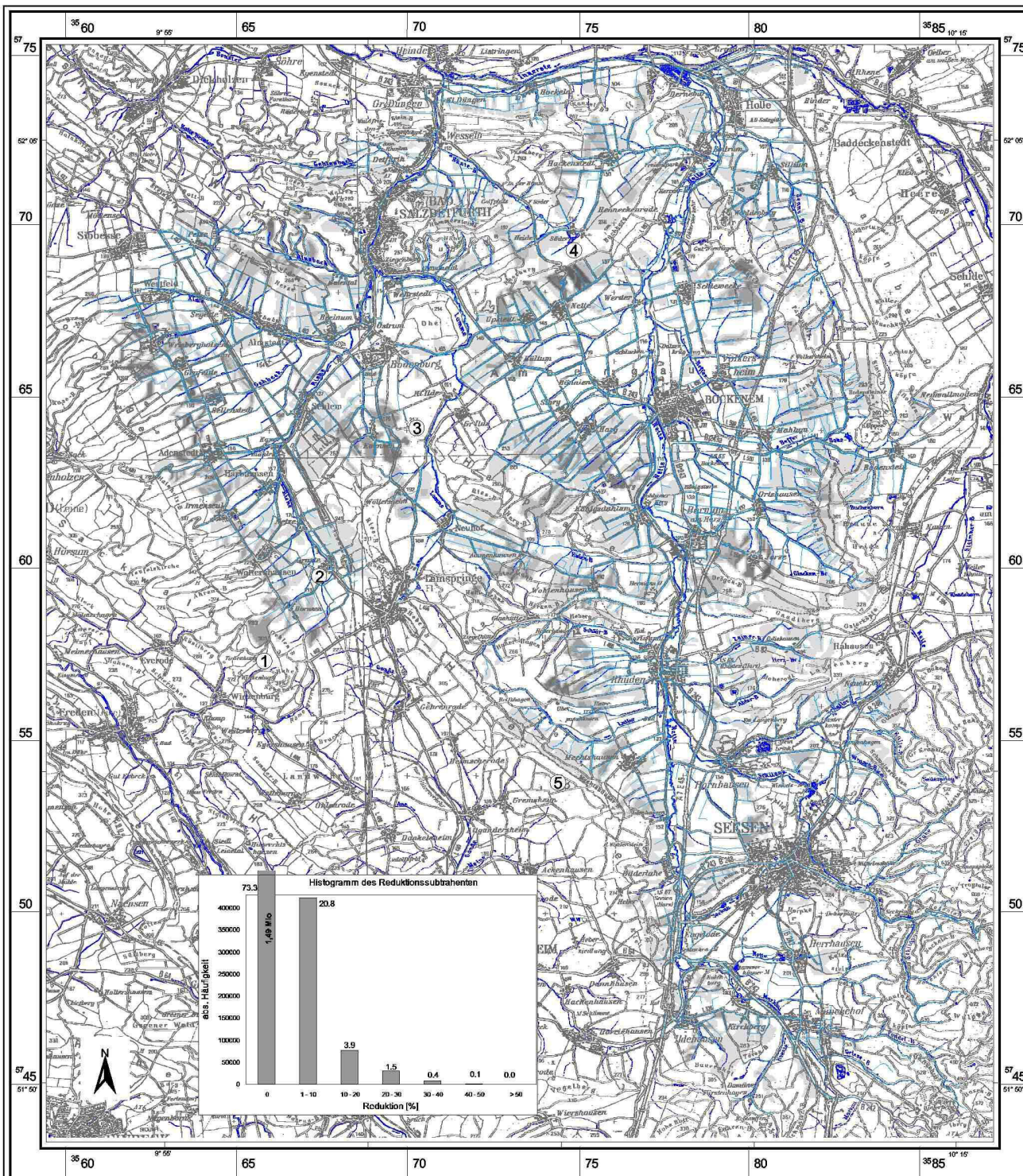
Karte 13 dokumentiert das Stoffretentionspotential in seiner räumlichen Verbreitung. Es drückt die verminderte Stofftransportfunktion der zeitweise wasserführenden Gräben aus. Dargestellt ist es in Form eines Reduktionsfaktors des modellierten Anbindungsgrades.

Der überwiegende Teil der Gräben (73 %) wird von dem modellinternen Selektionsverfahren *nicht* ausgewählt. Diese Gräben verfügen entsprechend der Modellannahme über eine ausreichende Transportfähigkeit und leiten die eingetragenen Feststoffe bis zum nächstgelegenen perennierenden Fließgewässer weiter. Gewässerreinigung, Rauigkeit, Fließgeschwindigkeit und Scheitelabfluss beim angenommenen Standardstarkregen überschreiten die definierten Grenzwerte, so dass das eingetragene Material in Schwebelage gehalten wird.

Für die meisten Einzugsgebiete der selektierten Grabenabschnitte berechnet sich ein Reduktionsfaktor von bis zu 10 %-Pkt.. Einen um 17 % geringeren Flächenanteil haben Grabeneinzugsgebiete mit einer Reduktion von 10-20 %-Pkt.. Die meisten betroffenen Grabenabschnitte liegen somit in relativer Nähe zum Fließgewässer, wo geringere Sohlenneigungen und Fließgeschwindigkeiten vorkommen. Im oberen Teil der Einzugsgebiete fallen zwar die Durchflüsse geringer aus, dafür ziehen die hohen Neigungen starke Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen nach sich.

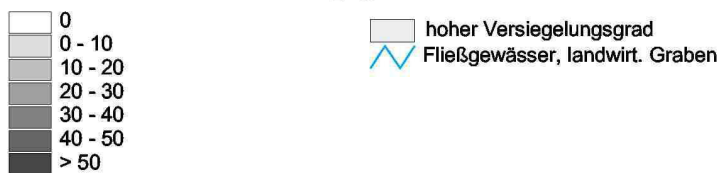
Die Höhe des Reduktionsfaktors steigt mit der Entfernung des selektierten Grabens zum permanenten Fließgewässer. Für weit vom permanenten Fließgewässer entfernt liegende Gräben berechnen sich folglich hohe Reduktionsfaktoren (①). Mit schrumpfender Distanz wird die Wahrscheinlichkeit stetig größer, dass die Stoffe die Transportstrecke bis zum Fließgewässer zurücklegen können. In sofern ist die abkoppelnde Wirkung solcher Gräben und deshalb auch der Reduktionsfaktorwert geringer (②). Die selektierten Grabeneinzugsgebiete weisen randlich eine wolkenähnliche Struktur auf. Sie ist Folge der Filterung und Mittelwertbildung, die am Rand der Gebiete eine langsame Abnahme des Faktorwertes hervorrufen (③).





### Stoffretentionspotential von Gräben Nette- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)

Reduktionfaktor des Anbindungsgrades in %



**Basisdaten:**  
 ATKIS: DLM25/1, DGM50;  
 Blatt 3925, 3926, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrsrg. vom 8.5.96, Az. B 2-A 14/96:  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Rasterdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
 Mit Erlaubnis d. Hrsrg. vom 15.09.'97, Az.: 52-1116/97:  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BÜK 50: Blatt L 3924, L 3926, L 4124, L 4126  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLfB)



Geographisches Institut  
 Universität Hannover  
 Physische Geographie und Landschaftsökologie

(c) J. Voges 1999

Karte 13: Retentionspotential von Gräben (Reduktionsfaktor des Anbindungsgrades)

Das scheinbar widersprüchliche nachbarliche Vorkommen von Zonen höherer und niedrigerer Reduktionsfaktoren hat seine Ursache in unterschiedlichen Fließrichtungen der betreffenden Gräben als Folge einer Wasserscheide (④). Im betreffenden Beispiel strömt das Wasser im einen Fall nach Südwesten über verhältnismäßig weite Entfernungen und im anderen Fall nach Nordosten über eine kurzgeschlossene Verrohrung zum Fließgewässer ab. Auch für vermeintlich fließgewässer-nahe Gräben kann modellseitig die Reduktion des Anbindungsgrades notwendig sein, wenn der Entwässerungsvorgang bis zum Fließgewässer nicht direkt sondern über eine längere Strecke in weit verzweigten künstlichen Gräben von statten geht.

### Fazit

Mit dem Verfahren zur Abschätzung des **Retentionsvermögens im zeitweise wasserführenden Grabensystem** wird der Anbindungsgrad der Einzugsgebiete von Gräben mit definitionsgemäß geringer Stofftransportkapazität zurückhaltend verringert. Das Modell berücksichtigt den Effekt des Stoffrückhaltes, bewertet ihn aber nicht über. Der Reduktionsfaktor erreicht in den meisten Fällen maximal 20 %-Pkt.. Mit dem Verfahren lässt sich die Modellaussage über den Feststoffeintrag in permanente Fließgewässer optimieren. Es bewertet die offsite-Schäden in Fließgewässern schwerwiegender als im Grabensystem. *Sie* führen zum definitiven Stoffaustrag aus dem Flusseinzugsgebiet (unwiederbringbarer Bodenverlust) und belasten nicht nur das natürlichere Ökosystem Fließgewässer, sondern auch weitere Ökosysteme (Seen und Meere) durch Fest- und Nährstoffe.

Das empirische Schätzverfahren kann nur Größenordnungen liefern, die eine Beurteilung hinsichtlich ihrer Relationen zueinander erlauben. Genauere Untersuchungen der Prozesszusammenhänge, des Entwässerungsvorganges von Kleinstinzugsgebieten nach einem erosionsbringenden Niederschlagsereignis und der Transportkapazität bzw. des Retentionspotentials in episodisch wasserführenden Gräben sind für eine präzise Quantifizierung des Stofftransportes notwendig.

## 7.2. Raumverteilungsmuster der Anbindungswahrscheinlichkeit von Ackerflächen an Fließgewässer

Karte 14 stellt als Gesamtergebnis der Untersuchungen die **modellierten Wahrscheinlichkeiten des Feststoffeintrages** in die Fließgewässer (Flächenanbindungsgrad, Eintragswahrscheinlichkeit) dar.

Der Flächenanbindungsgrad bezeichnet die statistische Wahrscheinlichkeit (Prognose), mit der ein Flächenausschnitt (Rasterzelle) Feststoffe an die Fließgewässer liefert. Die Wahrscheinlichkeit beschreibt das Potential der Stofflieferung einer Fläche aufgrund der räumlichen Bedingungen quantitativ. Das Stofflieferungspotential hängt von zeitvariablen und zeitinvariablen Faktoren ab. Es schließt die Prozesse des Bodenabtrags, des Stofftransportes auf der Bodenoberfläche und im Grabensystem ein und fasst in diesem Sinne onsite- und offsite-Schäden zusammen. Berechnet



wird die Wahrscheinlichkeit aus eintragsrelevanten Parametern der Anbindung, deren Verknüpfung auf Basis statistischer Zusammenhänge erfolgt.

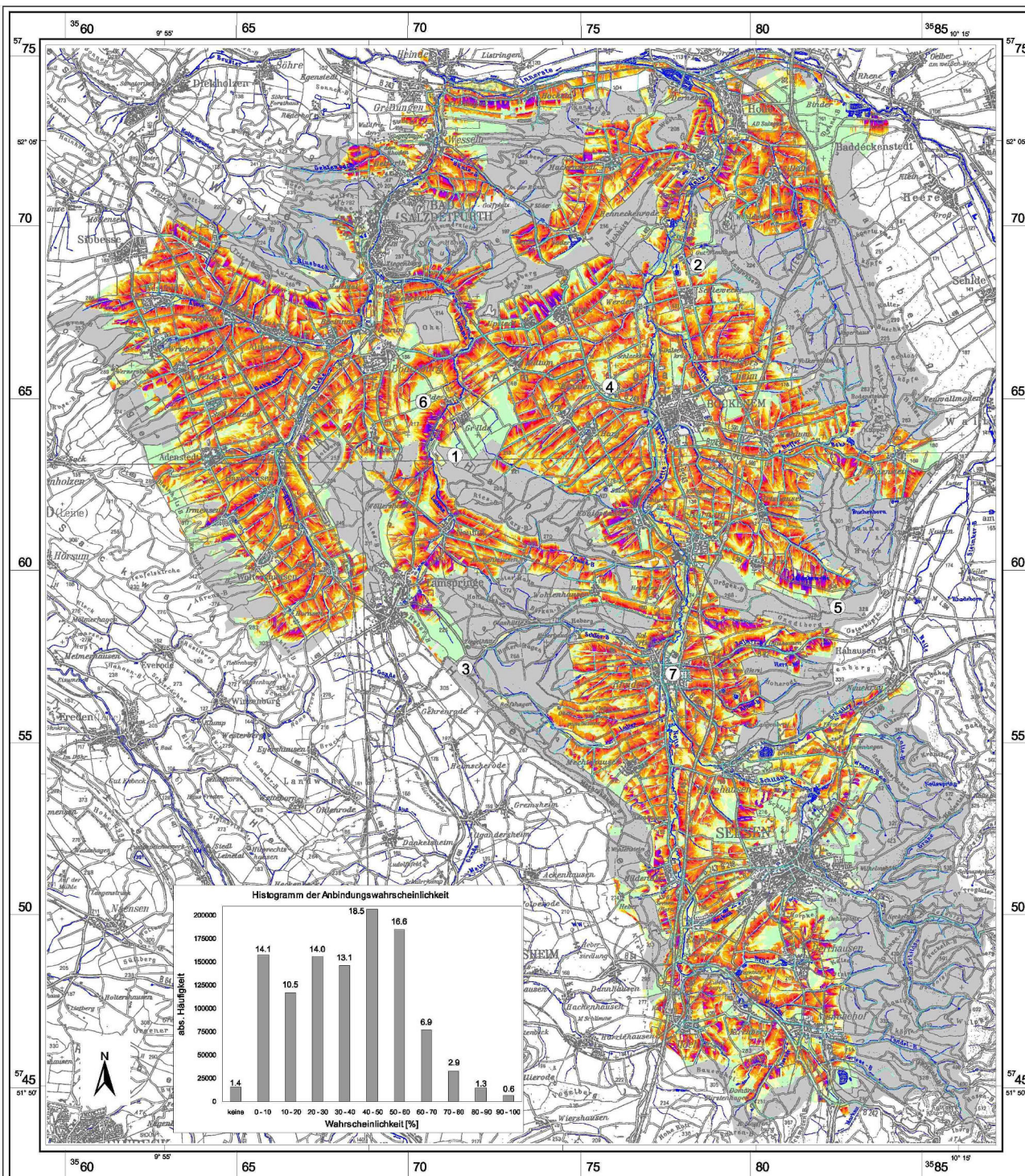
Ausgehend von einem Wiederkehrintervall der Übertrittereignisse von durchschnittlich einem Jahr läßt sich der Anbindungsgrad auch folgendermaßen interpretieren. Die Eintragswahrscheinlichkeit von 50 % bedeutet, dass Stofflieferungen ca. alle 2 Jahre von den betreffenden Flächen stattfinden. In diesem Zeitraum sollten die Flächen einmal innerhalb des Einzugsgebietes eines Übertrittsbereiches liegen. Ein Anbindungsgrad von 10 % Wahrscheinlichkeit ist also mit Stoffeinträgen etwa alle 10 Jahre gleichzusetzen. In der Angabe zur Wahrscheinlichkeit ist auch der Unsicherheitsfaktor dieser Aussage enthalten. Die Einträge müssen demnach nicht regelmäßig wiederkehren, sondern können auch episodisch auftreten, z. B. in einem Jahr mehrfach und in den folgenden Jahren gar nicht.

Zur besseren Unterscheidbarkeit sind auf der Karte sehr schwach angebundene Areale mit 0-10 % Lieferwahrscheinlichkeit und extrem stark angebundene Raumlagen besonders farblich abgesetzt. Ein kontinuierlicher Farbverlauf repräsentiert den gleitenden Übergang des Anbindungsgrades im Intervall dazwischen (s. A. KILCHENMANN 1991).

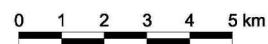
Etwa die Hälfte der Gebietsfläche liefert aufgrund ihrer Nutzung keine Stoffe an die Gewässer; dazu gehören Gehölze, Forsten, Siedlungen und Sondernutzungen. Der Anbindungsgrad der übrigen Fläche zeigt ein sehr flächenvariables Raummuster mit kleinräumiger Differenzierung. Terrains mit mittlerer bis hoher Eintragswahrscheinlichkeit scharen sich um das Gewässer- und Grabensystem. Darin zeigt sich der Einfluss der Anbindungsparameter Gewässerdistanz und Stofftransportpfaddistanz. Bereiche extremer Gefährdung können bis zu größeren Gewässerdistanzen extendieren, wenn eine gesteigerte Erosionsgefährdung oder eine besondere Abflusssituation vorliegt.

Das Histogramm der Anbindungswahrscheinlichkeit zeigt ein leicht linksschiefes annähernd normalverteiltes Häufigkeitsspektrum mit der Maximumklasse zwischen 40 und 50 %. Die relative Häufigkeit in den verschiedenen Wahrscheinlichkeitsklassen liegt meist zwischen 10 und 20 %. Oberhalb von 60 % Anbindungswahrscheinlichkeit fällt die Häufigkeit zunächst abrupt und dann langsam weiter ab.

Hochgradig angebundene Flächen mit über 80 % Eintragswahrscheinlichkeit sind in stark eingeschränkter Ausdehnung nur auf 2 % der Agrarnutzungsfläche vorhanden. Sie verteilen sich recht gleichmäßig über das Gebiet (Bsp. ① auf der Karte). Abgekoppelte Areale kommen vereinzelt (1,4 % Flächenanteil) vor (②). Sie treten meist in kleineren zusammenhängenden Gruppen von Rasterzellen auf. Bereiche mit geringer Eintragsgefährdung von 0-10 % Wahrscheinlichkeit zeigen sich meist in ausgedehnten geschlossenen Arealen (③). Sie sind häufig mit den abgekoppelten Gebieten vergesellschaftet.



**Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer**  
 Netze- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)



Gewässeranbindungsgrad der aktuellen Situation  
 Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrags [%]

- abgekoppeltes Areal
- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- Fläche ohne Stofflieferfunktion
- Siedlung
- Gewässer, landwirt. Graben

Datenbasis:  
 ATKIS: DLM25/1, DGM50; Blatt 3826, 3925, 3926, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrg. vom 8.5.96, Az.: B 2-A 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Rasterdaten TK 100, Blatt C 3922/26, C 4322/26  
 Mit Erlaubnis d. Hrg. vom 15.09.97, Az.: 52-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BJK 50; Blatt L 3924, L 3925; L 4124, L 4125  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLB)



Geographisches Institut  
 Universität Hannover  
 Physische Geographie und Landschaftsökologie

(c) J. Voges 1999

Karte 14: Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer, Gewässeranbindungsgrad der aktuellen Situation



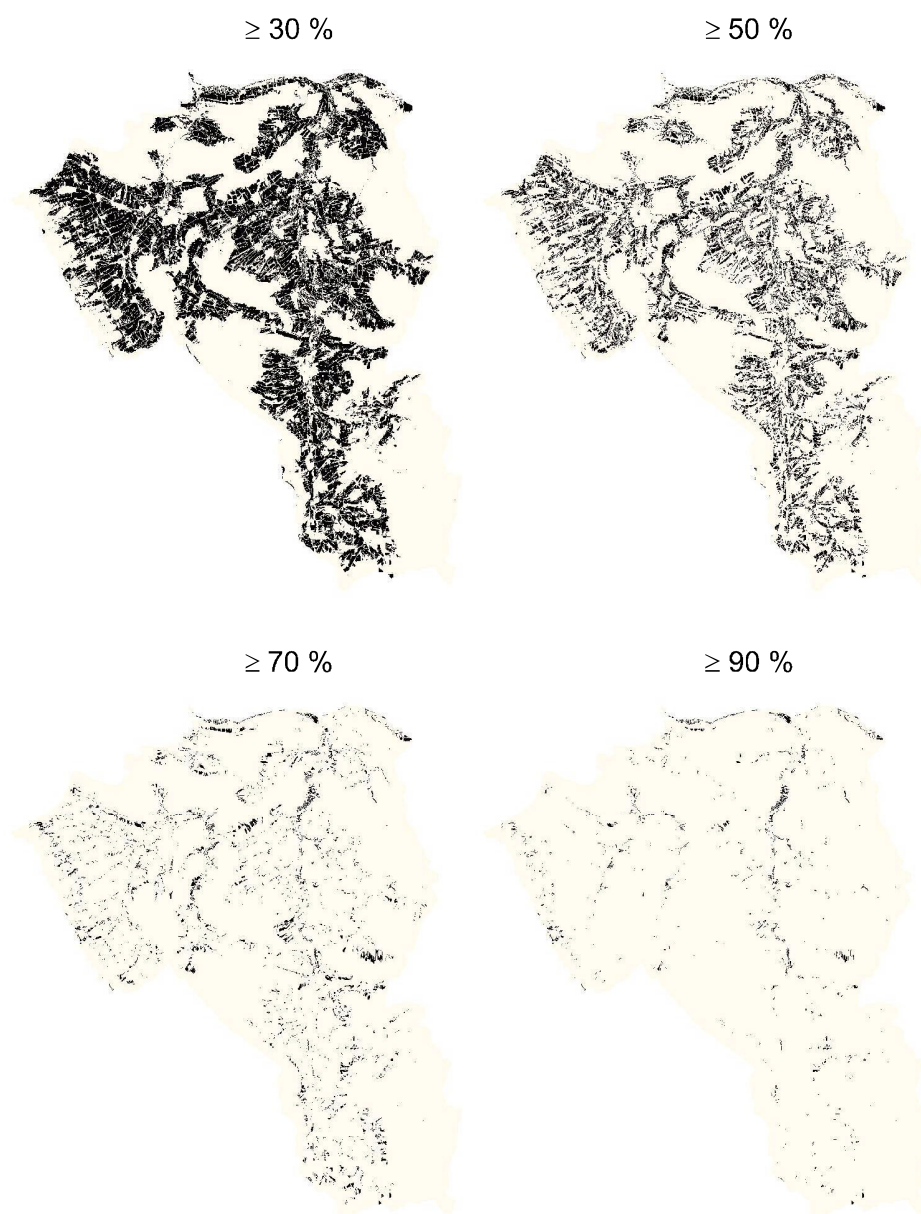
Flächen mit einem mittleren Anbindungsgrad von 20-60 % Lieferwahrscheinlichkeit sind im Untersuchungsraum am weitesten verbreitet (④). Die Klassengrenzen der Wahrscheinlichkeit verlaufen dabei oftmals gewässerparallel. Für den Oberflächentransport besonders günstige Rahmenbedingungen, wie sie in Tiefenlinien auftreten, drücken sich auch im erhöhten Gewässeranbindungsgrad aus (⑤). An solchen Standorten vereint sich hohe Erosionsgefährdung mit gesteigertem Runoff-Potential und großer Stofftransportkapazität. Geoökologische und raumstrukturelle Bedingungen, die zu einem sehr hohen Anbindungsgrad führen, existieren im Nahbereich der permanenten Fließgewässer nur vereinzelt. Viel zahlreicher sind solche Eintragswahrscheinlichkeiten im Grabenbereich (⑥). Die Auenbereiche der größeren Flüsse, wie Nette und Lamme, weisen sogar häufig sehr reduzierte Eintragswahrscheinlichkeiten auf (⑦). Aufgrund der geringen Hangneigung sind die Feststoffeinträge durch Bodenerosion hier unwahrscheinlich. Möglich sind hingegen Stoffeinträge durch rückströmendes Wasser bei Überschwemmung oder über die gelöste Phase durch Abschwemmung.

### Modelleinsatz in der Praxis

In Abhängigkeit von der Fragestellung oder Zielsetzung einer Modellprognose kann man über die **Definition der Grenzwahrscheinlichkeit** die Flächenausdehnung der simulierten Stofflieferareale verändern (Abb. 47). Sind Flächenbereiche bereits ab einer Anbindungswahrscheinlichkeit von 30 % als Lieferareal definiert, werden weite Bereiche vom Modell zurückgegeben. Wird die Grenze für ein Liefergebiet hingegen bei 90 % Eintragswahrscheinlichkeit festgelegt, generiert das Modell nur sehr ausgewählte Raumbereiche als angebunden. Im praktischen Modelleinsatz erweist sich die Verwendung von Wahrscheinlichkeitsaussagen als **vorteilhaft**.

