

Erosionsprognosen mit GIS und EDV

– Ein Vergleich verschiedener Bewertungskonzepte am Beispiel einer Gäulandschaft –

Diplomarbeit am Geographischen Institut
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
bei Prof. Dr. K.-H. Pfeffer

vorgelegt von
Holger Schäuble

Tübingen, im April 1999

Meinem Vater Eugen Schäuble (gest. 1972) gewidmet.

Ehrenwörtliche Erklärung:

Ich erkläre hiermit, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden durch Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Tübingen, den 25.4.1999

Holger Schäuble

Vorwort

Die Idee zu dieser Diplomarbeit entstand im Anschluß mehrerer Gespräche mit dem GIS-Beauftragten des Geographischen Instituts Herrn Dr. H.-J. Rosner, in denen die grundsätzlichen Probleme von Bodenerosionsprognosen mit GIS erörtert wurden. Anhand dieser Gespräche und der verfügbaren Literatur gelangte ich zu der Einsicht, daß in der angewandten GIS-Prognostik der Bodenabtrag nur unzureichend bestimmt wird, weil nicht alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden.

Damit war das lang gesuchte Thema dieser Diplomarbeit gefunden, die Entwicklung eines Lösungsweges, mit dem sich auch und gerade mit GIS, das Erosionspotential einer Landschaft exakt bestimmen läßt. Darüber hinaus sollte sich dieser Lösungsweg nicht nur auf die Prognose des Bodenabtrags beschränken, sondern zusätzlich in der Lage sein, auch das Ausmaß von Profilverkürzungen und Bodensedimentation vorherzusagen.

Daß all diese Unterfangen, also die praktische Umsetzung theoretisch abgesicherter Vorstellungen, trotz vieler Rückschläge gelungen sind, verdanke ich nicht zuletzt Herrn Dr. H.-J. Rosner, der mir bei Problemen jedweder Art mit Rat und Tat zur Seite stand. Darüber hinaus möchte ich auch Herrn Prof. Dr. K.-H. Pfeffer meinen Dank aussprechen, für die Übernahme des Themas und die gewährten Freiheiten, durch die mir während meiner Arbeit der Rücken freigehalten wurde.

Ferner gilt mein Dank folgenden Personen, die auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

- Herrn Matthias Betz von der Firma Friends & Partner in Tübingen für die Überlassung und Nutzung diverser EDV, vom Scanner bis zum hochwertigen Photodrucker.
- Den wissenschaftlichen Hilfskräften Andreas Neubauer und Jürgen Ulshöfer, deren kollegiale Hilfe mir den Einstieg wesentlich erleichtert hat.
- Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch Stefan Weingart und Andrea Anstädt, die mit beträchtlichem Zeitaufwand die vorliegende Arbeit Korrektur gelesen hatten und mich vor diversen grammatikalischen Tücken bewahren konnten.

Zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Mutter bedanken, für ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und vor allem dafür, daß sie mich bei aller Kritik immer meinen Weg gehen ließ, wenn er auch manchmal etwas im Kreis verlief. Aber was für die Erde recht und billig ist, sollte auch einem Geographen zuweilen erlaubt sein.

Holger Schäuble, Tübingen im April 1999

Inhaltsverzeichnis:

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	V

1. Problemstellung und Zielsetzung 1

1.1 Über die Notwendigkeit von Erosionsprognosen in Mitteleuropa.....	1
1.2 Fragestellung und Inhalt	4

2. Die Bewertungsmethode 8

2.1 Warum die RUSLE-Gleichung zur Bewertung der Bodenerosion ?.....	8
2.2 Allgemeine Aspekte der RUSLE-Erosionsgleichung	12
2.2.1 Grundsätzliche Vorbemerkungen	12
2.2.2 Die Faktoren der RUSLE-Gleichung.....	15
2.2.2.1 Der klimatische Faktor R.....	15
2.2.2.2 Der pedogene Faktor K.....	17
2.2.2.3 Die topographischen Faktoren S und L	19
2.2.2.4 Die nutzungsspezifischen Faktoren C und P	22
2.3 Berücksichtigung des lokalen Oberflächenabflusses mit der RUSLE	25
2.4 Bestimmung der Stoffbilanz mit den Erosionsgleichungen RUSLE und MUSLE 87.....	32

3. Theoretische Konzepte GIS-gestützter Erosionsprognosen bei dreidimensionalen Untersuchungsgebieten 35

3.1 Erosionsprognosen mit GIS – oder von der Schwierigkeit eine zweidimensionale Erosionsformel auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet zu übertragen	35
3.2 Einfache RUSLE-Konzepte.....	39
3.2.1 Das Regular Slope Konzept	39
3.2.2 Das RUSLE Light Konzept.....	42
3.3 Geographische RUSLE-Konzepte	44
3.3.1 Das Irregular Slope Konzept.....	44
3.3.2 Das Unit Contributing Area Konzept.....	47
3.4 Bestimmung der Stoffbilanz.....	51

4. Das Untersuchungsgebiet 54

4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets Rottenburg-Hirrlingen	55
---	----

5. GIS-gestützte Bewertung des Erosionspotentials im Untersuchungsgebiet	62
5.1 Ausgangsdaten und Ableitung der Grundinformationen.....	62
5.1.1 Grunddaten und Arbeitsmethoden	62
5.1.2 Ableitung des R-Faktors.....	66
5.1.3 Ableitung des K-Faktors	67
5.1.4 Ableitung des S-Faktors und der lokalen m_i -Werte	71
5.2 Bodenabtrag nach dem Regular Slope Konzept.....	73
Stark vereinfachte Umsetzung der RUSLE-Gleichung auf Basis ganzer Flächen	
5.3 Bodenabtrag nach dem RUSLE Light Konzept	77
Vereinfachte typische Umsetzung der RUSLE-Gleichung	
5.4 Exkurs: Abflußanalysen mit GIS und EDV	79
5.4.1 Abflußanalysen mit einem herkömmlichen Raster-GIS	79
5.4.2 Abflußanalysen mit dem entworfenen Win95/NT Programm FLOW 95.....	83
5.5 Bodenabtrag nach dem Irregular Slope Konzept	89
Bestmögliche Umsetzung der RUSLE-Gleichung mit der Standardsoftware Arc/View und Avenue	
5.6 Bodenabtrag nach dem Unit Contributing Area Konzept	97
Ideale Umsetzung der RUSLE-Gleichung mit Arc/View und FLOW 95	
5.7 Bewertung der Stoffbilanz.....	103
Erweiterte Berechnungen auf Basis der Abtragungsgleichungen RUSLE und MUSLE 87 mit Arc/View und FLOW 95	
6. Bewertung der Ergebnisse	105
6.1 Aussagekraft der verschiedenen Konzeptionen auf RUSLE Basis.....	105
6.2 Aussagekraft von Stoffbilanzbewertungen auf Basis von RUSLE und MUSLE 87	111
7. Anwendungen von Erosionsprognosen	117
7.1 Praktischer Erosionsschutz	117
7.2 Weitere potentielle Anwendungen.....	121
8. Schlußwort	124
9. Literaturverzeichnis	126
10. Anhang	137
10.1 Datentabelle zur Berechnung der K-Werte aus der Bodenkarte	137
10.2 Der Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95	144
10.3 Arc/View Extensions GRID tools und SHAPE tools	150
10.4 Inhalt der beiliegenden CD-ROM.....	151
10.5 Separates Kartenmaterial	153 / Kartenhülle

Abbildungsverzeichnis:

1: Erosionsberechnung nach der RUSLE-Standardformel.....	14
2: Wachstum von S und L bei verschiedenen Hanglängen und –neigungen	21
3: Bezugsgebiet bei einer Verdoppelung von erosiver Hanglänge und Hangneigung	22
4: Zusammenhänge zwischen Wassermenge, Neigung und Bodenabtrag bei unterschiedlichen Hangformen bzw. ein schematisiertes Erosionsprofil an einem typischen Hang	26
5: Standard RUSLE-Erosionsprognose.....	31
6: Erweiterte RUSLE-Erosionsprognose	31
7: Erweiterte RUSLE-Erosionsprognose mit Hindernis	31
8: Funktionsprinzip der MUSLE 87 am Beispiel eines konvex-konkaven Hangs.....	33
9: Berechnung des landschaftsbezogenen Erosionspotentials ($A=R*K*S*L$) mit einem handels- üblichen GIS durch Multiplikation übereinanderliegender Faktorkarten (Overlayprinzip).....	35
10: Grundsätzliche Möglichkeiten von Erosionsuntersuchungen mit GIS unter Anwendung der RUSLE-Gleichung.....	38
11: Behandlung des Oberflächenabflusses beim Regular Slope Konzept	40
12: Behandlung des Oberflächenabflusses beim RUSLE Light Konzept.....	42
13: Behandlung des Oberflächenabflusses beim Irregular Slope Konzept	45
14: Behandlung des Oberflächenabflusses beim Unit Contributing Area Konzept	47
15: Alle beschriebenen Konzeptionen im Überblick	50
16: Berechnung der Stoffbilanz am Beispiel einer einzelnen Rasterzelle.....	52
17: Das Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen	59
18/1: Typische Erosionsspuren im Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen.....	60
18/2: Beobachtungen im Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen.....	61
19: Verwendetes Datenmaterial und Methoden zur Gewinnung der digitalen Ausgangskarten	62
20: Datenflußdiagramm zur Prognose der Bodenerosion im Testgebiet	65
21: Niederschlagsverteilung und R-Werte im Untersuchungsgebiet	66
22: Zusammenhang zwischen Bodenerodibilitätsstufen aus der Bodenkarte und den wirklichen K-Werten.....	69
23: K-Faktorenkarte des Untersuchungsgebiets	70
24: Höhenmodell des Untersuchungsgebiets	72
25: S-Faktorengrid des Untersuchungsgebiets.....	72
26: Raster der m_f -Werte vom Untersuchungsgebiet	74
27: Abflußmaske nach dem Regular Slope Konzept	72
28: Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der Regular Slope Konzeption	76
29: L-Faktorkarte, ermittelt nach dem RUSLE Light Konzept.....	78
30: Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der RUSLE Light Konzeption.....	78
31: Fließrichtungsberechnung bei kommerzieller GIS Software.....	79
32: Prinzip einer Fließlängen bzw. Akkumulationsberechnung aus einem Fließrichtungsraster.....	81

33: Funktionsweise von Fließberechnungen nach der Multiple Flow Methodik	84
34: Bildschirmansicht von FLOW 95	87
35: Ergebnisse bei unterschiedlichen Fließberechnungsmethoden	88
36: Ermittlung der Wasserscheiden und der Abflußmaske beim Irregular Slope Konzept.....	91
37: Abflußmaske nach dem Irregular Slope Konzept.....	92
38: Endgültiges Fließrichtungsraster zur Berechnung von L_i nach dem Irregular Slope Konzept	95
39: L_i -Faktorenkarte, ermittelt nach dem Irregular Slope Konzept	95
40: Differenzen zwischen unterschiedlich ermittelten L_i -Faktoren	95
41: Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der Irregular Slope Konzeption	96
42: Abflußmaske nach dem Unit Contributing Area Konzept.....	97
43: L_i -Faktorenkarte, ermittelt nach dem Unit Contributing Area Konzept	101
44: Differenzen zwischen unterschiedlich ermittelten L_i -Faktoren	101
45: Bodenerosionspotential nach der Unit Contributing Area Konzeption	102
46: Ausgangsdaten und Zwischenergebnisse bei den Berechnungen zur Stoffbilanz.....	104
47: Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet.....	104
48: Ungenauigkeiten bei der Irregular Slope Konzeption.....	107
49: Ungenauigkeiten bei der MUSLE Light Konzeption	107
50: Ungenauigkeiten bei der Regular Slope Konzeption.....	108
51: Stoffbilanz nach der MUSLE 87: Prognostizierte und tatsächliche Ablagerungen	112
52: Logischer Fehler bei der MUSLE 87 – Erosionsgleichung	114
53: Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87: Prognostizierte und tatsächliche Boden- ablagerungen ohne Berücksichtigung von Waldflächen und hydrologischen Barrieren	115
54: Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87: Prognostizierte und tatsächliche Boden- ablagerungen mit Berücksichtigung von Waldflächen und hydrologischen Barrieren.....	116
55: Erlaubte Nutzungsweisen bei verschiedenen Abtragungsgrenzen.....	119
56: Funktionsweise zweier Multiple Flow Algorithmen – Konventionell versus FLOW 95	147
57: Vergleich zweier Multiple Flow Algorithmen am Beispiel eines unkorrigierten und eines korrigierten Höhenmodells	148
58: Flußdiagramm des Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95 zur Berechnung der Abflußmenge	149

Tabellenverzeichnis:

1:	C-Faktoren von Anbaufrüchten und. Fruchtfolgen.....	24
2:	Gewichtung der K-Werte der verschiedenen Bodenprofile nach ihrem Flächenanteil an der jeweiligen Haupteinheit.....	68
3:	Konkrete K-Werte für alle bewirtschafteten Böden im Untersuchungsgebiet.....	70
4:	Ausschnitt aus der Attributtabelle des Flächenrasters	75
5:	Reklassifizierungsschablone zur Umkehrung der Fließrichtungen.....	93
6:	Abweichungen von der Referenzmethode (1)	106
7:	Abweichungen von der Referenzmethode (2)	106
8:	GRID tools – zusätzliche Funktionen	150
9:	SHAPE tools – zusätzliche Funktionen	150

Abkürzungsverzeichnis:

ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
CAD	Computer Aided Design
DEM	Digital Elevation Model
DXF	Dateiformat des Programms AutoCAD
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FLT	Format von binären Rasterdateien, die aus Arc/View oder Arc/Info exportiert werden
GIS	Geographisches Informationssystem
GRID	Format von Rasterdateien bei Arc/View und Arc/Info
HDR	Kopfdatei (Headerfile) von exportierten Arc/View oder Arc/Info Rasterdateien
OPUS	Advanced Simulation Model for Nonpoint Source Pollution Transport
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
TIN	Triangulated Irregular Network
USLE	Universal Soil Loss Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project

1. Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Über die Notwendigkeit von Erosionsprognosen in Mitteleuropa

Wozu eigentlich Bodenerosionsprognosen in Mitteleuropa ? Diese oder ähnliche Fragen stellen sich zwangsläufig angesichts geringer Abtragsraten im gemäßigt humiden Klimabereich Mitteleuropas. Zwar haben landwirtschaftliche Nutzung und Ackerbau zu einer anthropogen verursachten Vegetationsarmut geführt und damit den natürlichen Bodenverlust um Größenordnungen erhöht, doch im Vergleich zu anderen Klimazonen (wechselfeuchte Tropen, mediterrane Gebiete, Steppenzonen, u.ä.) bleibt er immer noch relativ gering.

Auch die weitverbreiteten Erosionsspuren in der mitteleuropäischen Agrarlandschaft ändern an dieser Feststellung nichts. Rezente Spuren sind überwiegend auf den Mikrobereich beschränkt, gekappte Bodenprofile und mächtige Kolluvien- bzw. Auenlehmlagerungen das Ergebnis einer Jahrhunderte andauernden Entwicklung. Ob Mikro- oder Makrospuren, alle bestätigen die Lehrmeinung von der geringen Abtragsintensität im mitteleuropäischen Klimabereich, auch unter den erosionsfördernden Bedingungen intensiver Landwirtschaft.

Sind deshalb aber Bodenerosionsprognosen und zum Teil einschneidende Schutzmaßnahmen überflüssig ? Wenn man nur die **Quantität** abgeschwemmten Bodenmaterials betrachtet, dann ganz sicher, unter **geökologischen Gesichtspunkten** keinesfalls. Denn auch ein geringer Bodenabtrag verursacht unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen schwerwiegende Folgeschäden, sowohl langfristiger als auch kurzfristiger Art. Folgende Aspekte sollten in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden:

1. Die mitteleuropäischen Böden sind aufgrund ihrer Genese äußerst erosionsempfindlich. Selbst geringe erosive Kräfte führen auf lange Sicht zu ernsthaften Bodenverschlechterungen.
2. Bodenerosion ist kein geomorphodynamischer Vorgang, der sich in der Umlagerung von Bodenpartikeln erschöpft, sondern er „...reicht weit in den Stoffhaushalt der Landschaftsökosysteme hinein.“ (LESER 1986, S.2)

Zu 1:

Die mitteleuropäischen Böden sind aus periglazialen Deckschichten aufgebaut, von denen die oberste, der **schluffige jungtundrenzeitliche Deckschutt**, eine überragende Bedeutung besitzt. Aufgrund seiner günstigen physikalischen und chemischen Eigenschaften verbessert er die Bodenqualität an fast allen Standorten entscheidend. Wird er verkürzt, dann gelangen in der Regel ungünstigere Bodenschichten näher an die Erdoberfläche¹. Da die Erosionsresistenz des Deckschutts sehr gering ist, sowohl in qualitativer Hinsicht (schluffige Bodenart), wie auch in quantitativer (geringe Mächtigkeit), können selbst geringe erosive Kräfte das Bodenprofil entscheidend verkürzen. Schon der Verlust der obersten 20 cm führt zu einer nachhaltigen und irreversiblen Schädigung der Bodenfunktionen (AUERSWALD 1991). Mögliche **Auswirkungen** sind u.a. Ertragsverlust, geringere Wasserspeicher- und Filterkapazität, geringere nutzbare Feldkapazität, höherer Oberflächenabfluß sowie Veränderungen im Bodenchemismus.

Unter den **Bedingungen intensivierter Landwirtschaft** ist zu berücksichtigen, daß ein Verlust des bodenphysikalisch günstigen Deckschutts nicht kompensiert werden kann, selbst nicht durch nachträgliche Meliorationsmaßnahmen. Mit dem Verlust des schluffigen Deckschutts sinkt die pflanzenverfügbare Wassermenge im Boden (vgl. SCHLICHTING/BLUME/STAHR 1995). Ein vorübergehender Wassermangel ist jedoch schon unter heutigen Bedingungen der entscheidende Grenzfaktor beim Anbau vieler Kulturarten in Mitteleuropa (AUERSWALD 1991). So werden durch die Bodenerosion alle Bemühungen einer Ertragssteigerung bzw. –sicherung vereitelt, denn tatsächlich haben vorsichtige Hochrechnungen ergeben, daß auch bei den gegenwärtig geringen Bodenabtragsraten, in 100 Jahren ein durchschnittlicher Ertragsrückgang von 10 % zu erwarten ist (AUERSWALD 1991).

Zu 2:

Im Zuge der Bodenerosion werden sowohl feste Bodenpartikel verlagert, wie auch **Nähr- und Schadstoffe** in gelöster Form. Mit dem Oberflächenabfluß gelangen sie in tiefer liegende Geländebereiche und werden dort sedimentiert bzw. in naheliegende Gewässer verfrachtet. Diese doppelte Stoffverlagerung führt zu charakteristischen Veränderungen in den Landschaftsökosystemen. In Bereichen starker Erosion verarmt der Boden, in den Tiefenlinien des Reliefs führt die kontinuierliche Zufuhr von Bodenmaterial und Lösungsfracht dagegen zu einer Eutrophierung. Obwohl Stoffverlagerungen keineswegs alleinige Folgen der Boden-

¹ Hier wird der generelle Fall in Mitteleuropa beschrieben, ein typisches Bodenprofil mit Deckschutt über Basisschutt. Für andere Bodenprofile wie Paläoböden im Löß oder mächtige Mittelschuttlagen unter dem Deckschutt gelten diese pauschalisierten Erläuterungen natürlich nicht.

erosion sind, müssen sie doch im Zusammenhang mit ihr gesehen werden. Hinter jeder Art der Stoffverlagerung, ob in gelöster oder fester Form, steht mit dem **Oberflächenabfluß** der gleiche Transportmechanismus. Steigt der Oberflächenabfluß an, dann erhöht sich gleichzeitig der Bodenabtrag und der Abtransport gelöster Stoffe. Sinkt der Oberflächenabfluß, dann werden sowohl der Bodenabtrag als auch der Stofftransport minimiert.

Auf diese Weise sind Bodenerosion und Stofftransport untrennbar miteinander verknüpft. Beide können nur nennenswert vermindert werden, wenn der Oberflächenabfluß zugunsten einer höheren Infiltrationsrate erniedrigt wird. Insofern **führen Maßnahmen gegen die Bodenerosion gleichzeitig zu einer Verringerung des Stofftransports**. Angesichts der vielfältigen Schäden, die durch einen übermäßigen Stofftransport in Mitteleuropa verursacht werden (Eutrophierung, Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwasser, o.ä.), dürfte gerade dieser Punkt das entscheidende Argument für nachhaltigen Erosionsschutz sein.

Voraussetzung für einen effektiven Erosionsschutz sind genaueste Bodenerosionsprognosen, die nicht nur den Bodenabtrag prognostizieren, sondern darüber hinaus auch Aussagen zum Stofftransport und der Anreicherung von potentiellen Schadstoffen machen. Daher müssen praxisrelevante Bodenerosionsprognosen in Mitteleuropa vor allem folgende **Anforderungen** erfüllen:

- Sie sollten den genauen Bodenabtrag an jedem Punkt im Gelände vorhersagen können.
- Sie sollten die Stoffbilanz erosiver Prozesse prognostizieren, also das Ausmaß von Profilverkürzungen und Bodenakkumulation.
- Zusätzlich sollten sie den hinter der Bodenerosion wirkenden Prozeß, den Oberflächenabfluß, in Größe und Intensität berücksichtigen, damit neben genauen Erosionsprognosen auch Aussagen zum Stofftransport möglich sind.

Erst mit einer solchermaßen umfassenden Analyse sind wirksame Schutzmaßnahmen, welche die gebietstypischen Probleme vom gekappten Bodenprofil bis zur eutrophierten Sedimentationszone berücksichtigen, überhaupt erst möglich. Da sich insbesondere die Schäden durch übermäßigen Stofftransport in Zukunft noch verschärfen dürften, sind genaue Erosionsprognosen und nachfolgende Schutzmaßnahmen heute notwendiger denn je; auch und gerade in Mitteleuropa.

1.2 Fragestellung und Inhalt

Ziel der vorliegenden Arbeit war die **Umsetzung verschiedener Methoden zur Bodenerosionsbewertung mit einem Geographischen Informationssystem (GIS)**. Anhand von unterschiedlichen Bewertungskonzepten sollte der Bodenabtrag bzw. die Stoffbilanz in einem typischen Agrargebiet ermittelt und die gewonnenen Resultate auf ihre Plausibilität überprüft werden.

Dabei ist zunächst festzustellen, daß alle mir bekannten GIS-gestützten Erosionsuntersuchungen² praxisfern und ungenau sind, zumindest unter dem Aspekt der mitteleuropäischen Erosionsproblematik. Denn sie weisen folgende Mängel auf:

- Es werden Prognosemethodiken verwendet, die keine exakten Ergebnisse zulassen.
- Es wird nur der Bruttobodenabtrag berechnet, nicht jedoch die Stoffbilanz. Das heißt, es werden keine Aussagen über Verkürzungen im Bodenprofil bzw. über Akkumulationstendenzen gemacht.
- In keinem Fall wird der Oberflächenabfluß berücksichtigt, der als treibende Kraft erosiver Prozesse entscheidend den Bodenabtrag und Stofftransport bestimmt.

Der Grund für diese Mängel ist im wesentlichen technischer Natur und kann mit der Frage umschrieben werden, „Wie bringe ich meine GIS-Software dazu, das zu analysieren, was ich will?“ Ein kniffliges Problem, da bei allen weitverbreiteten GIS-Programmen³ wichtige Berechnungsfunktionen für Bodenerosionsuntersuchungen fehlen bzw. aufgrund ungenauer Algorithmen nicht eingesetzt werden können. Konkret sind hierbei verschiedene hydrologische Funktionen gemeint, mit denen u.a. der Oberflächenabfluß und seine Veränderung über ein gesamtes Einzugsgebiet analysiert werden kann.

Genau **hydrologische Daten über die abfließende Wassermenge und seine Fließenergie** sind unverzichtbare Bestandteile, für hochwertige Bodenerosionsprognosen und besonders für Analysen der Stoffbilanz. Ohne sie kann das energetische Potential des abfließenden Oberflächenwassers nicht bestimmt werden und die Größe des Transportprozesses bleibt im Dunkeln. Dies führt notwendigerweise zu ungenauen Resultaten. Auch eine noch so exakte

² Dies sind die folgenden GIS-gestützten Bodenerosionsuntersuchungen: BARTH (1997), PRASHUN/STAUB (1997), BUCK (1996), KAPPAS/SCHWERTER (1995); GÜNDRA/JÄGER/SCHROEDER/DIKAU (1995), SIGLE (1991, 1995), FROELICH/DRAEYER/HUBER (1994), DRAEYER (1995), ERDMANN/ROSCHER (1991), AUERSWALD/SCHMIDT (1986), alle auf der Methode von MARKS/MÜLLER/LESER/KLINK (1992) aufbauenden Untersuchungen

³ Hier wird auf folgende Programme Bezug genommen: Arc/View, Arc/Info, GRASS, IDRISI, SPANS, ERDAS IMAGINE, ILLWIS, PCRaster

Ermittlung der übrigen erosionsrelevanten Faktoren wie Bodenart, Ackervegetation oder Bearbeitung verbessert die Prognosegenauigkeit dann nicht mehr. Denn im Gegensatz zum aktiv wirkenden Oberflächenabfluß verhalten sich die restlichen Faktoren überwiegend passiv, d.h. sie bestimmen zwar entscheidend das Ausmaß von Bodenabtrag und Stofftransport, jedoch immer nur innerhalb des Rahmens, der vom Oberflächenabfluß vorgegeben wird⁴.

Eine Analyse des Oberflächenabflusses ist deshalb die entscheidende Grundvoraussetzung für genaue Bodenerosions- und Transportberechnungen. Da sie aufgrund des fehlenden bzw. mangelhaften Funktionsumfangs moderner GIS-Software nicht möglich ist, bleiben zur Bestimmung des Bodenerosionspotentials nur **vereinfachende Bewertungsmethoden** übrig, bei denen der Oberflächenabfluß nicht bestimmt werden muß. Ihre Anwendung führt jedoch zu den obengenannten Mängeln.

Angesichts des hohen Niveaus in der Erosionsforschung und der Tatsache, daß bei jeder modernen Erosionsgleichung **der Oberflächenabfluß berücksichtigt werden kann**, erscheint die gegenwärtige Situation paradox. Auf der einen Seite sind theoretisch abgesicherte Modellgleichungen in großer Vielfalt verfügbar (USLE, RUSLE, MUSLE 87, WEPP 97, ANSWERS, OPUS, u.a.), in der Praxis werden sie jedoch nur in einer stark reduzierten Form eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund bestand meine Motivation darin, **die verschiedensten Bewertungskonzepte – mit und ohne Berücksichtigung des Oberflächenabflusses – korrekt und nachvollziehbar mit einem Geographischen Informationssystem umzusetzen**. Zur Gewinnung der notwendigen hydrologischen Daten habe ich das **Analyseprogramm FLOW 95** geschrieben. FLOW 95 ist ein eigenständiges Win95/NT Programm, das mit der Programmiersprache Visual Basic erstellt wurde. Es analysiert die abfließende Wassermenge bzw. andere hydrologische Faktoren auf der Grundlage eines rasterorientierten Höhenmodells. Durch die kombinierte Anwendung von FLOW 95 und der GIS-Software Arc/View oder Arc/Info können somit exakte Bodenerosionsprognosen mit Berücksichtigung des Oberflächenabflusses erstellt werden.

⁴ Obwohl Faktoren wie Bodenart, Horizontierung, Ackervegetation, o.ä. auch aktiv wirken können, indem sie die Wasserinfiltration erhöhen und damit den Oberflächenabfluß beeinflussen, wirken sie im allgemeinen passiv. Ihr erosionsrelevanter Einfluß ist fast ausschließlich vom Oberflächenabfluß abhängig. Ist er gering, dann können auch die passiven Faktoren ihre Wirkung nicht entfalten.

Im Laufe dieser Arbeit werden **fünf unterschiedliche Konzeptionen zur Bodenerosionsbewertung bzw. zur Analyse der Stoffbilanz** umgesetzt. Eine Konzeption umfaßt die Bewertung der Stoffbilanz, die restlichen vier die Analyse des Bodenabtrags. Grundlage aller Konzeptionen sind die **Erosionsgleichungen RUSLE bzw. MUSLE 87**, die beide erweiterte und zum Teil leicht revidierte Nachfolgeversionen der bekannten USLE-Modellgleichung sind. Dabei wird der Bodenabtrag immer auf Basis der RUSLE-Formel ermittelt, lediglich zur Prognose der Stoffbilanz wird die erweiterte Funktionalität der MUSLE 87 benutzt. Nur zwei dieser fünf Konzeptionen werden in der Praxis bei angewandten Erosionsprognosen verwendet, beides Konzeptionen, die nur den Bodenabtrag bewerten und den Oberflächenabfluß generell nicht berücksichtigen.

Der **inhaltliche Aufbau** der vorliegenden Arbeit gliedert sich in einen **theoretischen Teil** (Kapitel 2-3), in dem die benutzten Methoden zur Erosionsbewertung beschrieben werden und in einen **praktischen Teil**, in dem sie mit dem Geographischen Informationssystem Arc/View bzw. der Software FLOW 95 umgesetzt werden (Kapitel 4-7).

Der theoretische Teil ist zweigeteilt. In Kapitel 2 werden die **Grundprinzipien der verwendeten Erosionsgleichungen** RUSLE und MUSLE 87 skizziert, insbesondere die erweiterten Möglichkeiten, welche eine Berücksichtigung des Oberflächenabflusses erlauben. Dagegen befaßt sich Kapitel 3 mit ihrer Übertragung in ein GIS. Dort werden einerseits die Probleme beschrieben, welche die Umsetzung in einem GIS erschweren, und zum anderen **die später benutzten Untersuchungskonzeptionen** in ihrer Methodik erklärt und visuell dargestellt.

Nach einer kurzen geographischen Beschreibung des Untersuchungsgebiets (Kapitel 4) wird der **Bodenabtrag und die Stoffbilanz im Testgebiet** anhand der zuvor beschriebenen Konzeptionen berechnet, mit Arc/View und falls erforderlich durch zusätzliche Nutzung von FLOW 95 (Kapitel 5). Da sich alle Konzeptionen im wesentlichen durch die unterschiedliche Berücksichtigung des Oberflächenabflusses unterscheiden, wird zuerst die Herleitung der Daten beschrieben, die bei allen identisch sind (Kapitel 5.1). Danach erfolgt die eigentliche Umsetzung der verschiedenen Konzepte (Kapitel 5.2 – 5.7).

Die gewonnenen Resultate werden in Kapitel 6 miteinander verglichen und bewertet, wobei **Eignung und Grenzen der einzelnen Untersuchungsmethoden** aufgezeigt werden. Da das Untersuchungsgebiet – eine südwürttembergische Gäulandschaft – mit seinen geographischen Eigenschaften (Relief, Böden, Nutzungspartellen, o.ä.) für viele mitteleuropäische Ackergebiete typisch ist, dürften die dabei gezogenen Schlußfolgerungen auch in anderen Anbaugebieten gelten.

Mit **potentiellen Anwendungsbeispielen** (Kapitel 7) und einem persönlichen Schlußwort (Kapitel 8) endet diese Diplomarbeit. Weitergehende technische Erläuterungen finden sich im Anhang, der darüber hinaus eine Beschreibung der **beiliegenden CD-ROM** enthält. Auf ihr sind sowohl die entworfene Software, wie auch die wichtigsten Untersuchungsdaten in digitaler Form enthalten. Auf diese Weise kann die Gültigkeit der gewonnenen Resultate anhand der Originaldaten überprüft werden.

2. Die Bewertungsmethode

2.1 Warum die RUSLE-Gleichung zur Bewertung der Bodenerosion ?

Bodenerosion ist definitionsgemäß der **anthropogen verursachte Bodenabtrag**, d.h. der Teil des Bodenverlustes, der über dem natürlichen Abtrag unter einer ungestörten Vegetationsdecke liegt (vgl. BORK/HENSEL 1988, FRIELINGHAUS 1996, GOUDIE 1994, RICHTER 1965). Da in Mitteleuropa jedoch naturgemäß weitgehende Formungsruhe herrscht, kann der gesamte Bodenverlust als Bodenerosion bezeichnet werden. Der Einfachheit halber werden in der vorliegenden Arbeit die Begriffe Bodenerosion, Erosion, Bodenabtrag oder Bodenverlust in der gleichen Weise gebraucht, nämlich als synonyme Bezeichnungen für den anthropogen verursachten Bodenabtrag unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen.

Folgende **Methoden** aus der allgemeinen Erosions- und Denudationsforschung sind je nach Fragestellung prinzipiell geeignet, das Bodenerosionspotential in einer Landschaft zu bestimmen (vgl. HENSEL 1991, GOUDIE 1995, KRETSCHMAR 1992):

1. Kartierung rezenter Erosionspuren

Rezente Erosionsspuren wie Rillen, Bodenverschlämmung oder Verspülungen werden im Gelände erfaßt und kartiert. Anhand ihrer Eigenschaften und ihres Auftretens wird danach die Erosionsgefährdung bewertet.

2. Fracht- und Sedimentmessungen

Über Sedimentfallen oder direkte Messungen von Abfluß und Fracht wird das abtransportierte Bodenmaterial bestimmt und danach unter Berücksichtigung des Einzugsgebiets die Erosionsgefährdung ermittelt.

3. Historische Bestimmungsmethoden

Gekappte Bodenprofile, korrelierte Sedimente und junge Böden wie Kolluvien oder Auenlehme werden im Gelände erfaßt und untersucht. Anhand ihrer Ausprägung und ihres Auftretens wird danach die Erosions- bzw. Akkumulationsgefährdung ermittelt.

4. Bodenerosionsmodelle

Mit Bodenerosionsmodellen wird der Bodenabtrag simuliert, entweder durch direkte Modellierung erosionswichtiger Prozesse oder durch empirische Gleichungen. Obwohl Bodenerosionsmodelle in der Regel auf realen Abtragsmessungen und -analysen beruhen, wird die Erosionsgefährdung mit ihnen nur indirekt ermittelt. Hinter ihren Aussagen stehen keine realen Geländespuren.

Unter Berücksichtigung der mitteleuropäischen Erosionsproblematik und der Tatsache, daß sehr große Gebiete beurteilt werden müssen, eignen sich nur die Bodenerosionsmodelle zur Abschätzung der Erosionsgefährdung.

Die **Kartierung rezenter Erosionsspuren** ist wegen des quantitativ geringen Bodenabtrags, der saisonalen Verwischung von Erosionsspuren durch das Pflügen der Äcker und auch aus Kostengründen ungeeignet. Gegen **Fracht- und Sedimentmessungen** sprechen vor allem Kostengründe und die Schwierigkeit, aus effektiv abgeschwemmtem Bodenmaterial die Erosionsgefährdung innerhalb des gesamten Einzugsgebiets beurteilen zu müssen. Fracht- und Sedimentmessungen erfassen nur das Bodenmaterial, welches das Einzugsgebiet am Ende verläßt. Dieser gemessene Wert läßt jedoch keine Rückschlüsse über die Verhältnisse innerhalb des Einzugsgebiets zu, da lokale Senken Bodenmaterial abfangen, bevor die Meßstelle erreicht ist.

Auch **historische Bewertungsmethoden** sind im Gegensatz zu den Bodenerosionsmodellen zur Bestimmung der rezenten Erosionsgefährdung ungeeignet. Obwohl mit ihnen die wirklichen Resultate eines jahrhundertlangen unfreiwilligen Erosionsversuchs analysiert werden, sprechen folgende Argumente gegen ihre Nutzung zu diesem Zweck:

1. Unterschiedliche Erosionswiderstände periglazialer Deckschichten

Jede periglaziale Deckschicht besitzt ihren ganz eigenen Erosionswiderstand (vgl. Anhang, Kap. 10.1). Der jungtundrenzeitliche Deckschutt ist wegen seiner schluffigen Bodenart sehr erosionsanfällig, der ihn unterlagernde tonigere Basisschutt deutlich weniger. Ähnliches gilt für die meisten Bodenprofile im Löß, wo über den Interglazialböden die Erodierbarkeit meist ansteigt. Da in Mitteleuropa im allgemeinen leicht erodierbare Bodenschichten von widerständigen unterlagert werden, eignen sich historische Methoden prinzipiell nicht zur Beurteilung der Erosionsgefährdung. Denn nach einer Kappung des Deckschutts steigt mit den zutage tretenden Bodenschichten der Erosionswiderstand in der Regel stark an. Dies führt zur paradoxen Situation, daß gerade Böden nach einer massiven Kappung des Profils (Deckschutt abgetragen) heute unter Umständen weniger gefährdet sind, als ihre kaum erodierte Umgebung.