Je nach finanziellen Möglichkeiten und angestrebter Tragweite der Regelungen lässt sich im Zuge eines Einzugsgebietsmanagements **bedarfsorientiert** ein adäquates **Konzept** zur Reduzierung von Stoffeinträgen erarbeiten. Sollen Schutzmaßnahmen ausschließlich in stark exponierten Arealen mit hohem Eintragspotential greifen, sind nur Lieferflächen mit mehr als 90 % Anbindungsgrad zu berücksichtigen. In diesem Fall sollte in den modellseitig herausgeschälten Lieferarealen eine Präzisierung und Validierung der Modellergebnisse anhand von zusätzlichen Geländekartierungen auf Grundlage des Kartierbogens „Anbindung von Ackerflächen an Gewässer und Gräben“ (Abb. 4) vorgenommen werden. Es gibt ebenfalls die Möglichkeit, in diesen Gebieten im Zuge eines **down-scaling-Verfahrens** komplexere Modelle einzusetzen, um zu genaueren Ergebnissen zu gelangen (R. DUTTMANN 1999, R. DUTTMANN U. A. 1998). Besteht ein Interesse an einer flächenhaft greifenden Gewässerprotektion und sind die notwendigen Eingriffe wegen der breiten Akzeptanz umsetzbar, kann das Managementsystem die Lieferflächen mit Übertrittswahrscheinlichkeiten von 50 % und mehr integrieren.

definierte Stofflieferfläche bei Eintragswahrscheinlichkeit von:

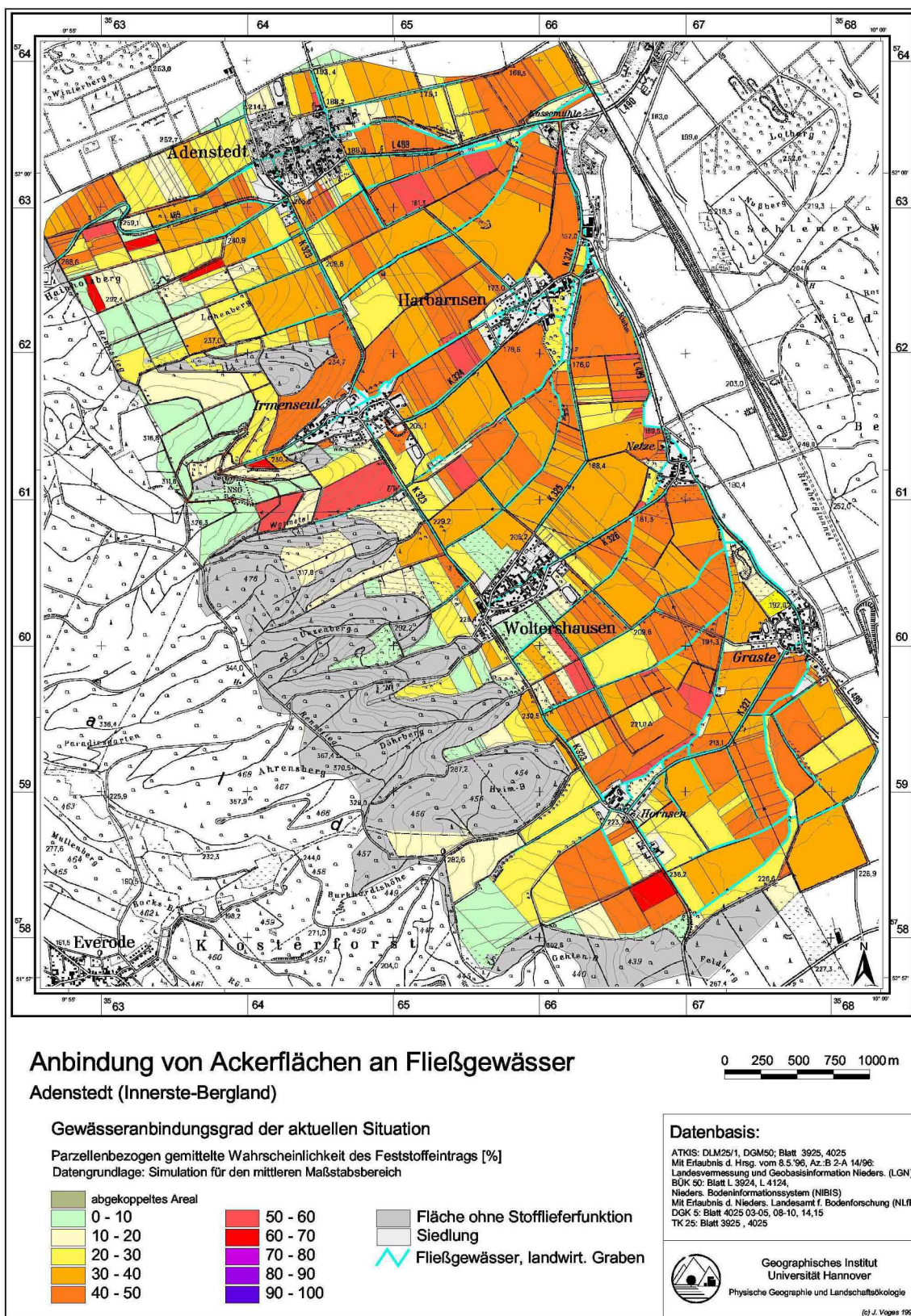


**Abb. 47: Verbreitungsmosaik von prognostizierten Lieferflächen für Feststoffe bei verschiedenen Grenzwerten der Eintragswahrscheinlichkeit**

Für die **Umsetzung** von Gewässerschutzmaßnahmen in der Fläche eignet sich die Rasterzelle als Bezugsareal weniger gut. In der landwirtschaftlichen Praxis vollzieht sich eine flächenhaft greifende Änderung meist parzellenbezogen. Die Parzellenstruktur lässt sich in die Angabe des Anbindungsgrades integrieren, indem schlagbezogen die mittlere Eintragswahrscheinlichkeit berechnet wird (Karte 15). Mit praxistauglichen angepassten Schutzmaßnahmen kann der Gewässereintrag auf besonders stark liefernden Ackerschlägen verringert werden. Durch die Mittelwertbildung gehen die Details der rasterbezogenen Darstellung verloren, so dass das Verbreitungsmuster des Anbindungsgrades homogener erscheint. Das Modellergebnis ist zudem nur in einem großen Maßstab dargestellt, erreicht also weiterhin nur die Qualität einer Prognose auf mittlerer Maßstabsebene. Für



genauere Simulationen auf größerem Maßstabsebene muss das Modell mit weiteren Anbindungsparametern erweitert werden (z. B. parzellenscharfe Landnutzung, kleinmaßstäbige Raumstrukturelemente, höher auflösendes DGM).



Karte 15: Flächenanbindungsgrad für den Praxiseinsatz: Parzellenbezogen gemittelte Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrages in Fließgewässer [%] (Datenbasis: mesoskalige Modellsimulation)

## Fazit

Der **Gewässeranbindungsgrad** bildet eine **integrative Größe**, die sowohl onsite-Schäden durch Bodenerosions- und Stofftransportprozesse als auch offsite-Schäden durch Stoffeinträge und -belastungen in Gräben und Fließgewässern in *einem* Wahrscheinlichkeitswert zusammenfasst. Insofern gehen im Ansatz „Gewässeranbindung“ Aspekte des Bodenschutzes und des Gewässerschutzes in einer Größe auf.

Das **Modell** errechnet sowohl für die räumliche Verbreitung als auch für die anteilmäßige Verteilung des **Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer** plausible langfristige Wahrscheinlichkeitswerte. So lassen sich Areale mit geringer Anbindung oder völliger Abkopplung sowie Gebiete hohen Eintragspotentials gut nachvollziehen bzw. durch Geländekenntnis bestätigen. Das Modell ist geeignet, für den mittleren Maßstab Flächen hinsichtlich ihrer Stofflieferfunktion zu differenzieren. D. h. beliebige Raumausschnitte werden hinsichtlich ihrer Eintragsrelevanz gewichtet, so dass relative Bedeutungsunterschiede erkennbar sind. Das Simulationsmodell kann Gebiete mit besonders hohem Eintragspotential, d. h. hohem Bedarf an Gewässerschutzmaßnahmen, bestimmen. Dies ermöglicht die detailliertere modellgestützte Analyse der eintragsrelevanten Raumbereiche im Zuge eines downscaling Prozesses (s. R. DUTTMANN U. A. 1998) oder die Verifizierung prognostizierter Lieferareale anhand von Geländekartierungen (s. Abb. 4).

Unter folgenden **Voraussetzungen** prognostiziert das Modell einen **hohen Gewässeranbindungsgrad** (Stoffeintragspotential):

- bei geringer Entfernung zu Gräben und Fließgewässern und ausreichender Hangneigung
- in Tiefenlinienbereichen mit geringer Entfernung zum Stofftransportpfad
- bei hoher Erosionsgefährdung mit günstigen Stofftransportvoraussetzungen
- bei sehr hoher Hangneigung und –länge
- bei hohem Direktabfluss und hoher Stofftransportkapazität des Oberflächenabflusses.

Der Gewässeranbindungsgrad lässt sich nur empirisch und nicht über definierte Messgrößen bestimmen. Das Modellergebnis ist nur auf der Grundlage von Geländeerhebungen ausgewählter Gebiete zu verifizieren oder zu falsifizieren (Kap. 4.5). Für das Gesamtgebiet lässt sich flächenhaft die Ergebnisüberprüfung nicht realisieren.

## 8. ANBINDUNGSGRAD FÜR NUTZUNGS- UND RAUMSTRUKTURSZENARIEN

Das anschließende Kapitel zeigt **Anwendungsperspektiven** des Modells anhand von exemplarischen Szenarien auf. Die Wirkung auf den Gewässeranbindungsgrad durch die Veränderung von Bodenbedeckung, Raumstrukturen und die Stoffretention im Grabensystem steht im Vordergrund der Erörterungen.

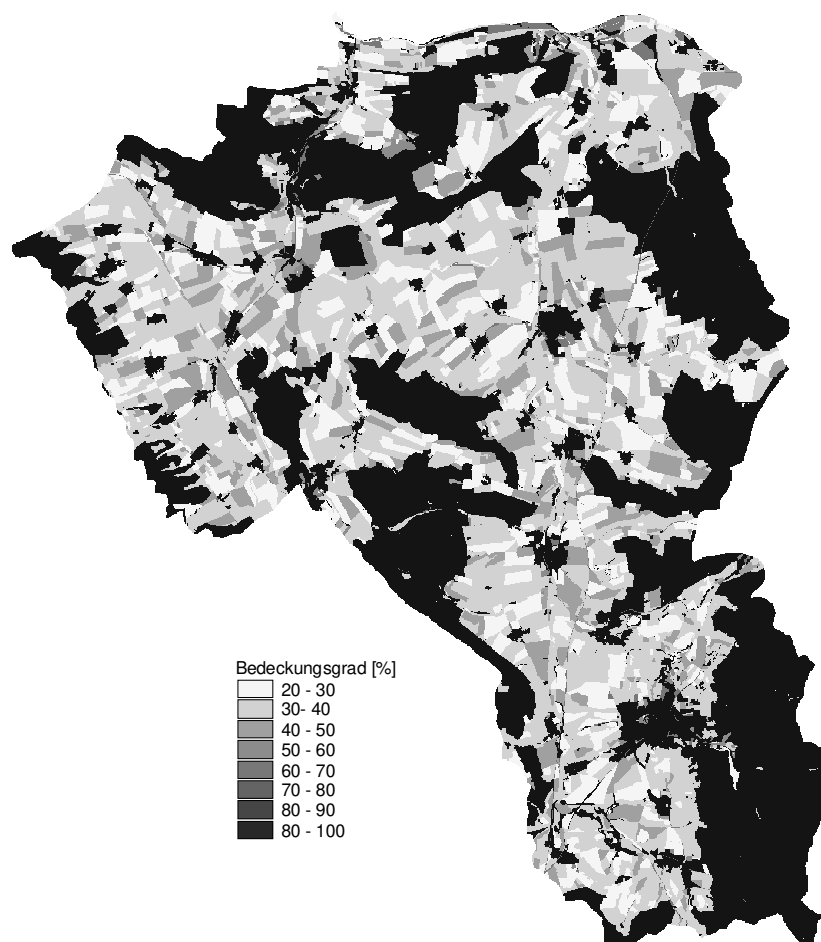
### 8.1. Veränderter Bodenbedeckungsgrad

Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, beeinflusst die Bodenbedeckung die potentielle Eintragsgefährdung für Feststoffe in starkem Maße. Sie bestimmt den Energieinput des aufschlagenden Regens und die Abflussbedingungen auf der Bodenoberfläche wesentlich mit. Ab einer Bedeckung im Hangeinzugsgebiet zwischen 60-70 % konnten in keinem Fall Stoffeinträge kartiert werden. Die Flächengröße der erfassten stoffliefernden Gebiete steigt exponentiell mit Abnahme des Bedeckungsgrades.

Für die Abschätzung des Anbindungsgrades bei Einzelereignissen ist die **Integration verschiedener Bewuchsdichten** innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzungsareale in die Simulation möglich. Entsprechend ihres Flächenanteils werden die Kulturfrüchte (30 % Hackfrucht, 60 % Getreide, 10 % Sonstiges) nach dem Zufallsprinzip einzelnen Nutzungsarealen zugeordnet. Den verschiedenen Kulturen entsprechen Bodenbedeckungen zwischen 20 und 70 % (Abb. 48). Hackfruchtkulturen erhalten geringere (30-40 %), Getreideflächen höhere simulierte Spektren der Bodenbedeckung (40-70 %). Auf 10 % der Fläche stehen sonstige Kulturen mit Bewuchsdichten von 20-30 %. Grünland ist mit 80- bis 100 % Bewuchs bedeckt. So entsteht ein realistisches Raummuster einer Agrarlandschaft im fortgeschrittenen Frühling (Mai-Juni).

Die Modellierung basiert auf der **Hypothese**, dass aus der linearen Zunahme der Bodenbedeckung eine lineare Abnahme der Übertrittswahrscheinlichkeit resultiert. Aus einer um 10 % höheren Bedeckung folgt eine 10 % niedrigere Eintragswahrscheinlichkeit.

Die Annahme stützt sich auf Geländebeobachtungen. Der überwiegende Teil der Übertritte passiert bei einer Bewuchsdichte bis 30 %. Das Modell wurde also für diese Bodenbedeckungen kalibriert. Parzellen mit über 70 % Bodenbedeckungsgrad liefern keine Feststoffe mehr an die Gewässer, d. h. der Anbindungsgrad liegt bei 0 % Eintragswahrscheinlichkeit. Aus der Zunahme der Bodenbedeckung um 50 % resultiert demnach die Abnahme des Anbindungsgrades auf Null. Diese Abnahme bildet das Modell ab. Der Anbindungsgrades wird in Abhängigkeit des Bewuchses so verändert, dass das Simulationsergebnis sich entsprechend den Kartierresultaten entwickelt.

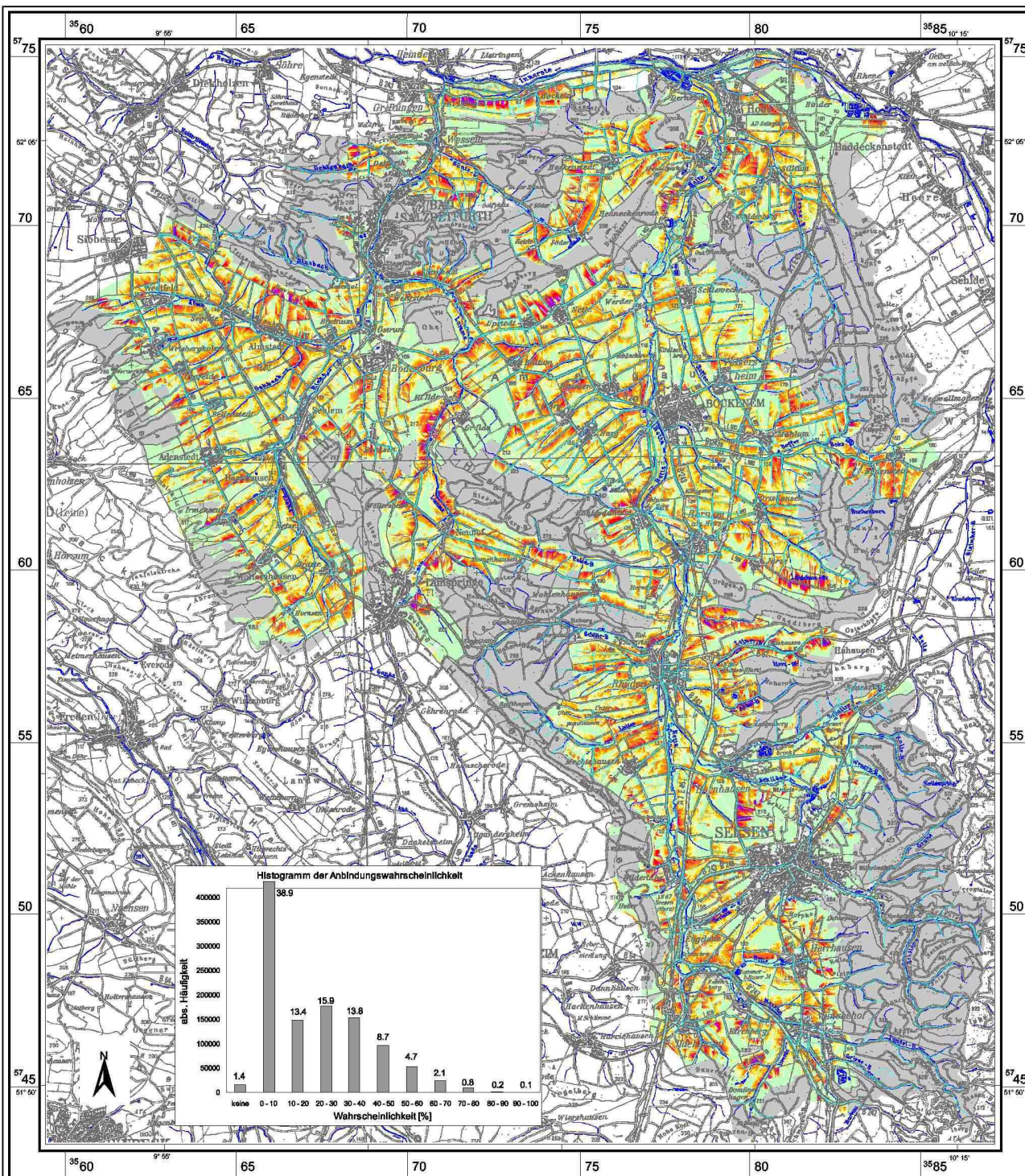


**Abb. 48: Räumliche Verbreitung von zufällig verteilten Bodenbedeckungen auf Ackerflächen zwischen 20 und 70 % sowie auf Grünland- und Waldflächen von 80-100 %**

Die Simulation für einen Frühjahreszeitpunkt mit sehr unterschiedlicher Bodenbedeckung zeigt im Vergleich zu den Grundeinstellungen deutlich verminderte Anbindungsgrade (Karte 16). Da der Modalwert der Eintragswahrscheinlichkeit ursprünglich bei etwa 50 % liegt, folgt daraus eine weitverbreitete Reduktion des Anbindungsgrades auf 0-10 %. Der Anteil der sehr gering gefährdeten Gebiete (0-10 %) steigert sich deutlich auf 39 %. Sie bilden das Maximum in der Häufigkeitsverteilung.

Das **Histogramm** verzeichnet eine Linksverschiebung: nur noch 8 % der Lieferflächen weisen einen Anbindungsgrad von mehr als 50 % auf. Raumbereiche mit relativ starker Eintragsgefährdung entsprechen denjenigen der Ausgangssimulation. Ihr Anbindungswahrscheinlichkeit ist je nach simuliertem Bedeckungsgrad allerdings um 30-40 % verringert. Die unterschiedlichen Nutzungsareale – denen ja unterschiedliche Bodenbedeckungen zugeordnet sind – lassen sich nur an wenigen Stellen durch das nachbarschaftliche Auftreten verschiedener Anbindungsniveaus erkennen.





**Gewässeranbindung für ein Frühjahrsereignis (Mai/Juni)**  
**Nette- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)**



Gewässeranbindungsgrad für kulturenartabhängige Bodenbedeckungen von 20-100 %  
 Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrags [%]

- abgekoppeltes Areal
- 0 - 10
- 50 - 60
- 10 - 20
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- Fläche ohne Stofflieferfunktion
- Siedlung
- Fließgewässer, landwirt. Graben

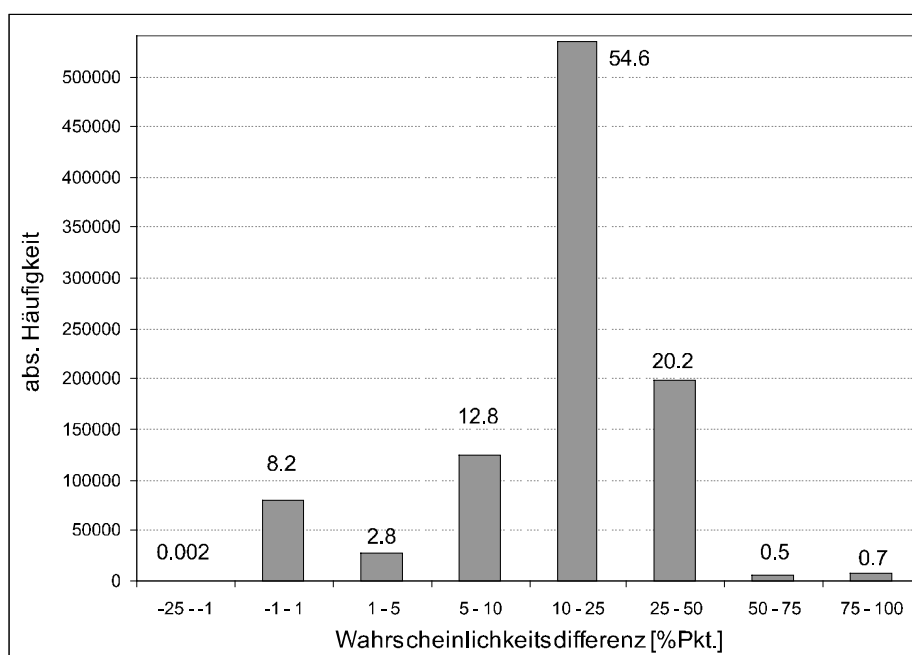
**Datenbasis:**  
 ATKIS: DLM25/1, DGM50; Blatt 3826, 3925, 3926, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 8.5.96, Az.: B 2-A 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Restdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
 Mit Erlaubnis d. Hrsg. vom 15.09.97, Az.: 92-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BÜK 50; Blatt I-3924, I-3926, I-4124, I-4126  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLFB)



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

(c) J. Voges 1999

**Karte 16: Anbindungsgrad für ein Frühjahrsereignis (Mai-Juni) unter Berücksichtigung der kulturar-  
 abhängigen Bodenbedeckung**



**Abb. 49: Histogramm der Wahrscheinlichkeitsdifferenzen zwischen ursprünglicher Modellierung und Simulation mit flächendifferenziert erhöhtem Bodenbedeckungsgrad**

Durch zellenbezogene Subtraktion der Anbindungswahrscheinlichkeiten aus der ursprünglichen Modellsimulation und Modellierung mit flächendifferenziertem Bedeckungsgrad erhält man für jede Zelle Wahrscheinlichkeitsdifferenzen, die sich in Histogrammform darstellen lassen (Abb. 49). Größtenteils wird der Anbindungsgrad um 10-25 Prozentpunkte vermindert. Nur gut 8 % der gesamten Ackerfläche ist nicht von Veränderung betroffen. Deutlich zeigt sich der starke Einfluss der Bodenbedeckung auf die Lieferfähigkeit von Ackerflächen. Der Anbindungsgrad ist von sich zeitlich verändernden Rahmenbedingungen abhängig, die von Übertrittereignis zu Übertrittereignis wechseln können. Damit bestätigt sich wiederum die Sinnhaftigkeit einer *langfristig geltenden* Wahrscheinlichkeitsaussage zur Gewässeranbindung.

### Fazit

Durch die Implementierung eines einfachen Algorithmus lässt sich die **Wirkung der Bodenbedeckung** auf den Anbindungsgrad simulieren. Der Anbindungsgrad ist dabei direkt umgekehrt proportional zum Bodenbedeckungsgrad, sinkt also linear mit Erhöhung des Bedeckungsgrades.

Die Methode kann als **einfache Abschätzung** verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeit von Stoffeinträgen für verschiedene Entwicklungsstadien der Kulturen im Jahresverlauf zu verdeutlichen. In Abhängigkeit von Saattermin und Kulturart entwickeln sich die Feldfrüchte unterschiedlich schnell. Dies führt v. a. zwischen verschiedenen Parzellen zu Unterschieden der Bodenbedeckung und der Abflusssituation. Die veränderte räumliche Gesamtstruktur kann oberflächliche Stofftransportprozesse im Hangeinzugsgebiet dadurch erheblich beeinflussen. Stofftransportpfade können



beispielsweise durch stark bewachsene Parzellen unterbrochen werden, die weiter unten im Hang-einzugsgebiet liegen. Aufgrund von Sedimentationsprozessen im Bestand kommt es folglich nicht mehr zum Stoffeintrag.

Der vorgelegte Ansatz versucht, die **bewuchsbedingte räumliche Strukturierung** in die Simulation zu integrieren und so zu einer optimierten Abbildung des Eintragspotentials für die spezifische Einzelsituation zu gelangen.

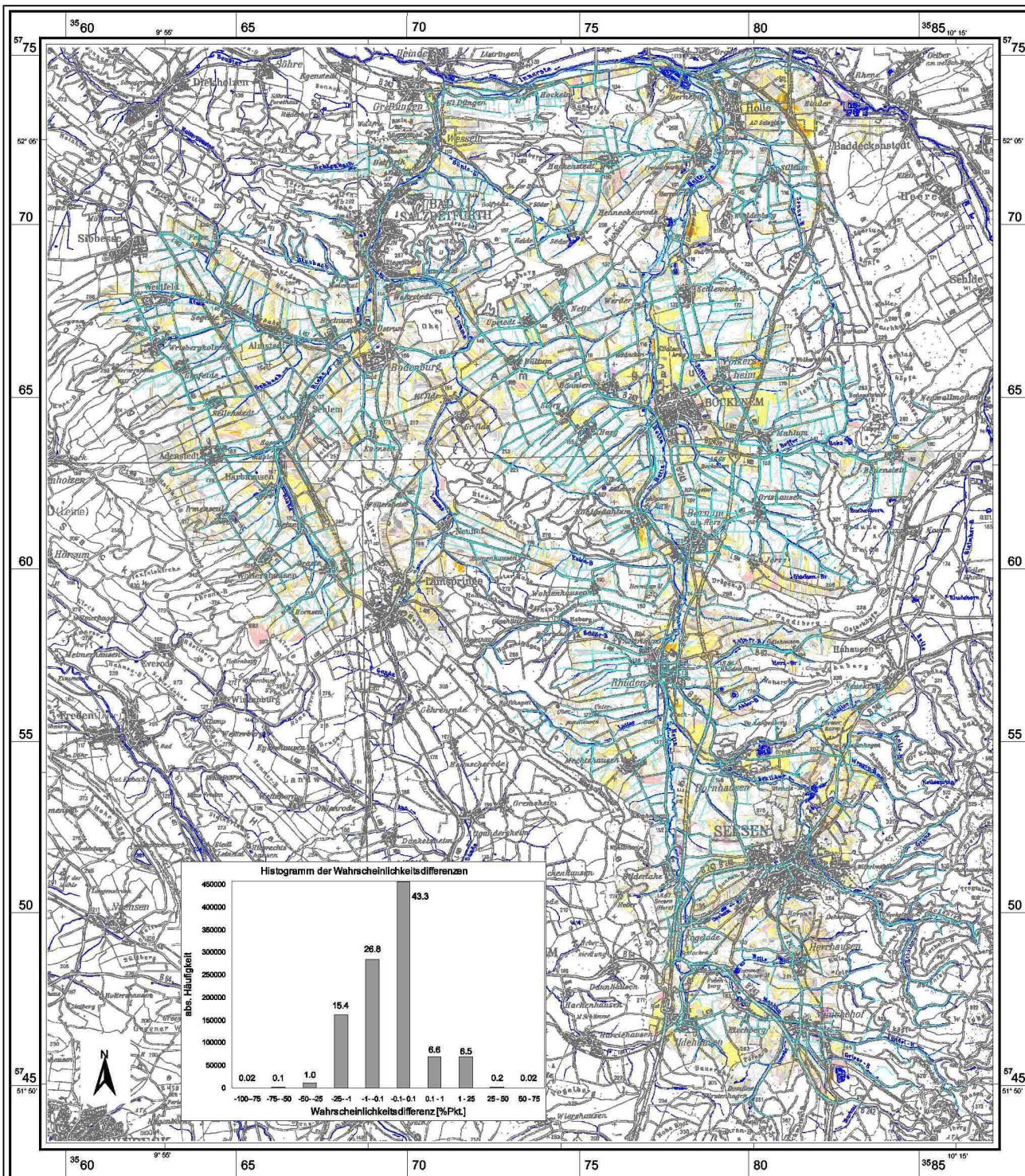
## 8.2. Veränderte Raumstrukturen

Mit dem Szenario „veränderte Raumstruktur“ wird der Einfluss von direktabflusswirksamen linearen Raumstrukturelementen auf den Anbindungsgrad überprüft. Auf dieser Maßstabsebene sind im Modell zusätzlich zum hochauflösenden Gewässernetz Strukturen, wie Verkehrswege und Nutzungsgrenzen, integriert. Da die Raumstrukturelemente den Verlauf der Stofftransportwege beeinflussen, muss sich dies über die Parameter Oberflächenabfluss, Stofftransportkapazität und Transportpfaddistanz auf den prognostizierten Gewässeranbindungsgrad niederschlagen. Wirkungen auf die Bodenerosionsgefährdung sind v. a. aufgrund einer veränderten Hanglänge zu erwarten. Für die Simulation werden die bei der ursprünglichen Modellierung integrierten Raumstrukturelemente aus dem DGM eliminiert. Die Algorithmen zur Anbindungsgenerierung werden *ohne* Raumstrukturelemente neu durchgerechnet.

Die zellenbezogene Subtraktion der Wahrscheinlichkeitswerte ergibt das räumliche **Verbreitungsmuster der Wahrscheinlichkeitsdifferenzen** (Karte 17). Ein negativer Rasterwert steht für einen erhöhten Anbindungsgrad bei Eliminierung der Raumstrukturen, ein positiver Wert für einen verminderten Anbindungsgrad gegenüber der ursprünglichen Modellierung.

Auf einem Großteil der Ackerfläche treten durch die Raumstrukturelemente keine Veränderungen des Anbindungsgrades auf (43 %-Pkt.). Entweder existieren für die betreffenden Bereiche keine Raumstrukturen oder die Einwirkung ist aufgrund der großen Entfernung der betreffenden Flächenbereiche zu den Strukturen unmöglich. Die Karte zeigt nur vereinzelt Bereiche (ca. 1 % aller Fälle) in denen die Abweichung des Anbindungsgrades 25 %-Pkt. übersteigt. 22 % der Rasterzellen unter Ackernutzung sind von Veränderungen bis zu 25 %-Pkt. betroffen. Weitere 33 % weichen nur in Nuancen von der ausganglichen Eintragswahrscheinlichkeit ab. Da die integrierten Strukturelemente zumeist im Gewässerrandbereich liegen, säumt ein schmales paralleles Band mit sehr geringen Anbindungsgraddifferenzen (-1 bis +1 %-Pkt.) die Gewässer.

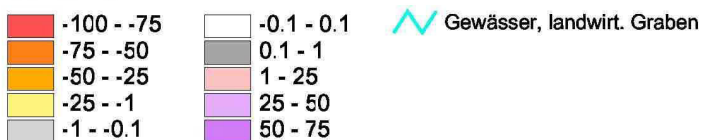




**Abweichung des Anbindungsgrades bei Eliminierung von linearen Raumstrukturelementen**  
 Nette- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)

Veränderung des Anbindungsgrades bei Ignorierung von Raumstrukturen

Differenz [%Pkt.]



**Datenbasis:**

ATKS: DLM2/1, DGM50; Blatt 3826, 3925, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 MI: Erlaubnis d. Hsrg. vom 8.5.96, Az.: B 2-A, 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Rasterdaten TK 100, Blatt C3922/26, C 4322/26  
 MI: Erlaubnis d. Hsrg. vom 15.09.97, Az.: 52-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BJK 50; Blatt L 3924, L 3926, L 4124, L 4129  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NIBIS)  
 MI: Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLFB)



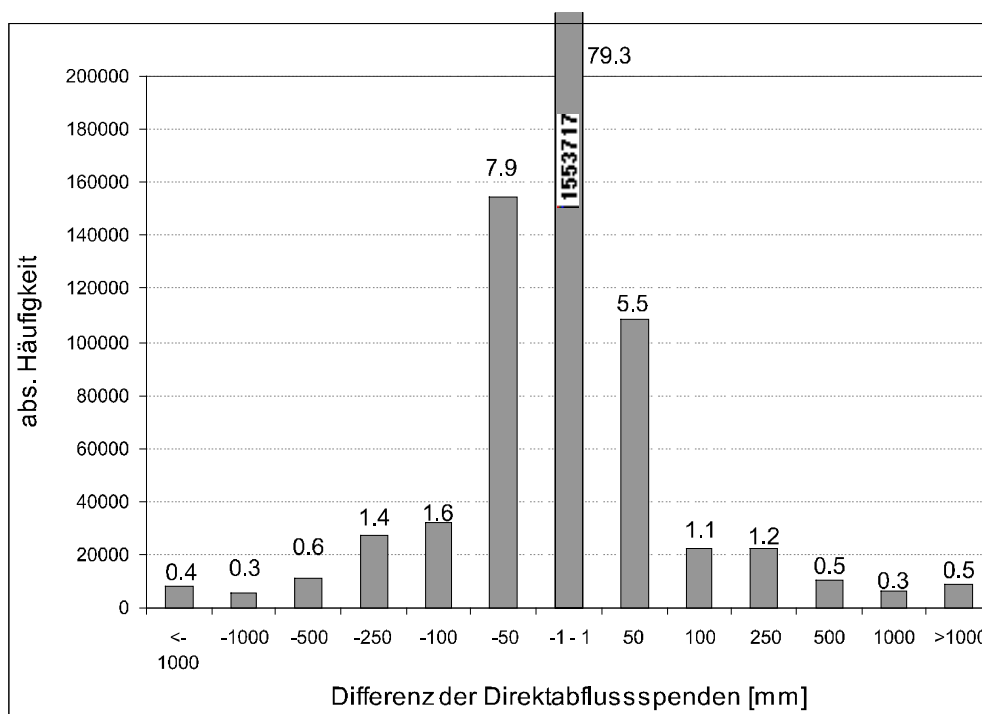
Geographisches Institut  
 Universität Hannover  
 Physische Geographie und Landschaftsökologie

Karte 17: Abweichung des Anbindungsgrades bei Eliminierung von Raumstrukturelementen



Anhand des **Teilprozesses Oberflächenabfluss** lässt sich der Effekt der Raumstrukturelemente auf den Transportweg eingehender untersuchen (Abb. 50). Knapp 80 % aller Rasterzellen sind nicht von der Variation der Oberflächenabflüsse betroffen. Bei den verbleibenden 20 % treten bei Vernachlässigung der Raumstrukturelemente z. T. beachtliche Abweichungen auf. Bei fast 10 % aller Standorte erreicht die Abflussdifferenz z. T. extreme Unterschiede von mehr als 1000 mm. Solche Extrema hängen ursächlich mit der räumlichen Verschiebung von generierten Stofftransportwegen zusammen. Die Veränderung des DGM im Zuge der Raumstrukturintegration führt dazu, dass der simulierte Abfluss nicht entsprechend der ursprünglichen Geländeneigung abläuft. Vielmehr strömt er verstärkt in abflussfördernden Strukturen ein bzw. verläuft entlang abflusshindernder Strukturelemente.

Für die Praxis des **Gewässerschutzes** kann die Vernachlässigung von Raumstrukturen bei Abflussanalysen auf Modellbasis erhebliche Konsequenzen haben. Wenn es darum geht, bei schmalen finanziellem Budget die wirkungsvollste Position eines Gewässerrandstreifens genau zu identifizieren, ist die möglichst lagegenaue Prognose der potentiellen Übertrittsbereiche erforderlich. Lässt die Modellsimulation die zumindest lokal starken Einflüsse der Raumstrukturelemente ausser Acht, kann das zu ungenaueren Prognosen der Eintragstellen führen. Die Folge könnte die Anlage von Gewässerschutzstreifen an wenig eintragsrelevanter Position sein.



**Abb. 50: Differenzen der Direktabflussspende im Gesamtgebiet bei Vernachlässigung von linearen Raumstrukturelementen (Verkehrswegenetz und Nutzungsgrenzen)**

**Fazit**

Auf ca. 8 % der Ackerflächen, das sind ca. 19 km<sup>2</sup>, beeinflussen lineare Raumstrukturelemente den **Flächenanbindungsgrad** stark. Auf ca. 22 % (= 52 km<sup>2</sup>) sind leichte Einwirkungen auf den Anbindungsgrad festzustellen. Sind die starken Unterschiede in der Anbindungswahrscheinlichkeit linienhaft im Raum angeordnet, ist das auf die unterschiedliche Raumposition der generierten Abflussbahnen zurückzuführen. Das Auftreten zusammenhängender Areale begründet sich mit der flächigen Wirkung von Distanzparametern der Anbindung. Da z. B. der Verlauf der generierten Transportpfade von Raumstrukturen beeinflusst ist, ändern sich auch die entsprechenden Transportpfaddistanzen mehr oder weniger stark.

Für den **Teilprozess Direktabfluss** kann auf ausgewählten Standorten die Eliminierung der Strukturen erhebliche Konsequenzen bei der lagegenauen Prognose von Eintragsbereichen nach sich ziehen. Gerade für eine GIS-gestützte automatisierte Generierung der Übertrittsbereiche ist die Integration von abflussverändernden Raumstrukturelementen notwendig, um durch eine präzisere Verortung der potentiellen Gefährdungsbereiche einen effektiveren Gewässerschutz ermöglichen zu können. Für die Modellierung der exakten abflussverändernden Wirkung von Raumstrukturen unterschiedlichen Typs sind weitere empirische Felduntersuchungen erforderlich (Messung der kanalisierenden oder retensiven Wirkung).

**8.3. Stoffretention in Kleinstezugsgebieten von temporären Gräben**

Eine Möglichkeit, den Feststoffeintrag in Fließgewässer zu reduzieren, besteht in der vollständigen Feststoffretention durch wasserbauliche Maßnahmen in Einzugsgebieten der Kleinstgewässer. Die Wirkung von Wasserrückhaltmaßnahmen in der Fläche ist unzureichend untersucht. Bei Ereignissen mittlerer Jährlichkeit deutet sich allerdings eine starke hochwasserentschärfende Wirkung an (A. BRONSTERT U. A. 1995). Ein Stoffrückhalt lässt sich in temporär wasserführender Gräben erreichen:

- über den Einbau kleiner simpler Staustufen (z. B. Holzverschalung mit Überfall),
- durch die konsequente Reduzierung des Grabengefälles,
- durch die Anlage kleinerer Regenwasserrückhaltebecken oder Überflutungsareale am Auslass von Kleinstezugsgebieten (s. H.-R. VERWORN 1987, J. KORAL & A.C. SAATCI 1976),
- über eine verminderte Durchflussmenge z. B. durch reduzierten Einsatz von Drainagesystemen oder Regenwasserversickerung in ländlichen Siedlungen (s. F. SIEKER 1997 u. 1992).

Alle Maßnahmen bewirken durch eine Verminderung des Energiegefälles und der Durchflussrate die Reduktion der Fließgeschwindigkeit, Strömungsturbulenz und Schleppkraft des Wassers. Sie geben so die Möglichkeit zur Feststoffablagerung im Grabensystem selbst oder auf den Retentionsflächen, so dass die mitgeführten Stoffe innerhalb des Einzugsgebietes verbleiben.

Zum Hochwasserschutz im Gebiet sind Regenrückhaltebecken bereits lokal realisiert, um Überschwemmungskapazitäten und Sedimentationspotential bereitzustellen. Regenrückhaltebecken mit natürlicher Pflanzenbedeckung und zusätzlicher Anlage von Faschienen sind geeignet, den Sedi-  
menteintrag aus Einzugsgebieten 1. Ordnung um 70 % zu reduzieren (J. BAADE U. A. 1993). Bei Kleinstgerinnen wirkt diese Maßnahme aufgrund der geringeren Durchflussmenge ebenso effektiv.

Im Rahmen der **Simulationsrechnung** werden sämtliche künstlichen Gräben ermittelt, die periodisch oder episodisch Wasser ableiten. Somit bleiben die permanenten Fließgewässer und die dauernd wasserführenden Gräben zurück. Für die selektierten Grabenabschnitte berechnet ein Algorithmus die Hangeinzugsgebiete und stuft sie über eine Codierung als zusätzlich abgekoppelte Areale ein.

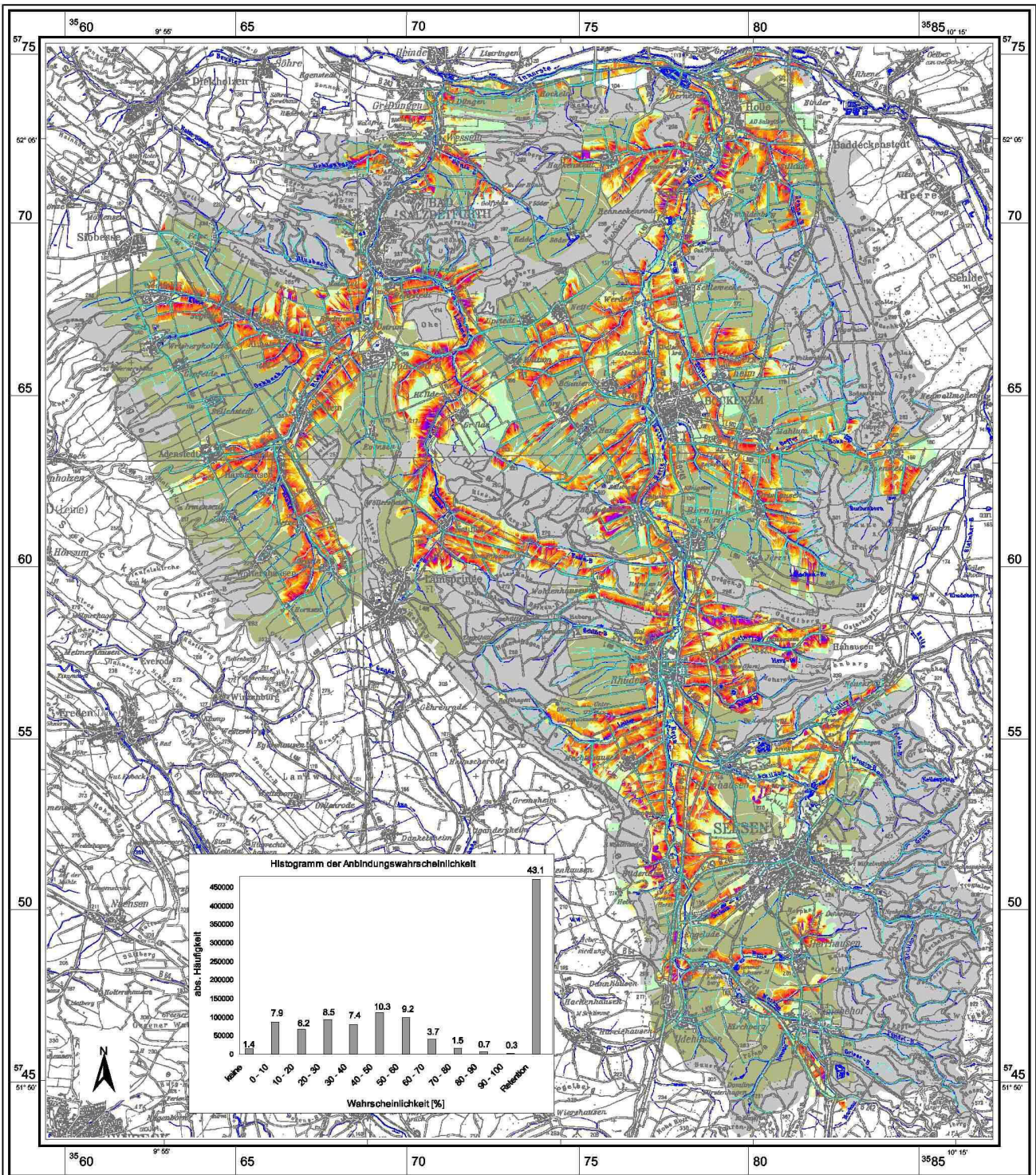
Die **Annahme** unterstellt somit, dass die erodierten Feststoffe aus den Einzugsgebieten wegen der Retentionsmaßnahmen sedimentieren und nicht bis zu den ständig wasserführenden Gräben und Fließgewässern weitertransportiert werden. Wenn die Sedimentmenge im Grabensystem ein tolerierbares Maß überschritten hat, wird das Grabensystem ausgekoffert und das Bodenmaterial zurück auf die Äcker verbracht. In den abgekoppelten Einzugsgebieten der Gräben findet zwar weiterhin Bodenumlagerung statt, das Bodenmaterial verlässt aber nicht mehr das Gesamtflusseinzugsgebiet (definitiver Bodenverlust). Gleiches gilt auch für die an die Bodenmatrix gebundenen Stoffe.

Durch eine konsequente Retention dieser Art ließe sich ein erheblicher Anteil der gesamten agrarischen Nutzfläche (43 %) von den Fließgewässern abkoppeln (Karte 18). Die raumbezogene Betrachtung zeigt eine starke Verbreitung der mehr oder weniger angebundenen Flächen um die permanenten Gewässer herum. Der obere Teil der Kleineinzugsgebiete ist größtenteils vollständig abgekoppelt, liefert also keine Stoffe an die Fließgewässer. Die Einzugsgebiete von Gräben, die die Fließgewässer direkt säumen, sind ebenfalls oft abgekoppelt. Die Gräben halten trotz der Fließgewässernähe die Feststoffe zurück.

Wie das **Histogramm** dokumentiert, entsprechen sich die relativen Häufigkeitsverteilungen der Eintragungswahrscheinlichkeit aus der Modellierung *mit* bzw. *ohne* Retentionsmaßnahme. Dabei ist die absolute Flächengröße in jeder Anbindungsklasse auf etwa die Hälfte reduziert. Gelten Flächenbereiche ab dem Limit von 50 % Eintragungswahrscheinlichkeit als „angebunden“, können bei Umsetzung der Retentionsmaßnahmen noch ca. 15 % der Ackerfläche Stoffe an die Fließgewässer liefern.

Werden nicht für alle zeitweise wasserführenden Gräben Retentionsmaßnahmen durchgeführt, sondern nur für diejenigen, die laut Landwirtebefragung praktisch das ganze Jahr über kein Wasser führen, lassen sich ca. 13 % der landwirtschaftlichen Fläche von den Fließgewässern abhängen. Eine derartige Maßnahme ist noch immer recht wirkungsvoll und zudem viel leichter durchzusetzen.





**Feststoffretention in zeitweise wasserführenden Gräben**  
 Nette- und Lammeeinzugsgebiet (Innerste-Bergland)



**Gewässeranbindungsgrad**  
 Wahrscheinlichkeit des Feststoffeintrags [%]

- |                     |          |                                 |
|---------------------|----------|---------------------------------|
| abgekoppeltes Areal | 50 - 60  | Fläche ohne Stofflieferfunktion |
| 0 - 10              | 60 - 70  | Siedlung                        |
| 10 - 20             | 70 - 80  | Gewässer, landwirt. Graben      |
| 20 - 30             | 80 - 90  |                                 |
| 30 - 40             | 90 - 100 |                                 |
| 40 - 50             |          |                                 |

**Datenbasis:**  
 ATKIS: DLM25A, DGM50; Blatt 3826, 3925, 3926, 3927, 4025, 4026, 4126, 4127  
 Mit Erlaubnis d. Hrg. vom 8.5.96, Az.: B 2-A 14/96;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 Restdaten TK 100, Blatt C 3922/26, C 4322/28  
 Mit Erlaubnis d. Hrg. vom 15.09.97, Az.: 52-1116/97;  
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
 BÜK 50: Blatt L 3924, L 3926, L 4124, L 4126  
 Nieders. Bodeninformationssystem (NBIS)  
 Mit Erlaubnis d. Nieders. Landesamt f. Bodenforschung (NLfB)



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

(c) J. Voges 1999

Karte 18: Feststoffretention im Einzugsgebiet zeitweise wasserführender Gräben

Die Ergebnisse lassen sich aber auch unter einem anderen Aspekt interpretieren. Untersuchungen zu erosionsbürtigen Stoffeinträgen in Oberflächengewässer, die nicht das gesamte Gewässer- und Grabennetz inklusive der sporadisch wasserführenden Kleinstgerinne in ihre Betrachtungen mit einbeziehen, kommen zu verfälschten Abschätzungen. Einer umfassenden Analyse zu Herkunft, Eintragsstelle und Quantität von gewässerbelastenden Stoffen muss demnach die **hochauflösende Erfassung des Entwässerungssystem** inklusive der Gräben und Kleinstgerinne vorausgehen.