Auf diese Weise verhalten sich die periglazialen Deckschichten fast wie Festgesteine in Schichtstufenlandschaften, wo eine unterschiedliche Widerständigkeit bei entsprechender Lagerung zur **Reliefumkehr** führt. Ein einfacher Analogieschluß (starke Kappung = starker gegenwärtiger Abtrag) ist daher im Fall von Bodenerosionsbewertungen ebenso verfehlt, wie bei geomorphologischen Untersuchungen von Schichtstufen.

2. Die absolute Höhe des Bodenabtrags zeigt sich nicht im Bodenprofil

Bodenprofile zeigen immer den Saldo aus zwei unterschiedlichen Prozessen, der Bodenzufuhr und des Bodenabtrags. Sie liefern lediglich **relative Daten über das Verhältnis von Zu- und Abfuhr**, quantitative Aussagen über die Höhe des verfrachteten Bodenmaterials machen sie nicht. Gekappte Bodenprofile zeigen nur, daß der Bodenabtrag um einen bestimmten Faktor größer ist als die Bodenzufuhr; Kolluvien, daß die Bodenzufuhr den Bodenverlust überwiegt.

Besonders ungeeignet ist die Anwendung historischer Bestimmungsmethoden an **Mittelhängen**. Aufgrund gleich hoher Zu- und Abfuhr von Bodenmaterial bleibt das Bodenprofil in der Regel unbeeinflusst. Bei den vorherrschenden konvex-konkaven Hangprofilen sind aber genau hier die erosiven Kräfte und folglich auch der Bodenabtrag am größten (maximale Neigung, relativ hohe Wassermengen). Mit historischen Bestimmungsmethoden kann das Gefährdungspotential, das von solchen Flächen ausgeht, überhaupt nicht erkannt werden, da mit ihnen ein Ruhezustand diagnostiziert wird, den es in Wirklichkeit nicht gibt. Tatsächlich werden jedoch von Mittelhängen große Stoffmengen in tiefer liegende Bereiche exportiert. Unter dem Aspekt der überdüngten mitteleuropäischen Felder sind gerade diese Flächen potentielle Gefahrenherde, obwohl sie mit historischen Methoden niemals als solche erkannt werden würden.

3. Veränderte Landnutzung und Bewirtschaftungspraktiken

Bodenprofile spiegeln das Resultat einer jahrhundertlangen Erosionsgeschichte mit vielen Nutzungswechseln und veränderten landwirtschaftlichen Praktiken wieder. Als geschichtliche Urkunden der Bodenerosion eignen sie sich prinzipiell nicht zur Abschätzung der rezenten Erosionsgefährdung. Darüber hinaus wurde der Bodenabtrag im Laufe der Jahrhunderte durch eine ständig intensivierete Landwirtschaft erhöht. Insofern kann anhand von Bodenprofilen kaum die rezente Erosionsgefährdung abgeschätzt werden. Veränderte Bewirtschaftungspraktiken, Flurbereinigungsmaßnahmen, abtragsfördernde Kulturen und die Beseitigung von Hindernissen verhindern dies.

Im Gegensatz zu anderen Bestimmungsmethoden stellen **Bodenerosionsmodelle** eine geeignete Möglichkeit zur preiswerten und genauen Erosionsbeurteilung dar. Mit ihnen wird der voraussichtliche Bodenabtrag durch mathematische Gleichungssysteme berechnet, welche die erosiven Prozesse simulieren. Die zuvor beschriebenen Nachteile anderer Methoden werden dabei weitgehend vermieden.

Man unterscheidet zwischen **zwei Arten von Bodenerosionsmodellen**, den Physikalischen und den Empirischen (vgl. BORK 1991, BORK/SCHRÖDER 1996, DE ROO 1996, LANE/LOPES/NEARING 1994, RENARD/LANE/FOSTER 1996):

Physikalische Erosionsmodelle versuchen, alle für die Bodenerosion verantwortliche Prozesse (Aufprall einzelner Regentropfen, Ablösung von Bodenpartikeln, Aufnahme in abfließendes Wasser, Transport, uvm.) und ihre vielfältigen Wechselwirkungen zu berücksichtigen. **Empirische Modelle** sind einfacher aufgebaut, weil sie das Ergebnis statistischer Regressionsberechnungen sind, mit denen vorausgegangene Erosionsversuche analysiert wurden. Unter einer meist künstlichen Berechnungsanlage werden hierzu vermutete erosionsrelevante Faktoren (wie Korngröße, Neigung, Vegetationsbedeckung, Fließlänge o.ä.) immer wieder verändert und die gemessenen Werte an abgetragenen Bodenmaterial nach statistischen Kriterien ausgewertet. Aus diesen Ergebnissen wird abschließend die entsprechende empirische Erosionsformel gewonnen.

Aufgrund dieser Vorgehensweise sind empirische Bodenerosionsmodelle, wie die später angewandte RUSLE-Gleichung, nur Annäherungen an die Wirklichkeit. Darüber hinaus gelten sie lediglich in den geoökologischen Zonen, wo sie gewonnen wurden. Denn das komplexe Prozeßgefüge der Erosion wird keineswegs erfaßt. Vielmehr betrachten empirische Modelle den Erosionsvorgang als abgeschottete **Black Box** und klammern Wechselwirkungen zwischen vielen Teilprozessen aus. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit nur vom **Bodenerosionspotential** und nie von Bodenerosionssimulation gesprochen. Simulationen sind nur durch prozeßorientierte physikalische Modelle möglich.

In der Praxis können jedoch die physikalischen Modelle nicht angewandt werden. Erstens gibt es (noch) kein Modell, daß alle erosionsrelevanten Prozesse und ihre Wechselwirkungen vollständig und widerspruchsfrei integriert. Zweitens wächst der Datenbedarf auch bei einem nur halbwegs genauen physikalischen Bodenerosionsmodell sprunghaft an. Zudem verhindern hohe Anforderungen an die Datenqualität jede Anwendung in einem größeren Gebiet. Exakte Daten können schon aus Kostengründen nicht beschafft werden. Bei weniger genauen Ausgangsdaten reagieren die prozeßorientierten physikalischen Modelle sehr sensibel und oft in unvorhergesehener Weise.

Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit ein robustes empirisches Modell zur Erosionsprognose verwendet, eine erweiterte und leicht revidierte Version der bekannten Universal Soil Loss Equation USLE. Denn „...aufgrund ihrer einfachen Struktur, des geringen Datenbedarfs sowie ihrer kurzfristigen Verfügbarkeit ist die USLE gegenwärtig das einzige Modell, mit dessen Hilfe kurzfristig und mit vergleichsweise geringem Aufwand Ausmaß und Verteilung der langjährigen Erosionsgefährdung geschätzt werden können“ (BORK/SCHRÖDER 1996, S.8).

2.2 Allgemeine Aspekte der RUSLE-Erosionsgleichung

2.2.1 Grundsätzliche Vorbemerkungen

Die empirische Erosionsgleichung **RUSLE** (Revised Universal Soil Loss Equation) ist eine überarbeitete und leicht revidierte Nachfolgeversion der allgemeinen Bodenabtragsgleichung USLE und hat diese seit Mitte der 90er Jahre abgelöst (vgl. u.a. RENARD/FOSTER/WEESIES 1997, RENARD/LAFLEN/FOSTER/MCCOOL 1994, SCHWERTMANN/VOGL/KAINZ 1990, WISCHMEIER/SMITH 1978). Beide Gleichungen sind in ihrer Grundstruktur identisch und berücksichtigen folgende erosionsrelevante Faktoren:

- Art und Stärke des Niederschlags (= **klimatische Faktoren**)
- Verschiedene Bodeneigenschaften (= **pedogene Faktoren**)
- Abflußrelevante Eigenschaften des Reliefs, d.h. die Länge und Neigung eines Hangs (= **topographische Faktoren**)
- Art der Vegetationsbedeckung und der Bodenbearbeitung (= **nutzungsspezifische Faktoren**)

Jeder dieser erosionsrelevanten Faktoren verursacht auf seine Weise einen mehr oder minder großen Bodenabtrag. Alle zusammen quantifizieren den jährlichen Bodenverlust, der mit folgender Formel in t/ha/Jahr ermittelt wird (nächste Seite):

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Dabei bedeuten:

A = langjähriger mittlerer Bodenabtrag in t/ha/a

R = klimatischer Faktor, der die erosive Energie des Niederschlags angibt.

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor

L / S = topographische Faktoren, mit S als Hangneigungs- und L- als Hanglängenfaktor

C = Bedeckungsfaktor, der die erosionsrelevanten Einflüsse der Vegetation angibt.

P = Erosionsschutzfaktor, der die erosionsrelevanten Einflüsse bestimmter Bearbeitungsmethoden (Konturnutzung, Streifensaat, o.ä.) angibt.

Diese Formel ist die **Standardformel der RUSLE- und USLE-Erosionsgleichung**. Unterschiede zwischen beiden Erosionsgleichungen bestehen nur in der Art und Weise, wie die einzelnen Faktoren R, K, L, S, C und P ermittelt werden. Jeder dieser Faktoren wird vor Anwendung der Standardformel mit einer oder mehreren mathematischen Gleichungen berechnet. Dabei ist das Resultat eine dimensionslose positive Zahl, die den Beitrag des Faktors am Bodenabtrag bestimmt. Das Produkt der sechs Faktoren ergibt den voraussichtlichen Bodenabtrag in t/ha pro Jahr.

Die Berechnungsschritte, die zur Ermittlung der einzelnen Faktoren notwendig sind, werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Auf einige **grundlegende Aspekte**, die bei der Nutzung der RUSLE-Erosionsgleichung beachtet werden müssen, soll jedoch schon an dieser Stelle hingewiesen werden:

1. RUSLE und USLE sind Bodenerosionsformeln, die ursprünglich für die **Beurteilung des durchschnittlichen Bodenabtrags an einem ununterbrochenen Hang** entwickelt wurden. Von jedem Faktor wird der Durchschnittswert ermittelt, den dieser am gesamten Hang besitzt (d.h. von der Wasserscheide bis zum Hangfuß). Danach werden die Faktorenwerte miteinander multipliziert (vgl. Abbildung 1). Im Fall querender Hindernisse bilden diese anstatt des Hangfußes die untere Grenze. Damit vervielfacht sich je nach Zahl der Hindernisse auch die Zahl der Hangabschnitte, die berechnet werden müssen.

Diese Vorgehensweise anhand der Standardformel führt zu folgenden **Einschränkungen**:

- Durch die Beschränkung auf Durchschnittswerte können keine hochauflösenden und genauen Erosionsprognosen erstellt werden
- Der Bodenabtrag wird unter der Annahme eines gestreckten Hangs prognostiziert. Die genaue Hangmorphologie mit konvexen und konkaven Abschnitten und ihr Einfluß auf den Bodenabtrag wird übergangen.

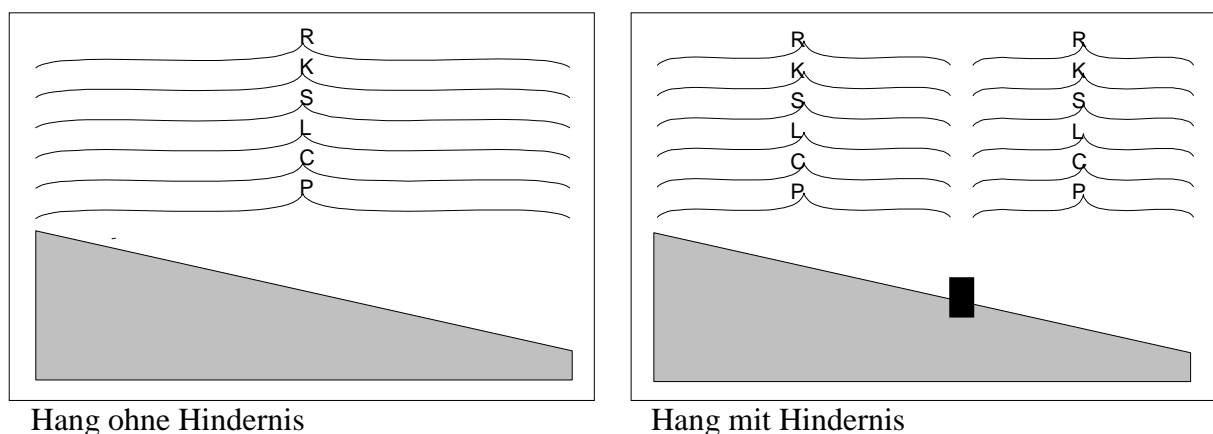
- Es wird nur der Bodenabtrag berechnet, der Saldo aus Bodenzufuhr und –abfuhr bleibt dagegen unberücksichtigt. Damit sind keine Aussagen zu Profilverkürzungen oder Akkumulationstendenzen möglich.
- Es wird nur ein zweidimensionaler Hang und kein dreidimensionales Einzugsgebiet betrachtet. D.h. Einflüsse von „der Seite“ werden generell ignoriert

Diese schwerwiegenden Einschränkungen gelten nur für die Standardformel der RUSLE, mit Ausnahme des letzten Punktes jedoch nicht für die erweiterte RUSLE- bzw. MUSLE 87-Gleichung, die in Kap. 2.3 bzw. 2.4 beschrieben werden. Die Einbeziehung seitlicher Einflüsse, d.h. die **Übertragung einer zweidimensionalen Hangformel auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet** ist jedoch so komplex, daß diesem Gegenstand ein eigenes Kapitel gewidmet wird (Kap. 3). Gerade an der Lösung dieser Frage zeigt sich, ob eine GIS-gestützte Erosionsprognose aussagekräftig ist oder nicht.

2. RUSLE und USLE gelten nur für Flächen, die entweder **über einen bestimmten Zeitraum des Jahres hinweg vegetationsfrei sind, oder generell über eine lückenhafte Vegetation verfügen**. D.h. für Ackerflächen oder für Gebiete in semiariden bis ariden Klimazonen, bei denen das Klima die Ausbildung einer dichten Vegetationsdecke verhindert. Weil beide empirischen Erosionsgleichungen nur für solche Gebiete entwickelt wurden, ist eine Übertragung auf Flächen mit lückenloser und ganzjähriger Vegetation wie Wälder oder Wiesen unzulässig¹. Diese Beschränkung mindert jedoch nicht die Aussagekraft von Bodenerosionsprognosen. Da in Mitteleuropa unter Wald bzw. dichtbewachsenen Wiesen weitgehend Formungsruhe herrscht, ist die Anwendung der RUSLE- bzw. USLE-Formel ohnehin nur auf Ackerflächen sinnvoll.

Abbildung 1:

Das Prinzip der Erosionsberechnung nach der RUSLE-Standardformel



¹ Erosionsprognosen über Wiesen und Wald sind nur dann zulässig, wenn die bodennahe Vegetation sehr lückenhaft ist (vgl. DISSMEYER/FOSTER 1980). In Mitteleuropa ist dies jedoch nicht der Fall.

2.2.2 Die Faktoren der RUSLE-Gleichung

2.2.2.1 Der klimatische Faktor R

Der klimatische Faktor R der RUSLE gibt die **kinetische Erosionsenergie des fallenden Niederschlags** als einziger aktiver Kraftquelle beim Bodenabtrag an. Die Auswirkungen der Winderosion werden generell nicht berücksichtigt².

In die Berechnung des R-Faktors fließen im wesentlichen drei Größen ein, die einen jeweils unterschiedlichen Einfluß auf den Bodenabtrag haben (vgl. das Berechnungsschema auf der nächsten Seite, genauere Erläuterungen dazu finden sich u.a. bei BORK/SCHRÖDER 1996, SCHWERTMANN et al. 1990, WIESNER 1986, RENARD/FOSTER/WEESIES 1997):

- die absolute Niederschlagsmenge in mm
- die mittlere Niederschlagsintensität in mm/h
- die maximale Niederschlagsintensität in mm/h

Anhand von Regenschreiberdaten wird ein einzelnes Niederschlagsereignis in Abschnitte gleicher Intensität unterteilt und danach seine kinetische Energie berechnet (Formel 1, 2). Die kinetische Energie ist dabei sowohl von der Intensität als auch von der gefallenen Niederschlagsmenge abhängig. Zeitlich begrenzte Maxima beeinflussen über eine sprunghafte Verstärkung des Splasheffekts den nachfolgenden Bodenabtrag entscheidend, weil sie die Aufnahme von Bodenpartikeln in einen laminaren Wasserfluß entscheidend fördern (vgl. SHARMA 1996). Deshalb muß die in Formel 2 berechnete kinetische Niederschlagsenergie zusätzlich durch $I_{\max 30}$ modifiziert werden (Formel 3). Der gewonnene Wert R_i ist die Erosionsenergie eines einzelnen Niederschlags; der Wert R die gesamte durchschnittliche Erosionsenergie des Niederschlags an diesem Ort.

² Die Nichtberücksichtigung der Winderosion ist im allgemeinen nicht besonders schwerwiegend, da in Mitteleuropa Bodenabtrag durch Wind nur in bestimmten Gebieten verstärkt auftritt (v.a. in küstennahen Gebieten mit sandigen Böden und häufig auftretenden trockenen Ostwinden, vgl. HASSENFLUG 1992, RICHTER 1965, 1980, SCHÄFER et al. 1991).

Schema zur Berechnung des R-Faktors:

$\mathbf{E_i = (11.89 + 8.73 \log I_i) * N_i * 10^{-3}}$	(1)
$\mathbf{E = \sum E_i}$	(2)
$\mathbf{R_i = E * I_{max30}}$	(3)
$\mathbf{R = 1/t * \sum R_i}$	(4)

Hierbei bedeuten:

E_i = kinetische Energiedichte eines in sich homogenen Abschnittes bei einem einzelnen Regenereignis in KJ/m^2

I_i = Regenintensität eines homogenen Teilabschnittes in mm/h , d.h. kaum Intensitätswechsel, sondern gleichmäßige Niederschlagsstärke)

N_i = absolute Niederschlagsmenge dieses homogenen Teilabschnittes in mm

E = gesamte kinetische Energiedichte eines Einzelregens

R_i = Erosivität eines einzelnen Niederschlagsereignisses

I_{max30} = maximale Regenintensität eines Einzelregens, d.h. die maximale Regenenergie, die innerhalb von 30 Minuten fällt

R = durchschnittliche Erosivität des fallenden Niederschlags (dimensionslos)

t = Anzahl der Jahre, bei denen alle einzelnen Niederschläge addiert wurden

Das beschriebene Berechnungsschema besitzt den entscheidenden Vorteil, in allen Klimaten angewandt zu werden. Eine Nutzung in der Praxis ist aufgrund fehlender Regenschreiberdaten oft nicht möglich. SCHWERTMANN et al. (1990) haben aus diesem Grund zwei Formeln entwickelt, mit denen der R-Faktor auch aus normalen Niederschlagssummen berechnet werden kann. Sie sind das Ergebnis von Regressionsberechnungen, bei denen das Verhältnis der nach obigem Schema berechneten R-Werte zu den mittleren Jahresniederschlägen in Mitteleuropa untersucht wurde.

Die folgenden Formeln gelten deshalb nur für Mitteleuropa oder Gebiete mit gleichartigem Niederschlagsregime:

$\mathbf{R = 0.083 * N - 1.77}$	(5)
oder: $\mathbf{R = 0.141 * N_s - 1.48}$	(6)

Hierbei bedeuten:

R = Erosivität des fallenden Niederschlags (dimensionslose Zahl)

N = Jahresniederschlag in mm

N_s = Niederschlag während der Sommermonate in mm

Die Resultate der Gleichungen 5 und 6 liegen mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 > 0.9$ (siehe SCHWERTMANN et al. 1990, S.15) recht nah an den Ergebnissen, die sonst nur über das wesentlich aufwendigere R-Berechnungsschema gewonnen werden können. Für Mitteleuropa typische R-Werte bewegen sich etwa im Bereich zwischen 50 und 100. Da Daten über die Niederschlagsmenge in der Regel immer vorhanden sind, Regenschreiberdaten dagegen nur in Ausnahmefällen, wird bei Erosionsprognosen in Mitteleuropa prinzipiell eine der beiden Gleichungen benutzt.

2.2.2.2 Der pedogene Faktor K

Der K-Faktor ist ein Maß für die Anfälligkeit des Bodens gegenüber einwirkenden Kräften. Er bezeichnet den **bodeneigenen Erosionswiderstand**, der von zahlreichen Faktoren und ihren Wechselwirkungen bestimmt wird. Vereinfachend kann er durch folgende Bodeneigenschaften beschrieben werden, mit denen er gut korreliert:

- der **Bodenart** des Oberbodens
- dem Anteil an **organischer Substanz** im Oberboden
- der **Aggregatklasse** des Oberbodens
- der **Wasserdurchlässigkeit** des gesamten Bodenprofils

Mit diesen Bodeneigenschaften werden die grundsätzlichen Faktoren berücksichtigt, welche die Erosionsanfälligkeit des Bodens beeinflussen: Der direkte Widerstand von Bodenpartikeln gegenüber einwirkenden Kräften (d.h. die Erosionsresistenz von Bodenpartikeln) und die Fähigkeit des Bodens, diese Kräfte umzusetzen oder zu absorbieren (d.h. die Infiltrationskapazität der Böden).

Anhand gewonnener und im Labor analysierter Bodenproben wird der Bodenwiderstand mit folgender Formel berechnet (genauere Informationen finden sich u.a. bei Schwertmann et al. 1990, S.19ff, RENARD/FOSTER/WEESIES 1997, S.65ff):

$$K = 2.77 * 10^{-6} * M^{1.14} * (12 - OS) + 0.043 * (A - 2) + 0.033 * (4 - D)$$

Hierbei bedeuten:

K = Erosionswiderstand des Bodens als dimensionsloser Wert

M = (%Schluff + Feinstsand) * (%Schluff + %Sand)

OS = %organische Substanz im Bereich von 0 – 4% (größere Werte werden als 4% gesetzt)

A = Aggregatklasse (4 Klassen von feinkrümmelig = 1 bis plattigfest = 4)

D = Durchlässigkeitsklasse (6 Klassen von sehr gering = 1 bis extrem hoch = 6)

In der Praxis bewegt sich der berechnete K-Wert immer zwischen 0 und 1. Größere Werte entsprechen geringeren Erosionswiderständen, kleinere höheren. D.h. je größer der K-Wert ist, desto mehr Boden wird abgetragen. Das größte Gewicht liegt dabei auf der Korngrößenverteilung im Oberboden, wobei ein hoher Anteil an schluffigen Bodenpartikeln zu K-Werten bis nahe 1 führen kann. Insgesamt steigt die Erosionsanfälligkeit des Bodens nach der K-Formel mit:

- wachsendem Schluff- und Feinstsandgehalt
- geringer werdendem Ton- und Humusgehalt
- größer werdenden Aggregaten³
- geringer werdenden Wasserdurchlässigkeit

Trotz einfacher Anwendung – Berechnung von M und OS anhand untersuchter Oberbodenproben im Labor, Schätzung von A und D anhand von Tabellen bei der Bodenansprache im Gelände – ist die Nutzung der K-Faktorformel sehr zeitintensiv. Um den Aufwand bei Erosionsprognosen in größeren Gebieten erträglich zu halten, muß zur Bestimmung des K-Faktors auf schon **vorhandene Datenquellen** zurückgegriffen werden. Folgendes Datenmaterial steht dabei in der BRD prinzipiell zur Verfügung:

- **Flächendeckende Karten der Reichsbodenschätzung**

Obwohl das Datenmaterial der Reichsbodenschätzung nur Informationen zur Bodenart und Zustandsstufe liefert, lassen sich daraus annäherungsweise die K-Werte bestimmen. Durch Nutzung eines Umrechnungsschlüssels können die eingetragenen Bodenarten direkt in K-Werte transformiert werden (vgl. SCHWERTMANN et al. 1990 und VOGL/BECHER 1985).

- **Neueste Bodenkarten im Maßstab 1:25000**

In den neuesten Bodenkarten einiger geologischer Landesämter werden die K-Faktoren direkt angegeben. So finden sich beispielsweise in den tabellarischen Erläuterungen baden-württembergischer Bodenkarten die entsprechenden K-Faktoren zu jedem untersuchten Bodenprofil (vgl. z.B. GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1992).

Sofern vorhanden, sollten vor allem die neuesten Bodenkarten zur Gewinnung der K-Werte genutzt werden, da hinter den eingetragenen Werten umfangreiche Gelände- und Laboruntersuchungen stehen. Darüber hinaus sind sie auch zur groben Bestimmung der erosiven Hänglänge geeignet (vgl. Kap. 2.2.2.3).

³ Größere Aggregate bringen nach MARKS et al. (1990) weniger Bindungskräfte auf und werden daher von aufprallenden Regentropfen leichter zerschlagen. Damit erhöht sich die Erosionsanfälligkeit bei zunehmender Aggregatgröße. Allerdings kann man in diesem Punkt durchaus geteilter Meinung sein. HENSEL (1991) betont, daß sich die Erosionsanfälligkeit gerade in entgegengesetzter Richtung erhöht, also bei kleineren Aggregatgrößen. Da jedoch in der Berechnungsformel zum K-Faktor die Aggregatgröße nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist dieser Diskurs für praktische Fragestellungen nicht relevant.

2.2.2.3 Die topographischen Faktoren S und L

Die topographischen Faktoren S und L sind zusammen mit dem C-Faktor die wichtigsten Elemente der RUSLE-Erosionsgleichung. S und L bestimmen, wie die potentielle Energie aufgetroffenen Niederschlags im Gelände in erosive Kräfte umgesetzt wird. Dabei ist der S-Faktor ein Maß für die Auswirkungen der **Hangneigung** auf den Bodenabtrag, während der L-Faktor die Einflüsse der **Hanglänge** berücksichtigt.

Beide Faktoren beschreiben im Prinzip das **energetische Erosionspotential abfließenden Oberflächenwassers**. Dies steigt einerseits mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Turbulenz (d.h. mit zunehmender Hangneigung, beschrieben durch den S-Faktor), andererseits mit zunehmender Wassermenge (d.h. bei zweidimensionaler Betrachtungsweise mit zunehmender Hanglänge und -neigung, beschrieben durch den L-Faktor) (vgl. dazu u.a. FOSTER/WISCHMEIER 1974, MOORE/BURCH 1986, MOORE/BURCH 1986A).

Mit folgenden Gleichungen werden beide Faktoren berechnet (vgl. RENARD/FOSTER/WEESIES 1997, S.103ff):

	$L = (\lambda / 22.13)^m$	(1)
wobei:	$m = \beta / (1 + \beta)$	(2)
	$\beta = (\sin \Theta / 0.0896) / [3 * (\sin \Theta)^{0.8} + 0.56]$	(3)

$S = 10.8 * \sin \Theta + 0.03$	bei $s < 9\%$	(4)
$S = 16.8 * \sin \Theta - 0.5$	bei $s \geq 9\%$	(5)

Hierbei bedeuten:

L = Hanglängenfaktor als dimensionslose Zahl.

λ = Länge des gesamten erosiven Hangs in Metern. d.h. von der Wasserscheide bis zu dem Ort, wo keine Erosion mehr stattfindet, also der Akkumulationszone am Hangfuß.

m = Hanglängenexponent, der das Verhältnis von Rillen- zu flächenhafter Erosion angibt.

Rillenerosion ist diejenige Erosionsart, die primär durch hydraulische Fließkräfte des Oberflächenabflusses verursacht wird, dagegen wird flächenhafte Erosion hauptsächlich durch eine Kombination von laminarem Wasserabfluß und den Auswirkungen des Splasheffekts bewirkt (vgl. SHARMA 1996, NEARING/LANE/LOPES 1994).

β = Anfälligkeit für Rillenerosion. Diese wächst mit steigender Neigung.

S = Hangneigungsfaktor als dimensionslose Zahl.

Θ = Hangneigung in Grad.

s = Hangneigung in %.

Wie verschieden die topographischen Faktoren S und L auf steigende Hangneigungen bzw. Hanglängen reagieren, zeigt Abbildung 2. Während der S-Faktor bei einer Neignungsvergrößerung immer gleichmäßig anwächst und nur bei 9% Steigung aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsformeln eine kleine Unregelmäßigkeit aufweist, gibt der L-Faktor bei steigenden Hanglängen und Neigungen ein anderes Bild ab.

Das unterschiedliche Verhalten wird verständlich, wenn man berücksichtigt, daß **der S-Faktor die Auswirkungen der Fließenergie, der L-Faktor die Folgen der Abflußmenge** auf den Bodenabtrag quantifiziert und sich die Berechnungsformeln auf den **gesamten Hang** beziehen.

So führt eine Steigerung der Hangneigung in jedem Fall zu einem überproportional höheren S-Faktor, weil ein dynamischerer Abfluß verursacht wird, der sich am gesamten Hang von der Wasserscheide bis zum Hangende auswirkt. Dagegen nimmt der L-Faktor mit zunehmender Hanglänge immer schwächer zu und wird zudem entscheidend von der Gesamtneigung des Hangs beeinflusst (= m-Wert). Das Verhalten beider Faktoren hat dazu geführt, daß in der Literatur und bei diversen GIS-gestützten Erosionsuntersuchungen oft die Meinung vertreten wird, die Bestimmung der erosiven Hanglänge sei überflüssig (AUERSWALD 1987, BUCK 1996, MARKS et al. 1992). Denn letztendlich würde der Bodenabtrag doch entscheidend von der Hangneigung beeinflusst, nicht von der Hanglänge.

Tatsächlich sprechen jedoch folgende **Argumente für die Berücksichtigung der Hanglänge als wichtigem Einflußfaktor:**

1. Ab einer gewissen Mindestneigung steigt der L-Wert mit zunehmender Hanglänge stark an; auch jenseits einer Hanglänge von etwa 100m⁴.
2. Die Hanglänge ist der einzige räumliche Einflußfaktor der RUSLE und nur durch sie kann die Abflußmenge berücksichtigt werden. Das ist vor allem dann wichtig, wenn dreidimensionale Gebiete untersucht werden müssen. Dort kann die Hanglänge durch die Werte Einzugsgebietsgröße bzw. potentielle Wassermenge ersetzt werden. Da diese Werte aufgrund der dreidimensionalen Betrachtungsweise sehr viel größer werden können, als dies bei einer metrischen Größe an einem zweidimensionalen Hang der Fall ist, steigt auch der L-Faktor an den entsprechenden Stellen stark an.

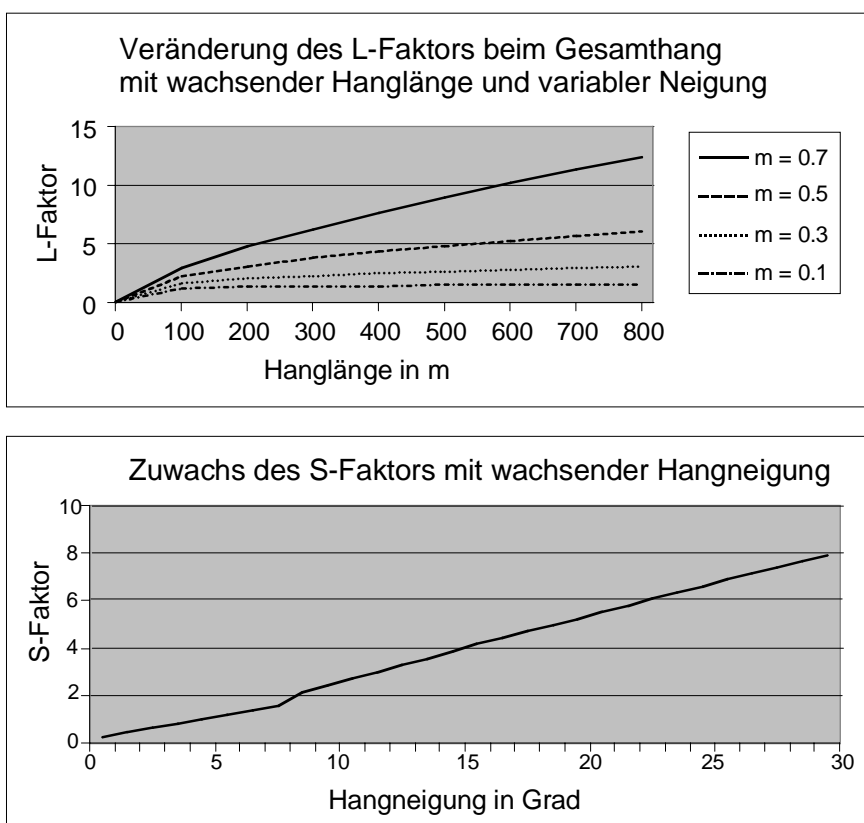
⁴ Laut Sensitivitätsanalysen (vgl. AUERSWALD 1987) steigt der L-Faktor bei Hanglängen über 100 m nur noch unterproportional an. Grundlage dieser Analysen waren aber ältere Formeln. Dort konnte der maximale m-Wert nicht größer als 0.5 sein. Die RUSLE erlaubt aber m-Werte von über 0.7, womit auch jenseits der Grenze von 100m ein Hanglängenwachstum den L-Faktor beträchtlich erhöhen kann.

3. Das entscheidende Argument ist jedoch, daß sich die vergrößerte Abflußmenge, welche von einem längeren Hang verursacht wird, nur im unteren Hangbereich auswirkt (vgl. Abbildung 3). Die weiter oben liegenden Bereiche bleiben unbeeinflusst. Die Erosion wird nur dort gesteigert, wo sich die Abflußmenge effektiv erhöht, also im neu hinzugekommenen Hangstück. Mit der L-Faktorformel werden aber **nur Durchschnittswerte berechnet, die sich auf den gesamten Hang beziehen**. Daher erscheint die Wirkung einer größeren Hanglänge sehr viel kleiner, als sie in Wirklichkeit im unteren Hangbereich ist.

Welche Auswirkungen dies im einzelnen hat, wird in den nächsten beiden Kapiteln beschrieben. Es wird gezeigt, **daß gerade lokale Unterschiede bei der Abflußmenge zu entscheidenden Differenzierungen der Erosionsgefährdung führen**.

Abbildung 2:

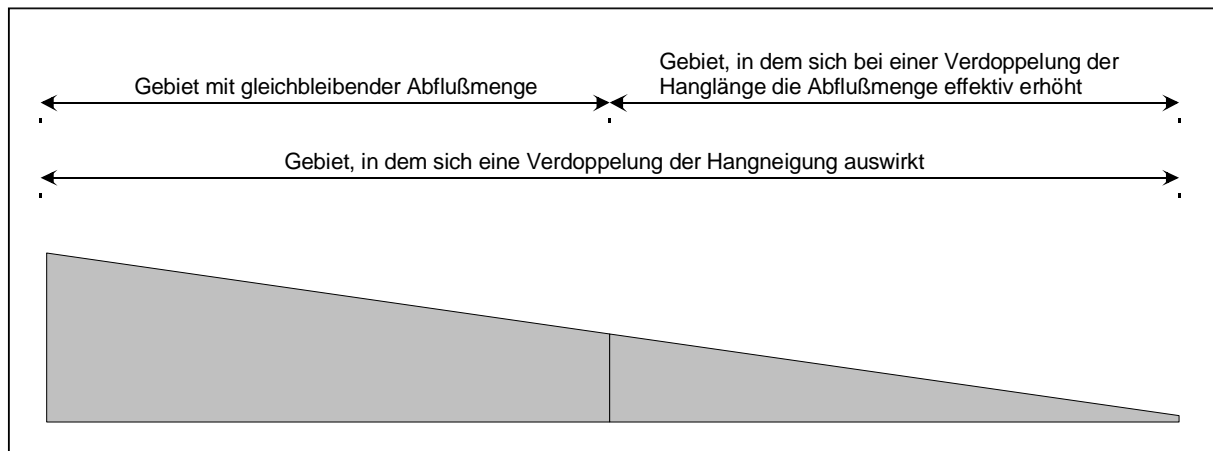
Wachstum von S und L bei verschiedenen Hanglängen und –neigungen



Quelle: Eigene Entwürfe. Berechnet nach den Gleichungen in diesem Abschnitt.

Abbildung 3:

Bezugsgebiet bei einer Verdoppelung von erosiver Hanglänge und -neigung



Quelle: Eigener Entwurf

2.2.2.4 Die nutzungsspezifischen Faktoren C und P

Die **Faktoren C und P** beschreiben die erosionshemmenden Auswirkungen menschlicher Bewirtschaftungsweisen im Vergleich zu einer vegetationslosen Schwarzbrache. Dabei quantifiziert der Bedeckungsfaktor C die **Schutzwirkung der angebauten Nutzvegetation**, der Bearbeitungsfaktor P die **erosionsmindernden Auswirkungen bestimmter Bearbeitungsweisen** (Konturpflügen, Streifennutzung u.a.). Beide Faktoren können je nach Nutzvegetation bzw. Bearbeitung Werte zwischen 0 und 1 erreichen, wobei Werte nahe 1 sehr erosionsfördernde Bewirtschaftungen kennzeichnen (z.B. lückenhafte Vegetation bzw. konventionelle Anbaumethoden), Werte nahe 0 erosionshemmende (z.B. dichte Vegetation bzw. hangparallele Bearbeitungsrichtung).