### Fazit

Dem Gewässerschutz steht mit der Maßnahme „**Retention von Feststoffen**“ im zeitweise wasserführenden Grabennetz oder auf Retentionsflächen ein effektives Instrument zur Verfügung, mit dem sich mehr als 40 % der Ackerfläche definitiv von Fließgewässern abhängen lässt. Als positiver Nebeneffekt der Rückhaltestrategien vollzieht sich der Wasserablauf verlangsamt über einen längeren Zeitraum, so dass die Abflusswelle insgesamt flacher wird. Dies führt zur Kappung der Hochwasserspitzen, die im Unterlauf der Flüsse Überschwemmungen hervorrufen können.

Die Installationskosten können je nach gewählter Variante sehr hoch sein. Zudem fallen erhöhte Kosten für die Grabenpflegemaßnahmen an (periodisches Ausheben). Durch den Aufstau im Grabensystem kann es zu höherer Bodenfeuchte oder Vernässung der grabennahen Ackerfläche kommen.

Grundsätzlich sollte ein Gewässerschutz die Ursachen der stofflichen Belastungen an der Wurzel bekämpfen (s. TH MOSIMANN 1995). Die belastenden Stoffe müssen in der Fläche gehalten werden, so dass erst gar kein übermäßiger Transport stattfinden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Boden wichtige Funktionen im Landschaftshaushalt (Abflussregulation, Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion usf.) übernimmt, die u. a. auch von seiner Gründigkeit abhängen (TH. MOSIMANN 1998). Daher ist der Einsatz flächig greifender angepasster Bodenerosionsschutzmaßnahmen zu favorisieren. Der Erosionsschutz kann nicht nur die stofflichen Belastungen in den permanenten Fließgewässern, sondern gleichzeitig auch die onsite-Schäden wirksam verringern.

Maßnahmen zum Rückhalt von erodierten Feststoffen sind in Fällen geeignet, wo sich aus Gründen mangelnder Akzeptanz oder problematischer Raumbedingungen Bodenschutzkonzepte weniger wirksam verwirklichen lassen. Retentionsmaßnahmen sind ferner in Kombination mit anderen Gewässerschutzstrategien sinnvoll einzusetzen, wenn der Stoffeintrag Ausmaße erreicht, die durch eine isolierte Maßnahme allein nicht in den Griff zu bekommen sind.



## 9. MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER GIS-GESTÜTZTEN BESTIMMUNG DER FLÄCHENANBINDUNG

### 9.1. Der Ansatz „Gewässeranbindung“, wozu ?

Aufgrund der Komplexität der Prozesse im Wirkungsgefüge des Landschaftsraumes lässt sich ein effizienter **Gewässerschutz** in ausgedehnten Flussgebieten nur in Form eines umfassenden, flächenhaft und gleichzeitig örtlich gezielt greifenden Einzugsgebietsmanagements erreichen. Umfangreiche raumbezogene Daten zu Klima, Boden, Nutzung, Relief, geologischer und hydrologischer Situation müssen in einem Informationssystem strukturiert vorgehalten werden, um für große Flussgebiete Gewässerschutzmaßnahmen planen und umsetzen zu können. In Zeiten finanzieller Mittelknappheit sind für die Wahl einer Maßnahme die Fragen nach der Maßnahmenwirksamkeit und der Kostenwirksamkeit von Bedeutung. So lässt sich durch die Modellierung der Stoffflüsse auf der Maßstabsebene von kompletten Flussgebieten (mikroscale) klären, in welchen Teileinzugsgebieten mit welchen Regelungen sich für bestimmte Stoffe die stärkste Wirkung erreichen lässt (R. MULL U. A. 1999, J. KUNZE 1999). Für gezielte Schutzmaßnahmen ist die genaue Quelle sowie der Belastungspfad der ins Gewässer eingetragenen Stoffe von Relevanz. Im Falle von partikelgebundenen Stoffen, im speziellen von Phosphor, heißt dies: Es müssen solche Raumbereiche identifiziert werden, die einerseits Feststoffe mobilisieren können, d. h. erosionsgefährdet sind, und die andererseits Stoffe in das Gewässer einzutragen vermögen, d. h. mit dem Gewässer mehr oder minder verbunden sind.

Der Gewässerschutz muss über den **Bodenschutz** wirksam in der Fläche selbst betrieben werden, *auch* um die Funktionsfähigkeit des Bodens als Puffer, Filter und Transformator für Stoffe zu erhalten. Die Filterwirkung von Uferstreifen hat nur marginale Bedeutung und wurde in der Vergangenheit überschätzt (M. BACH U. A. 1997). Die unter Berücksichtigung der ökologischen Bodenfunktionen notwendige uneingeschränkte Erhaltung *aller* Böden mit tolerierbaren Abtragsraten von weniger als 1 t/ha\*a lässt sich aber politisch nicht umsetzen (TH. MOSIMANN 1995). Während auf der Beratungsebene die Bodenerosionsbekämpfung in der Fläche erforderlich ist, sind auf der Vollzugsebene stark exponierte Risikoflächen auszuwählen. Denn hier sind die Maßnahmen dringlich, d.h. kurzfristig notwendig (TH. MOSIMANN 1998). Ein sinnvolles effizientes Managementsystem muss folglich Aspekte des Boden- *und* des Gewässerschutzes gleichermaßen berücksichtigen.

Hier greift das **Prinzip** „**Gewässeranbindung**“. Es geht darum Eintrag-liefernde Flächen bzw. Raumeinheiten herauszufiltern, um die gewässerbelastenden Stoffe (Nähr- und Schadstoffe, Pflanzenschutzmittel) frühzeitig am Ort zu binden oder zumindest den Transport bis zum Oberflächengewässer zu verhindern. Mit einem solchen Vorgehen können gleichzeitig die Schutzgüter Boden und Gewässer durch Maßnahmen effektiv geschützt bzw. die Schäden eingedämmt werden. Mit



diesem Ansatz lassen sich unterhalb der Ebene von Teileinzugsgebieten lagegenau die relevanten Areale prognostizieren, auf denen die Schutzmaßnahmen umgesetzt werden müssen. Besonders bedeutend für die Gewässerbelastung und damit prioritär für den Gewässerschutz sind gewässernahe, erosionsgefährdete Flächen hoher Stofftransportkapazität im Bereich von abflusssammelnden Relief- oder Raumstrukturen unterhalb größerer Hangeinzugsgebiete.

Für die **praktische Umsetzung** ist neben der Frage nach der Effizienz auch die Frage nach der Akzeptanz bei den Betroffenen für den Erfolg von Schutzmaßnahmen von Bedeutung. Akzeptiert werden Maßnahmen u.a. dann, wenn sie kostenwirksam sind. D. h. wenn zuerst jene Maßnahmen ergriffen werden, die pro reduzierter Einheit des eingetragenen Stoffes die geringsten Kosten für den Landwirtschaftsbetrieb darstellen (H.-G. FREDE & S. DABBERT 1998). Dies wird dadurch erreicht, dass zunächst auf den relevantesten Lieferflächen agiert wird. Nur, wenn sich das Schutzziel auf diese Weise nicht erreichen lässt, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden. Zum anderen ist es wichtig, dass die Ergebnisse der Flächenauswahl (Modellresultate) für die Landwirtschaft transparent und plausibel erscheinen. Sie sollten daher –wie im vorliegenden Modell– auf realen Felddaten basieren und nicht auf theoretischen Gleichungssystemen aufbauen. Aufwendig gerechnete komplexe Modelle übersteigen oft die Kapazitäten der Praxis (Landwirtschaftsberatung), auch wenn sie sich im Ergebnis als nachvollziehbar erweisen (H. LESER 1997).

Zur Validierung der Modellergebnisse kann zudem der Kartierbogen eingesetzt werden, um auf den selektierten Lieferflächen im Gelände eine weitere Differenzierung hinsichtlich des prognostizierten Anbindungsgrades vorzunehmen (vgl. Abb. 4). Somit besteht die Möglichkeit, die stark eintragsrelevanten Parzellenbereiche auf unterster Maßstabsebene auszuweisen und Schutzmaßnahmen wie Bewirtschaftungsänderungen oder lokal angelegte Gewässerrandstreifen vor Ort zu entwickeln. Dieses Vorgehen erleichtert die Umsetzung im betroffenen Landwirtschaftsbetrieb, da es die Zusammenarbeit von Boden- bzw. Gewässerschutzinstitution und Landwirtschaft fördert (TH. MOSIMANN 1998).

Dem Problem der Gewässeranbindung kann man sich nur über eine Analyse des Raumes und seiner Struktur nähern. Das starke Interesse am Raumproblem in den Geowissenschaften begründet sich in ihrem Arbeitsfeld selbst. Da zeitvariable Phänomene und Prozesse erforscht werden, die sich in der Dreidimensionalität des Raumes abspielen, müssen Aspekte des komplexen Raumes berücksichtigt werden (TH. MOSIMANN 1997). Dabei wird das Raumproblem in Modellen häufig durch Vereinfachungen gelöst oder bleibt unbeachtet (H. LESER 1997). Bei komplexen hochentwickelten Standortmodellen kann ein Standort (Punkt) als homogene Einheit betrachtet werden, denn er ist ein einheitlich strukturiertes oder einheitlich wirkendes Raumelement. Bei praktischen Fragestellungen werden solche Ansätze häufig auf große Raumeinheiten übertragen, obwohl die Homogenität im Raum nicht mehr gegeben ist (H.-B. KLEEBERG 1992). Da die Ableitung der Anbin-

dung von Ackerflächen an Gewässer in starkem Maße als Raumstrukturproblem zu bezeichnen ist und dahingehende Überlegungen in das Modellkonzept integriert sind, kann man die Untersuchung allgemein als Beitrag zum Verständnis des Landschaftsraumes auffassen.

## 9.2. Methodik

Der Anbindungsgrad von Agrarflächen an Fließgewässer ist im mittleren Maßstabbereich ausschließlich modellgestützt zu erfassen (s. H. LEHMANN & H.O. ZINTZ 1993). Für Teilbausteine der Simulation lassen sich sicherlich andere Modelle, wie z. B. AnnAGNPS (annualized Version unter: [HTTP://WWW.SEDLAB.OLEMISS.EDU/AGNPS98/MODEL.HTML](http://www.sedlab.olemiss.edu/agnps98/model.html)), anwenden, die ähnliche Datenanforderungen besitzen. Der Einsatz sehr viel komplexerer, wie z. B. physikalischer Modelle, muss dabei keine wesentliche Ergebnisverbesserung bringen. Ein Großteil der erforderlichen Eingangsdaten ist nicht gebietsweit verfügbar und lässt sich auch nicht stringent aus Primärdaten ableiten (D. I. MÜLLER-WOHLFEIL & S. MIELBY 1998). Deshalb müssen bei Anwendung komplexer Modelle im mesoscale die Randbedingungen weitgehend vorgegeben oder Standardinformationen verwendet werden, um die Datenlücken zu schließen. Dies kommt einer Vereinfachung des Landschaftsraumes in Form einer Simplifizierung der Modellgrundlage gleich, die sich in der Qualität des Resultates auswirkt.

### Datenanforderungen

Die **Eingangsdaten** weisen Ungenauigkeiten auf, die sich über die Fehlerfortpflanzung auch im Modellergebnis widerspiegeln. Z. T. können die Fehler mehrfach eingehen, wenn bestimmte Parameter für verschiedene Teilberechnungen mehrfach Verwendung finden. Die Qualität (Auflösung) des DGMs hat dabei einen weitreichenden Einfluss auf die Genauigkeit der Oberflächenanalyse (generierter Oberflächenabflussverlauf, Hanglänge, Einzugsgebietsgröße etc.). Durch die künftig verbesserten Höhenmodelle lässt sich die Qualität der Modellsimulation aber erhöhen.

Der Einfluss von nicht prognostizierbaren **Zufallserscheinungen**, die im Einzelfall wesentlich das Übertrittsgeschehen und damit die Gewässeranbindung bestimmen können, lässt sich im Modell weder einbeziehen noch quantifizieren. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich langfristig die Effekte von kleinräumig auftretenden Strukturen z. T. durch Mittelung reduzieren. Da die Strukturen ihre Wirkung in Abhängigkeit von ihrer wechselnden Raumposition mal in diesen mal in jenen Arealen ausüben, wird das Ausmaß des Einflusses langfristig geringer ausfallen als bei spezifischen Einzelereignissen. Ebenso geht der Einfluss von Extremwerten auf die mittleren Verhältnisse einer statistischen Stichprobe (Mittelwert) bei Zunahme des Stichprobenumfangs grundsätzlich zurück.

Ein wesentliches **Problem der erfassten Eingangsdaten** liegt in ihrer spezifischen Ausprägung entsprechend dem jeweiligen Niederschlagsereignis, dem Nutzungszustand und der vorangegangenen Witterung. Mit den Flächenkartierungen und Befragungen wurde eine sehr breite Daten-

grundlage zum Stoffeintrag in die Gewässer geschaffen. Dennoch sind zur Steigerung der Datenrepräsentativität weitergehende Erhebungen notwendig.

Unter Verwendung des Reliefmodells und der Parzellenanordnung lassen sich die Effekte von Bearbeitungsrichtung und linearen **Strukturelementen** im Modell angenähert simulieren (J. BIERBAUM 2000). Raumstrukturelemente auf Ackerparzellen und im Gerinnenrandbereich üben einen starken Einfluss auf den Oberflächenabfluss aus. Sie müssen daher auch im mittleren Maßstab detaillierter integriert werden. Zur Datengenerierung ist die Erfassung der Parzellenstruktur wie auf der DGK 5 notwendig und über Fernerkundungsdaten auch realisierbar.

### **Modellierung mit GIS**

Das Modell bildet ein Instrumentarium für ein effizientes, in der Fläche greifendes Einzugsgebietsmanagement. Es kann einen Beitrag zur optimierten Planung von Maßnahmen des Gewässerschutzes leisten, und dient somit der Verbesserung der stofflichen Situation in Oberflächengewässern.

Das Simulationsmodell ermöglicht im mesoscale die Bestimmung von eintragsrelevanten Flächen für große Flusseinzugsgebiete. Die Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages in Gewässer lässt sich flächendifferenziert in hoher räumlicher Auflösung ablesen. Dadurch ist die relative Bedeutung verschiedener Raumbereiche zueinander erkennbar. Die Modellalgorithmen gründen sich auf erprobte Standardverfahren zur Prozessabbildung, die z. T. durch Modifizierungen optimiert wurden. Zusätzlich sind einige für die Anbindung besonders wichtige Einflussgrößen im Modell implementiert. Die Modellkonzeption und –kalibrierung basiert auf umfangreichen Felddatenerhebungen zum Stoffeintrag in Oberflächengewässer. Dies entspricht der Forderung, nach der Prognosemodelle auf intensiven Felderhebungen aufbauen sollten (E. PLATE 1992).

Das Prognosemodell ist, wie viele andere Modelle (K. AUERSWALD & U. SCHWERTMANN 1990), nicht validiert. Dies muss mithilfe weiterer Geländeerhebungen von verschiedenen Erosions- und Übertrittseignissen sowie mit den dazu notwendigen Häufigkeits- und Regressionsanalysen erfolgen. Zu der Erfassung von realen Liefergebieten durch Erosionsschadens- und Raumstrukturkartierungen in Teilausschnitten des Landschaftsökosystems ist kaum eine sinnvolle Alternative erkennbar. Das Liefergebiet fasst als integrierende Raumeinheit die komplexen Prozesse des Stoffabtrags, -transportes und -eintrages zusammen. Diese Datengrundlage ermöglicht umfassende raumbezogene Analysen mit GIS und Datenbankmanagementsystemen.

**Modelle** sind vereinfachte Abbildungen einer Vorstellung eines Wirklichkeitsausschnittes. Sie haben das Ziel, Verhaltensmuster von Variablen im Raum abzubilden und ermöglichen Untersuchungen zur Wirkung szenarisch veränderter Randbedingungen (s. H. LESER 1997). Dazu greifen die Mo-

delle auf Eingangsdaten mit unterschiedlicher Qualität zurück. Sie weisen daher Schwächen auf, die sich im Modellfehler zeigen.

Das **Modell zur Bestimmung der Gewässeranbindung** ist für den mittleren Maßstabsbereich konzipiert. Es kann die Prozesse, die zum Eintrag in Gewässer führen, nur unvollständig abbilden. Im Berechnungsalgorithmus müssen empirische Schätzverfahren eingesetzt werden, um die Abträge durch Bodenerosion und den Oberflächenabfluss zu berechnen. Von der Oberflächenabflussmenge hängen wiederum die Stofftransportkapazität und der Abfluss im Gerinne ab. Dabei bleiben wesentliche flächenvariable Einflussfaktoren (Bodenfeuchte, Interzeption, Bewuchsdichte, Bearbeitungszustand u.s.f.) unberücksichtigt bzw. werden in empirischen Berechnungsfaktoren aufgelöst, die aus stark vereinfachenden Prozessvorstellungen abgeleitet sind. Die empirischen Verfahren müssen notwendigerweise an die speziellen geoökologischen Raumbedingungen angepasst werden. Weil ausreichend dichte Messungen für große Gebiete nicht realisierbar sind, kann dies nur unzureichend geschehen.

Da sich die Problematik der Gewässeranbindung nur raumdifferenziert modellieren lässt, ist der Einsatz eines **Geographischen Informationssystems** für die Problembewältigung unumgänglich. Mit ihm lassen sich die umfangreichen raumbezogenen Daten digital erfassen, redigieren, speichern, reorganisieren, modellieren und präsentieren (R. BILL & FRITSCH 1991). Durch Implementierung von GIS-Technologien lassen sich für große Gebiete raumbezogene Aufgaben produktiver und exakter lösen, ohne einen exzessiven Kostenanstieg zu verursachen (W.E. HUXHOLD & A.G. LEVINSOHN 1995). Der Einsatz von GIS-Applikationen führt bei hydrologischen Fragestellungen zu einer neuen Qualität bei der Durchführung von „Planung“ (P. RULAND & G. ROUVÉ 1995). Die Attraktivität von GIS im Bereich der mittel- und kleinmaßstäbigen Modellierung wird weiter zunehmen, da durch eine Vielzahl fachdisziplinärer Basisvorhaben künftig ein großes Datenpotential für sektorale GIS-Applikationen bereitsteht (R. BILL 1996). Die vollständige Integration von Simulationsmodellen in GIS erweitert dabei das Anwendungsspektrum von GIS erheblich und erlaubt den Aufbau fachspezifischer Informationssysteme. Neue objektorientierte Programmierumgebungen erleichtern die technische Umsetzung und die Bedienung von Simulationsmodellen (s. D.-I. MÜLLER-WOHLFEIL & S. MIELBY 1998, P. RULAND & G. ROUVÉ 1995).

### 9.3. Perspektiven

Die Implementierung des Modells in ein Geographisches Informationssystem hält das Potential für **mögliche Modellerweiterungen und -verbesserungen** weitgehend offen.

Da die physikalischen Grundprinzipien hydrologischer Prozesse meist gut erforscht sind (A. HERMANN & O. RICHTER 1997), sind die Verbesserungen v. a. an eine größere Verfügbarkeit bzw. Verfügbarmachung flächenhafter Eingangsdaten gebunden. Das **Datenproblem** limitiert weiter-

gehende Modellsimulationen heute sehr wesentlich (R. Duttmann 1999). Für die großskalige Simulation in großräumigen Einzugsgebieten ist in diesem Zusammenhang die weitere Forschung verstärkt auf die Konzeption und Validierung von **Regionalisierungsansätzen** zu richten. Im Wesentlichen sind (immer noch) zwei Fragenkomplexe anzugehen:

- Wie gelangt man vom punktuellen Einzelwert zu einer flächenhaften Aussage ?
- Wie lassen sich generalisierte Daten größerer Raumeinheiten (z. B. Bodentyp) disaggregieren ?

Kurzfristig erscheint in diesem Zusammenhang die Entwicklung von statistisch-empirischen Lösungsansätzen als vielversprechend, mittelfristig werden bei zunehmend größerer Datenverfügbarkeit auch physikalisch begründete Simulationsmethoden weiter an Bedeutung gewinnen.

Die Abschätzung des **Stofftransportes im Grabensystem** sollte Ziel weiterer Forschung sein. Gestützt auf breit angelegte Messungen ist zu quantifizieren, wieviel des eingetragenen Bodenmaterials die permanenten Fließgewässer tatsächlich erreicht. Parallel dazu sollte die Menge der langfristigen Akkumulationen in periodisch und episodisch wasserführenden Gräben untersucht werden, sowie deren Abhängigkeit von Grabenstrukturparametern. Über statistische Analysen von transportierten Feststoffmengen und Einzugsgebietskenngößen lässt sich ermitteln, in welcher Form die ausgetragene Feststoffmenge (tatsächlicher Bodenverlust) von den Eigenschaften des Einzugsgebietes abhängt. Daraus sind für den mittleren Maßstab empirische Übertragungsfunktionen für das Stofftransportpotential von Gräben abzuleiten. Der Anbindungsgrad an die Fließgewässer kann dann durch einen vom Transportpotential abhängigen Reduktionsfaktor modifiziert werden.

Die **skalenübergreifende Modellierung** nimmt heute einen bedeutenden Stellenwert bei der Analyse von landschaftshaushaltlichen Prozessen ein (A. HERRMANN & O. RICHTER 1997, H.-B. KLEEGERG 1992, E.J. PLATE 1992). Beim vorliegenden Modell zählt dazu insbesondere das downscaling, das notwendigerweise mit einer Zunahme der räumlichen Variabilität der Modellparameter verbunden ist. Aufgrund des Modellaufbaus ist die Integration zusätzlicher prozessbeschreibender Einflussgrößen für den größeren Maßstabsbereich (mikroscale) leicht realisierbar. Die Grundstruktur des Modells bleibt dabei erhalten, der Modellalgorithmus wird jedoch für Gebiete mit höherer Eingangsdatendichte um weitere Parameter ergänzt.

Unter Einsatz der zukünftig verfügbaren hochauflösenden digitalen Geländemodelle (z. B. 5 m Zellenweite) wird die **Integration von mikroskaligen Raumstrukturelementen** (Uferbankette, Ackerandfurche, Vorgewende, bearbeitungsbedingte Kleinststrukturen) in die Abbildung des Reliefs möglich. Fast alle derzeit bestehenden Modellansätze weisen Defizite bei Repräsentierung der hydrologischen Bedingungen an der Landoberfläche (z. B. lokales Retentionsvermögen) und bei der Berücksichtigung von linienhaften Strukturen der Landschaft auf (A. BRONSTERT & V. KRYSANOVA 1998). Für die Parametrisierung der Raumstrukturen sind intensive Felduntersuchungen zur Wir-

kung dieser Raumstrukturelemente auf die oberirdischen Transportprozesse notwendig. DGMS mit hoher Genauigkeit ermöglichen in Verbindung mit leistungsfähigeren Rechnersystemen und höher auflösenden Satellitensystemen die Ableitung linearer Raumstrukturen auch innerhalb großer Gebiete. Eine optimierte Integration von Raumstrukturelementen verbessert im **mesoscale** die Resultate aus der hydrologischen Oberflächenanalyse. In der **topischen Dimension** ließen sich unprognostizierbare Strukturen der Bodenoberfläche durch den Einsatz von Fuzzy-Methoden und die Einführung von „chaotischen“ Prozessparametern in die Simulation implementieren (s. H. LESER & C. KEMPEL-EGGENBERGER 1997, H. BANDEMER & S. GOTTWALD 1993). Damit kann die Abbildung des Verlaufs des Oberflächenabflusses und die Prognose der Übertrittsstellen optimiert werden.

Die **Strukturierung des Agrarraumes** (Parzellenanordnung mit unterschiedlicher Bodennutzung) beeinflusst den Anbindungsgrad bei Einzelereignissen und ist deshalb stärker zu berücksichtigen. Durch die verbesserte Integration der Parzellenstruktur und zeitlich variabler Einflussparameter, wie des Bodenbedeckungsgrades, kann die Veränderung des Anbindungsgrades im Jahresverlauf besser simuliert werden. Aus einer Vielzahl von Simulationen mit parzellenbezogenen Bewuchsdichten verschiedener Kulturentwicklungsstadien lassen sich ganze Fruchtfolgen modellieren. Über die rechnerische Verknüpfung unterschiedlicher Räumuster der Anbindung (Mittelwertbildung) in Abhängigkeit von Kultur und Fruchtfolgejahr sind die mittleren Anbindungsverhältnisse eines Gesamtgebietes prognostizierbar.

Das Modell lässt sich durch die **Erweiterung der Definition des Gewässeranbindungsgrades** auf besonders gewässerbelastende Stoffe (Nähr-/Schadstoffe) ausbauen. Der Anbindungsgrad wird zusätzlich definiert über die Stoffmenge, die im angebundenen Areal für den Gewässereintrag potentiell zur Verfügung steht. Aus den unterschiedlichen Stoffmengen in verschiedenen Flächen (z. B. parzellenbezogene Dünger- oder Pestizidgabe) mit sonst gleichen Anbindungsbedingungen resultiert dann eine unterschiedliche Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages (Nährstoffeintragungspotential). Ein hoher Phosphorgehalt im Boden aufgrund übermäßiger Düngergaben beispielsweise steigert die Belastung im Gewässer und damit auch den vom Modell generierten Anbindungsgrad. Dahinter steckt die Überlegung, dass die Wahrscheinlichkeit der stofflichen Belastung im Oberflächengewässer steigt, wenn in den angebundenen Arealen ein hoher Stoffvorrat für den partikulären Eintrag zur Verfügung steht.

Bei besserer Datenverfügbarkeit können auf unterer Maßstabsebene einige Anbindungsparameter über externe hochauflösende Modelle berechnet werden. Beispielsweise bräuchte der Einsatz von EROSION-3D oder AGNPS für die Erosionsberechnung Vorteile in der Simulation von Einzelereignissen. Hier erweist sich der modulare Modellaufbau als vorteilhaft, der die Integration fremdbe-rechneter Parameter in das Modellresultat erlaubt.

Innovative Techniken bieten besondere Möglichkeiten der Ergebnispräsentation innerhalb eines Gewässerschutzkonzeptes, die die Zusammenarbeit zwischen landwirtschaftlichem Betrieb und der Schutzvollzugsbehörde fördern können. Wenn die Simulationen mit GIS realisiert werden, bietet sich die Möglichkeit, die Ergebnisse in Zukunft durch **GIS im Internet** der betroffenen Öffentlichkeit unmittelbar zur Verfügung zu stellen. Technisch ist der Online-Zugriff auf Geodatenbestände auf Basis von Standardsoftware für Inter- und Intranet mit Hilfe von GIS-Viewern bereits machbar (F. FRIEBE 1997). So lässt sich eine größtmögliche Transparenz der wissenschaftlichen Ergebnisse und ein gesteigertes Verständnis für die Einflussprozesse erzielen. Die Wissenschaft kann von dem Feedback der Betroffenen mit genauerer Geländekenntnis profitieren und die Modellierung optimieren. Somit lassen sich die Betroffenen direkt in den Entscheidungsprozess zur Konzeption des Gewässerschutzes integrieren. Dieses Vorgehen ist als vertrauensschaffende Maßnahme geeignet, die die Akzeptanz bei den Betroffenen verbessert und gleichzeitig den Modellierern einen Erkenntnisgewinn verschafft.



## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Untersuchung leistet einen Beitrag zum Verständnis des Landschaftsraumes und seiner Strukturierung im Bereich der Prozesse von partikulärem Stoffabtrag, -transport und -eintrag. Das konzipierte Modell zur Bestimmung des Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer soll einen effizienteren Gewässerschutz in der Fläche ermöglichen und dabei Bodenschutzaspekte berücksichtigen. Die Basis des Konzeptansatzes bildet die prozessintegrierende Größe „Gewässeranbindungsgrad“. Sie gibt die Möglichkeit (Wahrscheinlichkeit) an, mit der ein Flächenbereich des Landschaftsraums partikelgebunden Stoffe in ein Oberflächengewässer liefern kann.

Grundlage eines effizienten flächenhaften Einzugsgebietsmanagements (Planung und Umsetzung von Gewässerschutzmaßnahmen) mit dem Ziel einer **Reduzierung von Nährstoffeinträgen** in Gewässer ist einerseits die Kenntnis der spezifischen Nährstoffanteile an der Gesamtbelastung und andererseits das Wissen über die lokale Herkunft der eingetragenen Nährstoffe (s. A. HAMM 1991). Während hinsichtlich der Nährstoffanteile und -mengen durch eine Vielzahl auch großräumiger Untersuchungen inzwischen recht genaue Vorstellungen existieren, wurde die Frage der Stoffherkunft weniger differenziert untersucht, so dass in weiten Bereichen Wissensdefizite vorhanden sind. Um gezielt Maßnahmen zum Schutz vor diffusen Nährstoffeinträgen in Gewässer projektieren und vor Ort realisieren zu können, ist es erforderlich, die für die Stofflieferungen relevanten Areale, differenziert nach ihrer Bedeutung, im Landschaftsraum zu bestimmen. Dazu notwendig ist die hinreichend lagegenaue Ausweisung von erosionsgefährdeten Flächen, Leitbahnen des oberirdischen Stofftransportes, potentiellen Übertrittsstellen sowie die Bestimmung von Relief- und Distanzparametern, die das Stoffeintragungspotential eines Raumbereiches im Wesentlichen festlegen.

Zu diesem Zweck wurde ein rasterbasiertes empirisch-statistisches **Prognosemodell** für den mittleren Maßstabsbereich konzipiert, das es erlaubt, auf Grundlage von flächenhaft verfügbaren Eingangsdaten (ATKIS DLM 25/1, DGM 50, BÜK 50, punktuellen Niederschlagsmesswerten) mithilfe eines Geographischen Informationssystems in einem kompletten Flusseinzugsgebiet den Anbindungsgrad von Raumsegmenten an die Fließgewässer zu ermitteln.

Der **Gewässeranbindungsgrad** bezeichnet die „Intensität der Kopplung“ eines stoffeintragenden Flächenbereiches mit dem Oberflächengewässer. Er wird quantitativ ausgedrückt in Form der Wahrscheinlichkeit der partikulären diffusen Stofflieferung an Fließgewässer bei Starkniederschlagsereignissen. Der Anbindungsgrad ist eine Funktion von Prozessen der Bodenerosion, des Oberflächenabflusses, des Stofftransportes (Stofftransportkapazität, Transportpfaddistanz) und von topographischen Elementen (Raumstrukturelemente), die den Raum gliedern und die oberirdischen Transportprozesse beeinflussen. Das Anbindungsmodell wurde für ein Flusseinzugsgebiet angewendet. In Szenarien erfolgt eine Untersuchung der Effekte auf den Anbindungsgrad bei Veränderung von Landnutzungs- und Raumstrukturbedingungen.

Die **Gewässeranbindung von Agrarflächen** kann nicht über definierbare Messgrößen festgelegt werden. Sie lässt sich empirisch über Indikatoren (Spuren von Bodenerosion und Stoffeintrag) im Feld bestimmen. In vier Testgebieten des Untersuchungsraumes wurden mit Kartierungen und Befragungen zu Erosions- und Stoffübertrittsgeschehen die Prozessbedingungen beim oberirdischen Stofftransport und -eintrag im Landschaftsökosystem erfasst. Durch die Erfassung der Abtragsgebiete, der Stofftransportpfade und der Eintragsbereiche ließen sich ca. 1100 Hangeinzugsgebiete den jeweiligen Übertritten zuordnen (**reale Lieferflächen**). Die raumbezogenen Informationen wurden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) weiterverarbeitet und mithilfe von statistischen Verfahren analysiert. Eine wesentliche Basis der Untersuchungsergebnisse bilden Wahrscheinlichkeitsaussagen und umfassende Häufigkeitsanalysen.

Das **Modellgebiet** ist ein Teileinzugsgebiet der Innerste, das dem nordwestlich des Harzes gelegenen Leinebergland zugeordnet ist. Der ländlich geprägte Raum hat eine Ausdehnung von 469 km<sup>2</sup> und umfasst die Flusseinzugsgebiete von Nette und Lamme. Die Flächennutzung gliedert sich in 50 % Ackerland, 7 % Grünland, 35 % Wald und 8 % Siedlung. Auf den vornehmlich aus Parabraunerdegesellschaften bestehenden Ackerstandorten werden auf ca. 70 % der Fläche Wintergetreide und auf 30 % Zuckerrübe kultiviert.

Die wesentlichen **Einflussfaktoren des Anbindungsgrades** einer Fläche an die Fließgewässer sind: Relief, Raumstruktur, Niederschlag, Bodenerosion, Oberflächenabfluss und Feststofftransport in temporär wasserführenden Gräben. In Abhängigkeit vom aktuellen Bodenzustand (Bedeckungsgrad, Bearbeitungszustand), von den strukturellen Bedingungen (Raumstrukturanordnung, Parzellierung) und dem Niederschlag gestaltet sich das Verbreitungsmuster von Bodenerosionsschäden und Hangeinzugsgebieten der Übertritte (Liefergebiete) räumlich und zeitlich stark variabel. Die modellgestützte Ableitung der Gewässeranbindung muss daher auf Basis von langjährigen mittleren Bodenabträgen sowie von repräsentativen Standardabflusssituationen erfolgen.

In den **realen Liefergebieten** erodieren in Abhängigkeit von Art und Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses (Schneesmelze im Februar o. Starkniederschlag im Mai) im Mittel 23 bzw. 40 t/ha. Das sind bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche ca. 4,5 bzw. 2,3 t/ha. Nur 25 % des abgetragenen Materials werden in den Liefergebieten wieder akkumuliert. Die angebondenen Areale sind demnach auch in Hinblick auf die Abtragsgefährdung besonders exponiert. Die Abtragsrate in den Liefergebieten ist sehr unterschiedlich. Etwa 10 % aller angebondenen Flächen liefern drei Viertel der gesamten eingetragenen Feststoffmenge an das Gewässersystem.

Im Mittel sind 9 % der Agrarfläche (= knapp 7 % der Gesamtfläche) an Gräben und Gewässer angebonden. Bei durchschnittlicher Konstellation der Niederschlags- und Nutzungsbedingungen (Jährlichkeit ca. 1) liefern nur knapp 4 % der Agrarfläche Partikel an das Gewässersystem. Die

mittlere Lieferflächengröße liegt bei 0,4 ha. Bei sehr großen Schlägen und durch Fremdwasserzufluss liefern häufiger 40-50 ha große Hangeinzugsgebiete abgetragene Feinerde an den Übertritt. Im Maximum erreichen die Lieferflächen eine Größe von 80 ha. Der größte Anteil der Einträge verläuft punkthaft in künstliche landwirtschaftliche Gräben, ein geringer Teil geht direkt in permanente Fließgewässer.

Raumstrukturelemente der Kulturlandschaft beeinflussen die oberirdischen Stofftransportprozesse (s. A. BRONSTERT & V. KRYSANOVA 1998, B. LUDWIG 1995) und folglich auch den Gewässeranbindungsgrad eines Raumbereiches. In den realen Liefergebieten existieren häufig abflusskanalisierende Strukturen, die den Stofftransport zum Gewässer fördern.

Als **lineare Raumstrukturelemente** spielen kleinräumlich (mikroskalig) Ackerrandfurchen sowie Uferbankette im Gewässerrandbereich bis 20 cm Höhe die größte Rolle. Etwa 10 % der Abtragsleistung eines typischen Erosionsereignisses können potentiell durch lineare Raumstrukturen zurückgehalten werden. Bei den größeren (mesoskaligen) Raumstrukturelementen wirken landwirtschaftliche Wege abflussfördernd und Hauptverkehrsstraßen abflusshindernd. In die Modellierung der oberirdischen Transportprozesse können aufgrund geringer Datenverfügbarkeit nur mesoskalige Raumstrukturen einfließen.

Bearbeitungsbedingte Leitlinien wirken als **flächenhafte Raumstrukturelemente** auf allen Ackerparzellen abflussverändernd. Mit Annäherung der Bearbeitungsrichtung an die Haupthangneigungsrichtung wächst die Größe des angebundenen Areals, d. h. die Wahrscheinlichkeit für Stoffeinträge in die Oberflächengewässer. Die Quer- oder Konturbearbeitung kann somit einen Beitrag zur Reduzierung der stofflichen Gewässerbelastung leisten.

Für den Anbindungsgrad ist die präzise Kenntnis der topographischen Lage des gesamten **Graben- und des Fließgewässernetzes** von entscheidender Bedeutung. Die Gewässerdichte beeinflusst alle wesentlichen Anbindungsparameter stark. Die Gräben unterscheiden sich in Abhängigkeit von Wasserführung und Durchflussbedingungen hinsichtlich ihres Stofftransportpotentials. In temporären Gräben können eingetragene Partikel verstärkt sedimentieren. Zeitweise wasserführende Gräben können potentiell etwa 20 % eines mittleren jährlichen Abtrages von 4,5t/ha zurückhalten.

Der **Transformationsschritt** (Regionalisierung) von den empirischen Informationen der erfassten Lieferareale im Gelände zu den operationalisierbaren Modellparametern der Gewässeranbindung wird über die Analyse von relativen Häufigkeiten und bedingten Wahrscheinlichkeiten vollzogen. Methodisch handelt es sich dabei um ein induktives Upscaling-Verfahren.

Das **Grundprinzip der Häufigkeitsauswertungen** besteht darin, dass eine statistisch signifikante Abweichung zwischen der Häufigkeitsverteilung von Einflussgrößen der Gewässeranbindung *innerhalb der Stoffliefergebiete* (Spezialfall) und der Häufigkeitsverteilung *in den Testgebieten* (Normal-

fall) Rückschlüsse auf die Bedeutung des entsprechenden Modellparameters für den Stoffeintrag ermöglicht. Die Lieferflächen weisen bestimmte landschaftsökologische und raumstrukturelle Bedingungen auf, die sie für den Stoffeintrag gegenüber den nicht angebotenen Flächen besonders prädestinieren. Diese besondere Exponiertheit der Liefergebiete manifestiert sich in parameterabhängigen Häufigkeitsverteilungen, die vom „normalen Gebietsdurchschnitt“ abweichen.

Große Häufigkeitsunterschiede zwischen „Spezialfall Lieferfläche“ und „Normalfall Testgebiet“ belegen für die Anbindungsparameter Hanglänge, Gewässerdistanz, Transportstrecke im Grabensystem, Transportpfaddistanz, Oberflächenabfluss und Bodenabtrag einen ausgeprägten Einfluss auf das Eintragspotential. Für die Modellparameter Neigung, Einzugsgebietsgröße, Hangform und Stofftransportkapazität lässt sich eine begrenzte Wirkung auf das Eintragspotential einer Fläche konstatieren.

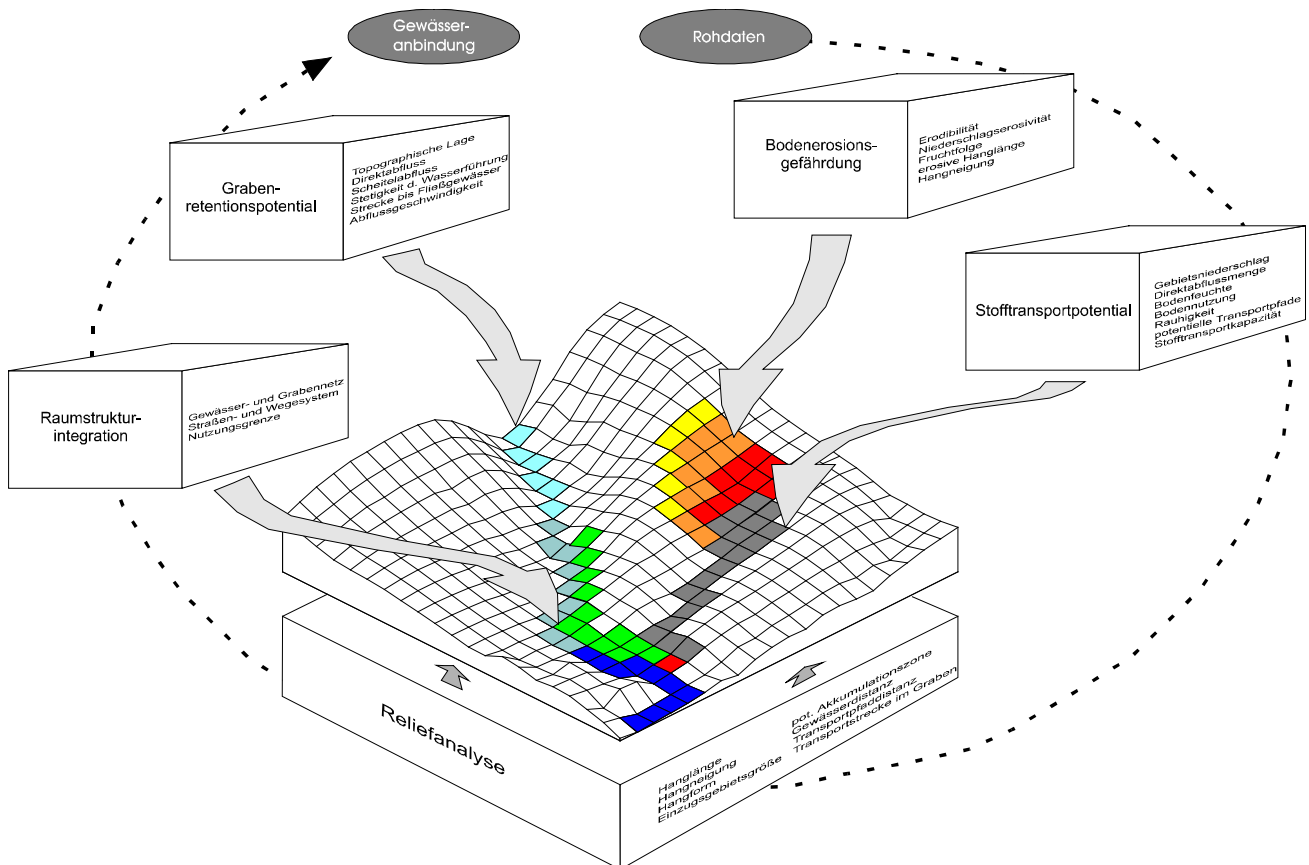
Die Wahrscheinlichkeit, dass es bei der Ausprägung eines Anbindungsparameters zum Übertrittsereignis kommt (**bedingte Wahrscheinlichkeit**), zeigt für alle Modellgrößen deutliche Abhängigkeiten. Mit Zunahme der Parameter Einzugsgebietsgröße, Hanglänge, Abflussmenge, Abtrag und Stofftransportkapazität steigt die Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages signifikant (10-25 % Pkt.) Bei Abnahme der Parameter Transportpfaddistanz und Gewässerdistanz sinkt die Wahrscheinlichkeit des partikulären Stoffeintrages weniger deutlich (10 %-Pkt.).

Die Bausteine und den Aufbau des Modells verdeutlicht Abb. 51. Das Modell ist vollständig ins GIS integriert, d. h. die Parameter der Anbindung werden direkt über die Nutzung von GIS-Funktionalitäten berechnet.

Durch Verfahren der **Reliefanalyse** bildet das Modell auf der Grundlage des DGMs Eigenschaften des Reliefs ab und berechnet die Entfernung zum potentiellen Stofftransportpfad und zu den Oberflächengewässern. Der **Oberflächenabfluss** wird über ein modifiziertes Curve-Number-Verfahren (SOIL CONSERVATION SERVICE 1972), die **Bodenerosionsgefährdung** mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung abgeschätzt (U. SCHWERTMANN U.A. 1987). Das **Stofftransportpotential** wird auf Grundlage von Gleichungen nach J. SCHMIDT (1994) und M. v. WERNER (1995) ermittelt. **Lineare Raumstrukturelemente** (Gewässer- und Verkehrsnetz) sind in das digitale Geländemodell integriert. Die hydrologische Oberflächenanalyse berücksichtigt ihre Wirkung auf den oberirdischen Abflussprozess. Die **Verknüpfung** der **Modellparameter** geschieht durch das statistische Verfahren der logistischen Regressionsanalyse, das die Ableitung der Wahrscheinlichkeit des Stoffeintrages erlaubt.

Mit einem Grenzwertverfahren werden nach definierten Kriterien (Gewässer-, Transportpfaddistanz, Hangeinzugsgebietsgröße, Abfluss- und Abtragsmenge) betroffene Gebietssegmente als vom Gewässersystem „**abgekoppelte Areale**“ deklariert. Über die Verknüpfung von Hanglänge, -neigung

und –form werden **potentielle Akkumulationsbereiche** ermittelt und die entsprechenden Raumbereiche in ihrem ursprünglichen Anbindungsgrad reduziert. Die Wahrscheinlichkeit der **Feststoffsedimentation im Gewässersystem** steigt mit der Größe des dazugehörigen Flusseinzugsgebietes (I. ICHIM 1990). Daher erfolgt in den Einzugsgebieten temporärer Gräben mit geringem Stofftransportpotential die Reduktion des generierten Anbindungsgrades in Abhängigkeit von der Entfernung zum permanenten Fließgewässer.



**Abb. 51: Prinzip der Modellkonzeption zur Ermittlung des Anbindungsgrades an Gewässer**

Die **Modellberechnungen** zeigen sowohl im räumlichen Verbreitungsmuster als auch in der anteilmäßigen Verteilung des Anbindungsgrades von Ackerflächen an Fließgewässer plausible Wahrscheinlichkeitswerte. Areale mit geringer Anbindung oder völliger Abkopplung sowie Gebiete hohen Eintragspotentials lassen sich aufgrund der modellierten Anbindungsparameter und unter Berücksichtigung der Geländekenntnis gut nachvollziehen.

Die **Modellqualität** wird vereinfachend im Prozentanteil der korrekt generierten angebotenen bzw. nicht angebotenen Areale ausgedrückt. Danach werden insgesamt 67 % der untersuchten Ackerfläche richtig wiedergegeben, wobei 11 % auf Lieferareale entfallen. Das Modell prognostiziert 28 % der Agrarfläche als angebotenen (tatsächlich 24 %).

Exemplarische Szenarien zeigen **Anwendungsperspektiven** des Modells auf. Die Wirkung der Veränderung der Bodenbedeckung, der Raumstrukturen und der Stoffretention im Grabensystem auf den Gewässeranbindungsgrad wird simuliert.

Die Simulation „**flächendifferenziert** erhöhter **Bodenbedeckungsgrad**“ zeigt einen linearen Einfluss der Bodenbedeckung auf den Anbindungsgrad. Das Modell kann den Effekt räumlich differenzierter kulturabhängiger Bodenbedeckungen abbilden. Die Prognose der Anbindung für die spezifische Raumsituation eines typischen Einzelereignisses (parzellenabhängiger Bedeckungsgrad) ist so vereinfachend möglich. Die Modellierung des Anbindungsgrades ohne **Raumstrukturbeeinflussung** zeigt, dass 8 % der Ackerflächen von einem ausgeprägten Effekt durch Raumstrukturelemente betroffen sind. Für weitere 22 % der Fläche lassen sich schwache Wirkungen auf den Anbindungsgrad konstatieren. Das Szenario „**veränderte Grabentransportbedingungen**“ beschreibt den Versuch, durch umfassende, konsequent durchgeführte Retentionsmaßnahmen im temporär wasserführenden Grabensystem die Möglichkeit des Stoffrückhaltes durch Sedimentation auszunutzen. Auf diesem Weg ließen sich bis zu 43 % der gesamten Ackerflächen von den permanenten Fließgewässern abkoppeln, allerdings ohne die on- und offsite-Schäden durch Bodenerosion in der Fläche und in den Retentionskörpern zu reduzieren.