Obwohl beide Faktoren entscheidend das Ausmaß des Bodenabtrags beeinflussen, werden sie **bei der Berechnung des Bodenerosionspotentials im Untersuchungsgebiet nicht berücksichtigt** und deshalb auch nicht genauer beschrieben (genaue Erläuterungen und Informationen zum C- bzw. P-Faktor finden sich u.a. bei AUERSWALD 1992, BORK/SCHRÖDER 1996, RENARD/ FOSTER/LAFLÉN 1997, RENARD/LAFLÉN/FOSTER/MCCOOL 1994, SCHWERTMANN et al. 1990, STOCKING 1988). Der Grund für diese auf den ersten Blick etwas befremdliche Vorgehensweise liegt darin, daß beide Faktoren ausschließlich vom Menschen beeinflusst werden und somit einem ständigen Wechsel unterliegen. Im Gegensatz dazu sind die übrigen vier Faktoren (R, K, S, L) sehr konstant und entziehen sich weitgehend jedem anthropogenen Einfluß.

Vor diesem Hintergrund erschien es mir vorteilhaft, lediglich das weitgehend konstante **landschaftsbezogene Erosionspotential** ($A_{\text{Landschaft}} = R \cdot K \cdot S \cdot L$) zu prognostizieren, den ausschließlich vom Menschen beeinflussten Anteil am Bodenabtrag ($A_{\text{Mensch}} = C \cdot P$) dagegen zunächst zu ignorieren.

In einem weiteren Berechnungsschritt lassen sich dann auf der Basis des landschaftsbezogenen Erosionspotentials die maximal tolerierbaren C- und P-Werte ermitteln, die sich unter Annahme bestimmter Höchstgrenzen beim Bodenabtrag ergeben. Die dazu notwendige Berechnungsformel lautet wie folgt:

$$(C \cdot P)_{\text{Max}} = A_{\text{Max}} / A_{\text{Landschaft}}$$

Hierbei bedeuten:

A_{Max} = maximal erlaubter oder erwünschter Bodenabtrag in t/ha pro Jahr

$A_{\text{Landschaft}}$ = natürliches Erosionspotential bei angenommener Schwarzbrache, d.h. $A_{\text{Landschaft}} = R \cdot K \cdot S \cdot L$

$(C \cdot P)_{\text{Max}}$ = höchster erlaubter Wert von C und P um die geforderten A_{Max} -Bedingungen bei gegebenem landschaftsbezogenem Erosionspotential zu erreichen

Eine **zweistufige Prognosemethodik** nach obigem Muster bringt folgende Vorteile:

1. Erosionsgefährdete Gebiete lassen sich ohne Berücksichtigung der nutzungsspezifischen Faktoren exakter bestimmen. Eine zusätzliche Beachtung anthropogener Faktoren würde das naturräumliche Erosionspotential dagegen weitgehend verschleiern.
2. Eine Gefährdungskarte mit Daten des landschaftsbezogenen Erosionspotentials bleibt über Jahre hinweg aktuell.
3. Der zeitaufwendige Dateninput verringert sich, da keine Grundlagenkarten mit den entsprechenden C und P Faktoren erstellt werden müssen, die für die Prognose erosionsgefährdeter Lokalitäten ohnehin nicht benötigt werden.
4. Durch Ermittlung der tolerablen C- und P-Werte wird die **Eignung jeder Lokalität für bestimmte Nutzungsweisen** sichtbar gemacht. Um den Belangen des Erosionsschutzes zu genügen, müssen sich die aktuellen C- und P-Werte innerhalb der Spannweite von 0 bis $(C \cdot P)_{\text{Max}}$ bewegen, erst bei größeren Werten wird der Bodenabtrag zu groß. Da die entsprechenden C- und P-Werte für alle möglichen Nutzungsweisen (vgl. Tabelle 1) bekannt sind, kann eine unangepasste Bewirtschaftung schnell lokalisiert werden. Für Flächen mit einem $(C \cdot P)_{\text{Max}}$ -Wert nahe 1 oder darüber sind dagegen alle Nutzungsweisen ohne Einschränkungen möglich, weil hier selbst unter den Bedingungen einer Schwarzbrache kaum Bodenmaterial erodiert werden würde.

5. Die Angabe eines kombinierten $(C*P)_{\text{Max}}$ -Wertes liefert Empfehlungen für verträgliche Nutzungsweisen und macht notwendige Erosionsschutzmaßnahmen transparent und durchsetzbar. Es kann dem Bauern selbst überlassen werden, mit welchen Anbaumethoden er die notwendigen Höchstgrenzen beim Bodenabtrag unterschreitet.
6. Durch die Wahl verschiedener A_{Max} -Werte können **Szenarien** entwickelt werden, die die Folgen unterschiedlich strenger Abtragshöchstgrenzen zeigen. Mit wechselnden A_{Max} -Werten ändern sich die Zahl und Lage der kritischen Gebiete und damit die Kosten für zu ergreifende Schutzmaßnahmen. Ein vorhergehendes Szenario zeigt, ob bestimmte Grenzwerte überhaupt durchgesetzt werden können.

Tabelle 1:C-Faktoren von Anbaufrüchten und Fruchtfolgen⁵:

Kulturpflanzen	Offener Boden	Bedeckter Boden
Weizen	0.1	0.03
Gerste	0.13	0.03
Hafer	0.1	0.02
Raps	0.15	0.08
Kartoffeln	0.23	0.24
Zuckerrüben		
- konventionell	0.21	0.21
- Mulchsaat	0.05	0.05
Mais		
- konventionel	0.27	0.28
- Spurlockerung	0.18	0.2
- Mulchsaat	0.06	0.05
Hopfen		
- konventionell	0.97	
- Minimalbearbeitung mit Strohmulch		0.13

Fruchtfolgen	Offener Boden	Bedeckter Boden
Getreide	0.1	0.04
Raps (1/3) – Getreide (2/3)	0.1	0.06
Kartoffel (1/3) – Getreide (2/3)	0.14	0.1
Zuckerrüben (1/3) – Getreide (2/3)		
- konventionell	0.14	0.1
- Mulchsaat	0.08	0.05
Mais (1/3) – Getreide (2/3)		
- konventionell	0.18	0.14
- Mulchsaat	0.08	0.05
Klee/Luzerne (1/3) – Getreide (2/3)	0.03	0.02

Erklärungen:

Offener Boden: Abfuhr bzw. Unterpflüfung aller Pflanzenreste nach der Ernte. Der Boden bleibt bis zur Einsaat unbedeckt
 Bedeckter Boden: Pflanzenreste bleiben nach Ernte auf den Feldern, evtl. mit zusätzlicher Bedeckung von Stroh, Mulch,...

⁵ Durchschnittliche Werte, entnommen aus: SCHWERTMANN et al. 1990.

2.3 Berücksichtigung des lokalen Oberflächenabflusses mit der RUSLE

Die im vorigen Abschnitt in ihren Grundzügen beschriebene Standardmethodik zur Erosionsabschätzung anhand der RUSLE-Gleichung hat **folgeschwere Nachteile**:

1. Es werden immer nur die Durchschnittswerte des gesamten Hangs betrachtet, nicht jedoch der genaue Bodenabtrag an jedem einzelnen Geländepunkt.
2. Darüber hinaus läßt sich die erosive Hanglänge wegen ihrer Definition zwar mit viel Mühe im Gelände bestimmen, nicht jedoch mit einem GIS, weil nur in den seltensten Fällen Bodenkarten vorhanden sind, mit denen anhand der eingezeichneten Kolluvien das Ende der erosiven Hanglänge festgestellt werden kann⁶ (vgl. Abbildung 4 und Definition der erosiven Hanglänge in Kap 2.2.2.3).
3. Über die Faktoren L und S wird nur das durchschnittliche Erosionspotential des Oberflächenabflusses am gesamten Hang berücksichtigt.

All dies führt dazu, daß mit der RUSLE-Standardformel keine exakten Erosionsprognosen möglich sind. Selbst die errechneten Durchschnittswerte sind ungenau, da der Bodenabtrag unter der Annahme eines gestreckten Hangprofils analysiert wird.

Korrekte Bodenerosionsprognosen setzen voraus, daß das **lokale Zusammenspiel des Oberflächenabflusses mit allen übrigen erosionsrelevanten Faktoren** berücksichtigt wird. Dies ist jedoch mit der Standardformel der RUSLE-Erosionsgleichung nicht möglich, da mit ihr nur das durchschnittliche Erosionspotential des Oberflächenabflusses berechnet werden kann (vgl. Kap. 2.2.2, Abbildung 3 und Erläuterungen zum L-Faktor).

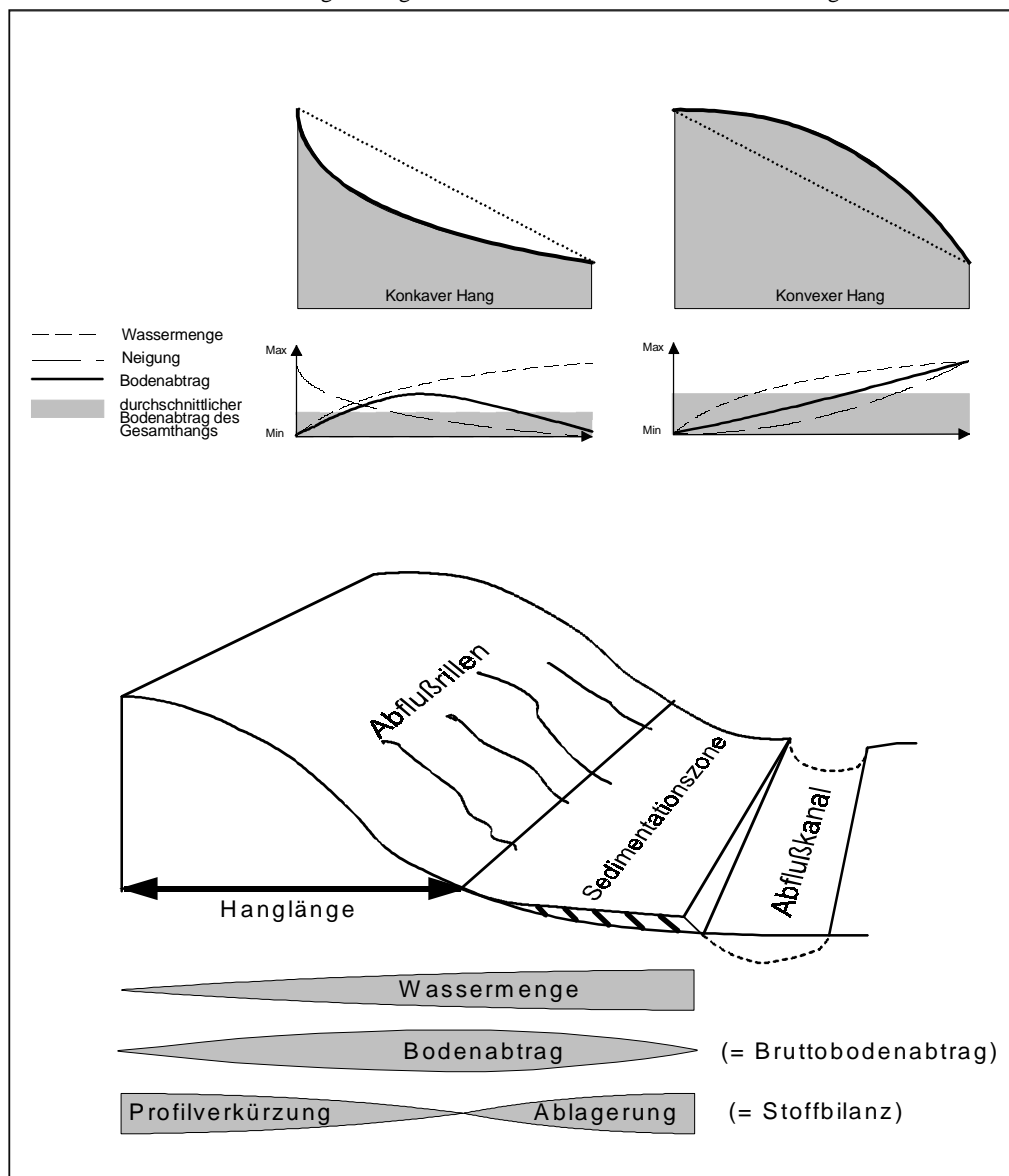
Das Erosionspotential des Oberflächenabflusses wechselt jedoch lokal sehr stark. Bei hohen Abflußmengen und Fließgeschwindigkeiten wird viel Bodenmaterial abgetragen, bei niedrigeren Werten entsprechend weniger. Immer hängt die Höhe des Bodenabtrags vom **Produkt aus Abflußmenge und Fließgeschwindigkeit** ab, weil beide zusammen das energetische Potential und die Transportkapazität des Oberflächenabflusses bestimmen (vgl. MOORE/BURCH 1986, MOORE/BURCH 1986A, FOSTER/WISCHMEIER 1974).

Welche Auswirkung das Zusammenwirken dieser Größen auf den lokalen bzw. durchschnittlichen Bodenabtrag an einem Hang hat, zeigt Abbildung 4 auf der nächsten Seite am Beispiel eines konkaven und konvexen Hanges.

⁶ Und selbst dies ist eine sehr kritische Angelegenheit, weil eingezeichnete Kolluvien in konventionellen Bodenkarten selten sehr genau eingezeichnet sind und andererseits auch in kolluvialen Bereichen immer noch Bodenmaterial abgetragen wird

Abbildung 4: Zusammenhänge zwischen Wassermenge, Neigung und Bodenabtrag bei unterschiedlichen Hangformen (oben) bzw. ein schematisiertes Erosionsprofil an einem typischen Hang (unten)

Grobe Typisierung unter sonst gleichen Bedingungen, d.h. alle übrigen erosionsrelevanten Faktoren ändern sich nicht. Im oberen Teil wird gezeigt, wie zwei nach der RUSLE-Standardformel vollkommen identische Hänge trotz gleicher Hanglänge und gleicher durchschnittlicher Neigung dennoch ein unterschiedliches Erosionspotential besitzen, weil sie verschiedene Hangprofile aufweisen. Der untere Teil veranschaulicht die Veränderung wichtiger erosionsrelevanter Größen an einem Hang.



Quelle: Eigener Entwurf unter Nutzung der erweiterten RUSLE-Erosionsgleichung.

Wie in der oberen Abbildung zu sehen ist, führt das Zusammenspiel von Abflußmenge und Fließgeschwindigkeit je nach Hangprofil zu unterschiedlichen Abtragsraten. Bei **konkaven Hängen** wird durch die gegenläufige Entwicklung von Wassermenge und Fließgeschwindigkeit das Abtragsmaximum in der Mitte des Hangs erreicht und nimmt danach wieder ab. Bei **konvexen Hängen** wachsen beide Größen und damit auch der Bodenabtrag kontinuierlich an. Der Grund für dieses unterschiedliche Verhalten liegt darin, **daß die erosive**

Wirkung des Oberflächenabflusses von seinem schwächsten Glied begrenzt wird. Im Fall des konkaven Hangs fehlt in Nähe der Wasserscheide die notwendige Wassermenge und am Hangfuß die notwendige Fließenergie. Durch die starken lokalen Unterschiede beider Teilpotentiale wird immer eines von beiden mangelhaft ausgenutzt⁷. Dies führt dazu, daß auch die durchschnittliche Erosionsenergie am konkaven Hang insgesamt niedriger ist, als beim konvexen, wo beide Teilpotentiale vollständig umgesetzt werden. Folglich ist der mittlere Bodenverlust trotz gleicher durchschnittlicher Teilpotentiale beim konvexen Hang größer als beim konkaven.

In Anbetracht der vielfältigen Variationen von Abflußmenge und Fließenergie bzw. ihrem Zusammenwirken mit den übrigen erosionsrelevanten Faktoren im Gelände, kann eine Bodenerosionsprognose nur dann genau sein, wenn sie eine **punktgenaue Ermittlung aller erosionsrelevanten Größen** erlaubt. Im Fall der RUSLE-Erosionsgleichung haben WISCHMEIER/FOSTER (1974) eine Methode entwickelt, mit der sich unter Wahrung ihrer Grundstruktur diese Forderung umsetzen läßt. Dabei werden alle Faktoren der RUSLE-Gleichung mit Ausnahme des L-Faktors unter Nutzung der bekannten Berechnungsformeln punktgenau ermittelt. Der L-Faktor wird dagegen durch folgende Berechnungsformel berechnet:

$$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^m} \quad \text{anstatt: } L = \frac{\lambda^m}{22.13^m}$$

Hierbei bedeuten:

i = i -tes Teilstück am Hang von oben

L_i = lokaler L-Faktor an einem bestimmten Punkt oder Abschnitt eines Hangs

λ_i = Entfernung vom Hanganfang bzw. einer hydrologischen Barriere bis zum unteren Ende des i -ten Teilstücks in m

m = Hanglängenexponent des Gesamthangs, entspricht dem m -Wert aus Kap. 2.2

Durch diese Umformulierung wird der L-Faktor, der bekanntlich die erosionsrelevanten Auswirkungen der durchschnittlichen Abflußmenge bewertet, durch einen modifizierten L_i -Faktor ersetzt. **Im Gegensatz zum normalen L-Wert quantifiziert der L_i -Faktor das Erosionspotential der lokalen Abflußmenge.** Dabei muß beachtet werden, daß die L_i -Faktorformel eine umformulierte Kontinuitätsgleichung zur Berechnung des Sedimenttransports ist. Obwohl in der oberen Beschreibung für λ_i ausschließlich Entfernungswerte verwendet werden, können statt dessen auch zweidimensionale Werte (Größe des Einzugsgebiets in qm) oder direkte Abflußgrößen (potentielle oder aktuelle Abflußmenge in l) eingesetzt werden.

⁷ Vgl. Unterschiede zwischen „Detachment limited erosion“ und „Transport limited erosion“ bei WISCHMEIER/FOSTER (1974).

Erweiterte RUSLE-Erosionsformel nach WISCHMEIER/FOSTER⁸:

(Konkrete Anwendung im Gelände, vgl. Abbildung 6 und 7 auf S.30)

$$A_i = R_i * K_i * S_i * C_i * P_i * \underbrace{\frac{\lambda_i^{(m+1)} - \lambda_{i-1}^{(m+1)}}{\lambda_i - \lambda_{i-1}} * (22.13)^m}_{\text{lokaler L-Faktor (= } L_i)}$$

Hierbei bedeuten: A_i = gesamter Bodenabtrag im i-ten Teilabschnitt in t/ha*Jahr R_i, K_i, S_i, C_i, P_i = durchschnittliche Werte der RUSLE-Teilfaktoren im i-ten Teilabschnitt; die jeweiligen Berechnungsformeln entsprechen denen der Standardmethode i = i-tes Teilstück am Hang von oben λ_i = Entfernung vom Hanganfang bzw. einem Hindernis bis zum unteren Ende des i-ten Teilabschnitts in m; anstatt eines Entfernungsmaßes können auch hydrologische Größen wie die Abflußmenge oder die Einzugsgebietsgröße eingesetzt werden m = Hanglängenexponent des Gesamthangs, entspricht dem m-Wert aus Kap. 2.2

Für genauere Berechnungen **kann der m-Wert auch durch m_{ϕ_i} ersetzt werden**. Dabei kennzeichnet m_{ϕ_i} den Hanglängenexponent des Einzugsgebiets vom i-ten Teilstück (also der Distanz von der Wasserscheide bis zum Abschnitt i ohne den darunterliegenden Hangabschnitt). Berechnet wird m_{ϕ_i} , indem alle einzelnen m_i -Werte der darüberliegenden Hangabschnitte aufsummiert und durch die Zahl dieser Abschnitte geteilt werden. **Besonders für GIS-gestützte Analysen ist diese Vorgehensweise besser geeignet und wird deshalb auch später verwendet.**

Die **Vorteile der erweiterten RUSLE-Erosionsgleichung** liegen auf der Hand. Mit ihr sind neben punktgenauen Berechnungen aller erosionsrelevanten Faktoren auch punktgenaue Bodenerosionsprognosen möglich. Darüber hinaus ist die Variable λ_i viel flexibler zu handhaben, weil sich mit ihr auch direkte Abflußwerte berücksichtigen lassen. Selbst bei einer Beschränkung auf metrische Entfernungswerte bietet die erweiterte RUSLE-Gleichung Vorteile. Da nur die Entfernungen von der Wasserscheide und nicht mehr die Strecke zwischen Wasserscheide und Akkumulationsbereich benötigt werden, wird das Problem mit der Bestimmung der erosiven Hanglänge elegant gelöst. Ferner lassen sich mit dieser Gleichung auch die Bodenabtragsraten in Akkumulationszonen berechnen, eine Möglichkeit, die mit der RUSLE-Standardgleichung aus methodischen Gründen nicht praktikierbar ist.

⁸ Vgl. dazu u.a. RENARD/FOSTER/LAFLÉN (1997); WISCHMEIER/FOSTER (1974); AUERSWALD/FLACKE/NEUFANG (1988), (1990); DESMET/GOVERS (1996); GRIFFIN et al. (1988); MITCHELL/BUBENZER (1980).

Die erweiterte RUSLE-Gleichung ist äußerst flexibel zu handhaben. Hat man erst einmal den Bodenabtrag an einem Hang oder Einzugsgebiet exakt bestimmt, dann lassen sich für alle beliebigen Gebietsgrößen sehr schnell die durchschnittlichen Abtragsraten berechnen, indem folgende Formel verwendet wird:

$$A_{\text{Gebiet}} = \sum A_i / n$$

Hierbei bedeuten:

A_{Gebiet} = durchschnittlicher Bodenabtrag im entsprechenden Gebiet. Entspricht dem A-Wert der Standardformel; allerdings mit weit höherer Genauigkeit, da alle Wechselwirkungen zwischen der Abflußmenge und den anderen erosionsrelevanten Faktoren berücksichtigt werden

A_i = prognostizierter Bodenabtrag für das i-te Gebiet

n = Anzahl aller berechneten Teilgebiete i

Einen schwerwiegenden Nachteil hat jedoch auch die erweiterte RUSLE-Gleichung immer noch. Mit ihr läßt sich **nur die Größe des abgeführten Bodenmaterials prognostizieren, also die Bruttoerosion**. Da jedoch, abgesehen von den obersten Hangbereichen, an fast jeder Stelle im Gelände sowohl Bodenmaterial zugeführt und auch abtransportiert wird, entscheidet letztendlich erst das Verhältnis aus zu- und abgeführter Bodenfracht, ob effektive Erosion oder Akkumulation stattfindet. Selbst in Bereichen tiefer Kolluvien wird bei entsprechender Neigung und Lage immer noch Bodenmaterial erodiert, nur ist die Zufuhr hier größer als die Abfuhr, und nur deswegen findet auch Bodensedimentation statt.

Die Zusammenhänge zwischen bloßem Bodenabtrag und seinen effektiven Folgen auf das Bodenprofil werden in der unteren Hälfte von Abbildung 4 veranschaulicht. Dort steigt der Bodenabtrag bis etwa zur Mitte des Hangs an, um danach wieder abzunehmen. Da jedoch das einmal erodierte Bodenmaterial in tiefer liegende Geländeabschnitte transportiert wird, muß der Bruttobodenabtrag dort mindestens ebenso hoch sein wie das zugeführte Material, ansonsten findet keine effektive Bodenerosion statt. Ist er niedriger, wird akkumuliert, ist er höher, wird effektiv erodiert und das Bodenprofil verkürzt sich. Bei gleich hoher Zu- und Abfuhr wird dagegen nur Material umgelagert, während sich das Bodenprofil dadurch nicht verändert.

Zur Prognose dieser weitergehenden Erosionsfolgen, also der **Stoffbilanz**, sind **zusätzliche Rechenschritte** notwendig, die im nächsten Abschnitt (Kap. 3.4) dargestellt sind.

Abschließend sind auf der nächsten Seite die **Grundprinzipien beider RUSLE-Erosionsgleichungen und ihre korrekte Anwendung an einem Hang** graphisch dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Anwendung der RUSLE-Standardmethode, während die Abbildungen 6 und 7 die Berechnung des punktuellen Bodenabtrags mit der erweiterten RUSLE-Erosionsgleichung veranschaulichen (aus Darstellungsgründen sind jedoch nur 3 Hangabschnitte dargestellt).

Im Unterschied zur Abbildung 6, die einen Hang ohne Hindernisse zeigt, stellt Abbildung 7 die Vorgehensweise bei einem Hang mit hydrologischen Barrieren dar. Da im Gelände mit Feldrainen, bewachsenen Wegrändern, Straßen, o.ä. immer Hindernisse den Wasserfluß unterbrechen, sollte die in Abbildung 7 gezeigte Methodik die typische Vorgehensweise bei der Prognose des Bodenabtrags sein, auch und gerade bei Berechnungen mit Geographischen Informationssystemen.

Anwendung der entsprechenden Formeln anhand der Abbildungen auf S.31:

1. Standard RUSLE-Prognose:

$$A = R * K * S * C * P * L \quad \text{mit } L = (\lambda / 22.13)^m$$

2. Erweiterte RUSLE-Prognose:

$$\begin{aligned} A_1 &= R_1 * K_1 * S_1 * C_1 * P_1 * L_1 \quad \text{mit } L_1 = [\lambda_1^{m_{01}+1} - 0] / [(\lambda_1 - 0) * 22.13^{m_{01}}] \\ A_2 &= R_2 * K_2 * S_2 * C_2 * P_2 * L_2 \quad \text{mit } L_2 = [\lambda_2^{m_{02}+1} - \lambda_1^{m_{02}+1}] / [(\lambda_2 - \lambda_1) * 22.13^{m_{02}}] \\ A_3 &= R_3 * K_3 * S_3 * C_3 * P_3 * L_3 \quad \text{mit } L_3 = [\lambda_3^{m_{03}+1} - \lambda_2^{m_{03}+1}] / [(\lambda_3 - \lambda_2) * 22.13^{m_{03}}] \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow A = (A_1 + A_2 + A_3) / 3 \quad = \text{Durchschnittsabtrag am Hang}$$

3. Erweiterte RUSLE-Erosionsprognose mit Hindernis:

Berechnung ähnlich wie zuvor. Allerdings beginnt durch das Hindernis ab A_2 praktisch ein neuer Hang, so daß dort wieder von vorne begonnen werden muß

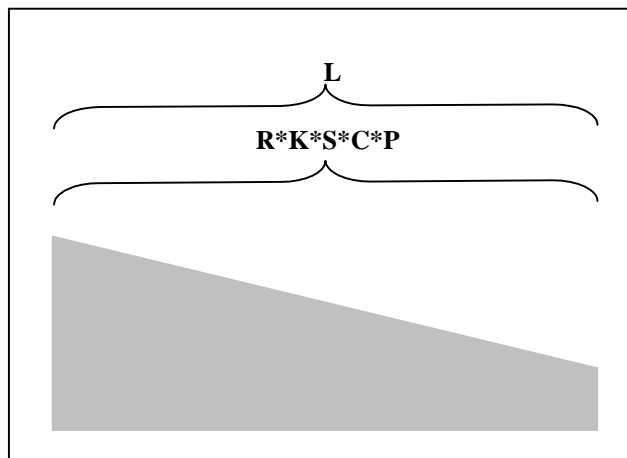
$$A_1 = R_1 * K_1 * S_1 * C_1 * P_1 * L_1 \quad \text{mit } L_1 = [\lambda_1^{m_{01}+1} - 0] / [(\lambda_1 - 0) * 22.13^{m_{01}}]$$

$$\Leftrightarrow A = A_1 \quad = \text{Durchschnittsabtrag am Hangabschnitt } A_1$$

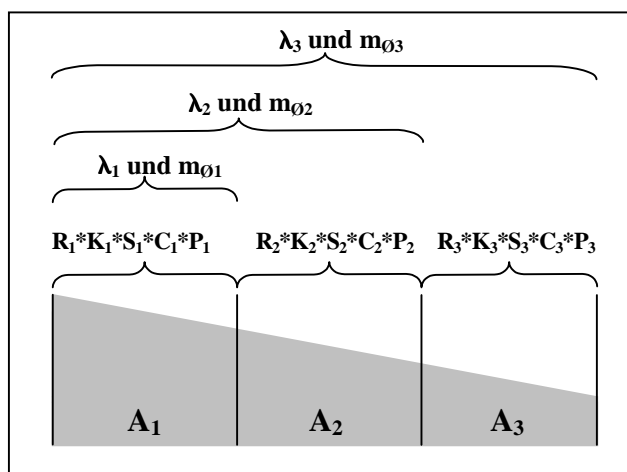
$$A_2 = R_2 * K_2 * S_2 * C_2 * P_2 * L_2 \quad \text{mit } L_2 = [\lambda_2^{m_{02}+1} - \lambda_1^{m_{02}+1}] / [(\lambda_2 - \lambda_1) * 22.13^{m_{02}}]$$

$$A_3 = R_3 * K_3 * S_3 * C_3 * P_3 * L_3 \quad \text{mit } L_3 = [\lambda_3^{m_{03}+1} - \lambda_2^{m_{03}+1}] / [(\lambda_3 - \lambda_2) * 22.13^{m_{03}}]$$

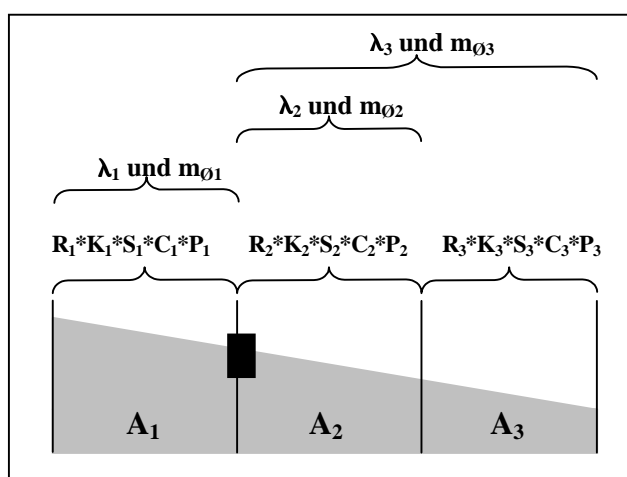
$$\Leftrightarrow A = (A_2 + A_3) / 2 \quad = \text{Durchschnittsabtrag am Hangabschnitt } A_2 - A_3$$



Quelle: Eigener Entwurf



Quelle: Eigener Entwurf



Quelle: Eigener Entwurf

Abbildung 5:
Standard RUSLE-Erosionsprognose

Hier wird der Durchschnittsbetrag der einzelnen Teilfaktoren und des Bodenabtrags am gesamten Hang bestimmt. Es ist zu beachten, daß mit dieser Methode bei den Teilfaktoren R, K, S, C, P der Durchschnittswert, beim Teilfaktor L die gesamte Hanglänge und der durchschnittliche m-Wert des Gesamthangs bestimmt werden.

Abbildung 6:
Erweiterte RUSLE-Erosionsprognose

Bei dieser hochauflösenden Erosionsprognose werden für jeden Hangbereich A_i die jeweiligen Durchschnittswerte von R_i , K_i , S_i , C_i , P_i berechnet, wobei die Größe jedes Hangstücks A_i beliebig kurz sein kann. Im Unterschied zu Abb. 1 wird jedoch der L-Faktor nicht direkt bestimmt, sondern nur die Variablen, aus denen er sich zusammensetzt, also m und λ . Der spezifische L_i -Faktor eines jeden Teilstücks wird danach innerhalb der erweiterten RUSLE-Formel berechnet. Die tiefgestellten Ziffern zeigen das Gebiet an, auf das sich die jeweiligen Werte beziehen.

Abbildung 7:
Erweiterte RUSLE-Erosionsprognose mit Hindernis

Diese hochauflösende Erosionsprognose entspricht in ihrer Methodik weitgehend der vorherigen. Allerdings wird hier veranschaulicht, wie der gebietsspezifische L_i -Faktor bei Auftreten eines Hindernisses am Hang berechnet wird. Als Hindernis wird alles bezeichnet, was den ansonsten kontinuierlichen Oberflächenabfluß unterbricht (Feldraine, Wege, u.a.), also Barrieren oder Stellen mit hoher Wasserversickerung. Damit teilt ein Hindernis den Gesamthang praktisch in zwei isolierte Einzelhänge, wobei bei jedem dieser Teilhänge m und λ analog dem obigen Schema bestimmt werden.

2.4 Bestimmung der Stoffbilanz mit den Erosionsgleichungen RUSLE und MUSLE 87

Obwohl die RUSLE-Erosionsformel ursprünglich nur zur Berechnung des Bruttobodenabtrags entworfen wurde, kann mit ihr auch die effektive Stoffbilanz erosiver Vorgänge bestimmt werden. Auf diese Weise ist es möglich, Akkumulationszonen und gekappte Bodenprofile zu prognostizieren. Voraussetzung ist jedoch die erweiterte und hochauflösende Berechnungsformel des vorherigen Abschnitts.

Die dazu notwendigen Berechnungsschritte sind Bestandteil der **Erosionsgleichung MUSLE 87**, wie die RUSLE-Gleichung eine modifizierte Version der bekannten USLE-Gleichung (vgl. HENSEL 1991, BORK/HENSEL 1988, BORK/SCHRÖDER 1996). Von der USLE unterscheidet sich die MUSLE 87 nur durch die **zusätzlichen Rechenschritte**, mit denen auf der Basis des zuvor prognostizierten Bruttobodenabtrags A_i die Stoffbilanz ermittelt wird. Da der Bruttobodenabtrag mit der erweiterten RUSLE-Formel jedoch genauer berechnet werden kann, empfiehlt es sich, die Stoffbilanz auf Basis der genaueren Abtragswerte der RUSLE-Formel zu analysieren.

Die Berechnung der Stoffbilanz nach der MUSLE 87 ist einfach und basiert auf der Idee, die **Differenz zwischen zu- und abgeführtem Bodenmaterial** zu ermitteln. Diese Differenz erhält man über die folgenden **3 Berechnungsschritte** (vgl. Abbildung 8):

1. Anwendung der erweiterten RUSLE-Erosionsgleichung, um den **genauen Bodenabtrag A_i** für jeden einzelnen Punkt oder Abschnitt an einem Hang zu prognostizieren
2. Berechnung des **durchschnittlichen Bodenabtrags im Einzugsgebiet** jedes einzelnen Hangabschnittes (bzw. Punktes) mit der Formel:

$$A_{\text{Einzugsgebiet } i} = \sum A_i / n$$

Diese Gleichung entspricht der Formel aus Kapitel 3.3 zur Berechnung des durchschnittlichen Bodenabtrags in einem beliebigen Gebiet. Allerdings wird nun nicht mehr ein beliebig wählbares Gebiet betrachtet, sondern nur das spezifische Einzugsgebiet eines jeden Hangabschnittes. Dieses reicht von der gegenwärtigen Hangposition bis hinauf zur Wasserscheide.

Hierbei werden alle Hangabschnitte bzw. Punkte von der Wasserscheide ($i=1$) bis zum Ausgang ($n=i_{\max}$) aufsummiert und danach durch die Gesamtzahl der Abschnitte bzw. Punkte geteilt. Der so berechnete Bodenabtrag ist als durchschnittlicher Gesamtverlust des Einzugsgebiets genau die Bodenmenge, welche das jeweilige Einzugsgebiet am Ausgang verläßt.