## 11. LITERATURVERZEICHNIS

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl, 392 S.
- ANDERSEN, E.B. (1994): The Statistical Analysis of Categorical Data. Springer Verlag, 3. Edt., 532 S.
- ARNOLD, J.G., B.A. ENGEL & R. SRINIVASAN (1993): Continuous time, grid cell watershed model. In: Heatwole, C.D. [Hrsg.]: Applications of Advanced Information Technologies: Effective Management of Natural Resources. S. 267-278
- AUERSWALD, K. (1987): Sensitivität erosionsbestimmender. Faktoren Wasser + Boden 1, S. 34-38
- AUERSWALD, K. & U. SCHWERTMANN (1988): Modelle zur Erosionsvorhersage als Grundlage des Bodenschutzes. In: Rosenkranz, D., G. Einsele & H.-M. Harreß [Hrsg.],(1988 und 1995): Bodenschutz. 4085, S. 1-20
- AUERSWALD, K. (1989a): Predicting nutrient enrichment from long-term average soil loss. Soil Technology, vol. 2, S. 271-277
- AUERSWALD, K. (1989b): Prognose des P-Eintrages durch Bodenerosion in die Oberflächengewässer der BRD. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 59/II, S. 661-664
- AUERSWALD, K. & U. SCHWERTMANN (1990): Bodenerosion und Bodenfruchtbarkeit -Kenntnisstand und Forschungsdefizite. Ber. Ldw. 68, S. 596-6030
- AUERSWALD, K. (1991): Onsite- und Offsite-Schäden durch Bodenerosion. In: Berichte für die Landwirtschaft, 205. Sonderheft Bodennutzung- und -fruchtbarkeit, Bd. 2, Bodenerosion
- AUERSWALD, K. (1992): Gewässerversauerung und Gewässereutrophierung- ökologische Folgen lateraler Stoffflüsse in Böden. Landwirtschaftliches Jahrbuch, 69. Jhrg., Sonderheft 2/92.
- AUERSWALD, K. & J. HAIDER (1992): Eintrag von Agrochemikalien in Oberflächengewässer durch Bodenerosion. Z. f. Kulturtechnik u. Landentwicklung 33, S. 222-229
- AUERSWALD, K. (1993): Realisierung durch die Landwirtschaft. In: Agrarspektrum Schriftenreihe d. Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e.V., Bd. 21, S. 150-164
- AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (AID) [Hrsg.]. (1995): Landentwicklung- Flurbereinigung. Landwirtschaft, Naturschutz
- AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (AID) [Hrsg.] (1990): Erosionsschäden vermeiden. 1108, 31 S.
- BAADE, J., D. BARSCH, R. MÄUSBACHER & G. SCHUKRAFT (1993): Sediment Yield and Sediment Retention in a small Loess-Covered Catchment in SW-Germany. Z. Geomorphol. N.F. Suppl.-Bd. 92, S. 217-230
- BACH, M., J. FABIS, H.-G. FREDE & I. HERZOG (1994): Kartierung der potentiellen Filterfunktion von Uferstreifen 1. Teil: Methodik der Kartierung. Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung 35, S. 148-154
- BACH, M., J. FABIS, H.-G. FREDE & I. HERZOG (1994): Kartierung der potentiellen Filterfunktion von Uferstreifen 2. Teil: Kartierung eines Flußeinzugsgebietes im Mittelgebirgsraum. Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung 35, S. 155-164
- BACH, M., FABIS, J. & H.-G. FREDE (1997): Filterwirkung von Uferstreifen für Stoffeinträge in Gewässer in unterschiedlichen Landschaftsräumen. DVWK Mitteilungen H. 28, 140 S.
- BAND, L. E. (1993): Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. In: K. Beven & M. J. Kirkby, Channel Network Hydrology, S. 14-41
- BANDEMER, H. & S. GOTTWALD (1993): Einführung in Fuzzy-Methoden. 264 S.
- BARTELME, N. (1994): Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen. 413 S.



- BAUER, J. H., ROHDENBURG & H.-R. BORK (1985): Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoffflüsse. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, H. 10, S. 1-15
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. [Hrsg.] (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der DFG. Mitteilung der XI Senatskommission für Wasserforschung*. VCH, S. 16-32
- BEHR, F. -J. (1998): *Strategisches GIS-Management*. 389 S.
- BEVEN, K. J. & I. D. MOORE [Hrsg.] (1994): *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*.
- BEZIRKSREGIERUNG HANNOVER [Hrsg.] (1993): *Bewirtschaftungsplan Leine*. 527 S.
- BIERBAUM, J. [in Vorb.] (2000): *Digitales Raumstrukturmodell zur großmaßstäbigen Prognose von Bereichen linearer Erosion*. *Geosynthesis* 12
- BILL, R. & D. FRITSCH (1991): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten*, 414 S.
- BILL, R. (1996): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen*, 463 S.
- BINGNER, R.L. (1990): *Comparation of the Components Used in Several Sediment Yield Models*. *Transactions of the ASAE*, Vol. 33(4), S. 1229-1238
- BLUME, H. P., P. FELIX-HENNINGSSEN, W. R. FISCHER, H.-G. FREDE, R. HORN & K. STAHR (1996): *Handbuch der Bodenkunde*.
- BOHL, M. (1986): *Zur Notwendigkeit von Uferstreifen*. *Natur u. Landschaft*, H. 4, S. 134-136
- BORK, H.-R. (1991): *Bodenerosionsmodelle-Forschungsstand und Forschungsbedarf. Bericht über Landwirtschaft, 205. Sonderheft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 3 Bodenerosion*, S. 51-67
- BORK, H.R. & A. SCHRÖDER (1996): *Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen*. In: *Handbuch der Bodenkunde*, S. 1-44
- BOSCH, K. (1998): *Statistik für Nichtstatistiker*. 236 S.
- BRAUN, M., M. FREY, P. HURNI & U. SIEBER (1991): *Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz (Stand 1986)*. FAC - Liebefeld, BUWAL - Bern, Bericht 1. Teil, 87 S.
- BRETSCHNEIDER, H., K. LECHER & M. SCHMIDT (1993): *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. 1022 S.
- BRIESE, D. (1984): *Zur Problematik landwirtschaftlicher Wege in Einzugsgebieten*. *Mitt. d. Deut. Bodenkundl. Ges.* 40, S.43-48
- BRIESE, D. & CH. ERPENBECK (1986): *Landwirtschaftliche Wege im Rahmen des Boden- und Gewässerschutzes - Probleme und Lösungsmöglichkeiten*. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 27, S. 158-164
- BRILLY, M., M. SMITH & A. VIDMAR (1993): *Spatially oriented surface water hydrological modelling*. *HydroGIS 93: Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*, IAHS Publ. No 211, S. 547-557
- BRONSTERT, A. (1994): *Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen*. *IHW*, H. 46, 200 S.
- BRONSTERT, A., S. VOLLMER & J. IHRINGER (1995): *Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflußverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten*. *Wasser und Boden*, 47, 9/1995, S. 29-46
- BRONSTERT, A. & V. KRYSANOVA (1998): *Ansätze zur großskaligen Simulation der Wasserflüsse und ein Anwendungsbeispiel für das Elbeeinzugsgebiet*. In: A. BRONSTERT, V. KRYSANOVA, A. SCHRÖDER, A. BECKER &

- H.-R. BORK [Hrsg.] (1998): Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten, PIK Report No. 43, S. 5-22
- BRONSTERT, A., V. KRYSANOVA, A. SCHRÖDER, A. BECKER & H.-R. BORK (Hrsg.) (1998): Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in Großen Einzugsgebieten. PIK Report, No 43. Potsdam
- BÜHL, A. & P. ZÖFEL (1998): SPSS für Windows Version 7.5 - Praxisorientierte Einführung in die moderne Datenanalyse - Addison Wesley Longman Verlag, 669 S.
- BUZIEK, G. [Hrsg.] (1995): GIS in Forschung und Praxis. 335 S.
- CAPELLE, A. & R. LÜDERS (1985): Die potentielle Erosionsgefährdung der Böden in Niedersachsen. Göttinger Bodenkundl. Berichte 83, S. 107-127
- CHIENG, S. & J. LUO (1993): Application of GIS to Peak Flow estimation. In: Heatwole, C.D. (Hrsg.): Applications of Advanced Information Technologies: Effective Management of Natural Resources. S. 279-298
- CLUIS, D. & E. QUENTIN (1993): Un système d'information géographique adapté à l'évaluation de la pollution agricole diffuse. HydroGIS 93: Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, IAHS Publ. No 211, S. 355-361
- DALLMAIER, S. (1997): Untersuchung zur Anbindung von Ackerflächen an Fließgewässer – Erfassung und Klassifizierung der Wasserführung und Transportfunktion von Gräben, Einfluß der Gräben auf den Anbindungsgrad der Ackerflächen. Unveröffentl. Dipl.-Arbeit, Geogr. Inst., Abt. Phys. Geographie u. Landschaftsökologie, Universität Hannover, 107 S.
- DE ROO, A.P.J. & R.J.E. OFFERMANS (1995): LISEM: A physically-based hydrologic and soil erosion model for basin scale water and sediment management. In: Modelling and management of sustainable basin scalle water resource systems, IAHS-Publ. NO 231, S. 339-448
- DESMET, P.J.J. & G. GOVERS (1995): GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparision of model results with soil map information. Catena 25, S. 389-401
- DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen.
- DÜSTER, H. R. & WEINGARTNER (1993): Prozeßorientierte Gewinnung von Gebietskenngrößen zur hydrologischen Charakterisierung von Einzugsgebieten.
- DUTTMANN, R. & TH. MOSIMANN (1995): Der Einsatz Geographischer Informationssysteme in der Landschaftsökologie - Konzeption und Anwendungen eines geoökologischen Informationssystems. GIS in Forschung und Praxis, S. 43-59
- DUTTMANN, R., J. BIERBAUM, TH. MOSIMANN & J. VOGES (1998): Dimensionsübergreifende Modellierung des Wasser- und Stofftransportes am Beispiel eines GIS-basierten "downscalings". In: Forschung zur deut. Landeskunde (im Druck)
- DUTTMANN, R. (1999): Partikuläre Stoffverlagerung in Landschaften - Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden und Stoffumlagerungen auf verschiedenen Maßstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung raum-zeitlicher Veränderungen der Bodenfeuchte. Geosynthesis 10, Hannover, 234 S.
- DVWK [Hrsg.] (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. DK 556.161.072 Niederschlag-Abfluß-Modelle, DK 556.51.028 Kleineinzugsgebiete. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft; H. 113. 34 S.
- DVWK [Hrsg.] (1988): Feststofftransport in Fließgewässern - Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis. DVWK-Schriften, H 87, 135 S.
- DVWK [Hrsg.] (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten, I. Bestimmung von Rauheiten, II. Äquivalente Sandrauheiten und Stricklerbeiwerte fester und beweglicher Strömungsberandungen. DVWK-Schriften 92, 285 S.

- DVWK [Hrsg.] (1991): Beitrag zur Ermittlung des effektiven Niederschlags für Bemessungshochwasser aus Gebietskenngrößen- Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung durch den DVWK-Fachausschuß "Niederschlag-Abfluß-Modelle". DVWK Materialien 2/1991
- DVWK [Hrsg.] (1997): Uferstreifen an Fließgewässern - Funktion, Gestaltung, Pflege. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 244/1997, 40 S.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1989): Grundlagen der Hydrologie. 408 S.
- EVERS, W. (1964): Der Landkreis Hildesheim-Marienburg. Die Landkreise in Niedersachsen, Bd. 21, Bremen.
- FEDRA, K. (1994): GIS and Environmental Modeling. IIASA, RR-94-2
- FELDWISCH, N. (1995): Hangneigung und Bodenerosion. Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie, Bd. 3, Gießen
- FREDE, H.-G. (1992): Landnutzung als mitbestimmende Größe der Gewässerbelastung. Z. f. Kulturtechnik u. Landentwicklung 33, S. 208-216
- FREDE, H.-G., J. FABIS & M. BACH (1994): Nährstoff- und Sedimentretention in Uferstreifen des Mittelgebirgsraumes. Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung 35, S. 165-173
- FREDE, H.-G. & S. DABBERT [Hrsg.] (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. 451 S.
- FREDE, H.G. (1986): Erosionsgefährdung in der Landwirtschaft. Kuratorium f. Technik u. Bauwesen i. d. Landwirtschaft, KTBL-Arbeitspapier 104, 37 S.
- FREEMAN, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. Computer & Geosciences Vol. 17, No 3, S. 413-422
- FRIEBE, T. (1997): GIS im Internet. Arbeitspapiere der GMD 1108
- FRIELINGHAUS, M., H. PETELKAU, K. SEIDEL, C. ROTH & H. SCHÄFER (1994): Möglichkeiten einer flächenhaften Beurteilung der Erosionsgefährdung durch Fahrspuren. Mitt. d. Deut. Bodenkundl. Ges. 74, S. 181-184
- FRIELINGHAUS, M., K. HELMIG, D. DEUMLICH & R. FUNK (1994): Gegenstand und Defizite in der regionalen Bodenerosionsforschung. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 74, S. 71-74
- GALLA, M. (1998): Entwicklung und Erprobung eines Pegelhöhenmessers zur Ermittlung des Abflußverhaltens kleiner Fließgewässer und landwirtschaftlicher Entwässerungsgräben. Unveröffentl. Dipl.-Arbeit, Geogr. Inst., Abt. Phys. Geographie u. Landschaftsökologie, Universität Hannover, 119 S.
- GÄBLER, H.-J. (1991): Die Fließgewässer und ihre Randbereiche-ein komplexes System. In: Wasser und Boden 3, S. 144-160
- GELBRECHT, J. & E. DRIESCHER (HRSG.) (1996): Untersuchungen zu Stoffeinträgen in Oberflächengewässer sowie zu Stoffumsetzungsprozessen in Fließgewässern im Einzugsgebiet der Unteren Spree als Grundlage für Sanierungskonzepte. Abschlußbericht zum BMfT-Projekt, Förderkennzeichen 0339400B
- GREENLEE, D.D. (1987): Raster and Vector Processing for Scanned Linework. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, No. 10, S. 1383-1387
- GROSS, P. & K. RICKERT (1994): Unterhaltungsrahmenplan für Fließgewässer und Uferstreifen. Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung 35, S. 174-179
- GRUNWALD, S. (1997): GIS-gestützte Modellierung des Landschaftswasser- und Stoffhaushaltes mit dem Modell AGNPSm. Boden und Landschaft, Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskunde und Landschaftsökologie, Bd. 14, Diss. Justus-Liebig Universität Giessen, 170 S.
- HAGEN, N. & H.B. KLEEBOG (1993): Möglichkeiten der Modellierung des großräumigen Stofftransportes auf Landflächen. Mitteilungen d. Inst. F. Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, S. 1-231
- HAIRSINE, P.B. & C.W. ROSE (1992): Modeling Water Erosion Due to Overland Flow Using Physical Principles. 1. Sheet Flow. Water Resources Research, Vol. 28, No. 1., S. 237-243

- HAIRSINE, P.B. & C.W. ROSE (1992): Modeling Water Erosion Due to Overland Flow Using Physical Principles. 2. Rill Flow. Water Resources Research, Vol. 28, No. 1., S. 245-250
- HAMM, A. [Hrsg.] (1991): Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern.
- HARMS, F.-J. (1984): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25 000, Erläuterungen zu Blatt Nr. 4025 Freden.
- HARMS, R.W. & W. SCHILLING (1983): Auswirkungen der räumlichen Variabilität von Niederschlag und Abflußbildung auf den Abfluß eines kleinen natürlichen Einzugsgebietes. Mitteilungen, H. 52 Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftl. Wasserbau der Uni Hannover, S. 207-229
- HENSEL, H. & H.-R. BORK (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. In: Landschaftsökologisches Messen und Auswerten, H. 2/3, S. 107-136
- HERMANN, A. & O. RICHTER (Hrsg.) (1997): Landschaftsökologie und Umweltforschung. H. 25, Regionalization in Hydrology, S. 133-136
- HICKEY, R. (1994): Slope length calculations from a DEM Within ARC/INFO GRID. Comput., Environ. And Urban Systems, Vol. 18, No. 5, S. 365-380
- HORLACHER, F. (1984): Ländlicher Wegebau und Landschaft. Wasser und Boden 11, 1985, S. 548-550
- HOSMER, D.W. S. & LEMESHOW (1989): Applied Logistic Regression. 307 S.
- HRISANTHOU, V. (1987): Simulation zur Berechnung der täglichen Feststofflieferung eines Einzugsgebietes. Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (IHW), H. 31, 235 S.
- HUBER, P. [unveröfftl.] (1996): GIS-gestützte Modellierung des erosionsbedingten Eintragspotentials in Fließgewässern am Beispiel der Erpe. Dipl.-Arb. Inst. F. Phys. Geogr. d. Freien Universität Berlin, 99 S.
- HUXHOLD, W.E. & A.G. LEVINSOHN (1995): Managing Geographic Information System Projects. 247 S.
- ICHIM, I. (1990): The relationship between sediment delivery ratio and stream order: a Romanian case study Erosion, Transport and Deposition Processes. IAHS Publ. No. 189, S. 79-86
- JENSEN, K.H. & A. MANTOGLOU (1992): Future of Distributed Modelling Hydrological Processes. Vol 6, S. 255-264
- JORDAN, H. (1987): Geologische Karte von Niedersachsen, 1:25 000 – Erläuterungen zu Blatt Nr. 3924 Gronau. Hannover, 181 S.
- JUAREZ, A. (1991): Simulation des durch Niederschlag verursachten Erosionsprozesses. Mitteilungen, H. 76 Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftl. Wasserbau der Uni Hannover, S. 1-152
- KAPPAS, M. (1994): Fernerkundung nah gebracht. 207 S.
- KARL, J. & M. POTZELT (1992): Halmfrüchte als Pufferzonen an Gewässern. Wasser u. Boden 2, S. 74-76
- KELLER, R. [Hrsg.] (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland-Karten und Erläuterungen. 68 S.
- KIEL, E. V., BROCK, W. PIEPER & H. REIMERS (1992): Kartieranleitung zur Erfassung der Gewässermorphologie, Fauna und Vegetation von Flachlandgewässern. Luft Wasser Boden, Hamburger Umweltberichte 44/94, 48 S.
- KILCHENMANN, A. (1991): Klassifikation, Datenanalyse und Informationsverarbeitung in der Geographie und Geoökologie. Karlsruher Manuskripte zur Mathematischen und Theoretischen Wirtschafts- und Sozialgeographie, H. 91
- KLEEBERG, H.B. [Hrsg.] (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Deutsche Forschungsgemeinschaft; 11, 444 S.

- KNIESEL, W.G. (1980): CREAMS – A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. US Department of Agriculture, Conserv. Res. Report, No. 26.
- KOLB, R. (1994): Uferstreifen in der Schweiz. Z. f. Kulturtechnik u. Landesentwicklung 35, S. 180-188
- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN [Hrsg.] (1997): Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich Wasserpolitik. Brüssel 26.2.97, 49 endg., 97/0067 (SÜN), Internet: europa.eu.int/en/comm/dg11/docum
- KORAL, J. & A.C. SAATCI (1976): Regenüberlauf- und Regenrückhaltebecken.
- KOVAR, P. (1997): Modelling design discharges with support of GIS. In: A. Hermann & O. Richter (Hrsg.): Landschaftsökologie und Umweltforschung, H. 25, Regionalization in Hydrology, S. 133-136
- KRAMER, H.J. (1994): Observation of the earth and its environment –survey of missions and sensors. 580 S.
- KRYSIK, H. (1995): Modellierung der Bodenerosion im Gebiet Mehle mit den Modellen EROSION-2D und EROSION-3D. Unveröffentl. Dipl. Arb., Geogr. Inst. Universität Hannover, 97 S.
- KUNZE, J. (1999): Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Grundwasserqualität in Flußgebieten. Mitt. d. Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirt. Wasserbau d. Universität Hannover, Nr. 88, 292 S. (im Druck)
- LA BARBERA, P., L. LANZA & F. SICCARDI (1993): Hydrologically oriented GIS and application to rainfall-runoff distributed modelling: case studies of the Arno basin. HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Vienna Conference, April 1993), IAHS Publ. No. 211, S. 171-179
- LANE, L.J. & M.A. NEARING (1989): USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile version model documentation. = USDA-ARS, National Soil Erosion Research Report, 2
- LEHMANN, H. & H.-O. ZINTZ (1993): Modellierung diffuser Nährstoffeinträge und deren Rückhalt für ganze Flußeinzugsgebiete. Wasser und Boden 8, S.629-632
- LEHMEIER, F. & R. KÖHTE (1992): Geomorphical Data as a Component of a Geoscientific Information System. Geol. Jb. A122, S. 371-380
- LEMBERT, M., M.W. OSTROWSKI & H. MÜLLER (1994): Die Berechnung des Oberflächenabflusses auf Grundlage digitaler Höhenmodelle. Wasser und Boden 11, S. 49-54
- LESER, H. & C. KEMPEL-EGGENBERGER (1997): Landschaftsökologie und Chaosforschung. In: Chaos in der Wissenschaft. Nichtlineare Dynamik im interdisziplinären Gespräch, [Hrsg.] V. P. Onori = Reihe MGU, Bd. 2, S. 184-210
- LESER, H. (1997): Landschaftsökologie. 644 S.
- LUDWIG, B., J. BOIFFIN, J. CHADOEUF & A.-V. AUZET (1995): Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. Catena 25, S. 227-252
- LUTZ, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (IHW), H. 24, 235 S.
- MANIAK, U. (1992) Hydrologie und Wasserwirtschaft. 568 S.
- MERKEL, B. & B. SPERLING (1993): Raster based modelling of watersheds and flow accumulation. HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Vienna Conference, April 1993), IAHS Publ. No. 211, S. 193-199
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Vorganges in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (IHW), H. 24, 215 S.

- MOORE, I.D. & T.W. NORTON & J.E. WILLIAMS (1993): Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. *J. of Hydrology*, 150, S. 717-747
- MOSIMANN, TH. (1984): Landschaftsökologische Komplexanalyse. 115 S.
- MOSIMANN, TH., A. MAILLARD, A. MUSY, J.-A. NEYROUD, M. RÜTTIMANN & P. WEISSKOPF (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten - Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. 186 S.
- MOSIMANN, TH. (1995): Schätzung der Bodenerosion in der Praxis und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenabtrag. In: Rosenkranz, D., Einsele, G. Harreß, H.-M. (Hrsg.), 1988 und 1995: Bodenschutz. 4070, S. 1-34
- MOSIMANN, TH. & M. RÜTTIMANN (1996): Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit. Grundlagen zum Schlüssel für Betriebsleiter und Berater mit den Schätztabelle für Südniedersachsen. *Geosynthesis* 9, Hannover, 52 S.
- MOSIMANN, TH. (1997): Prozess-Korrelationssystem des elementaren Geoökosystems. In: H. Leser (1997), *Landschaftökologie*, S. 262-270
- MOSIMANN, TH. (1998): Bodenerosion im Bodenschutzvollzug. In: G. Richter: *Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. S. 171-179
- MULL, R. (1993): *Wasser. Nahrungsmittel und Lebensraum in gemeinsamer Verantwortung*. 72 S.
- MULL, R., S. KUNST, U. MÜLLER, J. KREUZBERG, A. DEUNE, J. KUNZE & P.W. BURGS (1999): Kostenwirksamkeitsbeziehungen im Gewässerschutz. Abschlussbericht des Projektes Kostenwirksamkeitsbeziehungen im Gewässerschutz d. VW-Stiftung, Forschungsber.-Nr. AZ. II 70623. 430 S.
- MÜLLER-WOHLFEIL, D.I. & S. MIELBY (1998): Komponenten einer vollständig GIS-integrierten Modellierung der Hydrologie und des Stofftransportes innerhalb großer Einzugsgebiete. In: A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker & H.-R. Bork (Hrsg.) 1998, *Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten*, PIK Report No. 43, S. 123-132
- NEUFANG, K., K. AUERSWALD & W. FLACKE (1989a): Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten - Anwendung der dABAG in der Flurbereinigung und Landwirtschaftsberatung. *Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung* 30, S. 233-241
- NEUFANG, K., K. AUERSWALD & W. FLACKE (1989b): Automatisierte Erosionsprognose- und Gewässerverschmutzungs-karten mit Hilfe der dABAG - ein Beitrag zur standortgerechten Bodennutzung. *Bayer. Landwirtschaftl. Jb. H. 7*, S. 771-789
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (1993): Die Belastung der niedersächsischen Fließgewässer mit Schwermetallen und organischen Problemstoffen.
- NIEDERSÄCHSISCHER MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN [Hrsg.] (1983): *Hydrographischer Atlas von Niedersachsen*. 127 Kartenwerke und 1 Flächenverzeichnis, 304 S.
- NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (1987): *Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Obere Leine*. 192 S.
- NOLTE, C. & W. WERNER (1991): Flächendeckende Abschätzung des Stickstoff- und Phosphateintrages durch die Grundwasserneubildung sowie durch Erosionsereignisse in Fließgewässer des Elbeeinzugsgebietes im Bereich der ehemaligen DDR. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 66, II, S. 987-990
- NOLTE, C. & W. WERNER (1993): Diffuser Stickstoff- und Phosphor-Eintrag in Fließgewässer des Elbeeinzugsgebietes der früheren DDR über Grundwasser, Bodenerosion und Oberflächenabfluß. *Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung* 34, S. 19-28
- NORMANN-SCHMIDT, S. (1994): Auf der Suche nach der Umweltgerechten Landwirtschaft, 3. Teil: Welche Art der Landwirtschaft dient dem Schutz von Grund- und Oberflächenwasser? *gwf Wasser Abwasser* 135, Nr. 1, S. 19-36

- OKX, J.P., B.R. KUIPERS, G. DEVENTER & G. SÜBKRAUT (1993): Wahrscheinlichkeitskrigen für Bodensanierungszwecke. Beitr. z. Math. Geol u. Geoinformatik, Bd. 5, S. 49-53
- PAKOSCH, M. (1996): Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Gewässer und Gräben -Erfassung von Stofftransportwegen und Entwicklung eines Kriterienkataloges zur Bestimmung des Anbindungsgrades. Unveröffentl. Dipl.-Arbeit, Geogr. Inst., Abt. Phys. Geographie u. Landschaftsökologie, Universität Hannover, 123 S.
- PLATE, E.J. (1992): Weiherbach-Projekt " Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet" - Schlussbericht zur 1. Phase des BMFT-Verbundprojektes IHW 4, 550 S.
- PRASUHN, V. & M. BRAUN (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der FAC Liebefeld, Nr. 17, 113 S.
- PRASUHN, V. & M. BRAUN (1995): Regional differenzierte Abschätzung diffuser Phosphor- und Stickstoffeinträge in die Gewässer des Kantons Bern (Schweiz). Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung 36, S. 309-314
- RAPPE, B. (1995): Erfassung und Integration von Geo-Daten aus unterschiedlichen Quellen. In: G. Buziek, GIS in Forschung und Praxis, S. 123-140
- RICHTER, G. (1998): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. 264 S.
- RODE, M., S. GRUNEWALD & H.G. FREDE (1995): Methodik zur GIS-gestützten Berechnung von Nährstoffeinträgen in Fließgewässer durch Oberflächenabfluß mit dem Modell AGNPS. Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung 36, S. 63-68
- RODE, M. (1995): Quantifizierung der Phosphorbelastung von Fließgewässern durch landwirtschaftliche Flächennutzung. Boden und Landschaft, Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskunde und Landschaftsökologie, Bd. 1, Diss. Justus-Liebig Universität Giessen, 167 S.
- RODE, M. & H.-G. FREDE (1997): Modification of AGNPS for Agricultural Land and Climate Conditions in Central Germany. J. of Environmental Quality, 26, no. 1. S. 165-172
- ROHR, W., TH. MOSIMANN, R. BONO, M. RÜTTIMANN & V. PRASUHN (1990): Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen. Legende, Erläuterungen zur Kartiertechnik, Schadensdokumentation und Fehlerabschätzung. Materialien zur Physiogeographie, H. 14, Basel
- ROSCHER, S. K.-H. (1991): Der Einsatz eines Geographischen Informationssystems in der Bodenerosionsforschung. Mitt. Deut. Bodenkundl. Ges. 66 II, S. 1013-1016
- ROSENTHAL, W.D., R. SRINIVASAN & J. ARNOLD (1993): A GIS-watershed hydrology model link to evaluate water resources of the lower Colorado River in Texas In: Heatwole, C.D. (Hrsg.): Applications of Advanced Information Technologies: Effective Management of Natural Resources. S. 260-266
- ROTH, C.H. (1996): Physikalische Ursachen der Bodenerosion. In: BLUME, H. P., P. FELIX-HENNINGSSEN, W. R. FISCHER, H.-G. FREDE, R. HORN & K. STAHR (1996): Handbuch der Bodenkunde. Kap. 6.3.1.1, S. 1-36
- RUHE, C. (1997): Modellgestützte Bilanzierung von Stoffströmen in unter- und oberirdischen Gewässern eines Flußgebietes. Mitteilungen, Inst. F. Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau, H. 84. Diss. 140 S.
- RULAND, P. & G. ROUVÉ (1995): Objektorientierte geographische Informationssysteme im Wasserbau. Wasser und Boden 47, S. 22-25
- RÜTTIMANN, M., D. SCHAUB, V. PRASUHN & W. RÜEGG (1995): Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland-some critical considerations. Catena 25, S. 127-139
- SACHS, L. (1997): Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden. 885 S.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT [Hrsg.] (1996): Erosion 2D/3D - ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser.



- SAUERBORN, P. (1994): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland-Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. Bonner Bodenkundl. Abhandlungen, Bd. 13, Diss. 190 S.
- SCHAUDER, H. (1991): Quantifizierung der Filterwirkung eines bestehenden Grasfilterstreifens. Mitt. Deut. Bodenkundl. Ges. 66 II, S. 1023-1025
- SCHMIDT, J. (1997): pers. Mitteilung.
- SCHMIDT, J. (1994): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. Freiberg 164 S.
- SCHMIDT, R. (1994): Maßstabsprobleme der Regionalisierung von Bodendaten. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 74, S. 221-224
- SCHMIDT, R.-G. (1988): Methodische Überlegungen zu einem Verfahren zur Abschätzung des Widerstandes gegen Wassererosion. In: Regio Basiliensis XXIX / 1+2, S. 111-121
- SMITH, R.E. & J.R. WILLIAMS (1980): Simulation of the surface water hydrology. In: KNEISEL, W. G. CREAMS – A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. US Department of Agriculture, Conserv. Res. Report, No. 26., S. 13-35
- SCHNEIDER, K.-J. (1992): Bautabellen mit Berechnungshinweisen, Beispielen und europäischen Vorschriften.
- SCHÖNWIESE, C. D. (1992): Praktische Statistik. 231 S:
- SCHRÖDER, C.M. (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. DVWK-Schriften, H 92, 303 S.
- SCHWERTMANN, U. (1982): Bodenerosion und Flurbereinigung. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 23, S. 261-268
- SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrages und Bewertung von Gegenmaßnahmen 65 S.
- SEEDORF, H. H. & H.-H. Meyer (1992): Landeskunde Niedersachsen. Bd. 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung. 517 S.
- SEEDORF, H. H. (1977): Topographischer Atlas Niedersachsen und Bremen. 290 S.
- SHARPLEY, A.N., S.J. SMITH, J.R. WILLIAMS & C.A. JONES (1986): Simulation of Soil Formation and Degradation Processes. Internat. Geomorphology 1986 Part II, S. 495-506
- SIEKER, F. (1992): Reduzierung des Mischwasserabflusses durch dezentrale Versickerung des Regenwassers: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau Hannover.
- SIEKER, F. (1997): Möglichkeiten einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten, untersucht und demonstriert am Beispiel der Städte Dortmund und Zwickau. Materialsammlung des Teilprojektes Wasserwirtschaft - Hannover : SuG-Verl.-Ges.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology. Ch. 4 Storm Rainfall Data.
- SRINIVASAN, R. & J.G. ARNOLD (1993): Basin scale water quality modelling using GIS. In: Heatwole, C.D. (Hrsg.): Applications of Advanced Information Technologies: Effective Management of Natural Resources. S. 475-484
- STORM, R. (1995): Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Statistische Qualitätskontrolle. 423 S.

- THORNE, C.R., W.L. ZEVENBERGEN, T.P. BURT, & D.P. BUTCHER (1987): Terrain analysis for quantitative description of zero-order basins. In: Beschta, R.L., T. Blinn, G.E. Grant, F.J. Swanson & G.G. Ice [Hrsg.]: Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim. IHAS Publication No. 165, S. 121-130
- THOROE, C., H.-G. FREDE, H.-J. LANGHOLZ, W. SCHUMACHER & W. WERNER (1993): Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft -gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz-. Agrarspektrum Schriftenreihe d. Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst- Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e.V., Bd. 21, S. 1-244
- TIM, U.S., S. MOSTAGHIMI & V. O. SHANHOLTZ (1992): Identification of Critical Nonpoint Pollution Source Areas Using Geographic Information Systems and Water Quality Modelling. Water Resources Bulletin, Vol. 28, No. 5, American Water Resources Association
- TOY, T.J. [Hrsg.] (1977): Erosion: research techniques, erodibility and sediment delivery. 86 S.
- VACH, W. (1994): Logistic Regression with Missing Values in the Covariates. Lecture Notes in Statistics 86, 139 S.
- VAN DEURSEN, W.P.A., J.C.J. KWADIJK (1993): Rhineflow: an integrated GIS water balance model for river Rhine. HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Vienna Conference, April 1993), IAHS Publ. No. 211, S. 507-513
- VERWORN, H.R. (1987): Bemessung von Regenrückhaltebecken in städtischen Entwässerungssystemen.
- VETTER, M. (1986): Aufbau betrieblicher Informationssysteme mittels konzeptioneller Datenmodellierung. 399 S.
- VOGES, J. (1994): Untersuchung zur Flächenvariabilität depositionsabhängiger Schwermetallbodenbelastungen städtischer Flächen in Hinblick auf die Optimierung der Probenahmemethodik-Beispiel Nordenham (Niedersachsen). Unveröffentl. Dipl.-Arb. Geographisches Institut d. Universität Hannover, 161 S.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Boden-erosion in kleinen Einzugsgebieten. Diss; Freie Universität Berlin, 123 S.
- WALTHER, W. (1995): Über den Stoffhaushalt der Landschaft und über die diffuse Belastung von Böden, Fließgewässern und Grundwasser, dargestellt an ausgewählten Standorten. Habil.-Schrift, Fachber. Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU Carolo Wilhelmina Braunschweig. 369 S.
- WARWICK, J.J. & S.J. HANESS (1994): Efficacy of ARC/INFO GIS Applications to Hydrologic Modelling. J. of Water Resources Planning and Management, vol 120, no. 3, S. 366-381
- WERNER, W. & H.P. WODSAK (1994): Stickstoff- und Phosphateintrag in die Fließgewässer Deutschlands unter Besonderer Berücksichtigung des Eintragsgeschehens im Lockergesteinsbereich der ehemaligen DDR. Agrarspektrum Schriftenreihe d. Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst- Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e.V., Bd. 22, S. 1-243
- WICKENKAMP, V. (1995): Flächendifferenzierte Erosions-Akkumulationsmodellierung im Gebiet Mehle (Niedersachsen) unter Einsatz des Geoökologischen Informationssystems GOEKIS: Konzeption von Datenstruktur und Datenausgabe, Anwendung des Modells EROSION-3D. Unveröffentl. Dipl. Arb., Geogr. Inst. Universität Hannover
- WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to cobervation planning. US Dep. Agr., Agr. Handbook No. 537
- YOUNG, R.A., C.A. ONSTAT, D.D. BOSCH & W.P. ANDERSON (1987): AGNPS, Agricultural Non-point-source Pollution Model. A watershed analysis tool. US Departement of Agriculture-Agricultural Research Service, Conservation Research Report 35, 77 S.
- ZANKE, U. (1992): Über die Unschärfe von Sedimenttransportberechnungen. Wasser und Boden 9, S. 595-599
- ZEHNDER, C.A. (1987): Informationssysteme und Datenbanken. 274 S.

## ANHANG

- Tabelle zu Einflussgrößen der Gewässeranbindung..... 217
- Kartierbogen „Transportfähigkeit von Gewässern und Gräben“ ..... 219
- Befragungsbogen zum Erosions- und Übertrittsgeschehen..... 220
- Befragungsbogen zur Erfassung von Strukturgrößen des Gewässer- und Grabensystems..... 228

**Zielgröße:** Ackerflächen mit Gewässeranschluß

**Erfaßbare Mittlergrößen:** Übertrittsstellen, Transportwege

**Notwendige Informationen Teil I:**

Einflußbereich	Einzelparameter	Informationsart	Informationsquellen		
			Befragung	Kartierung	digitale Daten
<b>Relief</b>	Lage Übertritt	qualitativ	○	●	○
	Hangneigung	quantitativ	○	●	○
	Hangform	qualitativ	○	●	○
	Hangexposition	quantitativ	○	●	○
	Lage Hang-EZG im Formgefüge	qualitativ		●	○
	Tiefenlinien (Leitbahnen)				
	Lage	qualitativ	●	●	●
	Größe	quantitativ	○	●	○
	Funktion	qualitativ	○	●	
	Hangeinzugsgebiet: Lage (Transportstrecke)	qualitativ	○	●	●
Größe (Wassermenge)	quantitativ		●	●	
Form (Konzentrationszeit)	qualitativ		○	●	
<b>Boden</b>	Bodenart	qualitativ	●	○	●
	Humusgehalt	quantitativ	●	○	●
	Skelettgehalt	quantitativ			●
	Durchlässigkeit	semiquantitativ			○
	Feuchte	semiquantitativ			○
	<u>Vernässungsstellen:</u>				
	Lage	qualitativ	●	○	○
	Größe	quantitativ	●	○	○
	Ursache	qualitativ	●		
	Zeitdauer	semiquantitativ	●		
Häufigkeit	quantitativ	○			
<b>Geol. Situation</b>	Durchlässigkeit d. Geol. Untergrunds	qualitativ			●
<b>Wasserhaus- haltliche Situation im Hangeinzugs- gebiet</b>	<u>oberfl. Wasserflüsse:</u>				
	Verlauf	qualitativ	●	●	●
	Fließstrecke	quantitativ			○
	Häufigkeit	quantitativ	●		
	Ursache	qualitativ	○	○	
	Drainage (Lage)	qualitativ	●		
	Abwasser/Mischwassereinleitung (Lage)	qualitativ	●		
	Parzelle mit Fremdwasserzufluß	qualitativ	●	●	
	Hangwasseraustritt				
	Lage	qualitativ	●		
Art (punkthaft, flächenhaft)	qualitativ	●			
<b>Erosions- geschehen</b>	<u>Abtrag:</u>				
	Art	qualitativ	●	●	
	Lage	qualitativ	●	●	●
	Länge	quantitativ		●	
	Tiefe	quantitativ		●	
	Häufigkeit	quantitativ	○		
	Abtragsursachen	qualitativ	○	●	
	<u>Akkumulation innerhalb Parzelle.:</u>				
	Lage	qualitativ	●	●	
	Mächtigkeit	qualitativ		●	
	flächige Ausdehnung	quantitativ		●	
	Häufigkeit	quantitativ	○		
	<u>Akkumulation außerhalb Parzelle:</u>				
	Lage	qualitativ	●	●	
	Mächtigkeit	qualitativ		●	
	flächige Ausdehnung	quantitativ		●	
Häufigkeit	quantitativ	○			
<u>Bodenaustrag von Parz.:</u>					
Lage	qualitativ	●	●		
Spuren	qualitativ	●	●		
Art (punkthaft, flächenhaft)	qualitativ	○	●		
Häufigkeit	qualitativ	○			
Austragsursachen	qualitativ	○	●		
(Niederschlag, Schlagzustand)	quantitativ	○			

## Notwendige Informationen Teil II:

Einflußbereich	Einzelparameter	Informationsart	Informationsquellen			
			Befragung	Kartierung	digitale Daten	
Gewässer	homogene Abschnitte: Wasserführung, Verlauf, Verbauung	semiquantitativ qualitativ qualitativ	○ ○ ○	● ● ●		
	Besonderheit Randbereich Graben/Acker (Furche, Bankette)	qualitativ	○	●		
	<u>Morphologie Graben:</u> Tiefe Breite Böschungswinkel Grabenverbauung Verrohrung	quantitativ quantitativ quantitativ qualitativ qualitativ		● ● ● ● ●		
	<u>Bewuchs:</u> (Dichte, Art) Grabengalerie Böschung Sohle Veränderung je nach Wasserführung	qual./quant. qual./quant. qual./quant. qualitativ	● ● ●	● ● ○		
	<u>Fließquerschnitt</u> bei aktueller Wasserführung von Sohle bis Uferoberkante	quantitativ quantitativ		○ ○		
	<u>Wassereinfluss in Gew.:</u> Lage Häufigkeit Ursache	qualitativ quantitativ qualitativ	● ●	● ●		
	<u>Übertritte (Bodeneintrag in Gew.):</u> Lage Spuren (linien-, flächenhaft) Häufigkeit Ursache Art (punkt-, flächenhaft) Tiefe Breite Gestalt	qualitativ qualitativ quantitativ qualitativ qualitativ quantitativ quantitativ qualitativ	● ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ●		
	Entfernung Oberrand d. Hangeinzugsgebiet bis nächsten Graben.	quantitativ		●	●	
	Entfernung Oberrand d. Hangeinzugsgebiet bis nächstes ständig wasserführendes Gew.	quantitativ		●	●	
	<b>Flächennutzung</b>	Parzellenzuordnung	qualitativ	●		
	<u>Kulturart:</u> bei Bodenabtrag bei oberfl. Wasserfluß aktuelle Feldfrucht Fruchtfolge	qualitativ qualitativ qualitativ qualitativ	○ ○ ● ○	● ● ○ ○		
	Bearbeitungsrichtung	qualitativ	●	●	○	
	Bearbeitungszustand	qualitativ	○	●		
	Bewuchszustand (Höhe/Dicke)	qualitativ		●		
künstl. Übertritt (Wasserfurche o.ä)	qualitativ	●	○			
Verlauf Fahrspuren	qualitativ	●	○	○		
Entfernung Parz/Gewässer	quantitativ	○	●	●		
<u>Straßen- u. Wegenetz:</u> Lage Breite Höhe ü. BOF Form (/ , \ , ∩ , ∪) Belag Funktion f. Wassertransport (Wasserleitbahn) Funktion f. Bodentransport (Verschlammung, Erosionsrinnen)	qualitativ quantitativ quantitativ qualitativ qualitativ qualitativ qualitativ	○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ○ ○	● ○		

Kartierbogen Transportfähigkeit von Gräben/Gewässern

Allgemeine Daten		Gewässerstruktur	Sohle	Bemerkungen
Aufnahme-Nr.	Datum	<b>Linienführung</b> (f. ca. 500 m Abschnitt)	Gefälle _____ ‰	
TK Nr.:	Koord.	<input type="checkbox"/> geradlinig	<input type="checkbox"/> Substrat	
Gew.abschn.-Nr.	Gew.name	<input type="checkbox"/> geradlinig mit Kurven	<input type="checkbox"/> kein	
Gemeinde-/Flurbez.		<input type="checkbox"/> geschwungen	<input type="checkbox"/> Lehm/Schlamm	
Bearbeiter	Foto-Nr.	<input type="checkbox"/> schlängelnd	<input type="checkbox"/> Sand	
<b>Aufnahmebedingungen</b>		<input type="checkbox"/> mäandrierend	<input type="checkbox"/> Kies/Grus	
Sonne	<input type="checkbox"/> <b>Profilform</b>	<input type="checkbox"/> abgerundetes Trapez (halbkreisförmig)	<input type="checkbox"/> <b>Verbau</b>	
wechselhaft	<input type="checkbox"/> Trapez	<input type="checkbox"/> V-Profil	<input type="checkbox"/> kein	
Regen	<input type="checkbox"/> Kasten	<input type="checkbox"/> natürl. Querschnitt (Skizze mit Maßen)	<input type="checkbox"/> Massivsohle (Wasserbausteine)	
Schneefall	<input type="checkbox"/> <b>Profilmaße</b>	<input type="checkbox"/> obere Profilbreite _____ cm	<input type="checkbox"/> Stein- /Kiesschüttung	
<b>Niederschlags-/Abflußbedingungen bis 5 Tage vorher</b>	<input type="checkbox"/> Sohlenbreite _____ cm	<input type="checkbox"/> Böschungshöhe _____ cm	<input type="checkbox"/> <b>Bewuchs</b>	
Trockenheit	<input type="checkbox"/> Böschungsneigung _____ °		<input type="checkbox"/> kein	
zeitweise Regen			<input type="checkbox"/> Gräser/Kräuter	
überwiegend Regen			<input type="checkbox"/> Schilf/Wasserpflanzen	
Dauerregen			<input type="checkbox"/> Wuchshöhe _____ cm	
Schneeschnmelze			<input type="checkbox"/> Wuchsbild	
Regen während Schneeschmelze			<input type="checkbox"/> Wuchsbild aufrecht	
<b>Einzugsgebietscharakteristika</b>			<input type="checkbox"/> Wuchsbild in Fließrichtung weggenickt	
			<input type="checkbox"/> <b>Bewuchsdichte</b> (Aufsicht) <25% <input type="checkbox"/>	
			<input type="checkbox"/> <b>Skizze</b> (Exposition, Maße)	

Größe _____ km <sup>2</sup>	<b>Durchfluß</b>		25-50% <input type="checkbox"/>
mittlere Neigung _____ °	<b>Durchflußmaße</b> (offenes Gerinne)		50-75% <input type="checkbox"/>
Form _____	Breite d. Wasserlinie _____ cm		>75% <input type="checkbox"/>
dominante Nutzung _____	Breite 50 cm oberhalb d. Sohle _____ cm	<b>Reduktion d. Durchflußquerschnitts</b>	<10% <input type="checkbox"/>
mittlere Durchlässigkeit _____ cm/d	Wassertiefe _____ cm		10-20% <input type="checkbox"/>
<b>Art des Gewässers</b>	in Gewässermitte (bis 1m Gew.breite) _____ cm		20-30% <input type="checkbox"/>
Fluß (1. u. 2. Ordnung) <input type="checkbox"/>	an 3 Punkten (>1m Gew.breite) _____ cm		30-40% <input type="checkbox"/>
Bach (3. Ordnung) <input type="checkbox"/>	Mitte _____ cm		40-50% <input type="checkbox"/>
Wegeseitengraben <input type="checkbox"/>	Mitte + 25 cm rechts in Fließrichtung _____ cm		50-75% <input type="checkbox"/>
Ackerandgraben <input type="checkbox"/>	Mitte + 25 cm links in Fließrichtung _____ cm		>75% <input type="checkbox"/>
Straßengraben <input type="checkbox"/>	<b>Durchlaßmaße</b> (Verrohrung)	<b>Strukturelemente im Gewässer</b>	
„wilder Graben“ <input type="checkbox"/>	Rohrdurchmesser _____ cm	keine	
<b>Zustand des Gewässers</b>	Wassertiefe (Rohrmitte) _____ cm	Kies- /Sandbänke	
aufgemacht <input type="checkbox"/>	trockener Graben	Sohlabstürze	
geschlägelt <input type="checkbox"/>	ehem. Wasserlinie sichtbar <input type="checkbox"/>	Sohlrampen	
verkrautet <input type="checkbox"/>	vermutete Wassertiefe _____ cm	Uferabbrüche	
stark zusedimentiert <input type="checkbox"/>	<b>Böschung</b>	Baumwurzeln/ Totholz	
Feinerdeablagerung an der Sohle	<b>Bewuchs</b>	Uferabbrüche	
< 3 cm <input type="checkbox"/>	kein <input type="checkbox"/>	<b>Abflußsituation im Gerinne</b>	
3-10 cm <input type="checkbox"/>	Gräser/Stauden <input type="checkbox"/>	ungehindert <input type="checkbox"/>	
> 10 cm <input type="checkbox"/>	Röhricht/Schilf <input type="checkbox"/>	leicht eingeschränkt <input type="checkbox"/>	
<b>Wasserführung zum Kartierzeitpunkt</b>	Gehölzsaum <input type="checkbox"/>	weitgehend eingeschränkt <input type="checkbox"/>	
nicht wasserführend <input type="checkbox"/>	Einzelbäume <input type="checkbox"/>	nahezu ausgeschlossen <input type="checkbox"/>	
nicht wasserführend, Sohle feucht <input type="checkbox"/>	Einzelträucher <input type="checkbox"/>	ausgeschlossen <input type="checkbox"/>	
stehend <input type="checkbox"/>	<b>Bewuchsdichte</b>	unklar <input type="checkbox"/>	
ruhig fließend <input type="checkbox"/>	<25% <input type="checkbox"/>	<b>Transportfähigkeit f. Bodenmaterial</b>	
fließend mit Turbulenzen <input type="checkbox"/>	25-50% <input type="checkbox"/>	(Wasserführung, Gefälle, Durchflußquerschnitt, Struktur)	
turbulent fließend <input type="checkbox"/>	50-75% <input type="checkbox"/>	keine <input type="checkbox"/>	
Strömungsgeschwindigkeit (Abschätzung) _____ m/s	>75% <input type="checkbox"/>	gering <input type="checkbox"/>	
<b>Abfluß</b>	<b>Einleitungen</b>	mäßig <input type="checkbox"/>	
Durchflußfläche _____ m <sup>2</sup>	keine <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	
Hydraulischer Radius _____ m	Drainage <input type="checkbox"/>	hoch <input type="checkbox"/>	
Rauhigkeitsbeiwert _____	Regen-/Abwasser <input type="checkbox"/>	sehr hoch <input type="checkbox"/>	
Gefälle d. Energielinie _____ ‰	verrohrter Graben <input type="checkbox"/>		



## Fragebogen zu Erosions- und Übertrittgeschehen

Bitte ausfüllen, ankreuzen  und mit den angegebenen Zeichen (Signaturen) in die Karten einzeichnen. Notwendig dazu wären Bleistift, blauer, brauner, grüner und roter Buntstift. Vielen Dank !