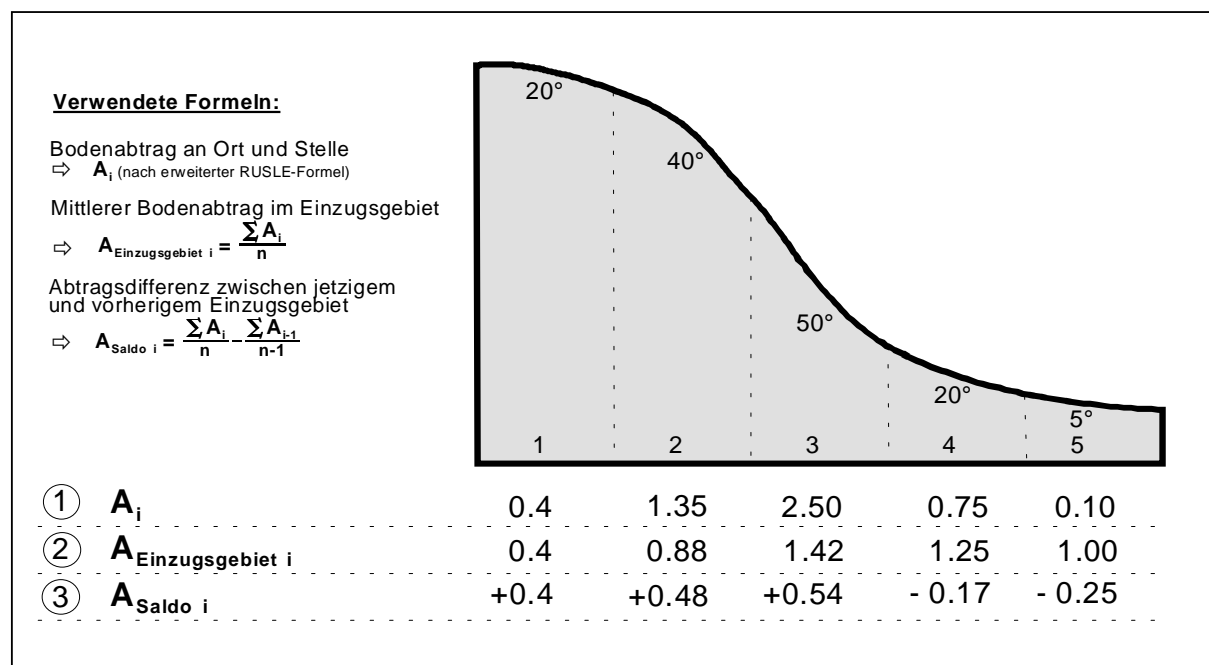
3. Berechnung des Saldos aus dem zu- und abgeführten Bodenmaterial für jeden Punkt oder Abschnitt am Hang mit der Formel $A_{\text{Saldo } i} = A_{\text{Einzugsgebiet } i} - A_{\text{Einzugsgebiet } i-1}$, d.h. die Abtragswerte vom weiter oben liegenden Einzugsgebiet werden vom jetzigen abgezogen, da dieses zumindest bei einem zweidimensionalen Hang alles erodierte Bodenmaterial in den darunterliegenden Abschnitt abtransportiert.

Das unter Punkt 3 erhaltene Ergebnis ist die **Stoffbilanz des Bodenabtrags** am jeweiligen Hangabschnitt bzw. Punkt, wobei positive Werte das Ausmaß von Profilverkürzungen, negative dagegen die Höhe der Bodenakkumulation quantifizieren. Dabei sind die Einheiten dieselben, wie bei der RUSLE-Formel auch, d.h. sie geben den effektiven Bodenverlust oder –gewinn in t/ha*Jahr an.

Abbildung 8:

Funktionsprinzip der MUSLE 87 am Beispiel eines konvex-konkaven Hangs

Die untere Abbildung zeigt einen in fünf gleich lange Abschnitte i unterteilten konvex-konkaven Hang mit den entsprechenden Hangneigungen in Grad. Die unter Ziffer 1 stehenden Werte kennzeichnen den Bruttobodenabtrag für den jeweiligen Hangabschnitt. Er wurde mit der erweiterten RUSLE-Erosionsformel unter ausschließlicher Berücksichtigung von Entfernung und Hangneigung berechnet (die Werte für den Bruttobodenabtrag stellen dimensionslose Zahlen dar, die sich bei einem durchschnittlichen Bodenabtrag von 1 am gesamten Hang ergeben würden). Die Zahlen unter Ziffer 2 zeigen den durchschnittlichen Bodenabtrag für das jeweilige Einzugsgebiet. Durch Differenzbildung zum vorigen Einzugsgebiet läßt sich das effektive Ausmaß von Profilverkürzung (positive Werte) oder Akkumulation (negative Werte) berechnen, wobei die entsprechenden Zahlen unter Ziffer 3 dargestellt sind. Die benutzten Berechnungsformeln befinden sich im linken oberen Teil dieses Schaubildes.



Quelle: Eigener Entwurf

Der entscheidende Vorteil der weiterführenden Berechnungsschritte nach der MUSLE 87 liegt darin, daß nicht nur Akkumulations- und Erosionszonen prognostiziert werden, sondern darüber hinaus auch Abschätzungen des chemischen Stofftransports möglich sind. Wo ein effektiver Bodenverlust bzw. Bodengewinn auftritt, findet gleichzeitig auch ein effektiver Verlust bzw. Gewinn von Nährstoffen und anderen chemischen Substanzen statt. Insofern beschränkt sich die Aussagekraft einer Stoffbilanzierung nach der MUSLE 87 nicht nur auf festes Bodenmaterial. Mit ihr lassen sich auch Verarmungs- und Eutropierungszonen im Gelände prognostizieren.

Zusammen mit der erweiterten RUSLE-Erosionsgleichung können damit **folgende, für Mitteleuropa relevante Sachverhalte prognostiziert** werden:

1. der örtliche **Bruttobodenabtrag** A_i
2. der **Bruttobodenverlust jedes einzelnen Einzugsgebiets am Hang** $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$
3. die **Stoffbilanz an jedem Punkt im Gelände** $A_{\text{Saldo } i}$

Gelingt es, beide Gleichungssysteme, die erweiterte RUSLE-Erosionsgleichung und die MUSLE 87-Stoffbilanzgleichung **korrekt und für jedermann nachvollziehbar mit einem GIS umzusetzen**, dann wird eine Abschätzung der wesentlichsten Probleme und Folgen möglich, die erosive Prozesse in Mitteleuropa bewirken. Allerdings verursacht gerade diese Umsetzung in ein GIS und damit auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet vielfältige Schwierigkeiten, die Gegenstand des nächsten Kapitels sind.

3. Theoretische Konzepte GIS-gestützter Erosionsprognosen bei dreidimensionalen Untersuchungsgebieten

3.1 Erosionsprognosen mit GIS – oder von der Schwierigkeit, eine zweidimensionale Erosionformel auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet zu übertragen

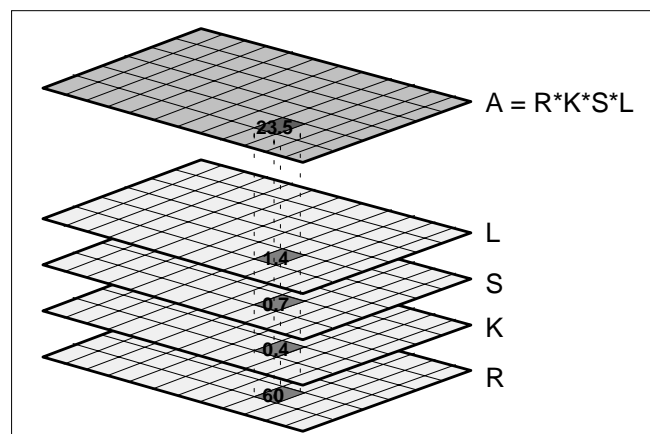
Erosionsgleichungen sind Hangmodelle. Sie wurden für zweidimensionale Vor-Ort-Prognosen am Hang entworfen und nicht zur Analyse eines komplexen Einzugsgebietes. Untersuchungen mit GIS finden aber in einem dreidimensionalen Einzugsgebiet statt. Deshalb müssen die Grundprinzipien der zweidimensionalen RUSLE- bzw. MUSLE 87-Gleichung auf ein **dreidimensionales Untersuchungsgebiet** übertragen werden. Dies führt in der Praxis zu schwerwiegenden Problemen.

Auf den ersten Blick scheint die Übertragung der RUSLE-Gleichung in ein Geographisches Informationssystem unproblematisch. Durch die Unabhängigkeit der Faktoren lassen sich diese getrennt voneinander ermitteln und müssen später lediglich miteinander multipliziert werden. Da jede GIS-Software entsprechende **Overlayfunktionen** besitzt, ist der Bodenabtrag zumindest in der Theorie durch eine einfache Multiplikation genau übereinander liegender Faktorkarten leicht berechenbar. Das Grundprinzip von Overlayberechnungen zeigt die folgende Abbildung am Beispiel einer Multiplikation von vier virtuell übereinander liegenden Karten:

Abbildung 9:

Berechnung des landschaftsbezogenen Erosionspotentials ($A=R*K*S*L$) mit einem handelsüblichen GIS durch Multiplikation übereinanderliegender Faktorkarten (Overlayprinzip)

Eingezeichnete Zahlen zeigen die jeweiligen Faktorwerte und das resultierende Ergebnis an einer beliebigen Stelle an, alle übrigen Berechnungen folgen demselben Prinzip. Wie hier zu sehen ist, entsprechen Overlayberechnungen mit GIS im Grunde herkömmlichen Berechnungen von Zahlen mit einem Taschenrechner, nur werden in diesem Falle keine Zahlen, sondern digitale Karten miteinander verrechnet.



Quelle: Eigener Entwurf

Da bei derartigen Overlayberechnungen genau diejenigen Geländebereiche miteinander verschnitten werden, die exakt die gleiche räumliche Position besitzen, scheinen der Übertragung der RUSLE-Erosionsformel in ein GIS keine Hindernisse entgegenzustehen, **zumindest solange alle Faktorkarten auch ermittelt werden können.**

Bei fünf Faktoren (R, K, S, C, P) gelingt dies auch mit der einfachsten GIS-Software. Dagegen bleibt der L-Faktor, unabhängig davon ob es sich um den herkömmlichen (Standardgleichung; vgl. Kap. 2.2) oder um den lokal modifizierten Faktor handelt (erweiterte RUSLE-Erosionsgleichung; vgl. Kap. 2.3), schwer zu fassen. Denn er unterscheidet sich grundlegend von allen anderen erosionsrelevanten Größen.

Die Faktoren R, K und C lassen sich leicht aus digital vorliegenden Karten gewinnen, indem nur die entsprechende Berechnungsformel auf die jeweilige Karte angewandt wird. Beim R-Faktor wäre dies die Multiplikation und Subtraktion einer Niederschlagskarte mit den entsprechenden Formelwerten (in Mitteleuropa beispielsweise mit $R = 0.083 \cdot N - 1.77$), beim K- bzw. C-Faktor eine ähnliche Umrechnung aus einer Boden- bzw. Nutzungskarte. Räumliche Analysen müssen zur Gewinnung dieser Faktorkarten nicht gemacht werden. Hier genügt die einfache Overlay Funktionalität herkömmlicher GIS Software.

Ähnlich vollzieht sich die Berechnung der S- und P-Werte. Auch hier ist die Analytik einfach und unterscheidet sich nur minimal vom eben genannten Prinzip, wenn auch die Gewinnung der entsprechenden Faktorkarten arbeitsaufwendiger ist. In keinem Fall sind räumliche Analysen notwendig, da alle fünf **ausgesprochen örtliche Faktoren** sind, d.h. keiner wird in seiner Größe von entfernten Gebieten bestimmt.

Der L-Faktor verhält sich dagegen grundlegend anders. Er beschreibt die Auswirkungen der Abflußmenge auf den Bodenabtrag und wird nicht von den örtlichen Gegebenheiten bestimmt. Seine Größe hängt von den Eigenschaften und der Größe des Einzugsgebiets ab. Deshalb ist der L-Faktor ein **räumlicher Einflußfaktor** und kann daher nur durch räumliche Analysen ermittelt werden.

Räumliche Analysen sind bei Erosionsuntersuchungen im Gelände kein Problem. Zur Abschätzung der Abflußmenge an einem Hang reicht eine einfache Entfernungs- und – Neigungsmessung aus. Bei GIS-gestützten Erosionsprognosen ist der Nutzer jedoch darauf angewiesen, daß seine Software über die entsprechenden Analysefunktionen verfügt. Will er die RUSLE-Gleichung umsetzen, dann benötigt er **folgende Funktionen**:

- Für einfachere Erosionsprognosen eine Analysefunktion, welche die **Entfernung von der Wasserscheide** berechnet. Dabei muß ein dreidimensionales Höhenmodell in allen Himmelsrichtungen durchlaufen und die größte Distanz zur Wasserscheide ermittelt werden.
- Für genauere Erosionsprognosen eine Analysefunktion, welche die **potentielle Wassermenge** berechnet, die über jeden Punkt fließen würde. Dabei muß ein digitales Höhenmodell von oben nach unten durchlaufen und dabei die abgeflossene Wassermenge aufsummiert werden.

Beide Funktionen sind jedoch in moderner GIS-Software nicht enthalten, bzw. aufgrund konzeptioneller Mängel so ungenau, daß sie nicht eingesetzt werden können. Das dadurch verursachte Dilemma ist die **entscheidende Grundschwierigkeit bei der Umsetzung der RUSLE-Formel mit einem Geographischen Informationssystem**. Der L- bzw. L_i -Faktor wird für eine vollständige und genaue Erosionsprognose benötigt, er läßt sich aber nicht einfach mit einem GIS bestimmen (vgl. Kap. 5.4).

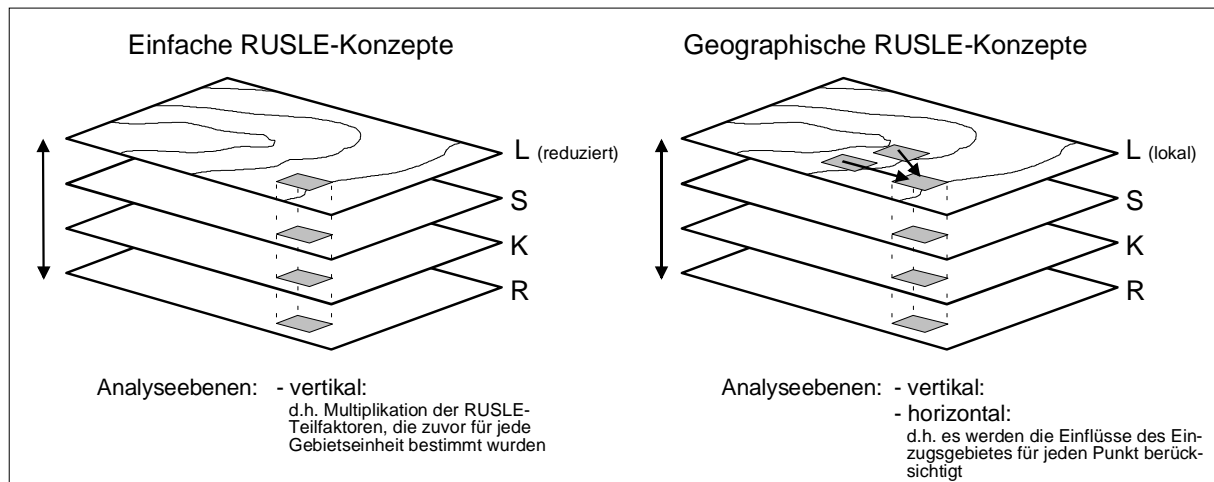
Um dennoch mit der RUSLE-Formel und einem GIS arbeiten zu können, bieten sich **zwei unterschiedliche Möglichkeiten** an:

1. Man ignoriert die räumliche Komponente des L-Faktors vollständig und gibt ihr stattdessen einen konstanten Wert.
2. Man findet einen Lösungsweg, wie die räumliche Komponente des L bzw. L_i -Faktors mit GIS analysiert werden kann. Auf diese Weise wird die RUSLE-Formel korrekt umgesetzt.

Je nach Wahl werden entweder räumliche Einflüsse in Gestalt der Abflußmenge berücksichtigt oder nicht. Da die Berücksichtigung räumlicher Einflüsse und Wechselwirkungen das entscheidende Merkmal geographischer Untersuchungen ist, können RUSLE-Umsetzungen mit Berücksichtigung der Abflußmenge als **Geographische RUSLE-Konzepte** bezeichnet werden. Ohne diese Berücksichtigung sind nur **Einfache RUSLE-Konzepte** möglich. Im folgenden Schaubild werden beide grundsätzlichen Möglichkeiten skizziert:

Abbildung 10:**Grundsätzliche Möglichkeiten von Erosionsuntersuchungen mit GIS unter Anwendung der RUSLE-Gleichung**

Dunkle Kästchen kennzeichnen Berechnungen an einer beliebigen Stelle, die analog im gesamten Gebiet so durchgeführt werden. Die schwarzen Linien auf der L-Ebene sind potentielle Höhenlinien und symbolisieren das Relief. Zusätzlich zeigen die beiden weiteren dunklen Kästchen auf der rechten Seite des Schaubildes entfernte Gebiete an, von denen ein Zufluß in das gerade analysierte Kästchen stattfindet. Dies wird durch die beiden waagerechten Pfeile symbolisiert.



Quelle: Eigener Entwurf

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, beschränken sich die einfachen RUSLE-Konzepte auf die örtlichen Faktoren. Die im Schaubild dargestellte L-Ebene (mit Darstellung potentieller Höhenlinien) ist ein reduzierter L-Faktor ohne Berücksichtigung der räumlichen Komponente. Die Analyserichtung wäre bei dieser Konzeption **lediglich vertikal**, d.h. nur verschiedene sachliche Ebenen werden beachtet. Die gesamte GIS-gestützte Analyse des Bodenerosionspotentials kann damit ausschließlich über Overlayfunktionen bestritten werden.

Im Gegensatz dazu wird bei den Geographischen RUSLE-Konzepten der Wasserfluß über jeden Punkt der Karte und somit die räumliche Komponente mitberücksichtigt (**horizontale Richtung**). Ein potentielles EDV-Programm muß dabei ein digitales Höhenmodell in allen möglichen Richtungen durchlaufen, um den Wasserfluß zu berechnen. Somit läuft hier die räumliche Analyse in mehreren Ebenen ab, ist also horizontal und vertikal.

Je nach Wahl von räumlicher Untersuchungskonzeption und benutzter Formel (Standardgleichung oder erweiterte Version der RUSLE) sind **insgesamt vier unterschiedliche Möglichkeiten** denkbar, die RUSLE in einem GIS umzusetzen. Diese teilen sich auf in zwei einfache und zwei geographische Umsetzungen. Die entscheidenden Unterschiede liegen dabei in der Wahl der Berechnungsformeln bzw. in der Art der Abflußanalyse.

Alle vier denkbaren Konzeptionen werden in den folgenden Abschnitten in ihren Grundzügen beschrieben und durch spezielle Blockbilder visuell dargestellt. Dabei beschränkt sich die visuelle Darstellung auf die Art und Weise, wie der Oberflächenabfluß in der jeweiligen Konzeption berücksichtigt wird. Denn nur darin unterschieden sie sich; die örtlichen Faktoren werden mit identischen Formeln über lokale Overlayberechnungen bestimmt.

3.2 Einfache RUSLE-Konzepte

3.2.1 Das Regular Slope Konzept

Das als Regular Slope¹ bezeichnete Konzept zur Bestimmung der Bodenerosion ist eine vereinfachte Übertragung der RUSLE auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet. Dabei wird die **RUSLE-Standardformel** (vgl. Kap. 2.2) übernommen und auf ein dreidimensionales Gebiet umgesetzt, indem genau die gleichen Bestimmungsprinzipien verwendet werden, wie bei der Bewertung des Bodenabtrags an einem zweidimensionalen Hang.

Das bedeutet:

- Es wird die Formel $A = R * K * S * L * C * P$ verwendet.
- Es werden die **Durchschnittswerte** von R, K, S, C und P eines gesamten Gebiets berechnet.
- Der L-Wert wird nach der Formel $L = (\lambda/22.13)^m$ bestimmt. Die erosive Hanglänge wird in der Regel manuell am Bildschirm abgemessen. Damit werden lediglich die Auswirkungen der **durchschnittlichen Abflußmenge** berücksichtigt (vgl. Kap. 2.2)² und auch nur der mittlere Bodenabtrag in einem Gebiet berechnet.
- Die kleinstmögliche Untersuchungseinheit (= weißes Gebiet in Abbildung 11) ist das ganze Gebiet zwischen hydrologischen Barrieren, d.h. Hindernissen, die den Wasserfluß hemmen. Eine höhere Auflösung ist mit dieser Methode nicht möglich.

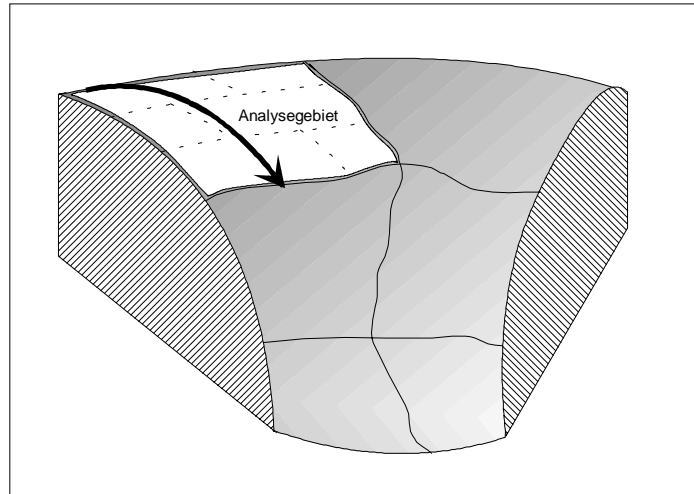
¹ Wie auch bei Benennung der folgenden 3 Konzeptionen sind diese Namen i.d.R. keine originären Bezeichnungen der entsprechenden 3D-Methoden, sondern entweder Namensübertragungen aus dem 2D-Bereich oder von mir gegebene (z.B. RUSLE-Light...). Der hier benutzte Begriff Regular Slope (= Annahme eines gestreckten und gleichmäßigen Hangs), wird allgemein zur Kennzeichnung der RUSLE-Standardformel genutzt.

² Die manuelle Abmessung ist die normale Methode bei Umsetzung dieses Konzepts und wird auch bei allen mir bekannten Untersuchungen verwendet.

Abbildung 11:
Behandlung des Oberflächenabflusses beim Regular Slope Konzept

Die weiße Fläche kennzeichnet die kleinste Untersuchungseinheit bei dieser Prognosemethode, d.h. bei den fünf örtlichen Teilfaktoren wird nur ihr Durchschnittswert im gesamten weißen Gebiet bestimmt, während beim L-Faktor die vermutete größte Distanz ausgemessen wird (im Schaubild durch den Pfeil dargestellt).

Die schwarzen gestrichelten Linien im weißen Gebiet grenzen einzelne Felder gegeneinander ab, die schwarzen durchgehenden Linien sind dagegen Wege, Hecken oder andere Barrieren, die den Wasserfluß hemmen. Ebenso wie beim weißen Gebiet wird mit den fünf restlichen grauen Gebieten verfahren.



Quelle: Eigener Entwurf

Wie in Abbildung 11 am Beispiel des weißen Analysegebietes gezeigt, ist die Regular Slope Methodik ein vereinfachtes RUSLE-Konzept. Zwar wird die erosive Hanglänge und damit der L-Faktor bestimmt, **jedoch beziehen sich alle Faktoren auf ein und dasselbe Gebiet**. Auch beim L-Faktor werden nicht die umgebenden räumlichen Einflüsse auf die jeweilige Lokalität berücksichtigt, sondern alles spielt sich in derselben Raumeinheit ab. Von den örtlichen Faktoren werden die Durchschnittswerte berechnet, ebenso wie beim eigentlich räumlichen L-Faktor lediglich die mittleren Auswirkungen der Abflußmenge berücksichtigt werden.

Beispiele für Bodenerosionsuntersuchungen, bei denen diese Methode angewandt und mit einem GIS umgesetzt wird, sind die Arbeiten von BARTH (1997) und KAPPAS/SCHWERTER (1997) im lokalen oder die bayerischen und baden-württembergischen Erosionsatlanten im überregionalen Bereich (AUERSWALD/SCHMIDT 1986, GÜNDRA et al. 1995).

Trotz ihrer **einfachen Handhabung** (räumliche Analysen sind nicht erforderlich, weil der entsprechende Wert auch manuell abgemessen werden kann bzw. wird) und ihrer häufigen Anwendung bei GIS-gestützten Bodenerosionsuntersuchungen besitzt diese Methodik **gravierende Nachteile**:

1. Es werden nur die Durchschnittswerte der erosionsrelevanten Faktoren und beim Bodenabtrag bestimmt, noch dazu unter der Voraussetzung eines gestreckten Hangs (vgl. Kap. 2.3).
2. Räumliche Einfüsse werden wegen der Beschränkung auf die mittlere Abflußmenge übergangen.

3. Die manuell ausgemessene erosive Hanglänge stimmt in den seltensten Fällen mit der wirklichen erosiven Hanglänge überein (vgl. Kap.2.3 Abbildung 8)
4. Die **kleinstmögliche Analyseeinheit** ist immer das gesamte Gebiet zwischen hydrologischen Grenzen (= Wasserscheiden oder abflußhemmende Barrieren, in Abbildung 11 als schwarze durchgehende Linien dargestellt). Ein solches Gebiet umfaßt aber fast immer eine Vielzahl dazwischenliegender Ackerfelder, da Feldgrenzen (in Abbildung 11 gestrichelt dargestellt) in den seltensten Fällen auch hydrologische Barrieren darstellen³. Schwertmann bemerkt hierzu: „*Schlaggrenzen begrenzen die Hanglänge nur, wenn sie Sedimentation bewirken und kein Wasser auf den darunterliegenden Schlag überlaufen kann, sondern quer zum Hang langsam abgeleitet wird*“ (SCHWERTMANN et al. 1990, S.29). Nimmt man diese Einschränkungen ernst, dann wird die kleinstmögliche Untersuchungseinheit so groß, daß der Aussagewert einer solchen Erosionsprognose praktisch gegen Null tendiert. In der Praxis werden aber ausschließlich Feld- bzw. aus Luftbildern abdigitalisierte Bearbeitungsgrenzen als hydrologische Grenzenlinien verwendet, also die erosive Hanglänge auf Feldbasis und nicht auf der Grundlage hydrologischer Barrieren ermittelt (siehe BARTH 1997, KAPPAS/SCHWERTER 1997). Damit werden diese Untersuchungen methodisch zweifelhaft.
5. Es wird nur der Bruttobodenabtrag berechnet. Erweiterte Analysen zur Stoffbilanz (Profilverkürzungen bzw. Bodensedimentation) sind mit dieser Methodik nicht möglich. Zudem werden Erosions- und Akkumulationsbereiche vermischt, so daß das Ergebnis selbst beim reinen Bruttobodenabtrag ungenau bleibt.

³ Vgl. Abbildung 18/2: Im Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. - Hirrlingen befinden sich zwischen benachbarten Feldern niemals hydrologisch wirksame Grenzen (außer im Fall von dazwischen liegenden Wegen mit Gräserändern). Im Gegenteil, gerade in der Phase der Saatbeetbereitung, also einer Jahreszeit mit geringer Bedeckung und hohem Erosionsrisiko sind keine reliefbedingten Übergänge oder Barrieren zwischen den einzelnen Schlägen zu erkennen.

3.3.2 Das RUSLE Light Konzept

Das von mir als RUSLE Light⁴ bezeichnete Konzept ist wie das Regular Slope Konzept zuvor, eine vereinfachte Übertragung der RUSLE auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet. Doch werden nun nicht mehr die jeweiligen Durchschnittswerte für ein großes Gebiet analysiert, sondern alle Faktoren **punktgenau** ermittelt. Die Verbesserung der Auslösung wird jedoch mit einer **Vereinfachung des L-Faktors** erkauft. Im Gegensatz zur Regular Slope Konzeption wird die erosive Hanglänge a priori festgesetzt, meist auf einen Wert von 100m. Auf diese Weise werden räumliche Analysen vermieden.

Die RUSLE Light Konzeption zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Es wird die Formel $A_i = R_i * K_i * S_i * L_i * C_i * P_i$ verwendet, wobei das tiefgestellte i einen beliebig kleinen Geländeabschnitt bezeichnet (im Idealfall ein Pixel bei rasterorientierten GIS-Systemen).
- Der L_i -Wert ist eigentlich ein **Pseudo- L_i -Wert**, da er durch die Formel $L_i = (C/22.13)^m$ bestimmt wird. C ist eine Konstante, die für alle L_i 's gilt und anstatt der erosiven Hanglänge in die L-Faktorformel eingesetzt wird. Auf diese Weise wird mit einer einheitlichen Hanglänge (meist mit $C = 100m$) gearbeitet und der Einfluß der Abflußmenge ignoriert.
- Die kleinstmögliche Untersuchungseinheit ist variabel, und kann von einem einzelnen Punkt bis zu einem größeren lokalen Gebiet reichen.

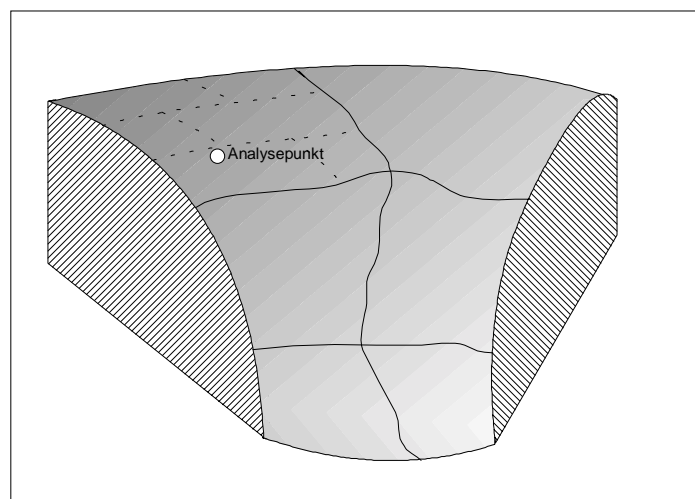
Abbildung 12:

Behandlung des Oberflächenabflusses beim RUSLE Light Konzept

Der weiße Punkt kennzeichnet die kleinste Untersuchungseinheit bei dieser Prognosemethode. Im Gegensatz zur vorherigen Bestimmungsmethode werden die exakten Werte der fünf örtlichen Teilfaktoren bestimmt, während der L-Faktor durch die Wahl einer festen Hanglänge seine räumliche Aussagekraft verliert.

Damit bleibt der Einfluß der Abflußmenge unberücksichtigt und wird deswegen auch nicht durch einen Fließpfeil in der Abbildung dargestellt.

Die gleiche Untersuchungsmethode wie beim angeführten weißen Beispielpunkt wird an jeder Stelle des Reliefs wiederholt.



Quelle: Eigener Entwurf

⁴ Der Name RUSLE Light ist eine persönliche Bezeichnung und bezieht sich auf den reduzierten Umfang im Vergleich zur RUSLE-Standardgleichung.

Wie in Abbildung 12 gezeigt wird, ist auch die RUSLE Light ein vereinfachtes Bewertungskonzept, da der Einfluß der Abflußmenge nicht beachtet wird. Die damit erstellten Erosionskarten sind im Gegensatz zur Regular Slope Konzeption sehr eindrucksvoll, weil sich jede Veränderung bei einem der erosionsrelevanten Faktoren sofort im Ergebnis auswirkt. Die Nichtberücksichtigung der Abflußmenge führt jedoch zu irreführenden Resultaten.

Beispiele für Bodenerosionsuntersuchungen, bei denen diese Methode angewandt und mit einem GIS umgesetzt wurde, sind die Arbeiten von PRASUHN/STAUB (1997), BUCK (1996) und ERDMANN/ROSCHE (1991) bzw. alle GIS-gestützten Erosionsuntersuchungen, die auf der Methode von MARKS/MÜLLER/LESER/KLINK (1992) beruhen.

Im Vergleich zu allen hier beschriebenen Bewertungsmethodiken ist diese Konzeption die mit Abstand **einfachste GIS-Umsetzung** der RUSLE-Erosionsformel. Der Arbeitsaufwand ist durch die Festsetzung der Hanglänge gering, die Ergebnisse sind hochauflösend. Trotzdem besitzt diese Konzeption **schwerwiegende Mängel**:

1. Räumliche Einflüsse werden ausgeklammert, indem die Hanglänge beim L_i -Faktor festgesetzt wird.
2. Abgesehen von dieser Festsetzung wird bei der Berechnung des L_i -Faktors noch ein weiterer methodischer Fehler begangen, indem der (zur Formel gehörende) **m_i -Wert** örtlich und nicht räumlich ermittelt wird. Wie in Kap. 2.2 bzw. 2.3 beschrieben, kennzeichnet der m-Wert als neigungsabhängiger Faktor das durchschnittliche Verhältnis von Rillen- zu flächenhafter Erosion am **ganzen Hang** (bzw. im entsprechenden Einzugsgebiet) und muß deshalb mit räumlicher Analytik ermittelt werden. Die entsprechenden GIS-Arbeiten verwenden aber nur die örtliche Neigung zur Bestimmung des m-Wertes, d.h. es wird ausschließlich die Neigung am jeweiligen Analysepunkt i berücksichtigt, nicht jedoch die durchschnittliche Neigung des gesamten rückwärtigen Einzugsgebiets. Dies führt dazu, daß die **Wirkung der Hangneigung auf den Bodenabtrag überbewertet** wird, weil zusätzlich zum ohnehin vorhandenen S_i -Faktor auch der so gewonnene L_i -Wert ein verkappter Neigungsfaktor ist.
3. Es wird nur der Bruttobodenabtrag berechnet. Erweiterte Analysen zur Stoffbilanz (Profilverkürzungen bzw. Bodensedimentation) sind mit dieser Methodik nicht möglich.

Zwar hat es nicht an Versuchen gefehlt, die RUSLE-Light Konzeption zu verbessern. MARKS/MÜLLER/LESER/KLINK (1992) versuchten dies beispielsweise durch zusätzliche Korrekturfaktoren, mit denen die Wölbung des Reliefs berücksichtigt wird (horizontale und vertikale Krümmung). Doch am grundsätzlichen Manko der RUSLE Light ändert sich dadurch nichts. Denn auch die Geländewölbung ist ein lokaler und kein räumlicher Einflußfaktor. Da die Größe des Oberflächenabflusses von kumulativen Effekten beeinflußt wird, die ihre Ursachen weit entfernt vom Ort der Wölbung haben, sind lokale Krümmungsfaktoren nutzlos. Allenfalls läßt sich mit ihnen in Kombination mit dem S_i -Faktor die Abflußintensität genauer bestimmen, keinesfalls jedoch die Abflußmenge.

3.3 Geographische RUSLE-Konzepte

3.3.1 Das Irregular Slope Konzept

Im Gegensatz zu den vorherigen Konzeptionen ist das Irregular Slope Konzept⁵ eine geographische Umsetzung der RUSLE-Gleichung auf ein dreidimensionales Gebiet. Das Untersuchungsgebiet wird mit räumlicher Methodik untersucht und die Abflußmenge zumindest annäherungsweise bestimmt. Dabei wird **erweiterte RUSLE-Erosionsformel** (vgl. Kap. 2.3) benutzt und konsequent umgesetzt.

Die Irregular Slope Konzeption zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

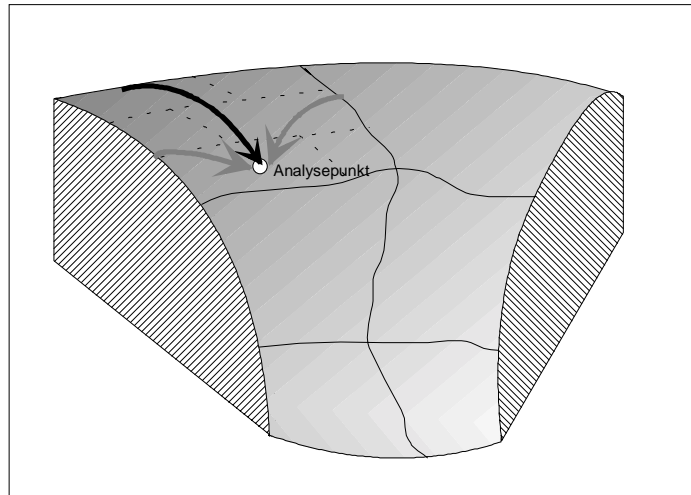
- Es wird die Formel $A_i = R_i * K_i * S_i * L_i * C_i * P_i$ verwendet, wobei das tiefgestellte i einen beliebig kleinen Geländeabschnitt bezeichnet (im Idealfall ein Pixel bei rasterorientierten GIS-Systemen).
- Der L_i -Wert entspricht dem lokalen L_i - Faktor aus Kap. 2.3 und wird mit entsprechender Formel berechnet: $L_i = [\lambda_i^{m_{oi}+1} - \lambda_{i-1}^{m_{oi}+1}] / [(\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^{m_{oi}}]$. Damit werden räumliche Einflüsse berücksichtigt, obwohl noch nicht die exakte Abflußmenge, sondern nur ein angenäherter Wert bestimmt wird. (vgl. Abbildung 13).
- Die kleinstmögliche Untersuchungseinheit ist variabel, und kann von einem einzelnen Punkt bis zu einem größeren lokalen Gebiet reichen.

⁵ Diese Bezeichnung bezieht sich auf die erweiterte RUSLE-Erosionsformel von Kap.2.3, die häufig so genannt wird. Bei der vorliegenden Konzeption werden alle Grundprinzipien der erweiterten RUSLE-Erosionsformeln umgesetzt. Deshalb wurde auch der Name Irregular Slope übernommen.

Abbildung 13:**Behandlung des Oberflächenabflusses beim Irregular Slope Konzept**

Der weiße Punkt kennzeichnet die kleinste Untersuchungseinheit bei dieser Prognosemethode. Auch hier werden die exakten Werte der fünf örtlichen Faktoren bestimmt. Im Gegensatz zu den vorherigen Bestimmungsmethoden wird jedoch auch die lokale Abflußmenge teilweise analysiert, indem alle möglichen Fließwege berechnet werden und der längste von ihnen Eingang in die lokale L_i -Faktorformel findet.

Der schwarze Pfeil symbolisiert den längsten Fließweg, während die grauen Pfeile kürzere Fließwege sind, die zwar berechnet werden, doch unberücksichtigt bleiben. Die gleiche Untersuchungsmethode wie beim weißen Beispielpunkt wird an jeder Stelle des Reliefs wiederholt.



Quelle: Eigener Entwurf

Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, zeichnet sich das Irregular Slope Konzept durch die genaue Umsetzung der erweiterten und hochauflösenden RUSLE-Formel aus, welche in Kapitel 2.3 beschrieben wurde. Dabei werden die örtlichen Faktoren wie beim RUSLE Light Konzept punktgenau ermittelt, während zur Ermittlung des lokalen L_i -Faktors alle Fließwege vom analysierten Punkt bis zu den jeweiligen hydrologischen Grenzen bestimmt werden.

Von dieser unendlichen Zahl wird aber **nur der längste Fließweg berücksichtigt** (= schwarzer Pfeil) und findet als Variable λ_i Eingang in die obengenannte L_i -Formel. Der entsprechende Wert λ_{i-1} wird gewonnen, indem der Abstand zwischen zwei benachbarten Analysepunkten (entspricht etwa der Pixelgröße bei einem rasterorientierten GIS System) von der Variable abgezogen wird.

Die Ermittlung des m_{0i} -Wertes ist etwas aufwendiger, weil er aus der durchschnittlichen Hangneigung des längsten Fließweges berechnet werden muß (vgl. Kap. 2.3). Dies bedeutet, daß alle m_i -Werte auf dem Fließweg zuerst einzeln berechnet und danach aufsummiert werden müssen. Diese Summe wird durch die Anzahl aller auf diesem Fließweg durchflossenen Punkte i geteilt⁶ (bei einem rasterorientierten GIS ist dies die Summe aller durchflossenen Pixel) und der so gewonnene Wert m_{0i} in die L_i -Formel eingesetzt.

Nach diesem Prinzip wird mit allen Punkten i im gesamten Untersuchungsgebiet verfahren und somit flächendeckend die jeweiligen L_i -Werte berechnet.

⁶ Dieser Fall gilt nur dann, wenn alle durchflossenen Geländeabschnitte gleich lang sind (bei GIS-gestützten Untersuchungen ist dies aber der Regelfall). Bei unterschiedlich langen Geländeabschnitten müßten die jeweiligen m_i -Werte entsprechend gewichtet werden.

Veranschaulichen läßt sich die gesamte Vorgehensweise damit, indem man sich vorstellt, **daß das gesamte dreidimensionale Untersuchungsgebiet in eine Unzahl zweidimensionaler Hänge zerschnitten wird**. Für jeden dieser imaginären zweidimensionalen Hänge wird die erweiterte RUSLE-Formel so angewandt, wie dies bei einer Vor-Ort-Untersuchung im Gelände der Fall wäre. Aus der Vielzahl der untersuchten Hangprofile wird nur der höchste Wert von L_i für den jeweiligen Abschnitt i übernommen. Bei dieser linienhaften Betrachtungsweise wird die Größe der Abflußmenge berücksichtigt, allerdings nur angenähert, weil lediglich der größte Teilzufluß beachtet wird.

Beispiele für GIS-gestützte Bodenerosionsuntersuchungen auf Basis der Irregular Slope Konzeption sind in der Fachliteratur nicht zu finden. Dies ist etwas überraschend, weil es auch ohne Programmierkenntnisse prinzipiell möglich ist, diese Konzeption zumindest mit Arc/Info bzw. Arc/View korrekt umzusetzen. Es bleibt aber ein schwieriges Unterfangen, weil dazu die Möglichkeiten der entsprechenden GIS-Software vollständig genutzt werden müssen und einige Umwege notwendig sind.

Die Irregular Slope Konzeption ist **sehr präzise** und den beiden ungeographischen Bewertungsmethoden überlegen. Einige **Nachteile** bleiben jedoch auch hier bestehen:

1. Die Berechnung des Bodenerosionspotentials ist aufwendig und damit nur für Gebiete sinnvoll, bei denen die verfügbaren Daten eine hohe Qualität besitzen
2. Es wird nur die Abflußmenge im Bereich der maximalen Fließlänge berechnet, jedoch nicht die Menge des gesamten Oberflächenabflusses. Damit werden divergierende und konvergierende Wasserflüsse völlig ignoriert.
3. Es wird nur der Bruttobodenabtrag prognostiziert. Erweiterte Analysen zur Stoffbilanz (Profilverkürzungen bzw. Bodensedimentation) wären auf Basis dieser Methodik zwar möglich, doch fehlen dafür auch unter Ausnutzung aller Möglichkeiten die vorhandenen Funktionen bei jedem mir bekannten Standard-GIS.

3.2.4 Das Unit Contributing Area Konzept

Die Unit Contributing Area Konzeption⁷ ist die exakteste aber auch komplexeste Übertragung der RUSLE-Logik auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet. Die Folgen des Oberflächenabflusses werden durch sie genauestens berücksichtigt.

Die benutzte Gleichung entspricht wie beim Irregular Slope Konzept der **erweiterten RUSLE-Erosionsformel** aus Kap. 2.3, die konsequent umgesetzt wird. Allerdings wird nun nicht mehr nur der größte Teilzufluß berücksichtigt, sondern die **gesamte kumulierte Abflußmenge**, welche über einen analysierten Reliefpunkt fließt.

Die Unit Contributing Area Konzeption zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

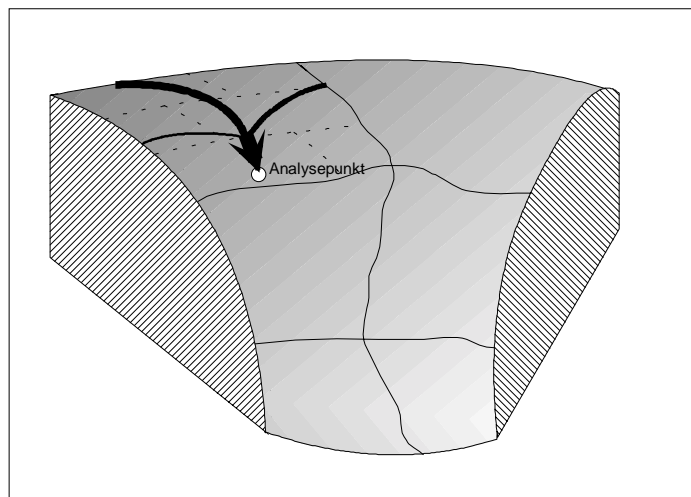
- Es wird die Formel $A_i = R_i * K_i * S_i * L_i * C_i * P_i$ verwendet, wobei das tiefgestellte i einen beliebig kleinen Geländeabschnitt bezeichnet (im Idealfall ein Pixel bei rasterorientierten GIS-Systemen)
- der L_i -Wert entspricht dem lokalen L_i - Faktor aus Kap. 2.3 und wird mit entsprechender Formel berechnet: $L_i = [\lambda_i^{m_{oi}+1} - \lambda_{i-1}^{m_{oi}+1}] / [(\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^{m_{oi}}]$. Die Variable λ_i kennzeichnet jedoch hier nicht mehr den maximalen Fließweg, sondern die **potentielle Abflußmenge**⁸, welche aufgrund des Reliefs über den jeweiligen Abschnitt bzw. Punkt i fließen würde
- Die kleinstmögliche Untersuchungseinheit ist variabel und kann von einem einzelnen Punkt bis zu einem größeren lokalen Gebiet reichen

Abbildung 14:

Behandlung des Oberflächenabflusses beim Unit Contributing Area Konzept

Der weiße Punkt kennzeichnet die kleinste Untersuchungseinheit. Die fünf örtlichen Faktoren werden wie zuvor exakt berechnet. Im Gegensatz zu allen übrigen Methoden wird aber die genaue Abflußmenge analysiert und bei der Erosionsprognose berücksichtigt. Dabei wird die gesamte Wassermenge berechnet, die aufgrund von Relief und Einzugsgebiet über den jeweils betrachteten Punkt fließen müßte. Dieser Wert findet als Variable λ_i Eingang in die entsprechende L_i -Formel, die oben dargestellt ist.

Die drei schwarzen Teilpfeile veranschaulichen das Prinzip. Alle Wassermengen, die aus unterschiedlichsten Richtungen über den jeweils betrachteten Punkt fließen, werden dort zur Gesamtmenge aufsummiert (= dicker Vereinigungspfeil). Die gleiche Untersuchungsmethode wird an jeder Stelle des Reliefs wiederholt.



Quelle: Eigener Entwurf

⁷ Der Name Unit Contributing Area bezeichnet die exakte Übertragung der RUSLE-Logik auf ein dreidimensionales Untersuchungsgebiet. Die vom jeweiligen Einzugsgebiet verursachte Abflußmenge wird direkt bestimmt.

⁸ siehe Fußnote 9 auf der nächsten Seite.

Wie in Abbildung 14 deutlich zu sehen ist, unterscheidet sich das Unit Contributing Area Konzept trotz gleicher Berechnungsformeln deutlich von der vorigen Konzeption, weil die konkrete Abflußmenge nicht mehr indirekt über den maximalen Fließweg abgeschätzt, sondern direkt bestimmt wird.

Anstatt den Abfluß nur im Bereich des größten Fließweges genau zu analysieren, wird mit dieser Konzeption zuerst die gesamte **potentielle Wassermenge**⁹ berechnet, die aufgrund des Reliefs und der Größe des rückwärtigen Einzugsgebietes über jeden einzelnen Punkt im Gelände fließen müßte. Dabei wird alles zuströmende Wasser aus jeder Richtung berücksichtigt und zur potentiellen Gesamtmenge aufsummiert.

Diese theoretische Größe wird als Variable λ_i in die entsprechende L_i -Faktorformel eingesetzt, ähnliches geschieht nach dessen Ermittlung mit dem dazugehörigen $m_{\emptyset i}$ -Wert. Auf diese Weise kann über die L_i -Faktorformel in etwa die **reale Abflußmenge** bestimmt werden, weil die potentielle Abflußmenge mit einem durchschnittlichen Neigungsfaktor ($m_{\emptyset i}$ -Wert des Einzugsgebiets) potenziert und damit ein gemitteltetes Versickerungsrisiko im Einzugsgebiet berücksichtigt wird.

Konkret läuft die Umsetzung der Unit Contributing Area Konzeption wie folgt ab:

Zuerst wird wie erwähnt, die potentielle Abflußmenge aus einem digitalen Höhenmodell berechnet. Dieser Wert wird in die Formel anstelle der Variablen λ_i eingesetzt. Dagegen wird λ_{i-1} dadurch ermittelt, indem vom gegenwärtigen Wert λ_i der anfängliche Wassergehalt abgezogen wird. Dies entspricht der potentiellen Wassermenge im weiter oben liegenden Punkt, da dieser nach unten entwässert. Damit sind die Basiswerte der L_i -Faktorformel bestimmt.

⁹ Die potentielle Abflußmenge ist keinesfalls identisch mit der tatsächlichen Abflußmenge, sondern ein theoretischer Wert, der sich anhand der Geländeform und der Größe des Einzugsgebiets nach Analyse aus einem digitalen Höhenmodell ergibt. Dabei besitzt jedes Pixel (d.h. jeder Geländeabschnitt) eine anfängliche Wassermenge, die es an benachbarte Pixel weitergeben kann, wenn ein Gefälle zwischen diesen besteht. Ist dies der Fall, dann fließt die Wassermenge anteilmäßig ab, wobei diejenigen Nachbarpixel mit dem größten Gefälle auch die größte Wassermenge zugewiesen bekommen. Die zugeflossene Wassermenge wird dort zur schon vorhandenen addiert. Nach diesem Prinzip wird im gesamten Höhenmodell von oben nach unten verfahren. Da bei den Berechnungen nur die relative Neigung im Vergleich zu den Nachbarpixeln über die Fließmenge entscheidet, nicht jedoch die absolute Neigung, kann der so erhaltene Mengenwert nur eine potentielle Abflußmenge sein, die unter der Bedingung einer kompletten Weitergabe des Wassers auftritt (d.h. keine Versickerung). Zur realen Abflußmenge wird diese Größe erst unter Einbeziehung der absoluten Neigung auf dem durchflossenen Gebiet, weil dies die Versickerungsraten und damit die Weitergabe der Wassermenge bestimmt, s.u.

Um die Potenz $m_{\emptyset i}$ in dieser Formel zu ermitteln, muß der durchschnittliche m_i -Wert im dahinterliegenden Einzugsgebiet bestimmt werden. Im Gegensatz zur Irregular Slope Konzeption ist das Einzugsgebiet diesmal allerdings ein flächenhaftes Gebiet. Weil dort nach allen Richtungen konvergierende und divergierende Wasserbewegungen stattfinden, kann der entsprechende $m_{\emptyset i}$ -Wert nicht mehr wie zuvor bestimmt werden.

Stattdessen muß in einem ersten Schritt die mit m_i gewichtete potentielle Abflußmenge bestimmt werden, d.h. die Werte von m_i sind bei dieser Berechnung die anfängliche „Wassermenge“ im Untersuchungsgebiet, auf dem dann wie gehabt die potentielle Abflußmenge errechnet wird. Der so erhaltene Wert entspricht der kumulierten Summe aller m_i 's und muß nun in einem zweiten Schritt durch die zuvor errechnete „normale“ potentielle Abflußmenge geteilt werden, also dem Wert λ_i für den entsprechenden Punkt oder Abschnitt i (s.o.). Das Ergebnis dieser Berechnung ist der gesuchte $m_{\emptyset i}$ -Wert für den jeweiligen Punkt oder Abschnitt i .

Nach diesem Prinzip wird mit allen Punkten i im gesamten Untersuchungsgebiet verfahren und somit flächendeckend die jeweiligen L_i -Werte berechnet.

Beispiele für die Anwendung der Unit Contributing Area Konzeption in angewandten Untersuchungen sind in der Fachliteratur nicht zu finden. Dies ist nicht verwunderlich, weil keine kommerzielle GIS Software die notwendigen hydrologischen Funktionen zur Verfügung stellt. Lediglich in einigen Forschungsarbeiten konnte diese Konzeption bisher umgesetzt werden (Vereinfachte Umsetzung bei HENSEL 1991, Perfekte Umsetzung bei DESMET/GOVERS 1996), allerdings immer nur mittels selbstgeschriebener Analyseprogramme, die nicht verfügbar sind. Die einzige Ausnahme bildet das an sich hervorragende Programm USLE2D¹⁰, das jedoch in der Praxis aufgrund nicht berücksichtigter Randbedingungen keine korrekten Ergebnisse liefert (vgl. Unterschiede zwischen konventionellen Multiple Flow Algorithmen und dem Algorithmus von FLOW 95 im Anhang, Kap. 10.2).

¹⁰ USLE2D 3.2 von Vanoost/Desmet/Govers; programmiert 1998 an der Katholischen Universität Leuven (Belgien), Labor für experimentelle Geomorphologie; Kontaktperson: Kristof.Vanoost@geo.kuleuven.ac.be

3.4 Bestimmung der Stoffbilanz

Wie in Kap. 2.4 beschrieben wurde, kann mit weiterführenden Berechnungen auf Basis der RUSLE-Gleichung auch die **Stoffbilanz** der Bodenerosion ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist aber eine vorherige Prognose des Bruttobodenabtrags nach dem Unit Contributing Area Konzept, weil damit der Abtrag am genauesten bestimmt wird.

Allerdings stellt sich auch bei diesen Berechnungen das gleiche Problem wie zuvor, die Frage der Umsetzung eines an sich einleuchtenden Konzepts, das an einem zweidimensionalen Hangabschnitt wenig Probleme bereitet, bei der Analyse eines dreidimensionalen Untersuchungsgebiets mittels GIS aufgrund fehlender Funktionen nicht durchgeführt werden kann.

Dabei ist das Grundprinzip einer Übertragung dieser weiterführenden Rechenschritte auf ein dreidimensionales Gebiet mit den entsprechenden Funktionen einfach und umfaßt dieselben Formeln wie in Kap. 2.4. Die dabei notwendige **Vorgehensweise bei einem dreidimensionalen Gebiet** wird im folgenden theoretisch beschrieben und in Abbildung 16 veranschaulicht.

1. **Ermittlung des Bruttobodenabtrags A_i** an jeder Stelle des dreidimensionalen Reliefs:

Als Resultat der Erosionsprognose nach dem Unit Contributing Area Konzept sind diese Daten schon vorhanden und Ausgangspunkt der folgenden Berechnungen.

2. Ermittlung des **durchschnittlichen Bodenabtrags im jeweiligen Einzugsgebiet**

$A_{\text{Einzugsgebiet } i}$:

Die Ermittlung dieser Daten verläuft nach demselben Prinzip wie die Ermittlung des $m_{\emptyset i}$ – Wertes im vorigen Abschnitt. Das heißt, die kumulierte Summe aller A_i 's wird durch die potentielle Abflußmenge λ_i geteilt.

3. **Ermittlung der Stoffbilanz $A_{\text{Saldo } i}$** für jeden einzelnen Gebietsabschnitt (Abbildung 16):

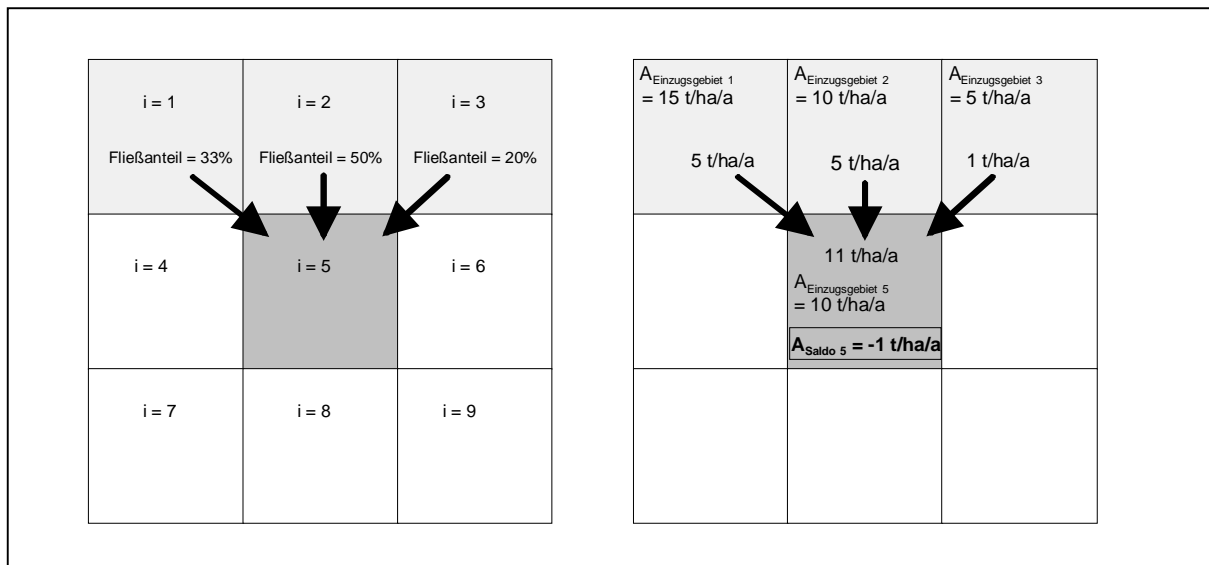
Wie bei Bestimmung der Stoffbilanz an einem zweidimensionalen Hang (vgl. Kap. 2.4) muß hier die Stoffzufuhr von der Stoffabfuhr abgezogen werden. Allerdings kann bei einem dreidimensionalen Untersuchungsgebiet das erodierte Bodenmaterial je nach örtlicher Neigung anteilmäßig in mehrere benachbarte Gebietsabschnitte abtransportiert werden. Somit müssen die relativen Fließanteile in allen Richtungen bestimmt und danach mit dem entsprechenden Bodenverlust multipliziert werden (wenn z.B. 33% des Gesamt-

abflusses in das benachbarte südöstliche Gebiet fließen, dann würde dieses bei einem Gesamtbodenverlust von 15t genau 5t Bodenmaterial erhalten, usw.). Erst danach werden alle Teilzufuhren an Bodenmaterial aus jeglicher Richtung aufsummiert. Durch Differenzbildung zwischen zu- und abgeführten Bodenmaterial wird wie in Kap. 2.4 der effektive Stoffsaldo ermittelt, wobei positive Werte einem effektiven Bodenverlust (Profilverkürzung), negative einem effektiven Materialgewinn (Akkumulation) entsprechen.

Abbildung 16:

Berechnung der Stoffbilanz am Beispiel einer einzelnen Rasterzelle ($i=5$)

Ausschnitt aus einem hypothetischen Untersuchungsgebiet mit neun einzelnen Gebietseinheiten (d.h. Pixel oder Pixelansammlungen bei einem rasterorientierten GIS-System). Der linke Abschnitt zeigt die Nummerierung der einzelnen Analyse-einheiten, wobei in diesem Fall die Stoffbilanz des dunkelgrauen mittleren Quadrats ($i=5$) untersucht wird. In dieses findet ein Wasserfluß bzw. Stofftransport von den drei oberen hellgrauen Quadraten ($i=1,2,3$) statt. Die Fließrichtungspfeile mit den entsprechenden Zahlenangaben symbolisieren den Fließanteil, der aufgrund der (nicht dargestellten) relativen Neigungen vom jeweiligen Gesamtabfluß in das zentrale Quadrat ($i=5$) fließen würde. Dies entspricht bei gegebenen Werten von $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ den jeweiligen Mengenangaben im rechten Teil des Schaubildes. Damit erhält das dunkelgraue Zentral-quadrat insgesamt 11t Bodenmaterial, während zur gleichen Zeit nur 10t abgeführt werden. Durch Differenzbildung wird daraus die Stoffbilanz ($A_{\text{Saldo } i}$) errechnet. Negative Werte entsprechen einem Stoffgewinn (Akkumulation), positive einem Stoffverlust (Profilverkürzung). Im unteren Beispiel erhält der Abschnitt $i=5$ insgesamt 1t mehr Bodenmaterial, als erodiert wird. Hier findet also eine effektive Bodenakkumulation statt. Die entsprechende Vorgehensweise wird für alle Gebietseinheiten im gesamten Untersuchungsgebiet analog angewandt.



Quelle: Eigener Entwurf

Gelingt auch die Umsetzung dieser weiterführenden Berechnungen nach dem eben beschriebenen Prinzip, dann erhält man als Ergebnis insgesamt zwei hochauflösende Erosionskarten, eine des **Bruttobodenabtrags** und eine der **Stoffbilanz**. Damit wären alle relevanten Aspekte ermittelt, die im Gefolge der Bodenerosion in Mitteleuropa auftreten und deren Kenntnis für entsprechende Schutzmaßnahmen wichtig sind.

Im folgenden praktischen Teil werden alle vier Konzeptionen und die eben beschriebene Stoffbilanzierung mit einem Geographischen Informationssystem am Beispiel eines repräsentativen Agrargebietes umgesetzt. Dies geschieht nach genau den gleichen Prinzipien, die in diesem Kapitel beschrieben wurden. Sofern die standardisierten Möglichkeiten der benutzten GIS-Software Arc/View nicht ausreichend waren, wurden die benötigten Funktionen selbst programmiert. Alle für diesen Zweck **entworfenen Module und Programme** sind auf der beiliegenden CD-ROM zu finden.

4. Das Untersuchungsgebiet

Da in der vorliegenden Untersuchung nicht nur die verschiedensten Bewertungskonzeptionen umgesetzt werden sollten, sondern auch ihre **praktische Genauigkeit** zu bewerten war, mußte ein besonderes Augenmerk auf ein geeignetes Untersuchungsgebiet gelegt werden. Das Untersuchungsgebiet sollte so beschaffen sein, daß die dort ermittelten Ergebnisse auch auf die meisten erosionsgefährdeten Gebiete in Mitteleuropa übertragbar sind. Aus diesem Grund mußte das Untersuchungsgebiet ein **agrarisch genutztes Gebiet** sein,

- in dem die **Bodenerosion** ein ernsthaftes Problem darstellt,
- und das **keine zu extreme Topographie** aufweist.

Der Hintergrund dieser Anforderungen liegt in der Tatsache, daß in Mitteleuropa die Bodenerosion vor allem durch den Ackerbau verursacht wird. Erst die sich jährlich wiederholende Vegetationsarmut während der Wachstumsphase und nach der Ernte ermöglicht einen nennenswerten Oberflächenabfluß, der zum Bodenabtrag führt. Zwar werden über anderen vegetationslosen Flächen zum Teil noch größere Bodenmengen abgetragen (Weinberge, kahle Mittelgebirgshänge, Abraumdeponien, o.ä.), doch in allen diesen Fällen ist die Erosion keine zwangsläufige Folgeerscheinung der Nutzung. In Weinbergen kann eine Grasdecke den Bodenabtrag weitgehend verhindern, Mittelgebirgshänge können wieder aufgeforstet werden und über Abraumdeponien bildet sich nach einigen Jahren ganz von selbst wieder eine Vegetationsdecke aus. Dagegen findet über Äckern zwangsläufig Bodenerosion statt, weil auch mit den schonendsten Bearbeitungsmethoden der Boden immer eine Zeit lang unbedeckt bleiben wird. Insofern sind gerade diejenigen Gebiete gefährdet, die eine ertragreiche Landwirtschaft erlauben und wo die Bedingungen für einen dauerhaften Abtrag gegeben sind. In Mitteleuropa zählen dazu vor allem **Jungmoränenlandschaften, Gäuflächen und hügelige Gebiete mit Lößablagerungen** (vgl. dazu RICHTER 1965, 1980). Unter allen Gebieten sind diese drei Landschaftstypen am stärksten von der Bodenerosion bedroht, weil sie gleichzeitig folgende Bedingungen erfüllen:

1. Sie wurden schon seit alters her intensiv landwirtschaftlich genutzt. Daher sind die Böden an vielen Stellen schon nennenswert erodiert. Ein weitergehender Bodenabtrag kann kaum noch kompensiert werden.
2. Sie werden aufgrund ihrer fruchtbaren Böden auch in Zukunft intensiv genutzt werden.
3. Sie besitzen allesamt schluffige und damit sehr **erosionsanfällige Oberböden**.

4. Im Gegensatz zu anderen intensiv genutzten Landschaften (Beckengebiete, Ebenen) sind hier auch die **topographischen Bedingungen für einen starken Bodenabtrag** gegeben. Obwohl die örtlichen Neigungen kaum höher als 10 % sind, reichen diese unter den Bedingungen einer intensivierten Landwirtschaft für einen starken Bodenabtrag aus. Da im Gegensatz zu früheren Zeiten keine Futterwirtschaft mehr stattfindet (Wiesen, Klee, Luzerne, o.ä.), sind die bewirtschafteten Felder heutzutage dauerhaft starken erosiven Kräften ausgesetzt.

Aus den drei Landschaftstypen wurde stellvertretend eine **Gäufläche** im Südosten Baden-Württembergs als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Sie weist Eigenschaften auf, die auch in den übrigen gefährdeten Agrargebieten an der Tagesordnung sind. Somit gelten die späteren Schlußfolgerungen über die Qualität der einzelnen Prognosekonzeptionen nicht nur im Untersuchungsgebiet, sondern in allen erosionsgefährdeten Anbaugebieten.

4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets Rottenburg - Hirrlingen

Das Untersuchungsgebiet Rottenburg-Hirrlingen liegt am **südöstlichen Rand des Landkreises Tübingen** und umfaßt eine Fläche von etwa 6*6 km (siehe Abb.17). Es besteht aus zwei verschiedenen naturräumlichen Einheiten, einer **Gäufläche** und einem randlich ansteigenden **Keupergebiet**. Die von Muschelkalk und Lettenkeuper unterlagerte Gäufläche ist aufgrund ihres geologischen Untergrundes relativ eben und wird nur durch einzelne Dellentäler und Flußläufe (Starzel, Katzenbach, Krebsbach) stärker untergliedert. Im Gegensatz dazu steigt das aus mittlerem Keuper bestehende Keupergebiet zuerst langsam (Gipskeuper) und danach immer stärker an, bis mit dem stufenbildenden Stubensandstein wieder eine Hochfläche gebildet wird, die das Untersuchungsgebiet am östlichen Rand begrenzt.

Für die nachfolgenden Bodenerosionsanalysen ist vor allem die Gäufläche von entscheidender Bedeutung, das Gebiet des mittleren Keupers interessiert wegen seiner Nutzung (Wiesen im Gipskeuper, Wälder auf dem Stubensandstein) und der damit verbundenen Erosionsresistenz nur als hypothetisches Vergleichsgebiet für spezielle Fragestellungen. Im Gegensatz dazu wird die Gäufläche wegen der hohen Bodenfruchtbarkeit fast ausschließlich ackerbaulich genutzt und ist aus folgenden Gründen ein ideales Testgebiet für GIS-gestützte Bodenerosionsprognosen.

1. Vielfache Erosionsspuren im Gelände

Mehrere Geländebegehungen und eine Auswertung der Bodenkarte zeigten, daß das Untersuchungsgebiet von der Bodenerosion sehr stark betroffen ist. So sind auf der Gäufläche vielfältige Erosionsspuren zu finden (vgl. Abbildung 18/1). Betrachtet man die **gesamte Ackerfläche** und läßt alle übrigen Nutzungen außer Betracht, dann stellt sich die Bodenverteilung¹ dort wie folgt dar (vgl. Bodenkarte im Anhang):

Tiefe Parabraunerden ohne Erosionsspuren:	22%
Tiefe Parabraunerde mit Erosionsspuren:	22%
Stärker erodierte Parabraunerden:	5%
Kolluvien:	15%

Auch die anderen im Ackergebiet auftretenden Böden weisen vielfach Erosionsspuren auf, obwohl sie nicht als erodierte Böden in der Bodenkarte eingezeichnet sind. Ein Blick in die tabellarischen Erläuterungen (vgl. Anhang, Kap. 10.1 und GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1992) zeigt jedoch, daß auch bei diesen Bodentypen der Deckschutt an vielen Profilen vollständig gekappt ist. Damit erhöht sich der Anteil der erodierten Bodenprofile nochmals, wenn er auch nicht wie oben genau quantifiziert werden kann.

2. Erosionsanfällige schluffige Böden

Die Böden auf der Gäufläche bestehen überwiegend aus **schluffigem und verwittertem Lößlehm**, der dort zum Teil mächtige **periglaziale Deckschichten** bildet. Reine Lößprofile treten allerdings nirgends auf. Aufgrund der großräumlichen Lage im Lee des Schwarzwaldes wurde im Untersuchungsgebiet weit weniger Löß sedimentiert, als in typischen Lößgebieten wie dem Kraichgau oder der Magdeburger Börde (vgl. PÉCSI/RICHTER 1996, Kap.5: Herkunft und Klassifikation von Lössen). Daher sind die Böden nur nahe der Erdoberfläche schluffig (Deckschutt und z.T. mächtige Mittelschuttlagen), die tieferen Bodenhorizonte bestehen dagegen aus überwiegend tonigem bzw. steinigem Basisschutt des Anstehenden (Lettenkeuper bzw. oberer Muschelkalk).

Auf der Gäufläche können zwei unterschiedliche Gebietseinheiten unterschieden werden. Im **flachen Zentrum** (Lößlehmzone, vgl. Abb. 17) dominieren tiefgründige Parabraunerden. Sie bestehen aus mächtigen periglazialen Deckschichten mit *Mittelschuttlagen* von bis zu einem Meter Tiefe. Wegen der geringen erosiven Kräfte ist hier der *schluffige Deckschutt* noch überall erhalten (vgl. GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1990, 1992 bzw. Bodenkarte im Anhang). Im Gegensatz dazu weisen die Böden an den **Rändern der Gäufläche und in Dellentälern** vielfältige Erosionsspuren auf. Auf-

¹ Berechnet mit GIS auf Basis der Bodenkarte 7519 und der Topographischen Karte 7519.

grund der höheren Reliefenergie wurde dort der Deckschutt entweder stark gekappt oder gar vollständig abgetragen. Daher finden sich nur noch mitteltiefe Parabraunerden bzw. noch weiter erodierte Böden wie Ackerbraunerden, Pararendzina-Braunerden, o.ä.. Strati-graphisch ist die Situation recht uneinheitlich, da je nach Exposition entweder Mittelschuttlagen vorhanden sind oder nicht. In den östlich abfallenden Dellentälern und Randflächen sind im Untergrund noch *Mittelschuttlagen* zu finden, an den westlich exponierten Rändern jedoch nicht mehr (vgl. Geologische Karte, Abb. 17 und Bodenkarte im Anhang). Der Oberboden besteht hier entweder aus tonigem *Basisschutt*, oder bei geringerer Kappung noch aus einer geringmächtigen *schluffigen Decklage*.

Durch die vorherrschenden schluffigen Deckschichten ist die Gäufläche insgesamt **sehr erosionsanfällig**. Während jedoch im flachen Zentrum nur eine theoretische Erosionsgefahr besteht, sind die Ränder und Dellentäler umso mehr bedroht. Hier führt die Kombination von noch vorhandenen schluffigen Deckschichten mit einem recht starken Gefälle zu einem nennenswerten Bodenabtrag. Die Folgen sind dabei umso drastischer, je dünner die schluffigen Deckschichten sind. Besonders hoch ist die Erosionsgefährdung an einigen westexponierten Hängen im Nordosten des Untersuchungsgebiets, wo kein unterlagernder Mittelschutt den Verlust schluffigen Deckschutts ausgleichen kann (Felder zwischen Dettingen und Bad Niedernau). Dort kann auch ein geringer Bodenabtrag sehr rasch zu einer irreversiblen Degradation führen.

Da die schluffigen Böden aufgrund ihrer **hohen Fruchtbarkeit** intensiv genutzt werden und die schluffigen Deckschichten vielerorts die Bodeneigenschaften entscheidend verbessern (z.B. bei Böden über kieseligem Buntsandstein o.ä.), sind Bodenerosionsuntersuchungen in diesem Gebiet aufgrund ähnlicher Bodenart und Nutzungsproblemen auch auf andere wichtige Anbauggebiete übertragbar.

3. Praxisrelevante Topographie

Bodenerosion tritt in Mitteleuropa vorwiegend über Ackerflächen auf. Die Topographie eines Testgebiets muß dem entsprechen. Dies bedeutet konkret, daß ein Testgebiet zwar ein gewisses Gefälle ausweisen muß (sonst gibt es keine Bodenerosion), die Neigungen jedoch nicht zu stark sein dürfen, weil sonst aus Rentabilitätsgründen kein intensiver Ackerbau mehr stattfindet². Mit einer **durchschnittlichen Neigung von 6 %**³ und einer Spanne von 0-15 % eignet sich gerade die Gäufläche für Testzwecke, weil dort alle

² Hohe Steigungen erschweren den Einsatz maschineller Geräte zur Bodenbearbeitung. Darüber hinaus nimmt die Bodenqualität bei steileren Hängen oftmals ab (vgl. SEMMEL 1981, 1983, 1986, 1993; flache lößbedeckte Osthänge – steile lößfreie Westhänge). Beide Faktoren führen im allgemeinen dazu, daß sich der Ackerbau ab einer gewissen Mindestneigung aus ökonomischen Gründen nicht mehr lohnt. Unter den Bedingungen eines sich verschärfenden Konkurrenzdruckes in der Landwirtschaft (EG-Binnenmarkt, Abbau von Subventionen, Importe aus Übersee, u.ä.) dürften daher diese Flächen verstärkt stillgelegt bzw. weniger intensiv bewirtschaftet werden.

möglichen Neigungsgrößen vorkommen, die in der Praxis auf ackerbaulich genutzten Feldern typisch sind. Zusätzlich sind dort alle typischen **Geländeformen** (Delltäler, kleinerer Kuppen, komplexere dreidimensionalen Einzugsgebiete, o.ä.) vorhanden, die auch in anderen wichtigen Ackerbaugebieten zu finden sind.

4. Nutzung und Flurordnung

Das gewählte Untersuchungsgebiet weist zwei vollkommen unterschiedliche Nutzungsstrukturen auf. Auf der einen Seite repräsentiert die zentrale Gäufläche mit einem engmaschigen Wegenetz und relativ kleinen Ackerparzellen die in Mitteleuropa typische kleinbäuerliche Nutzungsweise. Auf der anderen Seite wachsen die Parzellengrößen mit zunehmender Nähe zum Gipskeuper immer stärker an. Für GIS-gestützte Boden-erosionsprognosen bietet sich dadurch die Möglichkeit, die Genauigkeit der unterschiedlichsten Prognosekonzepte an zwei verschiedenen Nutzungsstrukturen (größere und kleinere Parzellen) zu überprüfen.