Nr.: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_ 1996

### ALLGEMEINES

1. **Wo liegen Gewässer (Bäche, Drän- bzw. Straßengräben) im Gebiet und wie sah ihre Wasserführung in den letzten 5 Jahren ungefähr aus ?**

Bitte ankreuzen und mit den angegebenen Farben entlang der Gräben auf der Karte einzeichnen.

- ständig wasserführend (blau durchgehend mit Pfeil in Fließrichtung  $\longrightarrow$  )
- immer nach Regenfällen zeitweise wasserführend (blau gestrichelt mit Pfeil in Fließrichtung  $- - - - - \rightarrow$  )
- nur jedes Jahr im Frühjahr wassergefüllt (blau gepunktet mit Pfeil in Fließrichtung  $\cdots\cdots\cdots \rightarrow$  )
- meistens trockengefallen (grau durchgehend  $\longrightarrow$  )

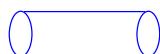
2. **Wozu dienen die einzelnen Gräben hauptsächlich ?**

Bitte auf der Karte mit der angegebenen Signatur einzeichnen (Kombinationen möglich).

- Abführung von Regenwasser bzw. Oberflächenwasser vom Ackerflächen [OW]
- Abführung von Dränwasser [DW]
- Abführung von Grundwasser/Quellwasser [GW]
- Abführung von Abwasser aus Siedlungen [AW]

3. **Wo sind die Gewässer verrohrt bzw. wo laufen sie unterirdisch?**

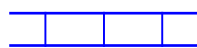
Bitte auf der Karte mit der folgenden Signatur in blau einzeichnen.



Gewässerverrohrung

4. **Wo sind Gewässerböschung oder -sohle mit Steinschüttungen befestigt ?**

Bitte auf der Karte mit der folgenden Signatur in blau einzeichnen.



Gewässerbefestigung

5. **Wo werden in die Gewässer Abwasser oder Mischwasser (z.B. aus Siedlungen) eingeleitet ?**

Bitte auf der Karte mit der folgenden Signatur in blau einzeichnen.



Abwassereinleitung




6. **Gibt es an den Gräben Bewuchs, wie z.B. Bäume, Sträucher oder Gewässerrandstreifen :**

Bitte auf der Karte mit folgenden Signaturen in grün einzeichnen.

- Gewässerrandstreifen (grün durchgehend  $\longrightarrow$  )
- Uferstreifen mit Baum/Strauchbewuchs (grün durchgehend mit Kreisen  $\bullet\bullet\bullet\bullet$  )
- einzelner Baum/Strauchbewuchs (grüne Kreise  $\bullet\bullet\bullet$  )


7. **Wo und in welcher Weise verändert sich der *Sohlenbewuchs* nach längeren Regenperioden ?**

Bitte die Bereiche auf der Karte mit folgenden Signaturen in **grün** einzeichnen

- Pflanzen in Fließrichtung weggeknickt → 
- Pflanzen z.T. ausgeräumt → 
- sämtliche Pflanzen der Sohle ausgeräumt → 
- mehr oder weniger unverändert
- sonstiges \_\_\_\_\_

8. **Wo und in welcher Weise verändert sich der Bereich der *Grabenböschung* nach längeren Regenperioden ?**

Bitte die Bereiche auf der Karte mit folgenden Signaturen einzeichnen

- seitliche Erosion am Grabenufer sichtbar ⇨ E
- Böschungsabbrüche sichtbar 
- einfließendes Wasser an Böschung sichtbar W ⇨
- mehr oder weniger unverändert
- sonstiges \_\_\_\_\_

9. **Wo gibt es flächenhafte o. punkthafte Hangwasseraustritte o. Quellen im Gebiet?**

Bitte in die Karte mit folgender Signatur in **blau** einzeichnen.



Quelle/Hangwasseraustritt punkthaft (Æ bis 5 m)



Quelle/Hangwasseraustritt flächenhaft

10. **Wo gibt es Tiefenlinien (Sinken) im Gelände bzw. auf dem Schlägen ?**

- ja, Tiefenlinien vorhanden
- keine

Ihren Verlauf bitte auf der Karte mit folgender Signatur in **grau** einzeichnen (  ) !

11. **Wo wurden die Gräben in diesem Frühjahr ausgehoben oder wo soll dies noch geschehen ?**

Bitte auf der Karte mit folgender Signatur in **braun** einzeichnen (  ) !

12. **Wo gibt es Überfahrten auf die Schläge ?**

Bitte auf der Karte mit folgender Signatur in **braun** einzeichnen  !

## GEWÄSSERSTRUKTUR

13. Wo sind nach Starkniederschlägen o. Feuchtperioden Spuren von Bodenmaterial im Bereich des Gewässerrandes sichtbar ?

Bitte mit folgender Signatur in braun durchnummerieren  $\nabla^2$ .

<b>Nummer:</b> _____ _____ _____ _____	<b>Lage d. Ablagerung:</b> <input type="checkbox"/> neben Gewässer oberhalb der Böschung <input type="checkbox"/> auf Uferböschung <input type="checkbox"/> im Gewässer eingespülte Schwebstoffe <input type="checkbox"/> keine genauere Ortsangabe möglich
--	---

14. Wo gibt es Abschnitte am Grabenufer, an denen Oberflächenwasser vom Ackerschlag in die Gräben einfließen kann, d.h. wo gibt es Übertrittsstellen, die häufig Wasser vom Acker zum Graben ableiten?

Bitte auf der Karte mit folgenden Signaturen einzeichnen und mit Nummern versehen.

- punkthafte Übertritte (< 1 m Breite) sichtbar Signatur: ● 1
- flächenhaft Übertritte (> 1 m Breite) sichtbar Signatur:  $\square$  2
- nicht sichtbar
- mir nicht bekannt

15. Welche Faktoren sind dafür hauptsächlich verantwortlich ?

Bitte nach Übertrittsstellen unterscheiden.

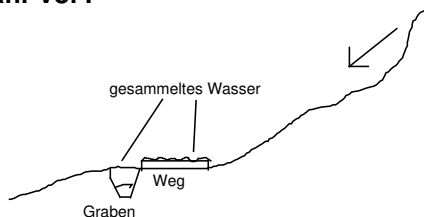
<b>Übertrittsnummer:</b> _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____	<b>verantwortliche Faktoren:</b> Größe des Einzugsgebiets Größe der zusammenfließenden Wassermenge Hangneigung Hangform ungünstiges Wegenetz Beschaffenheit des Grabens (Böschung, Verlauf) aktuelle Kulturart Bearbeitungszustand des Schlages sonstiges weiß nicht
---	--

16. Von welchen Schlägen kann ihrer Meinung nach *Bodenmaterial* in das Graben- oder Gewässersystem gelangen ?

Bitte Schlagnummern angeben:

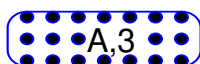
- 
- von keinem

**17. Wo sammelt sich überschüssiges Niederschlagswasser (Pfützen o.ä.), das nach Schneeschmelze o. größeren Niederschlagsereignissen oberflächlich abfließt und wie häufig kommt dies im Jahr vor?**



Bitte auf der Karte mit folgender Signatur einzeichnen.

- sammelt sich auf Wegen o. Straßen und versickert dort
- sammelt sich auf Wegen o. Straßen und fließt dann weiter talwärts
- fließt quer über Wegen o. Straßen auf nächsten Schlag
- wird von Gräben aufgefangen
- wird von Bächen aufgefangen
- sammelt sich am Hangfuß oder in Mulden
- sonstiges \_\_\_\_\_



blau (Wasseransammlung A, tritt ca. 3 mal im Jahr auf)

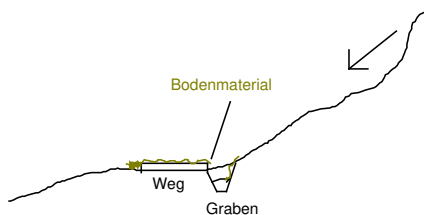
**18. Wie lange Zeit vergeht im Durchschnitt bis das zusammengeflossene Wasser im Boden versickert ist ?**

Wasseransammlg. A:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. B:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. C:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. D:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. E:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. F:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. G:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. H:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. I:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche
Wasseransammlg. K:	<input type="checkbox"/> < 1 Tag	<input type="checkbox"/> 1-2 Tage	<input type="checkbox"/> 2-4 Tage	<input type="checkbox"/> 4-7 Tage	<input type="checkbox"/> >1 Woche

**TOPOGRAPHIE**

**19. Wo lagert sich auf Wegen oder Straßen Bodenmaterial ab ?**

- Nr. \_\_\_\_\_ lagert sich auf Wegen o. Straßen ab
- Nr. \_\_\_\_\_ lagert sich auf Wegen o. Straßen ab und wird dann weiter talwärts transportiert
- Nr. \_\_\_\_\_ fließt quer über Wege o. Straßen auf nächsten Schlag
- Nr. \_\_\_\_\_ wird von Gräben am Weg aufgefangen
- Nr. \_\_\_\_\_ sonstiges \_\_\_\_\_





Bitte auf der Karte mit folgender Signatur einzeichnen.



**20. Wo sammelt sich auf den Schlägen Oberflächenwasser, das konzentriert ins Tal fließt (z.B. in Gerinnen oder Fahrspuren) ?**

Bitte mit angegebener Signatur mit blau in die Karte einzeichnen.

- in Fahrspuren 
- in kleinen chaotischen Gerinnen >>>>>
- Oberflächenwasser fließt diffus, d.h. es sind keine konzentrierten Fließwege erkennbar 
- weiß nicht

**21. Auf welche Schläge fließt von darüberliegenden Parzellen Fremdwasser zu ?**

Bitte Schlagnummern angeben:

- 
- von keinem

**22. Wo wird überschüssiges Niederschlagswasser zeitweise mit besonderen Maßnahmen (z.B. Wasserfurche) vom Ackerschlag geleitet ?**

Bitte mit angegebener Signatur mit blau in die Karte einzeichnen.

- regelmäßig jedes Jahr notwendig =====
- nur in überdurchschnittlich feuchten Jahren notwendig == ==
- nirgendwo

**BODENEIGENSCHAFTEN / BEWIRTSCHAFTUNG**

**23. Wie hoch ist der Humusgehalt auf den Schlägen?**

- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ <1%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 1%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 2%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 3%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 4%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 5%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 6%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 7%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 8%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 9%
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_ 10%

**24. Wo gibt es Vernässungen des Bodens ?**

Wie häufig und wie dauerhaft treten sie über das Jahr auf ?

Bitte in die Karte mit folgender Signatur in blau einzeichnen.



Vernässung 1: tritt 2 mal insgesamt ca. 3 Wochen pro Jahr auf

**25. Welche Ursache haben die Vernässungen ?**

- Vernngr.: \_\_\_\_\_ Grundwasser
- Vernngr.: \_\_\_\_\_ Stauwasser
- Vernngr.: \_\_\_\_\_ Überschwemmungen
- Vernngr.: \_\_\_\_\_ Fremdwasserzufluß von anderen Parz.
- Vernngr. : \_\_\_\_\_ sonstiges.....
- alle Vernässungen wegen Stauwassers

**26. Auf welchen Schlägen wurden Drainagen verlegt ?**

Bitte in die Schläge mit folgender Signatur einzeichnen.

- Drainage (D)  
 auf keinem

**27. Welche Hauptfruchtfolgen werden auf Ihren Parzellen verwendet ?**

1. Rüben-Weizen-Gerste auf Parz.nr.: \_\_\_\_\_  
 2. Rüben-Weizen-Weizen auf Parz.nr. \_\_\_\_\_  
 3. Rüben-Weizen-Gerste- \_\_\_\_\_ auf Parz.nr. \_\_\_\_\_  
 4. \_\_\_\_\_ auf Parz.nr. \_\_\_\_\_

**28. Mit welcher Kulturart sind die Parzellen 1996 bestellt worden ?**

Bitte für jede Parzellennummer die Kultur angeben.

- Winterweizen..... Parzellennr.  
 Sommerweizen ..... Parzellennr.  
 Wintergerste..... Parzellennr.  
 Sommergerste..... Parzellennr.  
 Hafer ..... Parzellennr.  
 Mais ..... Parzellennr.  
 Raps..... Parzellennr.  
 Rüben ..... Parzellennr.  
 Kartoffeln..... Parzellennr.  
 Ackerbohnen/Ackererbsen..... Parzellennr.  
 Feldgemüse ..... Parzellennr.  
 Gründüngung ..... Parzellennr.  
 Wiese/Weide..... Parzellennr.  
 Grünbrache ..... Parzellennr.  
 Dauerbrache ..... Parzellennr.  
 sonstiges ..... Parzellennr.

**29. Auf welchen Schlägen liegt die Bewirtschaftungsrichtung nicht entlang der größten****Schlaglänge?**

- Schlagnr: \_\_\_\_\_ in Fallinie  
 Schlagnr: \_\_\_\_\_ quer zur Fallinie  
 Schlagnr: \_\_\_\_\_ schräg zur Fallinie  
 Schlagnr: \_\_\_\_\_ Konturbearbeitung

**30. Wie ist der Bodenbearbeitungszustand im Winter, wenn kein Wintergetreide auf den Schlägen gesät wurde ?**

Zeit der Hauptbodenbearbeitung:

- Schlagnr: \_\_\_\_\_ Herbstfurche  
 Schlagnr: \_\_\_\_\_ Frühjahrsfurche

**31. Auf welchen Parzellen wird bei Rübenanbau eine Zwischenfrucht gesät ?**

Schlagnr: \_\_\_\_\_

Warum wird dies gemacht ?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# EROSION

**32. Wo sind Erosionsschäden *in den letzten 2 Jahren* auf den Parzellen festgestellt worden ?**

**Bitte mit angegebener Signatur mit Rot in die Karte einzeichnen.**

↓↓ linienhafte Erosion (rot)  ja  nein



Verschlämmung (rot)  ja  nein

**33. Wo und wie häufig sind Erosionsschäden *in den letzten 10 Jahren* auf den Parzellen festgestellt worden ?**

**Bitte mit angegebener Signatur mit Pfeilnummer und Häufigkeitszahl (z.B. III/4 ) in die Karte einzeichnen.**

III/4  
↓↓ linienhafte Erosion (grau)  ja  nein



Verschlämmung(grau)  ja  nein

**34. Welche Kulturarten sind im Sommer bzw. im Winter von der Erosion betroffen ?**

**Bitte die Pfeilnummer mit eintragen !**

**im Sommer:**

- Wintergetreide
- Sommergetreide
- Mais
- Raps
- Rüben
- Kartoffeln
- Ackerbohnen/Ackererbsen
- Feldgemüse
- Gründüngung
- Wiese/Weide
- Grünbrache
- sonstiges

**Pfeilnummer:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**im Winter:**

- Wintergetreide
- Sommergetreide
- Mais
- Raps
- Rüben
- Kartoffeln
- Ackerbohnen/Ackererbsen
- Feldgemüse
- Gründüngung
- Wiese/Weide
- Grünbrache
- sonstiges

**Pfeilnummer:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**35. Worin liegen Ihrer Meinung nach die Ursachen für die Bodenerosion auf den Parzellen ?**

**Pfeilnummer**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ursachen (nach Wichtigkeit)**

- Größe des Einzugsgebiets
- Größe der zusammenfließenden Wassermenge
- Hangneigung
- Hangform
- ungünstiges Wegenetz
- Beschaffenheit des Grabens (Böschung, Verlauf)
- aktuelle Kulturart
- Bearbeitungszustand des Schlages
- sonstiges.....



**36. Auf welchen Parzellen traten linien- oder flächenhafte Erosionsereignisse auf. Wie häufig im Jahr traten diese Ereignisse durchschnittlich auf ?**

Linienhafte Erosion

- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  gar nicht
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  < 1 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  1 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  2 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  3 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  4 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  5 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  6 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  7 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  8 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  9 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  10 mal

Verschlämmung

- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  gar nicht
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  < 1 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  1 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  2 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  3 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  4 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  5 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  6 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  7 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  8 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  9 mal
- Schlagnr.: \_\_\_\_\_  10 mal

**37. Wo wird abgetragenes Bodenmaterial wieder abgelagert und wie häufig im Jahr passiert dies ? Bitte in die Karte mit folgender Signatur einzeichnen.**



Ablagerungsbereich, der ca. 2 mal im Jahr sichtbar ist

**38. Wurde Bodenmaterial über die Parzellengrenze hinausgespült ? Bitte Ablagerungsbereich in der Karte mit \* versehen.**

- ja  in benachbarte Parzellen
- nein  in \_\_\_\_\_ (sonstiges)

**39. Wirken Sie der Erosion entgegen ? Wenn ja wie ?**

ja, auf folgende Art und Weise:

---



---



---

nein, weil

---



---

**Raum für Notizen und Anmerkungen:**

① \_\_\_\_\_

---



---

② \_\_\_\_\_

---



---

## Fragebogen zur Erfassung der Wasserführung von Gewässern und Gräben in landwirtschaftlichen Regionen im Einzugsgebiet der Innerste

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen für Ihr Zuständigkeitsgebiet. Bei  kreuzen Sie bitte das Zutreffende an. Bei \_\_\_\_\_ tragen Sie bitte die gewünschten Angaben ein. Wenn Sie keine genauen Angaben machen können, tragen Sie bitte Schätzwerte ein.

Vielen Dank!

### A Allgemeine Informationen

Gebiet : \_\_\_\_\_ Nr.: \_\_\_\_\_

#### A1 Wie läßt sich Ihr Zuständigkeitsgebiet räumlich abgrenzen?

- durch die Gemarkungsgrenze  
 durch die Wasserscheide(n)  
 sonstiges: \_\_\_\_\_

#### A2 Wie groß ist Ihr Zuständigkeitsgebiet?

\_\_\_\_\_ ha.

### B Inventarisierung der Fließgewässer

In diesem Teil geht es um die räumliche Erfassung der Fließgewässer in dem Gebiet. Neben der Beantwortung der Fragen ist daher ein genaues Einzeichnen in die Karten nötig.

**Bitte benutzen Sie die dafür vorgesehenen Farben und Signaturen.**

#### B1 Wo liegen in Ihrem Gebiet Gewässer (Bäche, Drän- bzw. Straßengräben) und wie sah die durchschnittliche Wasserführung der letzten 5 Jahre aus?

- ständig wasserführend  
(blau, durchgehend mit Pfeil in Fließrichtung)
- nach Regenfällen zeitweise wasserführend  
(blau gestrichelt, mit Pfeil in Fließrichtung)
- im Frühjahr / Herbst länger wasserführend, sonst trocken  
(blau, gepunktet mit Pfeil in Fließrichtung)
- meistens trocken gefallen  
(grau, durchgehend)

#### B2 Wozu dienen die einzelnen Gräben hauptsächlich?

- Abführung von Regenwasser bzw. Oberflächenwasser von Ackerflächen [OW]  
 Abführung von Dränwasser [DW]  
 Abführung von Grundwasser / Quellwasser [QW]  
 Abführung von Abwasser aus Siedlungen [AW]

#### B3 Gibt es an den Gewässern Bewuchs, wie z.B. Bäume, Sträucher, Gewässerrandstreifen oder gibt es einen Uferwall?

- Gewässerrandstreifen  
(grün, durchgehend)
- Uferstreifen mit Baum-/ Strauchbewuchs  
(grün, durchgehend mit Kreisen)
- einzelner Baum-/ Strauchbewuchs  
(grüne Kreise)
- Uferwall (braun, durchgehend)

#### B4 Wurden in Ihrem Gebiet Gewässerabschnitte verrohrt bzw. wo laufen sie unterirdisch?

- nein  ja



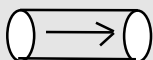
#### B5 Welche Ackerschläge in Ihrem Gebiet wurden drainiert bzw. wohin entwässert die Drainage?

- keine  
 Drainage (D + Pfeil in Entwässerungsrichtung)

**B6 Wird in Ihrem Gebiet Ab- bzw. Mischwasser (z.B. aus Siedlungen) in Gewässerabschnitte geleitet?**

nein

ja



- 17  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 18  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 19  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 20  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm

**B7 Wo und in welcher Weise verändert sich der Bereich der Gewässerböschung nach längeren Regenperioden?**

- seitliche Erosion sichtbar [=> E]
- Böschungsabbrüche sichtbar [A ↓]
- einfließendes Wasser sichtbar [W =>]
- mehr oder weniger unverändert
- sonstiges:

**Notizen und Anmerkungen:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

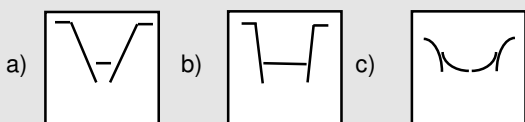
---

---

**C Beschaffenheit der Fließgewässer**

In diesem Teil werden die verschiedenen Gewässerabschnitte separat betrachtet.

**C1 Wie ist das Gewässerbett beschaffen?**



Abschnitt

- 1  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 2  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 3  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 4  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 5  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 6  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 7  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 8  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 9  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 10  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 11  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 12  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 13  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 14  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 15  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm
- 16  a)  b)  c)  
Tiefe: \_\_\_\_\_ cm; Breite: \_\_\_\_\_ cm

**C2 Wie veränderte sich der Wasserstand [cm] der letzten 5 Jahre durchschnittlich im Jahresverlauf? (<10, -25, -50, -75,-100, >100)**

Abschnitt	Frühjahr	Sommer	Herbst
1	_____	_____	_____
2	_____	_____	_____
3	_____	_____	_____
4	_____	_____	_____
5	_____	_____	_____
6	_____	_____	_____
7	_____	_____	_____
8	_____	_____	_____
9	_____	_____	_____
10	_____	_____	_____
11	_____	_____	_____
12	_____	_____	_____
13	_____	_____	_____
14	_____	_____	_____
15	_____	_____	_____
16	_____	_____	_____
17	_____	_____	_____
18	_____	_____	_____
19	_____	_____	_____
20	_____	_____	_____

**Notizen und Anmerkungen:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**C3 Welche maximalen Wasserstände [cm] treten bei den temporär wasserführenden Gräben auf ?**

episodisch

periodisch

---

**C4 Welchen Querschnitt weisen die Rohre in den Überfahrten auf ?**

\_\_\_\_\_ cm.

- ausreichend       nicht ausreichend

**C5 Welcher Gewässerabschnitt weist eine befestigte Böschung oder Sohle auf ?**

- Steinschüttung \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- Betonhalbschale \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- Betonrohr \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- sonstiges \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**C6 Welcher Gewässerabschnitt weist einen Bewuchs auf und wie dicht ist er? (0%, -25%, -50%, -75%, -100%)**

Abschnitt

- |    |                          |      |                          |        |                          |        |       |   |
|----|--------------------------|------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|-------|---|
| 1  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 2  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 3  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 4  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 5  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 6  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 7  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 8  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 9  | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 10 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 11 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 12 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 13 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 14 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 15 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 16 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 17 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 18 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 19 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |
| 20 | <input type="checkbox"/> | Gras | <input type="checkbox"/> | Schilf | <input type="checkbox"/> | sonst. | _____ | % |

**Notizen und Anmerkungen:**  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**D Gewässerpflege**

**D1 Welche Pflegemaßnahmen werden in Ihrem Gebiet durchgeführt und wo?**

- keine \_\_\_\_\_
- Mähen des Bewuchses \_\_\_\_\_
- Säubern des Gewässerbettes \_\_\_\_\_
- Ausheben des Gewässerbettes \_\_\_\_\_
- Behebung der Erosionsschäden \_\_\_\_\_

**D2 In welchem Zeitintervall werden die Pflegemaßnahmen durchgeführt?**

- nur nach Bedarf
- jedes Jahr
- alle \_\_\_\_\_ Jahre

**D3 Wann wurden Pflegemaßnahmen durchgeführt, bzw. für wann sind diese geplant?**

- letztes Jahr \_\_\_\_\_
- in den letzten 5 Jahren \_\_\_\_\_
- in den letzten 10 Jahren \_\_\_\_\_
- noch in diesem Jahr \_\_\_\_\_

(Nach S. DALLMAIER 1997)