5. Verfügbarkeit einer neueren Bodenkarte im Maßstab 1:25000

Neben den bisher genannten Punkten war die Verfügbarkeit einer neueren Bodenkarte im Maßstab 1:25000 ein wesentliches Kriterium für die Auswahl des Testgebiets. Abgesehen von der Tatsache, daß in den neueren baden-württembergischen Bodenkarten der Erosionswiderstand in Form von **K-Werten** direkt angegeben wird, dient eine vorhandene Bodenkartierung auch zur **Kontrolle der erzielten Ergebnisse**.

Allerdings werden in dieser Arbeit nur die auftretenden **Kolluvien und Auenböden** zu Kontrollzwecken benutzt. Denn zum einen machen gekappte Bodenprofile keine Angaben über die Höhe des gegenwärtigen Bodenabtrags (vgl. Kap. 2.1), und zum anderen ist die RUSLE-Formel hinreichend abgesichert. Im Gegensatz dazu können prognostizierte Bodenakkumulationen anhand kartierter Kolluvien überprüft werden.

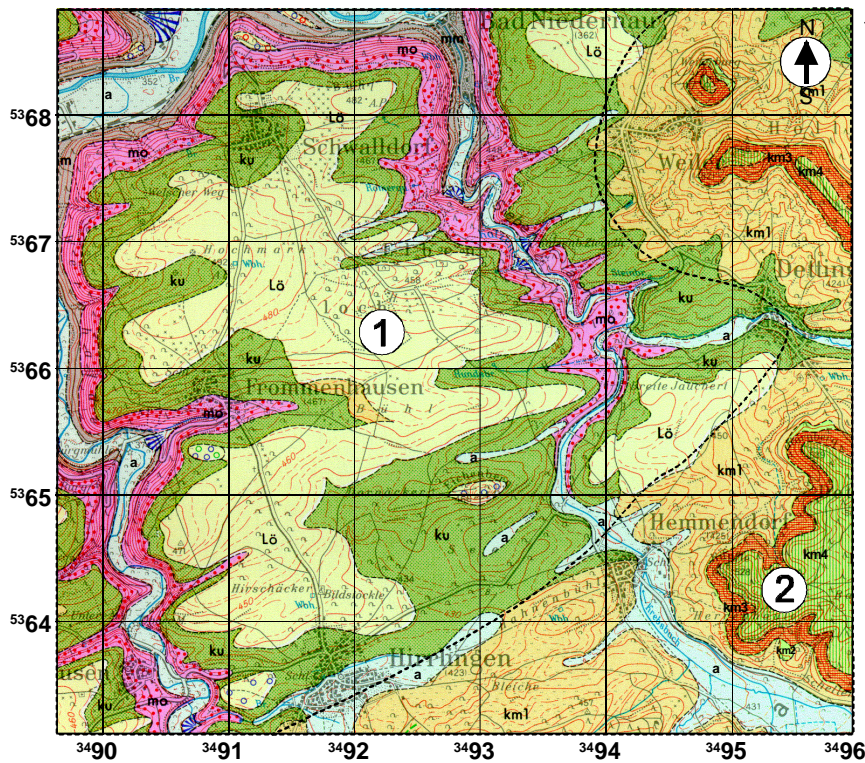
Weitergehende Erläuterungen zum Untersuchungsgebiet (Niederschlag, Bodenerodibilität, u.a.) finden sich im nächsten Kapitel im Zusammenhang mit der Bestimmung der jeweiligen Faktorkarten der RUSLE.

³ Die Neigungswerte wurden mittels GIS aus dem erstellten Höhenmodell berechnet.

Abbildung 17:
Das Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen

Die obere Karte zeigt das Untersuchungsgebiet mit den Rechts- und Hochwerten nach Gauss-Krüger. Die nachfolgenden Untersuchungen finden immer auf dem exakt gleichen Gebiet statt. Aus Darstellungsgründen fehlen jedoch bei allen späteren Karten die Koordinatenwerte generell.

Lage und Geologie



Quelle: Geologische Karte von Tübingen und Umgebung 1:50000

Legende Geologie:

- mm: mittlerer Muschelkalk
- mo: oberer Muschelkalk
- ku: Lettenkeuper
- km1: Gipskeuper
- km2: Schilffsandstein
- km3: Bunte Mergel
- km4: Stubensandstein
- Lö: Lößlehm
- a: Alluvium

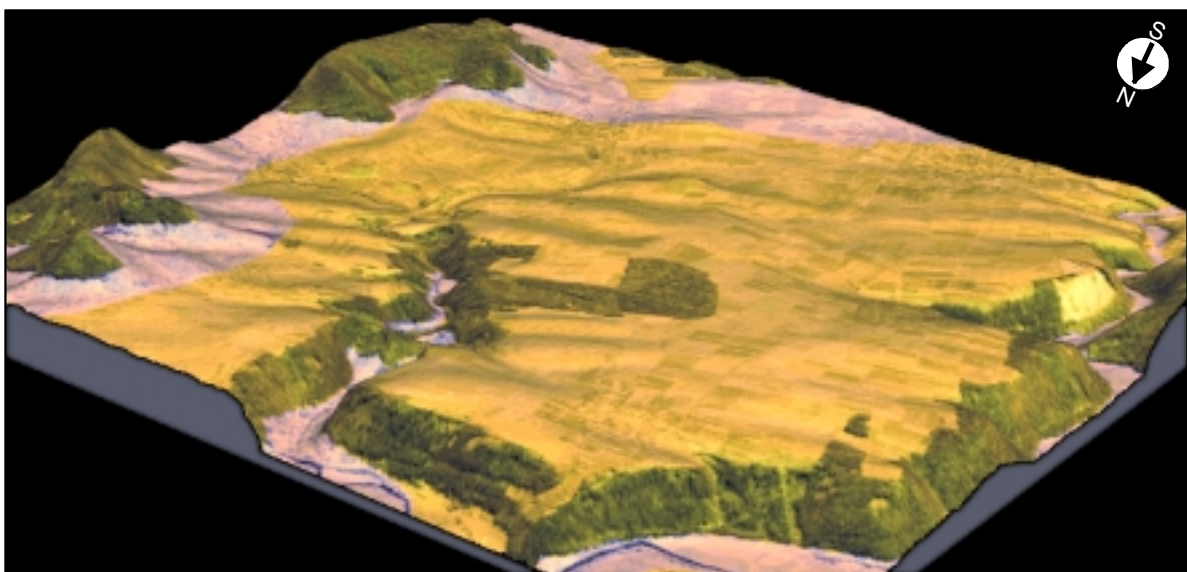
- ① Gäuffläche
- ② Keupergebiet



Legende Nutzung:

- hellgrün: Äcker
- bläulich: Wiesen
- dunkelgrün: Wald
- Siedlungen nicht extra bezeichnet

Topographie und Nutzung



Quelle: Eigener Entwurf (Höhenmodell mit überlagertem und überarbeitetem Satellitenbild aus D-SAT 2; 4-fach überhöht)

Abbildung 18/1:

Typische Erosionsspuren im Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen

**Initialstadium:**
Splash-Erosion

Verschlämmter Oberboden als Folge der Splash-Erosion. Tritt aufgrund der schluffigen Böden überall im Untersuchungsgebiet auf.

**Leichte Erosionsschäden:**
Bodenverspülung

Flächenhafte Verspülung von Bodenmaterial. Tritt im Untersuchungsgebiet vor allem an Hängen und in leicht wegsamen Fahrrinnen auf. Das Bild zeigt einen gestreckten Hang mit mäßiger Neigung (ca. 6%). Wegen der großen Hanglänge sammelt sich am Fuß zunehmend Bodenmaterial an, das bei der nächsten Bearbeitung in das benachbarte Gebiet zwischen den Abflußrinnen gepflügt wird. Aufgrund der mäßigen erosiven Kräfte und der mächtigen Deckschichten (Lößlehmzone) sind an diesem Hang noch überall schluffige Oberböden zu finden.

**Starke Erosionsschäden:**
Erodierter Oberboden mit aufgepflügtem Gestein

Gekappter Oberboden mit aufgepflügten Gesteinen des Anstehenden (Lettenkeuper). Tritt im Untersuchungsgebiet nur an sehr erosionsgefährdeten Stellen auf (Steilere Dellentäler ohne Mittelschuttlagen). Das Bild zeigt den Ausschnitt eines gestreckten Mittelhangs mit relativ starker Neigung (ca. 9%).

Abbildung 18/2:

Beobachtungen im Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N. – Hirrlingen

**Nutzungsgrenze mit Weg als abflußhemmendem Hinderniss**

Typische Situation an querenden Wegen im Anbaubereich. Aufgrund der permanenten Vegetation (grassbewachsene Feldwege bzw. Grünstreifen am Rand geteilter Straßen) versickert das abfließende Oberflächenwasser am Wegesrand und stoppt damit den Erosionsvorgang. Wege und andere Hindernisse (Hecken, Wälle) müssen daher bei Erosionsprognosen auf jeden Fall berücksichtigt werden.

**Nutzungsgrenze zwischen benachbarten Feldern ohne abflußhemmendes Hinderniss**

Typische Grenze zwischen einzelnen Feldern im Untersuchungsgebiet. Diese Grenze wirkt sich im Gegensatz zum oberen Beispiel nicht hydrologisch aus, da zwischen den beiden Feldern kein Feldrain oder ein dauerhaft begrünter Geländestreifen existiert. Aus diesem Grund dürfen Feldgrenzen bei der Berechnung des L-Faktors nicht berücksichtigt werden.

**Inhomogenes Ackerfeld mit Zonen unterschiedlicher Erosion bzw. Akkumulation**

Beispiel eines Ackerfeldes mit unterschiedlicher Erosions- und Akkumulationsgefährdung. Während am steilen Mittelhang das Bodenprofil stark verkürzt wurde (aufgepflügte Steine), ist es im Vordergrund noch relativ unbeeinflusst. Fälle wie diese zeigen die Problematik einer Erosionsprognose nach dem Regular Slope Konzept. Aufgrund der Inhomogenität von Feldern sind Durchschnittsberechnungen daher fraglich.

5. GIS-gestützte Bewertung der Bodenerosion im Untersuchungsgebiet Rottenburg-Hirrlingen

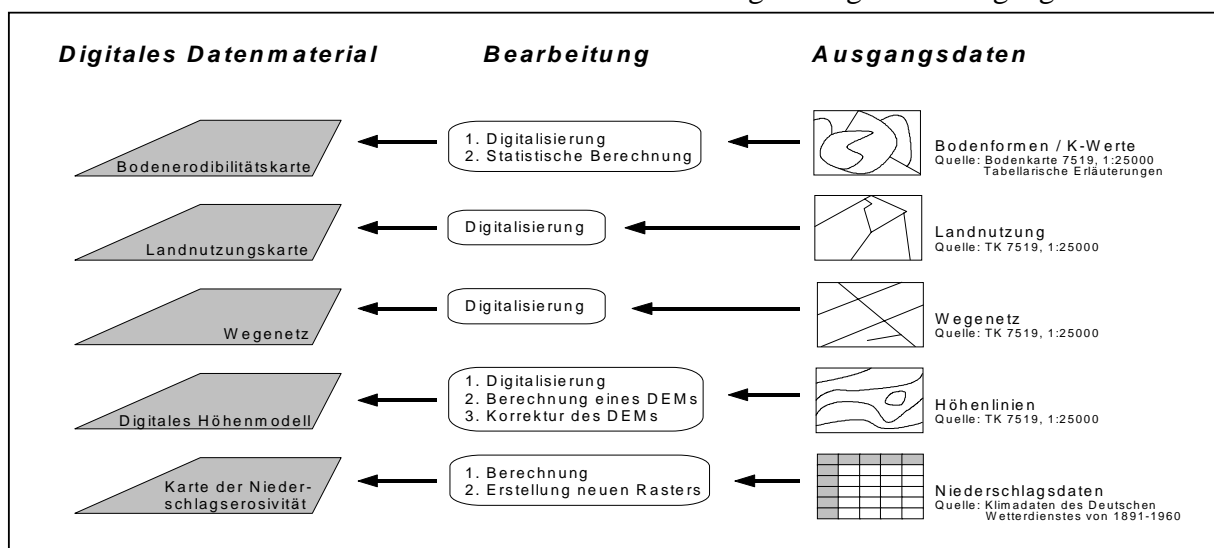
5.1 Ausgangsdaten und Ableitung der Grundinformationen

5.1.1 Grunddaten und Arbeitsmethoden

Abbildung 19 gibt einen **Überblick über das benutzte Datenmaterial** und die Bearbeitungsschritte, die zur Übertragung der erosionsrelevanten Grundlagendaten in ein GIS notwendig waren. Alle Ausgangsdaten entstammen drei verschiedenen Quellen (TK 1:25000, Bodenkarte 1:25000, Niederschlagsdaten des deutschen Wetterdienstes) und wurden auf ähnliche Weise in digitale Rasterkarten überführt.

Abbildung 19:

Verwendetes Datenmaterial und Methoden zur Gewinnung der digitalen Ausgangskarten



Mit einer Ausnahme waren dazu immer folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Digitalisierung der räumlichen Informationen aus vorhandenem Kartenmaterial.
2. Überarbeitung, Georeferenzierung und Zuweisung der entsprechenden Sachattribute, gegebenenfalls nach vorheriger statistischer Analyse.
3. Konvertierung der überarbeiteten Vektordaten in das Rasterformat, im Fall des digitalen Höhenmodells nach seiner vorheriger Berechnung.

Das digitale Kartenmaterial, welches auf diese Weise gewonnen wurde, bildete die Ausgangsbasis der nachfolgenden Berechnungen. Alle Bodenerosionsprognosen wurden ausschließlich auf Basis der fünf Ausgangskarten durchgeführt, die in Abbildung 19 dargestellt sind.

Zur Aufbereitung der Ausgangsdaten wurden folgende **Computerprogramme und Arbeitstechniken** verwendet:

Für den **Dateninput**, also die Digitalisierung der entsprechenden Karten, wurde ausschließlich die Standardsoftware **Designer 95** genutzt. Designer ist ein herkömmliches CAD orientiertes Layout-Programm und ermöglicht schnelle und genaue Digitalisierungsarbeiten auf der Grundlage eingescannter Karten. Dank seiner umfangreichen Editierfunktionen (direkte Digitalisierung über der eingescannten Vorlage, Digitalisierung bei 4-facher Vergrößerung, Nachrundungsautomatik, Nachkorrektur einzelner Stützpunkte und ganzer Linien), war es möglich, die Ausgangsdaten mit einer hohen Genauigkeit in ein digitales Format zu überführen. Der maximale Digitalisierfehler entspricht einer Abweichung von weit unter 10 m¹ im Gelände.

Das digitalisierte Datenmaterial wurde als DXF-Datei gespeichert, in **PC Arc/Info** importiert und dort überarbeitet. Dabei wurden systematische Digitalisierungsfehler (over-/undershots, offene Polygone, Pseudonodes, usw.) behoben, die jeweilige Karte georeferenziert (16-Punkt Georeferenzierung mit einer linearen Koordinatentransformation) und im Fall von flächenhaften Gebieten eine entsprechende Topologie aufgebaut (Bodenformenkarte, Landnutzungskarte). Nach der Aufbereitung in PC Arc/Info konnten alle Daten in Arc/View weiterverarbeitet werden. In Arc/View selbst wurden den räumlichen Informationen (Linien oder Polygone) die entsprechenden Attributwerte zugeordnet und die vorliegenden Vektorkarten ins programmeigene Rasterformat GRID konvertiert.

Nur bei der Erstellung des digitalen Höhenmodells mußte ein etwas anderer Weg beschritten werden, da zu Beginn dieser Arbeit am Geographischen Institut noch nicht die notwendigen Softwaremodule für Arc/View und Arc/Info vorhanden waren. Deshalb wurde die entsprechende Arc/View Höhenliniendatei wieder exportiert, diesmal zur GIS-Software

¹ Diese Fehlerdistanz ergibt sich aus der höchsten Abweichung der nachdigitalisierten Linien von der eingescannten Vorlage. Abdigitalisiert wurde bei einer Vergrößerung von 400% am Bildschirm. Bei diversen Nachkontrollen traten maximale Abweichungen von <1mm gegenüber dem eingescannten Kartenmaterial auf. Dies ergibt bei einem Maßstab von 1:25000 eine Abweichung von maximal 7m. Da das Kartenmaterial beim Scanvorgang auf dicke Pappe aufgezogen wurde und die Georeferenzierung 16 Paßpunkte umfaßte, dürften zumindest die Übertragungsverluste vom Kartenmaterial in das GIS sehr gering sein. Die Frage nach der Genauigkeit der Ausgangskarten bleibt davon selbstverständlich unberührt.

IDRISI. Dort wurde das digitale Höhenmodell berechnet, korrigiert² und schließlich mit einigen Tricks³ wieder nach Arc/View importiert, diesmal als Rasterdatei mit Fließkommawerten.

Alle gewonnenen Rasterkarten besitzen eine Ausdehnung von 1261*1134 Pixeln. Die Größe eines einzelnen Pixels beträgt **5*5 m**. Zwar ist es berechtigt, angesichts dieser hohen Auflösung von einer Pseudogenauigkeit zu sprechen (Digitalisierungsungenauigkeit, Mittelwertfilter bei Nachkorrektur des Höhenmodells, u.a.), doch eine Pixelgröße von 5*5 m war dringend notwendig, weil bei einigen Prognosekonzepten die Auswirkungen hydrologischer Barrieren wie abfluhemmender Wege (Ableitung des Oberflächenwassers, Versickerung an wegbegleitenden Grünstreifen), berücksichtigt werden mußten. Im Gelände betrug die Breite der querenden Wege und angrenzenden Grünstreifen im Durchschnitt etwa 5 m. Bei höheren Pixelgrößen wären die Wege auf Kosten der Prognoseflächen unnatürlich verbreitert worden.

Der grundlegende **Verlauf aller GIS-gestützten Berechnungen** wird auf der folgenden Seite (Abbildung 20) in einem Datenflußdiagramm skizziert.

Bei den Untersuchungen wurde nur das **landschaftsbezogene Erosionspotential** ($A_{\text{Landschaft}} = R * K * S * L$) bestimmt. Somit beziehen sich alle Ergebnisse auf die Erosionsgefährdung bei potentieller Schwarzbrache. Darauf aufbauend wurden in einem zweiten Schritt die nutzungsspezifischen Faktoren C und P ermittelt (vgl. Kap. 2.2.2, S.22ff). Diese weiterführenden Berechnungen sind jedoch erst Gegenstand des 7. Kapitels, wo praktische Anwendungen von Erosionsprognosen besprochen werden. Aus Darstellungsgründen sind alle folgenden Karten in unterschiedlichen Größen und ohne Koordinaten und Höhenlinien abgebildet. Für genauere Vergleiche wird auf die Kartenhülle verwiesen, wo die wichtigsten Karten in einheitlichem Maßstab enthalten sind (siehe auch Kap. 10.5).

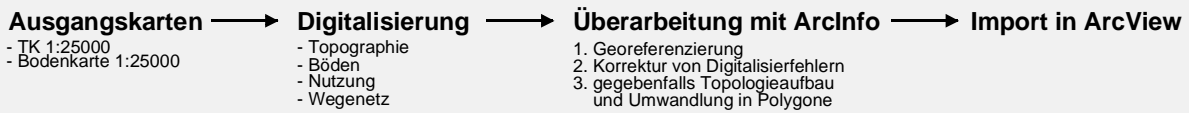
² Das vorliegende Höhenmodell wurde nach seiner Berechnung (5*5m Pixel) mit einem regulären Mittelwertfilter geglättet. Die Größe des Mittelwertfilters wurde mit 50m Radius sehr großzügig gewählt, um die typischen Interpolationssprünge bei einem selbsterstellten Höhenmodell so gering wie möglich zu halten. Da sich das später beschriebene Programm FLOW 95 auch sehr gut zur Kontrolle eines erstellten Höhenmodells eignet, konnte festgestellt werden, daß die üblicherweise benutzten 3x3 Mittelwertfilter viel zu engmaschig sind, um die Qualität eines erstellten Höhenmodells auf ein akzeptables Niveau zu heben. Vor diesem Hintergrund mußte der Mittelwertfilter sehr großzügig bemessen sein.

³ Eigentlich ist aufgrund fehlender Export-/Importfunktionen kein Datentransfer zwischen Arc/View und IDRISI möglich, zumindest nicht im Fall von Fließkommarastern. Bei genaueren Untersuchungen stellte sich jedoch heraus, daß das ASCII Datenformat von GRASS mit dem ASCII Exportformat von Arc/View identisch ist. Da IDRISI sowohl Export- als auch Importfunktionen zu GRASS besitzt, konnten über diesen Umweg dennoch zwischen den beiden Programmen Arc/View und IDRISI problemlos die entsprechenden Daten ausgetauscht werden.

Abbildung 20:





Datenflußdiagramm zur Prognose der Bodenerosion im Testgebiet

1. Dateninput

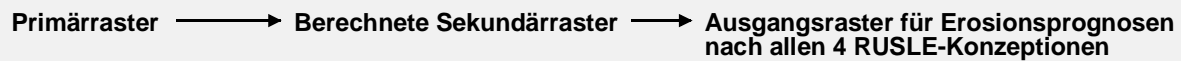


2. Überarbeitung der Ausgangsdaten







 Böden	Zuweisung von K-Werten für alle Bodenformen nach vorheriger Berechnung	Einfache Konvertierung Vektor-Raster neues Raster = K-Faktorenaster
 Landnutzung	Zuweisung folgender Landnutzungsklassen: Wald/Wiese/Acker/Siedlungen	Konvertierung Vektor-Raster mit Reklassifizierung (Bezeichnungen zu Zahlen) neues Raster = Landnutzungsaster
 Wegenetz		Konvertierung Vektor-Raster mit anschließender Reklassifizierung (Wege = NoData, Rest = 1) neues Raster = Wegeraster
 Höhenlinien		Umwandlung in Raster, Export in IDRISI, Berechnung eines DEMs dort, Rückimport in ArcView neues Raster = digitales Höhenmodell
		Berechnung der Erosivität aus Niederschlagsdaten, Erstellung eines Rasters in ArcView neues Raster = R-Faktorenaster

3. Gewinnung der Grundlagenraster



R-Faktorenaster		R-Faktorenaster
K-Faktorenaster		K-Faktorenaster
Höhenmodell	S-Faktorenaster m _s -Werteraster	S-Faktorenaster m _s -Werteraster
Landnutzungsaster Wegeraster	Kombinierte Nutzungsmasken - Acker mit Fließbarrieren - Landwirtschaft mit Fließbarrieren	Acker-/Barriereraster Landwirtschaft-/Barriereraster

4. Erosionsprognosen

Regular Slope	RUSLE Light	Irregular Slope	Unit Contributing Area
Bestimmung hydrologisch einheitlicher Flächen und Berechnung der Durchschnittswerte von R/K/S/m	Berechnung des reduzierten L-Faktors bei einer Hanglänge von 100m	Analyse der Fließlänge auf Basis eines invertierten Fließrichtungsrasters	Export der entsprechenden Dateien ins Binärformat und Berechnung des Wasserflusses mit FLOW 95
Messung der Hanglänge und Berechnung des flächenbezogenen L-Werts		Berechnung von L _i	Bestimmung des spezifischen L _i -Faktors mit kombinierter Nutzung von ArcView und FLOW 95
 Berechnung der Bodenerosion mit R*K*S*L	 Berechnung der Bodenerosion mit R*K*S*L	 Berechnung der Bodenerosion mit R*K*S*L	 Berechnung der Bodenerosion mit R*K*S*L
*Berechnung der maximalen C und P-Werte bei verschiedenen A _{max}	*Berechnung der maximalen C und P-Werte bei verschiedenen A _{max}	*Berechnung der maximalen C und P-Werte bei verschiedenen A _{max}	Erweiterte Berechnungen zur Bestimmung der Stoffbilanz mit FLOW 95 (Akkumulation, u.a.)
			Berechnung der maximalen C und P-Werte bei verschiedenen A _{max}

* Abschließender Schritt einer Erosionsprognose. Aus Platzgründen wurden die zulässigen Nutzungsweisen jedoch nur einmal berechnet, nämlich bei der Umsetzung des Unit Contributing Area Konzepts.

5.1.2 Ableitung des R-Faktors

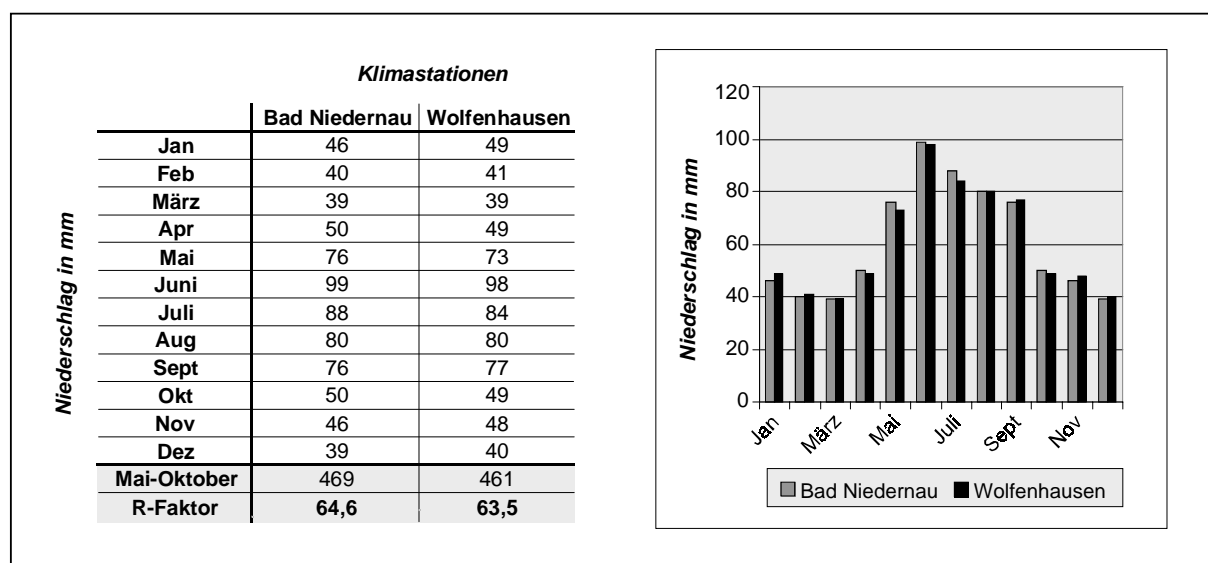
Die Ermittlung der Niederschlagserosivität im Untersuchungsgebiet war eine unproblematische Angelegenheit, weil sich der entsprechende R-Wert mit den von SCHWERTMANN ET AL. (1990) entwickelten Formeln aus normalen und leicht zu beschaffenden Niederschlagsdaten gewinnen ließ.

Für die Berechnung wurde die **Sommerformel** benutzt, also diejenige der beiden Formeln, welche den R-Faktor aus den mittleren Sommerniederschlägen vom 1.Mai bis 31.Oktober berechnet ($R = 0.141 * N_s - 1.48$). Mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0.92$ (SCHWERTMANN ET.AL 1990, S.15) repräsentiert sie hinreichend genau die erosionsrelevanten Auswirkungen des Niederschlags, welche ansonsten nur über das wesentlich arbeitsintensivere RUSLE-Berechnungsschema (vgl. Kap. 2.1) zu ermitteln gewesen wären. Hierfür fehlten jedoch im Untersuchungsgebiet die genauen Daten.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Niederschlagsverteilung und die R-Werte im Untersuchungsgebiet. Da die einzige Klimastation im Untersuchungsgebiet (Bad Niedernau) am Rand des Neckartals und nicht auf der eigentlichen Gäufläche liegt, wurden zusätzlich noch die Werte der Station Wolfenhausen (10 km weiter nördlich) berücksichtigt. Diese befindet sich innerhalb einer benachbarten gleich hohen Gäufläche und ist damit für das Untersuchungsgebiet repräsentativ.

Abbildung 21:

Niederschlagsverteilung und R-Werte im Untersuchungsgebiet



Von beiden berechneten R-Werten wurde der Mittelwert genommen ($R = 64$) und daraus ein **Raster mit dem einheitlichen Wert von 64** erstellt. Variationen kommen deshalb beim R-Faktorgrid trotz einer Größe von $1261 * 1134$ Pixeln nicht vor. Aufgrund des homogenen und kleinen Untersuchungsgebiets wäre dies aber auch bei genauerem Datenmaterial nicht zu erwarten. Theoretisch mögliche Variationen beim Niederschlag (orographische Verstärkung) können sich ohnehin nicht erosionsrelevant auswirken, weil die dafür in frage kommenden Flächen nicht ackerbaulich genutzt werden (Anstieg zu Stubensandsteinstufe, Muschelkalk-abhang).

5.1.3 Ableitung des K-Faktors

Im Gegensatz zum R-Wert war die Ermittlung der Bodenerodibilität eine umfangreiche Angelegenheit, obwohl für das Untersuchungsgebiet eine **Bodenkarte mit den entsprechenden K-Werten** (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1990, 1992) schon vorhanden war. Denn in den neueren baden-württembergischen Bodenkarten werden zwar die K-Werte angegeben, jedoch immer nur für jede Untereinheit (= einzelnes untersuchtes Bodenprofil) und nicht für eine Bodenform als ganzes.

Die Schwierigkeit bei der Erstellung einer K-Faktorkarte bestand darin, aus den einzelnen **profilbezogenen K-Werten** den K-Faktor jeder flächenhaft verbreiteten Haupteinheit (= mehrere Bodenformgruppen, die zu einer Kartiereinheit zusammengefaßt wurden) zu berechnen. Dabei mußte folgendes berücksichtigt werden:

- In den tabellarischen Erläuterungen zur Bodenkarte 7519 werden die einzelnen Bodenprofile ohne Angabe des Standortes beschrieben. Eine Interpolation zwischen ihnen scheidet daher aus.
- Eine Haupteinheit setzt sich aus mehreren Untereinheiten zusammen, die allesamt verschiedene K-Werte und Verbreitungsgrade besitzen.
- Die Bodenerodibilität wird in den tabellarischen Erläuterungen nicht als direkter RUSLE-K-Wert angegeben, sondern nur als Stufenwert (6 Erodibilitätsstufen).

Aus diesen Gründen waren umfangreiche Berechnungen zur Erstellung der K-Faktorenkarte notwendig. Dazu wurde eine Tabelle (Anhang, Kap. 10.1) erstellt, in der alle relevanten Bodendaten eingetragen wurden. Anhand dieser Tabelle wurden mit den folgenden Berechnungsschritten die direkten RUSLE-K-Werte für jede Haupteinheit bestimmt (vgl. dazu GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1992, S.7-26 sowie Anhang, Kap. 10.2):

1. Ausschluß nicht ackerbaulich genutzter Bodenprofile aus der K-Werteberechnung.
2. Berechnung des **relativen Gewichts von jedem Einzelprofil** nach der Häufigkeit seines Auftretens⁴. Dabei wurde folgende Umrechnungstabelle erstellt und benutzt:

Tabelle 2: Gewichtung der K-Werte der verschiedenen Bodenprofile nach ihrem Flächenanteil an der jeweiligen Haupteinheit

Flächenanteilsklasse (Klassifizierung nach Anteil)	Flächenanteil in % (Durchschnittlicher Flächenanteil)	Relatives Gewicht G zu Klasse 1 (nach der Formel Flächenanteil/3.5)
1	3.5	1
2	11	3
3	28	8
4	50	14
5	73	21
6	93	27

3. Bestimmung des **mittleren K-Stufenwertes einer Haupteinheit** aus den Bodenerodibilitätsklassen der einzelnen Profile nach folgender Formel:

$$K_{\text{Haupteinheit}} = \frac{K_{\text{Einzelprofil}} * G_i}{G_i}$$

Hierbei bedeuten: $K_{\text{Haupteinheit}}$ = mittlerer K-Stufenwert einer Haupteinheit (insgesamt gibt es im Untersuchungsgebiet 54 verschiedene Haupteinheiten)

$K_{\text{Einzelprofil}}$ = K-Stufenwert eines Einzelprofils, das zur jeweiligen Haupteinheit gehört (der K-Stufenwert ist die Bodenerodibilitätsklasse, die in den tabellarischen Erläuterungen der benutzten Bodenkarte angegeben wurde; es existieren 6 verschiedene Klassen)

G_i = Gewichtung des jeweiligen Einzelprofils (= relatives Gewicht zu Klasse 1)

Durch Anwendung dieser Formel konnte für jede einzelne Bodenform ein durchschnittlicher K-Stufenwert berechnet werden. Dieser Stufenwert ist jedoch noch nicht der wirkliche K-Faktor, weil in den tabellarischen Erläuterungen nur Erodibilitätsstufen, nicht jedoch die wirklichen K-Faktoren angegeben werden. Da jedoch jeder Stufenwert einem ganz bestimmten Wertebereich beim K-Faktor entspricht, mußten diese Stufenwerte in einem letzten Schritt zu direkten K-Werten transformiert werden.

⁴ Vgl. tabellarische Erläuterungen der Bodenkarte 7519: Spalte 2 [Haupteinheit], 4 [Kartiereinheit, d.h. Einzelprofil], 6 [Flächenanteil]

4. Quantitative Analyse der **Beziehung zwischen K-Stufenwert und dem wirklichen K-Wert**:

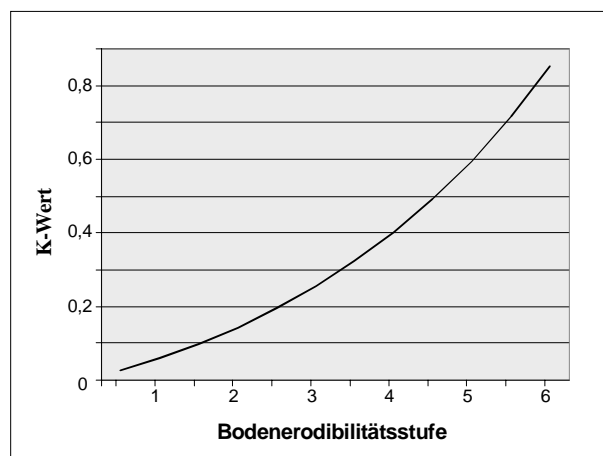
Durch eine exponentielle Regressionsanalyse mit dem Programm **Statistika**⁵ wurde der Zusammenhang zwischen den angegebenen K-Stufen in der Bodenkarte und den entsprechenden K-Werten bestimmt. Die ermittelte Formel erlaubt die einfache Umrechnung von K-Stufenwerten in direkte RUSLE-K-Werte. Sie beschreibt mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0.93$ den Zusammenhang zwischen Stufenwerten und wirklichen K-Faktoren hinreichend genau und lautet folgendermaßen:

$$\text{K-Wert}_{\text{Haupteinheit}} = -0.2012 + e^{(-1.6212 + 0.2788 \cdot \text{K}_{\text{Haupteinheit}})}$$

hierbei bedeuten: $\text{K}_{\text{Haupteinheit}}$ = K-Stufenwert der Haupteinheit (berechnet nach der Formel aus Punkt 3)
 e = Wachstumsexponent (Eulersche Zahl $e = 2.7183$)
 $\text{K-Wert}_{\text{Haupteinheit}}$ = wirklicher RUSLE-K-Wert der Haupteinheit (= K-Faktor)

Abbildung 22:

Zusammenhang zwischen Boden-erodibilitätsstufen aus der Bodenkarte und den wirklichen K-Werten (berechnet nach obiger Formel)



Durch **Anwendung der skizzierten Berechnungsschritte auf jedes einzelne Bodenprofil** konnte der **durchschnittliche K-Faktor der jeweiligen Haupteinheit** bestimmt werden. Obwohl in der Bodenkarte 1:25000 Rottenburg a.N. insgesamt 54 unterschiedliche Bodeneinheiten unterschieden werden, wurden nur für die ackerbaulich genutzten die entsprechenden K-Werte berücksichtigt. Der K-Faktor jeder Bodeneinheit wurde in eine Tabelle eingetragen (vgl. Tabelle 3) und diese mit der digitalisierten Bodenkarte verknüpft⁶. Auf diese Weise konnten den Bodenflächen die entsprechenden K-Faktoren zugeordnet werden. Das Ergebnis in Form einer **K-Faktorenkarte** zeigt Abbildung 23 auf der nächsten Seite.

⁵ Programmmodul: Nonlinear Estimation - Exponential Growth Regression (Schätzmethode: Quasi-Newton)

⁶ GIS-Technik des Table Joining. Dabei wird eine extern erstellte Tabelle mit der Attributtabelle der jeweiligen Vektordatei verknüpft und mit ihr zusammengefügt. Voraussetzung ist eine gleiche Referenzspalte bei beiden Tabellen, in diesem Fall die Nummern der Bodeneinheiten, welche in beiden Tabellen vorhanden waren. Somit wird sichergestellt, daß beide Tabellen auch korrekt verschmolzen werden.

Tabelle 3:

Konkrete K-Werte für alle bewirtschafteten Böden im Untersuchungsgebiet

Die Ziffern unter der Rubrik Bodeneinheit zeigen die Identifikationsnummern der entsprechenden Bodenformen, die in der Bodenkarte 1:25000 Rottenburg a.N. und den dazugehörigen tabellarischen Erläuterungen genau beschrieben werden. (siehe Tabellarische Erläuterungen zur Bodenkarte 7519, S. 27ff und Bodenkarte im Anhang)

Vorherrschende Bodentypen bei den einzelnen Identifikationsziffern (Ausschnitt):

2-5: Rendzinen (z.T. verbraunt)

6-7: Pararendzinen

9-11: Stärker verbraunte Pararendzinen

12-17: Braunerde-Pelosole

18-29: Unterschiedliche Braunerden

30: Tiefe Parabraunerde (keine Erosionsspuren)

31-33: Unterschiedlich erodierte Parabraunerden

38-39: Tiefe Kolluvien

40-41: Pseudogley-Kolluvien

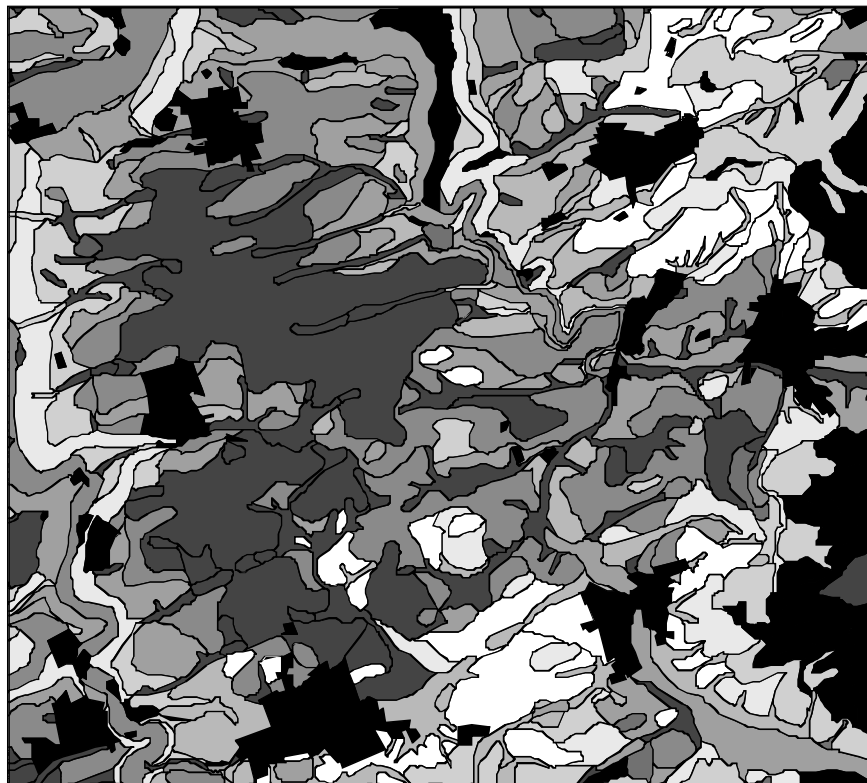
42-47: Unterschiedliche Auenböden, usw.

Bodeneinheit	K-Wert	Bodeneinheit	K-Wert
2	0,23	30	0,51
3	0,17	31	0,35
5	0,28	32	0,31
6	0,09	33	0,35
7	0,4	36	0,4
9	0,18	37	0,45
10	0,22	38	0,49
11	0,26	39	0,26
12	0,21	40	0,49
13	0,13	41	0,28
14	0,16	42	0,35
16	0,23	43	0,32
17	0,34	45	0,32
18	0,29	46	0,16
19	0,28	48	0,31
21	0,31	49	0,22

Abbildung 23:

K-Faktorenkarte des Untersuchungsgebiets

Die K-Werte steigen generell von hell zu dunkel, schwarze Flächen sind entweder überbaute Gebiete ohne Bodeninformationen oder aber Bodentypen, die nur unter Wald oder Wiesennutzung vorkommen und daher nicht berücksichtigt wurden. Eine Karte mit den entsprechenden Bodentypen ist im Anhang zu finden.



K-Werte

	0.09 - 0.14
	0.14 - 0.18
	0.18 - 0.23
	0.23 - 0.28
	0.28 - 0.32
	0.32 - 0.37
	0.37 - 0.42
	0.42 - 0.46
	0.46 - 0.51

5.1.4 Ableitung des S-Faktors und der lokalen m_i -Werte

Der **S-Faktor im Untersuchungsgebiet** wurde ausschließlich aus dem digitalen Höhenmodell bestimmt. Hierzu mußten die in Kap. 2.1 beschriebenen Berechnungsformeln auf das Höhenmodell angewandt werden:

1. $S = 10.8 * \sin \Theta + 0.03$ bei Neigungen bis 9% (bzw. bis 5.14 Grad)
2. $S = 16.8 * \sin \Theta - 0.5$ bei Neigungen ab 9% (bzw. ab 5.14 Grad)

Aufgrund der beiden unterschiedlichen Berechnungsformeln wurden nach Analyse der Hangneigung zwei Masken erstellt, eine für Neigungswerte bis 5.14 Grad und eine für Neigungswerte darüber. Nachdem der S-Faktor mit jeder der beiden Berechnungsformeln⁷ einmal analysiert worden war, konnten die jeweiligen S-Faktorkarten (S-Faktor mit Formel 1, S-Faktor mit Formel 2) mit den jeweiligen Masken verschnitten und in einer abschließenden Overlayoperation kombiniert werden. Das Ergebnis war eine S-Faktorkarte, in der jeder einzelne S-Wert mit der dafür zuständigen Berechnungsformel gewonnen wurde.

Ähnlich verlief die Berechnung einer Rasterkarte mit den **jeweiligen m_i -Werten**. Auch hier mußten die entsprechenden Berechnungsformeln (vgl. Kap.2.1) auf das digitale Höhenmodell angewandt werden. Im Gegensatz zu vorhin waren jedoch keine Masken erforderlich, weil beide benutzten Formeln (vgl. Kap. 2.1) im ganzen Gebiet gelten:

3. $\beta = (\sin \Theta / 0.0896) / [3 * (\sin \Theta)^{0.8} + 0.56]$
4. $m = \beta / (1 + \beta)$

Es ist zu beachten, daß die ermittelten m_i -Werte keinesfalls dem m-Wert zur Berechnung des L-Faktors entsprechen (vgl. Kap. 2.3). Das berechnete m_i -Raster diente lediglich als Ausgangsraster für weiterführende Berechnungen zur Ermittlung des wirklichen m- bzw. m_{oi} -Wertes. Da es jedoch bei allen folgenden Prognosekonzeptionen notwendig war, wurde seine Herleitung schon an dieser Stelle skizziert und braucht daher nicht mehr wiederholt zu werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen das digitale Höhenmodell des Untersuchungsgebiets in einer schattierten Ansicht und die daraus berechneten Karten mit den jeweiligen m_i - bzw. S-

⁷ Hier war allerdings zu beachten, daß zur Berechnung des jeweiligen Sinuswertes zuerst das Neigungsraster ins Bogenmaß überführt werden mußte, da Arc/View bzw. Arc/Info Neigungen in Rad und nicht in Grad voraussetzen, zumindest bei trigonometrischen Funktionen. Dies wurde nach einer vorherigen Transformation mit der Formel $\text{Rad} = \text{Grad} * (\pi/180^\circ)$ möglich.

Werten. Zusammen mit den vorhin erläuterten Faktoren R und K waren damit **alle fünf Grundlagenkarten ermittelt** (R-Faktorkarte, K-Faktorkarte, S-Faktorkarte, m_i -Wertekarte, digitales Höhenmodell), die bei jeder Prognosekonzeption notwendig waren.

Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die jeweiligen **Fließmasken**, also Karten mit eingezeichneten hydrologischen Barrieren, von Prognosekonzeption zu Prognosekonzeption. Ihre Herleitung wird in den nächsten Abschnitten bei der jeweiligen Berechnungskonzeption direkt beschrieben.

Abbildung 24:

Höhenmodell des Untersuchungsgebiets

Schattierte Ansicht in 4-facher Überhöhung.

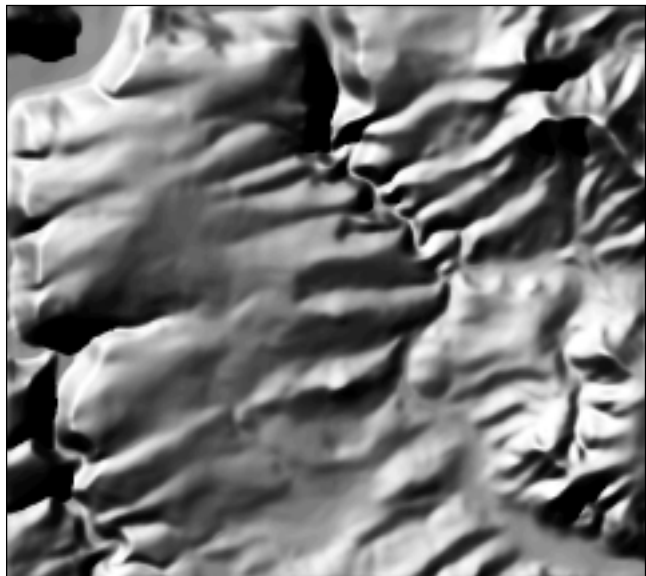


Abbildung 25:

S-Faktorengrid des Untersuchungsgebiets

Vereinfachte Darstellung in grober Klassifikation (7 Klassen). Mittelgraue Farben entsprechen dem S-Wert des RUSLE-Standardhangs (ca. 9% Neigung), hellere und dunklere dagegen geringeren bzw. größeren Neigungswerten.

S-Faktoren	
	< 0.25
	0.25 - 0.75
	0.75 - 1.25
	1.25 - 2
	2 - 3
	3 - 5
	5 - 7
	> 7

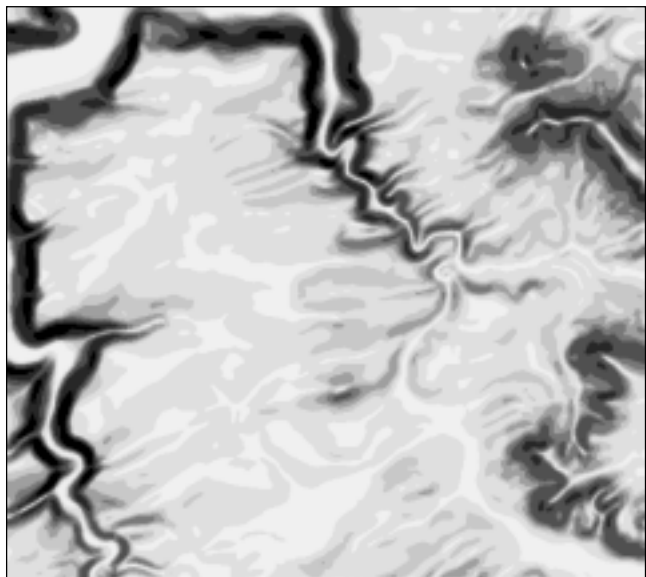
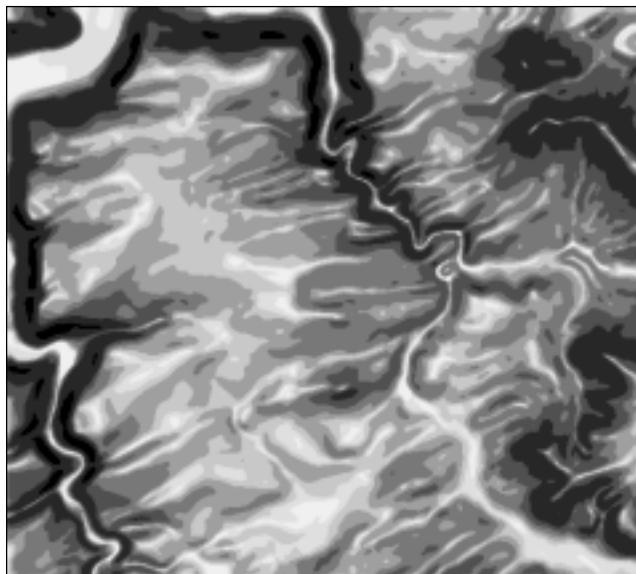
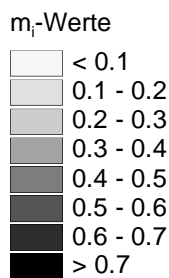


Abbildung 26:

Raster der m_i -Werte im Untersuchungsgebiet



5.2 Bodenabtrag nach dem Regular Slope Konzept: Stark vereinfachte Umsetzung der RUSLE-Gleichung auf Basis ganzer Flächen

Die Bestimmung des Erosionspotentials nach der Regular Slope Konzeption folgte den in **Kap. 3.2.1** beschriebenen Prinzipien. Vor Berechnung der flächenbezogenen Durchschnittswerte mußten daher zuerst die entsprechenden **Untersuchungseinheiten** bestimmt werden, d.h. alle isolierten Einzelflächen, auf denen das Oberflächenwasser ohne Unterbrechung durch hydrologische Barrieren (Wege, Gräben, Hecken, o.ä.) abfließen kann.

Zu diesen Zweck wurde eine **Abflußmaske** erstellt, in der zwischen zwei möglichen Werten unterschieden wird (vgl. Abb. 27):

- Gebiete mit regulärem Oberflächenabfluß (ackerbaulich genutzte Gebiete⁸)
- Gebiete oder Linien, auf denen kein erosionsrelevanter Oberflächenabfluß auftreten kann oder aber kanalisiert bzw. abgeleitet wird. Diese Bereiche sind Start- bzw. Endpunkte der Hanglängenmessung nach der RUSLE-Erosionsformel und begrenzen somit die Fließ-

⁸ Obwohl eigentlich unzulässig wurden bei dieser und allen folgenden Prognosekonzeptionen Flächen, die in der topographischen Karte als Wiesen eingezeichnet waren, zu den Gebieten mit regulärem Oberflächenabfluß, also den ackerbaulich genutzten gezählt (vgl. Nutzungskarte im Anhang). Dies geschah aus zwei Gründen: zum einen wurden auf der Gäufläche zum Zeitpunkt der Untersuchung alle als Wiesen eingezeichnete Gebiete ausnahmslos ackerbaulich genutzt, zum anderen eignen sich gerade die Wiesenflächen im Gipskeuper aufgrund der extremeren Bedingungen (steileres Relief, großzügigere Wegabstände) als zusätzliches hypothetisches Vergleichsgebiet. Läge der Schwerpunkt aller Untersuchungen jedoch nicht auf einem Methodenvergleich, sondern in der konkreten Analyse der wirklichen Erosionsgefährdung, dann müßten im Fall der Gipskeuperwiesen diese selbstverständlich zu den Ausschlußgebieten gezählt werden, also zu den Flächen ohne Oberflächenabfluß.

strecke des abfließenden Wassers. Nach der RUSLE-Erosionsgleichung gehören hierzu Wald, Wasserscheiden, Abflußlinien, Wege oder sonstige Hindernisse. Diese wurden alle ermittelt und sind in Abb. 27 in schwarzer Farbe dargestellt⁹.

Abbildung 27:

Abflußmaske nach dem Regular Slope Konzept

schwarze Farbe:

Gebiete ohne erosionsrelevanten Oberflächenabfluß oder hydrologische Barrieren im Sinne der RUSLE-Formel (Wald, Siedlungen, lineare Fließlinien, Wasserscheiden, Wege, Feldraine).

Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, wurden alle hydrologischen Barrieren auf die dreifache Größe verbreitet (15 statt 5m), die Analysen selbst fanden jedoch in der Originalgröße statt.

weiße Farbe:

Gebiete mit Ackernutzung und flächenhaftem Oberflächenabfluß



Nach einer Reklassifizierung der erstellten Abflußmaske (Ackerflächen = 1; Abflußgrenzen, Gebiete ohne Oberflächenabfluß = datenloser Bereich), konnten in einem zweiten Schritt mit der Arc/View Funktion REGIONGROUP¹⁰ alle Untersuchungseinheiten bestimmt werden, d.h. jede der 2649 weißen Teilflächen aus denen sich das gesamte Untersuchungsgebiet wie ein Puzzle zusammensetzt (siehe Abbildung 27), wurde ermittelt und bekam eine eigene Gebietsnummer.

Für **jede dieser kleinstmöglichen Untersuchungseinheiten** wurden in mehreren Schritten die Durchschnittswerte von R, K, S und m bestimmt, beim Faktor Hanglänge dagegen die größte Fließlänge in der jeweiligen Untersuchungseinheit ermittelt. Alle gewonnenen Werte wurden mit dem jeweiligen Gebiet verknüpft. Als Ergebnis entstand ein **neues Flächenraster**, in dem für jedes einzelne Teilgebiet (= kleinste Untersuchungseinheit) diejenigen Werte abgespeichert waren, welche für eine nachfolgende Erosionsprognose nach der Regular Slope Methode benötigt wurden.

⁹ In dieser Umsetzung der Regular Slope Konzeption wurden ausdrücklich alle möglichen wasserflußhemmenden Grenzlinien bestimmt. Mir bekannte Untersuchungen begnügen sich dagegen mit Weggrenzen und Grenzen zu nicht ackerbaulich genutzten Gebieten (Weitere Umsetzungsprobleme, vgl. Kap. 3.2)

¹⁰ Spezielle Berechnungsfunktion, die nur mit der Skriptsprache Avenue benutzt werden kann. Die auf beiliegender CD-ROM enthaltene Erweiterung GRID tools lädt diese Funktion automatisch in das Programmfenster von Arc/View.

Die folgende Tabelle zeigt ausschnittshaft die mit dem neu erstellten Flächenraster verknüpfte Attributtabelle:

Tabelle 4:

Ausschnitt aus der Attributtabelle des Flächenrasters

Ausschnitt aus der mit dem Flächenraster verknüpften Attributtabelle. Die erste Spalte zeigt die Kennziffer des jeweiligen Gebiets, die zweite seine Größe in Pixeln, die nachfolgenden bis zum m-Wert den Durchschnittswert des jeweiligen RUSLE-Faktors auf dem betreffenden Gebiet. Die letzte Spalte zeigt die maximale Fließlänge, die im jeweiligen Gebiet möglich ist.

GEBIET	FLÄCHE	R-FAKTOR	K-FAKTOR	S-FAKTOR	M-WERT	HANGLÄNGE
.....
11	74	64	0,31	0,21	0,21	57
12	8	64	0,39	0,17	0,18	7
13	241	64	0,16	0,43	0,34	69
14	182	64	0,14	0,48	0,37	20
15	4	64	0,13	0,25	0,25	34
16	1736	64	0,13	0,68	0,42	132
17	831	64	0,14	0,44	0,33	142
18	591	64	0,11	0,64	0,41	137
19	3396	64	0,18	0,81	0,40	415
20	93	64	0,31	0,15	0,17	80
21	295	64	0,29	0,28	0,25	110
22	8	64	0,26	0,39	0,33	5
.....

Aus dem erstellten Flächenraster wurden die jeweiligen Faktorkarten extrahiert (flächenbezogene Karten vom R-Faktor, K-Faktor, S-Faktor, m-Wert und der Hanglänge) und in einem abschließenden Schritt der Bodenabtrag berechnet. Dabei wurde die RUSLE-Standardformel benutzt und folgende Overlayoperation durchgeführt:

$$A = \text{R-Faktor} * \text{K-Faktor} * \text{S-Faktor} * (\text{Hanglänge} / 22.13)^{\text{m-Wert}}$$

Die daraus resultierende Bodenerosionskarte zeigt den durchschnittlichen Bodenabtrag für jede einzelne der 2649 Untersuchungsflächen und ist auf der folgenden Seite dargestellt.

Alle dargestellten Ergebnisse sind das Resultat einer buchstabengetreuen Umsetzung des Regular Slope Konzepts mit einem Geographischen Informationssystem. **In der Praxis wird dieses Konzept jedoch mangelhaft umgesetzt**, weil lediglich Feldgrenzen zur Festlegung der einzelnen Untersuchungsflächen benutzt werden, nicht jedoch hydrologisch wirksame Grenzlinien im Sinne der RUSLE (vgl. Kap. 3.2.1). Darüber hinaus wird die erosive Hanglänge durch subjektives und manuelles Abmessen am Bildschirm (BARTH 1997, KAPPAS/SCHWERTER 1997), nicht jedoch über eine genaue Analyse ermittelt.

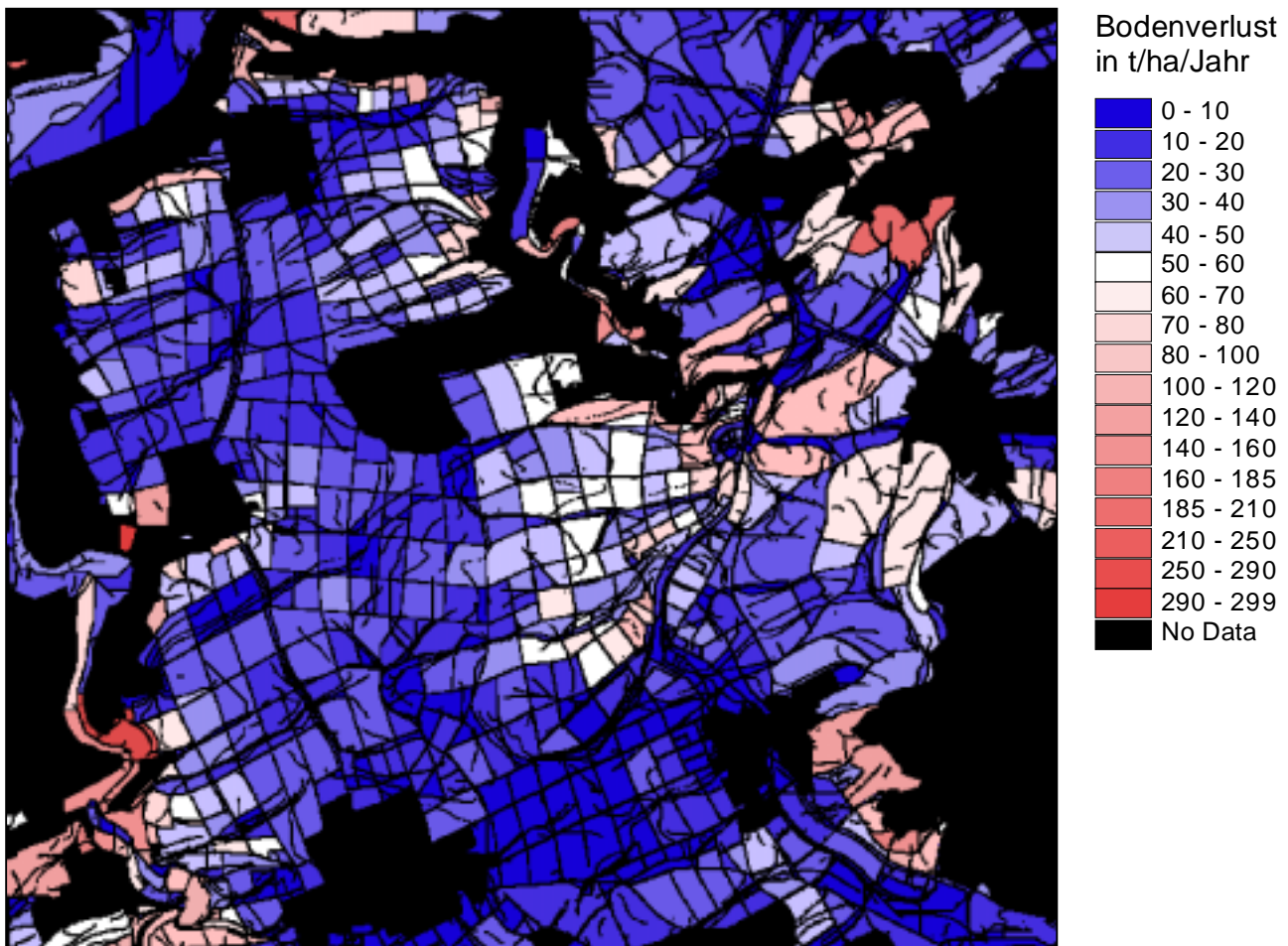
In der vorliegenden Umsetzung wurden dagegen sowohl die Untersuchungsflächen als auch die erosiven Hanglängen in weitgehend automatisierten Arbeitsschritten über bestehende GIS-Funktionen ermittelt. So wurden die Wasserscheiden und Abflußlinien der erstellten

Abflußmaske mit der Arc/View Funktion ACCUMULATION¹¹ und einer nachfolgenden Reklassifizierung bestimmt, die erosiven Hanglängen über die Funktion FLOWLENGTH¹². Weil bei der Regular Slope Konzeption nur die Durchschnittswerte ganzer Flächen verwendet werden, wirken sich Ungenauigkeiten bei beiden Berechnungsfunktionen kaum aus. Zur punktgenauen Berechnung des Bodenabtrags eignen sie sich jedoch nur mit Abstrichen und Anwendung einiger Umwege (vgl. Kap 5.4).

Abbildung 28:

Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der Regular Slope Konzeption

Bodenverlust ganzer Flächen unter Schwarzbrachebedingungen. Schwarze Farben kennzeichnen erosionsfreie Gebiete (Wald, Siedlungen und überbaute Gebiete) oder erosionswichtige Linien (Wasserscheiden, potentielle Abflußlinien, Bäche, Wege, u.a.). Wiesen wurden zu Vergleichszwecken wie Ackerflächen behandelt. Alle hydrologischen Barrieren sind der Übersicht halber in dreifacher Breite dargestellt.



¹¹ Spezielle Berechnungsfunktion, die nur mit der Skriptsprache Avenue benutzt werden kann. Die auf beiliegender CD-ROM enthaltene Erweiterung GRID tools lädt diese Funktion automatisch in das Programmmenü von Arc/View.

¹² s.o.

5.3 Bodenabtrag nach dem RUSLE Light Konzept: Vereinfachte typische Umsetzung der RUSLE-Gleichung

Die Bestimmung des Erosionspotentials nach der RUSLE Light Konzeption folgte genau den Prinzipien, die in **Kap. 3.2.2** beschrieben wurden. Weil die Fließlänge hier auf einen konstanten Wert von 100 m festgesetzt wird, reichen zur Berechnung des L-Faktors **standardisierte Overlayfunktionen** aus. Daher war die GIS-Umsetzung der RUSLE Light Konzeption einfach, zumal alle vorhandenen Ausgangskarten, deren Herleitung in Kap. 5.1 beschrieben wurde (Karten des R-Faktors, K-Faktors, S-Faktors und m_i -Werts) unverändert übernommen werden konnten.

Zur Ermittlung der entsprechenden L-Faktorkarte genügte die Anwendung der reduzierten Berechnungsformel $L_i = (100/22.13)^{m_i}$ bzw. $L_i = 4.52^{m_i}$, d.h. der Term 100/22.13 mußte lediglich mit dem zuvor erstellten m_i -Werteraster potenziert werden.

Da hydrologische Grenzen durch die Festsetzung der Hanglänge keine Rolle spielen, mußte im Gegensatz zur Regular Slope Konzeption keine Abflußmaske erstellt werden. Deshalb ist die berechnete L-Faktorenkarte auf der nächsten Seite (Abbildung 29) nicht durch schwarze Ausschlußbereiche gegliedert.

Nach Berechnung des L-Faktorrasters wurde der Bodenabtrag in einem abschließenden Schritt prognostiziert, indem die RUSLE-Standardformel benutzt und folgende Overlayoperation durchgeführt wurde:

$$\mathbf{A = R-Faktor * K-Faktor * S-Faktor * L-Faktor}$$

Das Ergebnis zeigt Abbildung 30 auf der nächsten Seite. Hier wurden allerdings erosionsunempfindliche Ausschlußgebiete (Wald, Wege) nachträglich als schwarze Flächen in die Karte eingefügt. Obwohl sie bei der Berechnung keine Rolle gespielt haben, war dies notwendig, weil die RUSLE-Formel für solche Flächen nicht gilt.

Alle dargestellten Untersuchungsergebnisse sind das Resultat einer buchstabengetreuen Umsetzung der RUSLE Light Konzeption. Auch in der Praxis wird dieses Untersuchungskonzept immer korrekt in der beschriebenen Weise umgesetzt. Doch dies ist nicht überraschend, da hierbei lediglich einfache Overlayfunktionen benötigt werden.

Abbildung 29:
L-Faktorkarte, ermittelt nach dem RUSLE Light Konzept

Vereinfachte Darstellung in grober Klassifikation (sechs Klassen). Weiße Farben entsprechen dem L-Wert des RUSLE-Standardhangs (ca. 9% Neigung bei 22.13m Hanglänge), rote Farben größeren Neigungs- bzw. Hanglängenwerten. Hydrologische Grenzlinien im Sinne der RUSLE oder erosionsfreie Flächen wurden zur Prognose des L-Faktors nicht benötigt, da die Hanglänge auf 100m festgesetzt wurde und keine räumlichen Analysen notwendig waren.

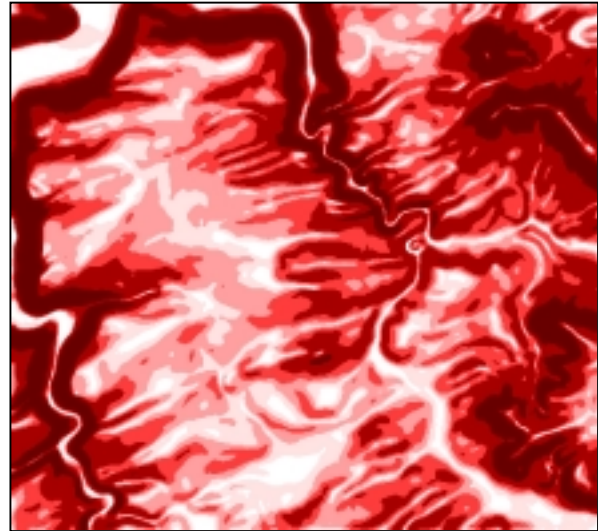
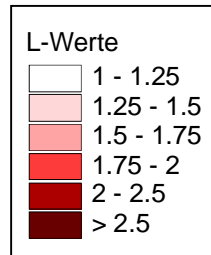
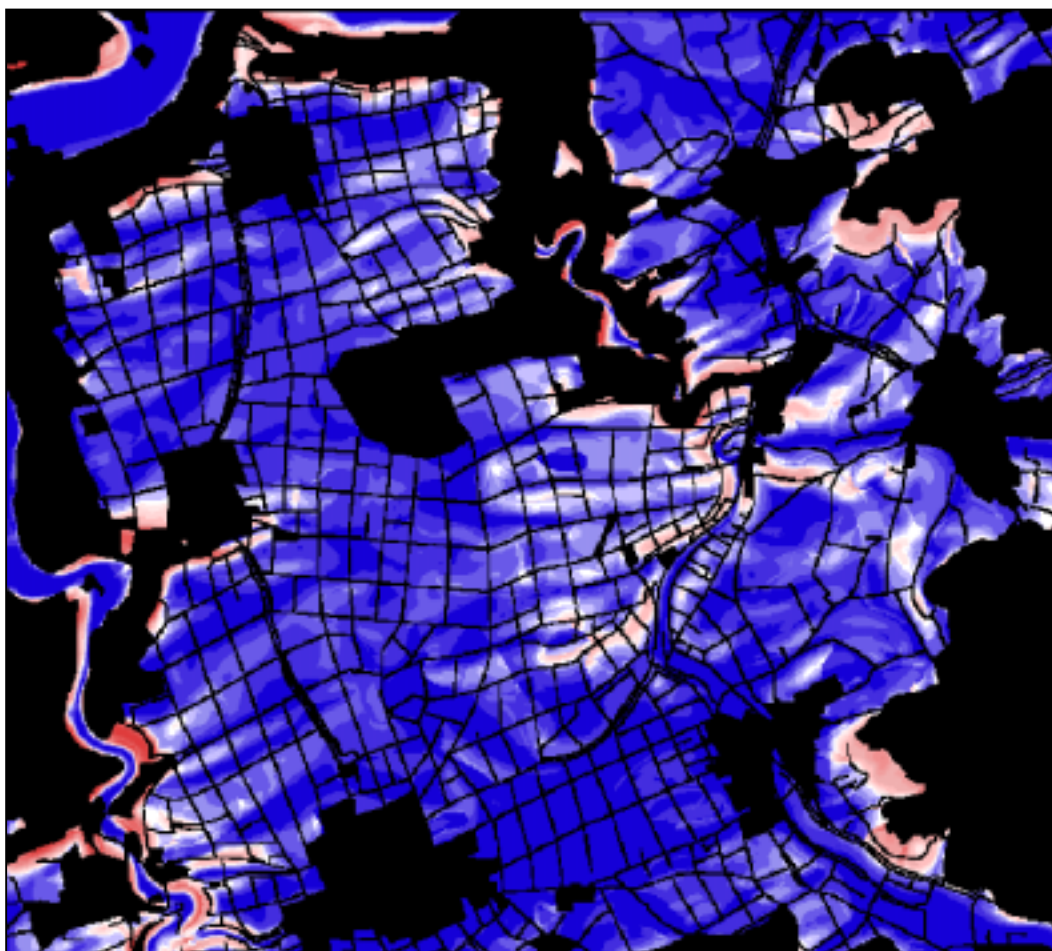
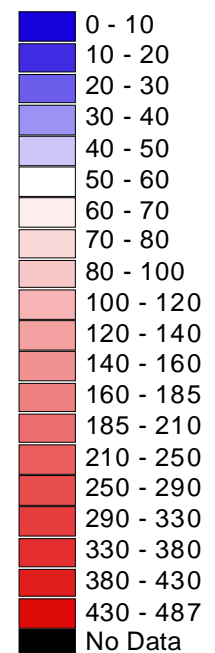


Abbildung 30:
Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der RUSLE Light Konzeption

Bodenverlust ganzer Flächen unter Schwarzbrachebedingungen. Schwarze Farben kennzeichnen erosionsfreie Gebiete (Wald, Siedlungen und überbaute Gebiete) oder Linien (Wege). Sie wurden jedoch erst nach der Erosionsberechnung in die Karte eingefügt, da sie für Prognosen nach dem RUSLE Light Konzept nicht benötigt wurden. Wiesen wurden zu Vergleichszwecken als Ackerflächen behandelt. Hydrologische Barrieren sind in dreifacher Verbreiterung dargestellt.



Bodenverlust
in t/ha/Jahr



5.4 Exkurs: Abflußanalysen mit GIS und EDV

Die folgenden Erläuterungen dienen dem Verständnis der nächsten Erosionsprognosen, der Umsetzung des Irregular Slope und Unit Contributing Area Konzepts im Untersuchungsgebiet. Beide Konzeptionen benötigen hydrologische Daten in der einen oder anderen Weise. Diese lassen sich mit einem herkömmlichen GIS-System nicht bzw. nur eingeschränkt ermitteln. Die dafür verantwortlichen Ursachen und mögliche Alternativen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

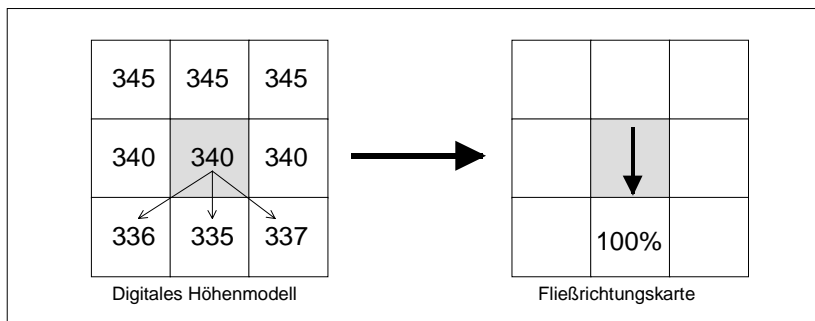
5.4.1 Abflußanalysen mit einem herkömmlichen Raster-GIS¹³

Wie bereits erwähnt, ist keines der momentan auf dem Markt vertriebenen GIS-Programme¹⁴ in der Lage, den Oberflächenabfluß korrekt zu analysieren. Schuld daran sind Berechnungsalgorithmen, die aufgrund **konzeptioneller Beschränkungen** keine genauen Ergebnisse erlauben.

Diese Beschränkungen zeigen sich in der Art und Weise, wie der Oberflächenabfluß innerhalb eines GIS berechnet wird. Dies geschieht in der Regel in **zwei Schritten**. Zunächst wird aus einem digitalen Höhenmodell die Abflußrichtung in jedem Pixel errechnet und daraus ein Fließrichtungsraster erstellt. Auf dessen Basis lassen sich dann die entsprechenden hydrologischen Daten bestimmen, z.B. die Abflußmenge, Wasserscheiden, Fließlängen usw. Das folgende Schaubild zeigt das **Prinzip der Fließrichtungsberechnung**:

Abbildung 31:

Fließrichtungsberechnung bei kommerzieller GIS Software



¹³ Obwohl im folgenden die Probleme einer Abflußanalyse nur am Beispiel eines Raster-GIS erläutert werden, stellt sich die Situation bei einem Vektor-GIS mit einer TIN-gestützten Datenstruktur ähnlich dar. Da jedoch nur die wenigsten GIS Programme mit dem Datentyp TIN umgehen können, wurde aus Platzgründen auf eine Darstellung der TIN-typischen Probleme verzichtet.

¹⁴ Auf folgende weitverbreiteten Programme wird dabei Bezug genommen:
Arc/View, Arc/Info, IDRISI, SPANS, GRASS, PC Raster, ILLWIS, Erdas IMAGINE

Auf der linken Seite von Abbildung 31 ist der Ausschnitt eines digitalen Höhenmodells zu sehen. Die abgebildeten Zahlen zeigen die jeweiligen Höhenwerte in Metern. Bei der **Berechnung der Fließrichtung** gehen nun alle derzeitigen GIS-Systeme nach dem folgenden Prinzip vor:

Zuerst werden die Höhenwerte der acht umliegenden Rasterzellen mit der Zentralzelle (im Schaubild grau dargestellt) und untereinander verglichen. Die niedrigste Nachbarzelle bestimmt dabei die Fließrichtung in der Zentralzelle. Im obigen Beispiel wäre dies die mittlere der drei untersten Zellen. Das Wasser würde aus der Zentralzelle heraus in südlicher Richtung fließen, wie in der rechten Hälfte des Schaubildes gezeigt wird.

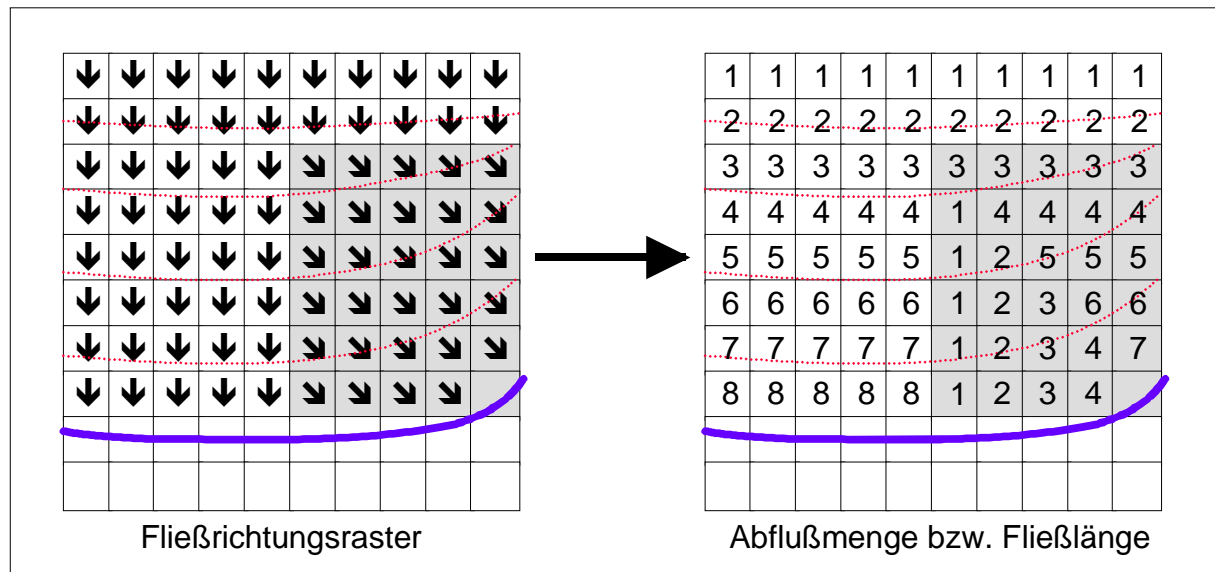
Diese Art der Fließrichtungsbestimmung, auch unter dem Begriff **Single Flow** bekannt, abstrahiert das wirkliche Fließverhalten sehr stark. Denn natürlich müßte sich das aus dem Zentralpixel abfließende Wasser auf alle drei unteren Pixel verteilen. Zu allen dreien besteht ein Gefälle und damit sind auch die Bedingungen für einen Wasserfluß gegeben. Dagegen erhält nach der Single Flow Methode die niedrigste Nachbarzelle im Stil einer **Alles oder nichts - Lösung** 100% des abfließenden Wassers. Alle übrigen Zellen bleiben trotz eventuell vorhandenen Gefälles zur Zentralzelle unberücksichtigt, d.h. nach der Single Flow Berechnungsmethode findet dorthin im Gegensatz zur Realität nicht der geringste Wasserzufluß statt.

Trotz der zum Teil massiven Vergrößerung der Wirklichkeit besitzt die Beschränkung auf eine Fließrichtung einen großen Vorteil. Durch sie werden nachfolgende hydrologische Berechnungen wie Fließlängen- oder Abflußanalysen sehr einfach.

Abbildung 32 zeigt das Prinzip dieser weiterführenden hydrologischen Berechnungen auf der nächsten Seite. Im linken Teil ist der Ausschnitt einer hypothetischen Fließrichtungskarte zu sehen. Die gestrichelten Isohypsenlinien zeigen die Geländeform an, einen einfachen Hangabschnitt, dessen süd- bis südostexponiertes Gefälle von einer Abflußlinie (dicke Linie) begrenzt wird. Eingezeichnete Pfeile entsprechen den Fließrichtungen in den jeweiligen Rasterzellen. Sie sind das Ergebnis einer Fließrichtungsanalyse aus einem digitalen Höhenmodell.

Abbildung 32:

Prinzip einer Fließlängen bzw. Akkumulationsberechnung aus einem Fließrichtungsraster



Aus dieser Fließrichtungskarte läßt sich durch **einfaches Verfolgen der Pfeile** von oben nach unten bzw. einer Aufsummierung der durchflossenen Rasterzellen, Fließlänge bzw. Abflußmenge¹⁵ ermitteln, wie der rechte Teil des Schaubildes zeigt.

Unter der Annahme eines ursprünglichen Wassergehaltes von 1 Liter/Raster und einer vollständigen Weitergabe zeigt die rechte Abflußmengenkarte die Höhe des abfließenden Oberflächenwassers. Eine Fließlängenkarte würde bei einer Rastergröße von 1*1m in etwa ähnlich aussehen, da im oberen Beispiel kein Zusammenfluß von Oberflächenwasser stattfindet.

In der Abbildung ist gut zu erkennen, daß hydrologische Analysen auf der Basis von Single Flow Algorithmen nicht nur die Wirklichkeit sehr stark vergrößern, sondern darüber hinaus **prinzipielle methodische Fehler produzieren**, und zwar fast immer dann, **wenn sich die Fließrichtung zwischen zwei benachbarten Pixeln ändert**. Beim Übergang von der südlichen zur grau unterlegten südöstlichen Fließrichtung zeigt die Abflußkarte bei fünf Pixeln eine Durchflußrate von einem Liter an, ein unglaublicher Wert angesichts der Geländeform und der Lage der entsprechenden Pixel am Mittelhang. Der Fehler setzt sich nach unten fort und macht die ganze Abflußkarte unbrauchbar.

¹⁵ Als Fließlänge bezeichnet man die Aufsummierung von in Fließrichtung hintereinander liegender Pixel; gibt es einen Zusammenfluß, dann werden die Werte nicht addiert, sondern nur der jeweils höchste Wert beibehalten. Im Gegensatz dazu werden bei Akkumulationsberechnungen diese Werte aufsummiert.

Probleme dieser Art sind bei Single Flow Berechnungen an der Tagesordnung. Denn bei Fließrichtungsänderungen erhalten die Grenzpixel oft keinen Zufluß von anderen Rasterzellen. Auch im oberen Beispiel fließen die Wassermassen der Pixel mit südlicher Fließrichtung einfach an den Grenzpixeln vorbei, nicht jedoch in sie hinein.

Durch die Beschränkung auf nur eine Fließrichtung in nur ein Nachbarpixel werden bei Single Flow Berechnungen zwangsläufig **künstliche Wasserscheiden geschaffen** und weil sich solche Fehler nach unten fortsetzen, wird das ganze Resultat unbrauchbar.

Leider werden die dadurch verursachten Fehler trotz ihrer verheerenden Auswirkungen bei keinem mir bekannten GIS-Programm in den Handbüchern oder der Online-Hilfe angesprochen, geschweige denn ob oder wie sie zu umgehen sind.

Dabei gibt es zumindest im Fall einer Fließlängenberechnung die theoretische Möglichkeit, auch mit herkömmlichen Single Flow Berechnungsmethoden zu annehmbaren Resultaten zu gelangen. Denn das Problem zusätzlicher Wasserscheiden tritt nur in Richtung der Fließrichtungspfeile auf, nicht jedoch entgegengesetzt¹⁶. Deshalb könnten mit einer **Aufsummierung von unten nach oben, also entgegengesetzt der berechneten Fließrichtung**, zumindest bei Fließlängenberechnungen einigermaßen korrekte Ergebnisse erreicht werden, da auf diese Weise die Pixel ineinander „fließen“, auch an den wichtigen Grenzbereichen (vgl. Abb. 32). Dies führt zu einem einigermaßen brauchbaren Ergebnis, wenn es auch auf den ersten Blick noch spiegelverkehrt ist.

Auf dieser prinzipiellen Lösungsmöglichkeit beruht die Umsetzung der Irregular Slope Methode im Untersuchungsgebiet. Allerdings funktioniert der Trick mit einer Umkehrung der Fließrichtung **nur bei Fließlängenberechnungen**. Hier gibt es keine Zusammenflüsse wie im Fall einer Abflußanalyse (z.B. mit der Arc/View bzw. Arc/Info Funktion ACCUMULATION), wo auch unter Ausnutzung aller denkbaren Möglichkeiten keine brauchbaren Resultate auf Basis von Single Flow Algorithmen zu erzielen sind.

Daher eignen sich herkömmliche GIS-Systeme zwar unter gewissen Einschränkungen¹⁷ für Erosionsprognosen auf Basis der Irregular Slope Konzeption, in keinem Fall jedoch zur Umsetzung der weit anspruchsvolleren und genaueren Unit Contributing Area Methodik. Hier wird jeder GIS-Nutzer mit konzeptionellen Hindernissen konfrontiert, die er nicht über-

¹⁶ Bei diversen Versuchen mit Fließlängenberechnungen in umgekehrter Richtung gab es in keinem Fall die Bildung zusätzlicher Wasserscheiden. Auch theoretisch ist dies nicht möglich, da bei entgegengesetzter Aufsummierung der Fließrichtungspfeil immer in das angrenzende Pixel hineinreicht.

¹⁷ Diese Einschränkungen beziehen sich auf die Tatsache, daß bei Single Flow Berechnungen nur insgesamt acht verschiedene Fließrichtungen möglich sind (alle acht Nachbarpixel einer Zentralzelle). Somit gibt es trotz der möglichen Vermeidung zusätzlicher Wasserscheiden immer noch Ungenauigkeiten, weil die Fließwege ihre Richtung nicht stufenlos ändern, sondern immer in nur Winkeln von 45°

schreiten kann. Vor diesem Hintergrund habe ich das **Analyseprogramm FLOW 95** entworfen. Es enthält alle Funktionen, die für genaue Analysen der potentiellen Abflußmenge und weiterführende Berechnungen zur Stoffbilanz notwendig sind. Somit können mit FLOW 95 nicht nur Erosionsprognosen auf Basis des Unit Contributing Area Konzept umgesetzt, sondern auch gleichzeitig die effektiven Folgen der Bodenerosion abgeschätzt werden (vgl. Kap. 3.3).

Zur Berechnung des Oberflächenabflusses benützt FLOW 95 einen Algorithmus, der in der Fachliteratur als **Multiple Flow** bekannt ist und von mir in verschiedenster Hinsicht modifiziert wurde. Seine grundlegenden Berechnungsprinzipien und das Analyseprogramm FLOW 95 werden im folgenden Abschnitt soweit skizziert, wie es zum Verständnis der Erosionsprognosen im Untersuchungsgebiet notwendig ist. Eine genaue Beschreibung des verwendeten Algorithmus ist im Anhang (Kap. 10.2) zu finden.

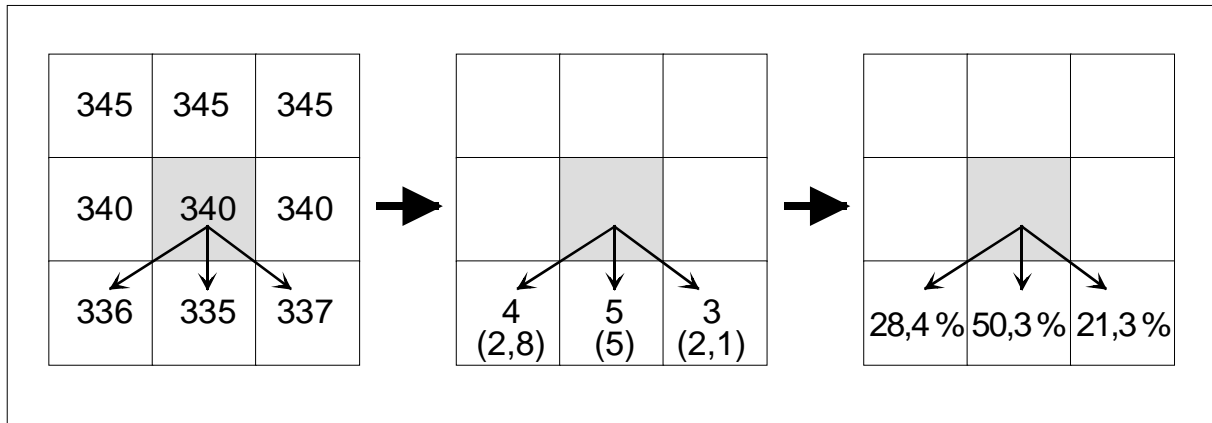
5.4.2 Abflußanalysen mit dem entworfenen Win95/NT Programm FLOW 95

Im Gegensatz zu herkömmlicher GIS-Software wird der Oberflächenabfluß bei FLOW 95 nicht nach der eben beschriebenen Single Flow Methode analysiert, sondern durch einen weit genaueren Berechnungsalgorithmus. Dieser ist in der Fachliteratur unter dem Namen **Multiple Flow** bekannt (vgl. DESMET/GOVERS 1996A, 1996B, QUINN ET AL 1991) und unterscheidet sich in seiner Funktionsweise eklatant von herkömmlichen Algorithmen auf Single Flow Basis.

Während dort ein Abfluß nur in eine Richtung stattfinden kann, läßt das Multiple Flow Rechenverfahren mehrere Fließrichtungen zu und berücksichtigt damit das Verhalten abfließenden Wassers weit genauer. Die **Grundprinzipien einer Abflußanalyse nach der Multiple Flow Methodik** werden in Abbildung 33 graphisch dargestellt und nachfolgend erläutert.

Abbildung 33:**Funktionsweise von Fließberechnungen nach der Multiple Flow Methodik**

Linkes Raster: Ausschnitt aus einem Höhenmodell mit den jeweiligen Höhenangaben; die schwarzen Fließpfeile zeigen die Richtungen des Wasserflusses an. Mittleres Raster: Höhendifferenz zur Zentralzelle in m (= nicht eingeklammerte Ziffern) mit den entsprechenden relativen Neigungswerten (= Zahlen in Klammern). Rechtes Raster: Relativer Wasserfluß in die tieferliegenden Nachbarzellen in % des Gesamtabflusses.



Das linke Raster in Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt aus einem digitalen Höhenmodell mit den entsprechenden Höhenangaben in Metern. Der Ausschnitt entspricht genau demjenigen aus Abbildung 31, wo zuvor die Funktionsweise herkömmlicher Single Flow Algorithmen erläutert wurde.

Während jedoch bei Single Flow Berechnungen nur ein Wasserfluß in Richtung des größten Gefälles möglich ist, werden bei Multiple Flow Analysen alle Richtungen berücksichtigt, in denen ein Gefälle vom Zentral- zu den jeweiligen Nachbarpixeln besteht (in Abb. 33 durch drei schwarze Fließpfeile dargestellt). Der Anteil an Oberflächenwasser, den jedes tiefer liegende Nachbarpixel von der Zentralzelle erhält, ist dabei direkt proportional zum lokalen Gefälle zwischen beiden.

Wie dieser Anteil bestimmt wird, zeigen der mittlere und rechte Teil des Schaubildes:

Nach Analyse der Höhendifferenz zum Zentralpixel (Zahlen ohne Klammern) wird in einem zweiten Schritt die jeweilige Neigung zum tiefer liegenden Pixel errechnet. Bei einer rechtwinkligen Fließrichtung entspricht der Neigungswert genau der Höhendifferenz, bei einer diagonalen Fließrichtung aufgrund der längeren Fließstrecke dem Produkt aus der Höhendifferenz mal der Wurzel aus 2. Dies wird durch die Zahlen im mittleren Raster symbolisiert, wo die oberen Ziffern die absolute Höhendifferenz kennzeichnen, die unteren dagegen die relativen Neigungen (Zahlen in Klammern).

Aus den einzelnen Neigungswerten werden in einem dritten Schritt die **relativen Wasserflüsse in jede Nachbarzelle** bestimmt, indem das Gefälle zur Nachbarzelle durch die

Gesamtneigung aller tiefer liegenden Nachbarzellen (Summe aller relativen Neigungen) geteilt wird. Im oberen Beispiel hat die Gesamtneigung zu allen tiefer liegenden Pixeln einen Wert von $2.83 + 5 + 2.12 = 9.95$. Die sich daraus ergebenden relativen Fließanteile ($2.83/9.95 = 28.4\%$, usw.) sind im rechten Raster des Schaubildes dargestellt. Damit erhält jede tiefer liegende Zelle vom gesamten Wasserfluß genau den Anteil, der ihr aufgrund ihrer Lage und Höhe zusteht.

Auf diesem **Grundprinzip einer neigungsgewichteten Fließberechnung** basieren alle **Funktionen des Programms FLOW 95**, d.h. bei jeder Abflußberechnung werden ausnahmslos alle vorkommenden Fließrichtungen berücksichtigt. Insgesamt sind in FLOW 95 vier unterschiedliche Berechnungsfunktionen enthalten, von denen die wichtigsten kurz beschrieben werden sollen (vgl. Abbildung 34: Bildschirmansicht von FLOW 95):

1. Flow Accumulation

Hier wird die **kumulierte und ungewichtete Wassermenge** berechnet, die bei idealen Bedingungen (keine Versickerung) über jedes einzelne Pixel fließen müßte. Dabei besitzt jedes Pixel einen anfänglichen Wasserwert von 1, der an benachbarte und tiefer liegende Pixel weitergegeben werden kann. Ist eine Neigung zu den umliegenden Pixeln gegeben, dann wird die relative Abflußmenge nach der Multiple Flow Methodik berechnet und zum anfänglichen Wasserwert des jeweiligen tiefer liegenden Pixels addiert.

Da die Berechnung der kumulierten Wassermenge in strikt absteigender Reihenfolge durchgeführt wird (d.h. von den höchsten zu den niedrigsten Höhenwerten), sammelt sich mit zunehmender Tiefenlage eine immer größere Wassermenge an, wobei das Ausmaß von den topographischen Eigenschaften des höher liegenden Einzugsgebiets abhängt. Der berechnete kumulierte Oberflächenabfluß **entspricht genau der potentiellen Abflußmenge**, die in Kap. 3.2.4 erwähnt wurde und als **Variable λ_i** für Erosionsprognosen nach der Unit Contributing Area Konzeption benötigt wird.

2. Weighed Flow Accumulation

Hier wird die **kumulierte und gewichtete Wassermenge** berechnet. Im Gegensatz zur ungewichteten Wassermengenberechnung kann jedoch die anfängliche Wassermenge beliebig variiert werden. Das heißt, die Initialwerte der Wassermenge, die bei Anwendung der Funktion FLOW ACCUMULATION alle ausnahmslos den Wert 1 besitzen, werden durch ein zusätzliches Gewichtungsraster modifiziert. Damit können unterschiedliche

Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet oder wasserflußhemmende Barrieren bei der Abflußanalyse berücksichtigt werden. Ansonsten funktioniert das Berechnungsprinzip wie zuvor. Durch die Möglichkeit einer Gewichtung ist diese Berechnungsfunktion von entscheidender Bedeutung für die **Analyse des m_{ei} -Werts bei der Unit Contributing Area Konzeption** (vgl. Kap. 3.2.4).

3. Weighed Flow Balance on neighbourhood basis

Diese Funktion berechnet die **Stoffbilanz der Bodenerosion** nach genau den gleichen Prinzipien, wie sie in Abbildung 16 (Kapitel 3.4) beschrieben werden. Dabei wird die Stoffzufuhr aus den acht umgebenden Nachbarzellen berechnet und davon der gegenwärtige Pixelwert abgezogen. Auch hier wird nach der Multiple Flow Methodik verfahren. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Funktionen findet aber nun nicht mehr eine kumulative Abflußanalyse statt, sondern es wird lediglich die Differenz zwischen zu- und abgeführtem Bodenmaterial berechnet. Auf diese Weise kann mit einem Erosionsraster als Gewichtungsgrid (in diesem Fall mit $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$) $A_{\text{Saldo } i}$ berechnet werden.

Mit diesem gesamten Rüstzeug an zusätzlichen Rechenfunktionen von FLOW 95 kann die anspruchsvolle Unit Contributing Area Konzeption perfekt umgesetzt und neben dem Bruttobodenabtrag auch die Stoffbilanz ermittelt werden.

FLOW 95 ist im wesentlichen **als zusätzliches Programm entwickelt** worden, mit dem in Kombination mit Arc/View bzw. Arc/Info die gesteckten Ziele erreicht werden können. Allerdings arbeitet FLOW 95 als eigenständige Win95/NT Software unabhängig von beiden Programmen. Deshalb müssen die entsprechenden Rasterdateien zuerst ins binäre Exportformat transferiert werden (also als [* .flt] Datenfile¹⁸ und [* .hdr] Headerfile vorliegen), bevor sie in FLOW 95 eingelesen und analysiert werden können. Ebenso werden die berechneten Raster von FLOW 95 als **binäre Rasterdateien** im Format [* .flt] Datenfile / [* .hdr] Headerfile gespeichert, und müssen daher vor einer weiteren Verwendung zuerst in Arc/View bzw. Arc/Info importiert werden.

¹⁸ Das Symbol * steht für jeden x-beliebigen Namen, den die entsprechende Datei erhalten kann.

Wie wichtig Multiple Flow gestützte Rechenfunktionen für die Gewinnung von genauen hydrologischen Daten sind, zeigt Abbildung 35 auf der nächsten Seite. Dort wurde auf demselben Gebiet zweimal der Oberflächenabfluß berechnet, einmal mit herkömmlicher Single Flow Methodik, einmal mit dem Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95.

Jenseits der hier beschriebenen Möglichkeiten wurden die beiden Funktionen FLOW ACCUMULATION und WEIGHED FLOW ACCUMULATION so programmiert, **daß sie in jedem Fall den Oberflächenabfluß korrekt berechnen**. Digitale Höhenmodelle haben in der Praxis immer kleinere Fehler im Sinne winziger lokaler Senken. Auch eine Senke von der Größe eines einzigen Pixels verschluckt alles zuströmende Oberflächenwasser wie ein schwarzes Loch. Für genaue Berechnungen ist deswegen wichtig, daß das Analyseprogramm mit solchen Randbedingungen umgehen kann. Durch eine spezielle Berechnungsroutine wird bei FLOW 95 dafür gesorgt, daß auch bei diesen Randbedingungen der Wasserfluß weiterläuft und somit ein korrektes Ergebnis sichergestellt wird (vgl. Anhang, Kap. 10.2).

Abbildung 34:
Bildschirmansicht von FLOW 95

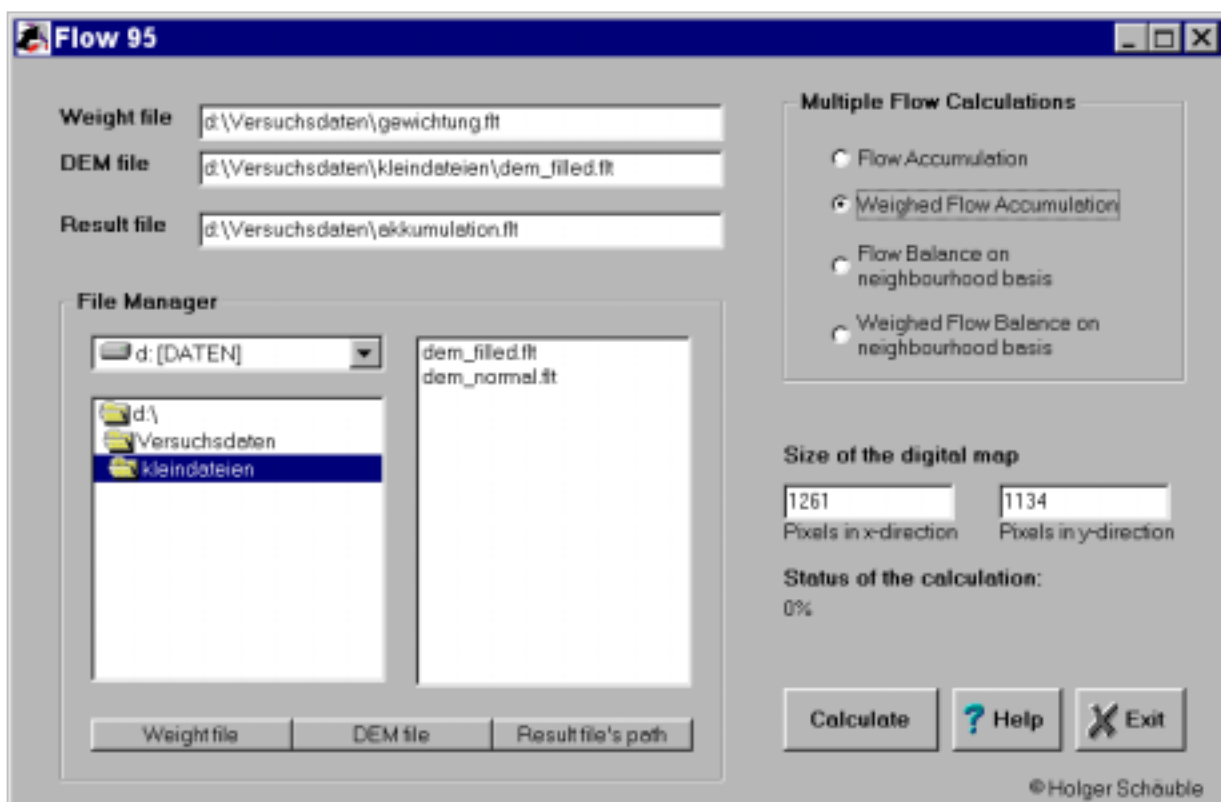


Abbildung 35:

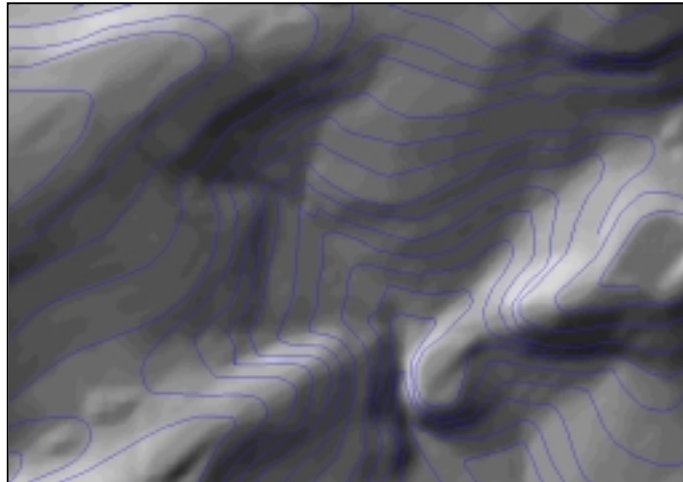
Ergebnisse bei verschiedenen Fließberechnungsmethoden

Karte 1:

Untersuchtes Testgebiet

Schattiertes Relief mit überlagernden Höhenlinien; 4-fach überhöht.

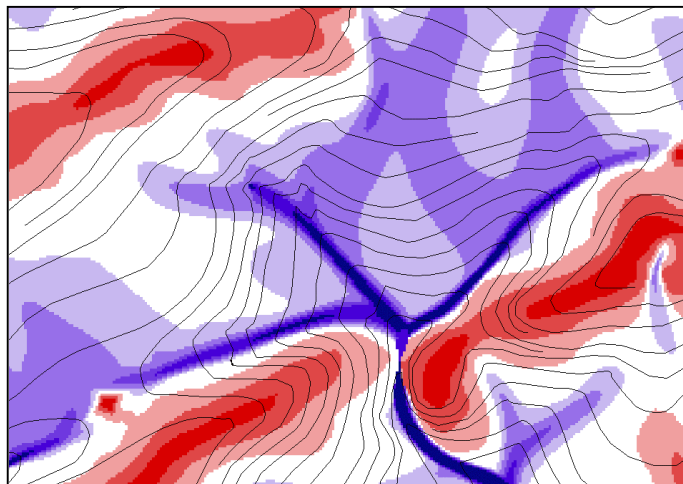
Das dargestellte Gebiet ist ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Rottenburg a.N.-Hirrlingen

**Karte 2:**

Potentieller Oberflächenabfluß (Wasserakkumulation); berechnet nach der Multiple Flow Analyse-methode

Analyse mit dem Programm FLOW 95 und der Funktion: Flow accumulation.

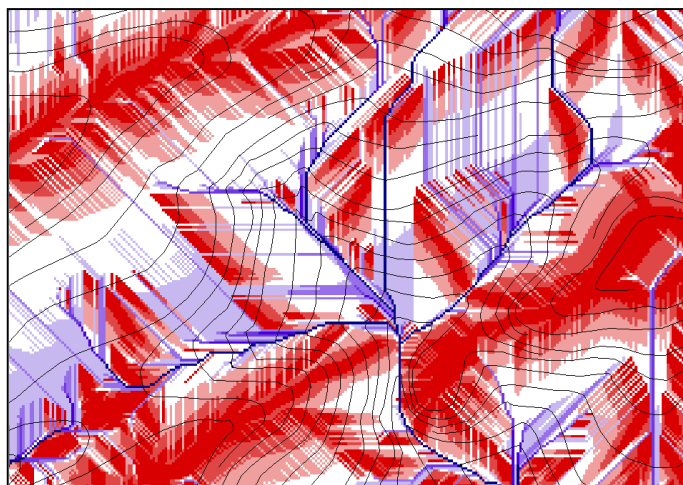
Farben: rot = weniger Fließwasser
blau = mehr Fließwasser
gleiche Fließklassen wie in Karte 3

**Karte 3:**

Potentieller Oberflächenabfluß (Wasserakkumulation); berechnet nach der Single Flow Analyse-methode

Analyse mit den Programmen Arc/View oder Arc/Info und der Funktion: Accumulation

Farben: rot = weniger Fließwasser
blau = mehr Fließwasser
gleiche Fließklassen wie in Karte 2



5.5 Bodenabtrag nach dem Irregular Slope Konzept: Bestmögliche Umsetzung der RUSLE-Gleichung mit der Standardsoftware Arc/View und Avenue

Die Bestimmung des Erosionspotentials nach der Irregular Slope Konzeption folgte den Prinzipien, die schon in **Kap. 3.2.3** ausführlich beschrieben wurden. Da zur Ermittlung der L-Faktorkarte lediglich die Fließlänge, und nicht die potentielle Wassermenge benötigt wird, kann das Irregular Slope Konzept auch mit einem herkömmlichen GIS-System wie etwa Arc/View oder Arc/Info umgesetzt werden. Allerdings ist dies eine aufwendige Angelegenheit, da bei der Nutzung hydrologischer Funktionen unliebsame Überraschungen von vornherein ausgeschlossen werden müssen.

Von den zahlreichen Versuchen, mit systemeigenen Funktionen ein korrektes Ergebnis zu erzielen, blieb **nur eine Lösung** übrig, die im folgenden mit den Untersuchungsergebnissen zusammen skizziert werden soll. Zur Umsetzung dieses Lösungsweges wurden mit der **Skriptsprache Avenue** zwei Erweiterungen programmiert (**GRID tools und SHAPE tools**), welche die Funktionsvielfalt von Arc/View entscheidend erhöhen. Beide Erweiterungen sind auf der beiliegenden CD ROM enthalten und werden im Anhang kurz beschrieben. Bei entsprechenden Analysen wird deswegen auf den jeweiligen Menübefehl verwiesen, den eine der beiden Erweiterungen zur Verfügung stellt.

Zur **Berechnung des Bodenabtrags im Untersuchungsgebiet nach dem Irregular Slope Konzept** waren aufwendige Berechnungen notwendig, die fünf größere **Analyseabschnitte** umfaßten:

1. Erstellung der geeigneten Abflußmaske
2. Erstellung des geeigneten Fließrichtungsrasters
3. Berechnung aller Fließlängen und m_{0i} -Werte auf der Basis des Fließrichtungsrasters
4. Anwendung der erweiterten RUSLE-Formel zur Berechnung der L_i -Faktorenkarte
5. Berechnung des Bodenabtrags

Das eigentliche Charakteristikum des entwickelten Lösungswegs liegt nicht in der Reihenfolge und den Analyseschritten selbst, sondern wie die einzelnen Rasterkarten ermittelt werden. Die entscheidende **Grundidee war, auf Basis eines umgedrehten Fließrichtungsrasters die Fließlänge entgegen der Abflußrichtung zu analysieren.**

Hierzu sind einige Erklärungen notwendig. Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, produzieren hydrologische Funktionen auf der Basis von Single Flow Algorithmen methodische Fehler wenn die Analyse in Fließrichtung (d.h. von den Wasserscheiden abwärts) verläuft. Bei umgekehrter Analyserichtung, d.h. vom Hangfuß zu den Wasserscheiden sind dagegen alle erzielten Ergebnisse korrekt, zumindest bei Fließlängenberechnungen.

Da in Arc/View und Arc/Info bzw. jeder kommerziellen GIS Software lediglich Single Flow Algorithmen implementiert sind, stellt sich folgendes **Grundproblem**: Einerseits muß die Fließlänge gemäß den RUSLE-Spezifikationen unbedingt in Abflußrichtung ermittelt werden, andererseits sind korrekte Berechnungen nur entgegen der Abflußrichtung möglich. Diese Schwierigkeit kann nur gelöst werden, wenn man die GIS-Software zu folgendem Verhalten zwingt:

- Die Fließlänge wird entgegen der Abflußrichtung analysiert.
- Gleichzeitig wird die Fließlänge aber von den Wasserscheiden aus gemessen, also von oben nach unten.

Theoretisch ist dies im Prinzip nach der **Methode der doppelten Umkehrung** mit folgenden Schritten möglich:

- Reklassifizierung eines berechneten Fließrichtungsrasters. Hierbei wird die Fließrichtung umgedreht, indem die aktuellen Fließrichtungswerte durch ihre entgegengesetzt verlaufenden Pendanten ersetzt werden (um z.B. die Fließrichtung von Osten nach Westen umzukehren, müßte der aktuelle Zahlenwert 1 durch 16 ersetzt werden, usw., vgl. ESRI 1992 bzw. ONLINE HILFE VON ARC/VIEW 3).
- Berechnung der Fließlänge auf der Basis des reklassifizierten Fließrichtungsrasters von unten nach oben unter Anwendung der Funktion FLOWLENGHT.

Praktisch hat diese Vorgehensweise einige heimtückische Fußfallen. Durch die Umkehrung der Fließrichtung kann es dazu kommen, daß die Fließwege unter Umständen eine andere Form¹⁹ annehmen. Um solche unerwünschten Nebenwirkungen zu vermeiden, muß auf die **Erstellung einer geeigneten Abflußmaske** besonderer Wert gelegt werden. Nur korrekt gesetzte Barrieren sorgen bei späteren Fließlängenanalysen dafür, daß die Rechenfunktion FLOWLENGHT trotz verdrehter Fließ- und Analyserichtungen in der richtigen Spur gehalten wird.

¹⁹ Ein Fließweg läßt sich mit einer linienhaften geometrischen Form vergleichen, z.B. wenn er etwa zickzack in einem bestimmten Winkel an einem Weg entlangläuft. Bei einer Umkehrung der Fließrichtung bleibt diese Form zwar in den meisten Fällen gleich (d.h. der Fließweg verläuft immer noch zickzack im gleichen Winkel am besagten Weg entlang, nur sind die Fließrichtungen in diesem Fall innerhalb der gleichen Form verdreht), doch es gibt auch Ausnahmen. Vor allem in der Nähe kleinerer Wasserscheiden und an Mittelhängen kann ein Fließweg dadurch so verändert werden, das er in das benachbarte Einzugsgebiet übertritt.

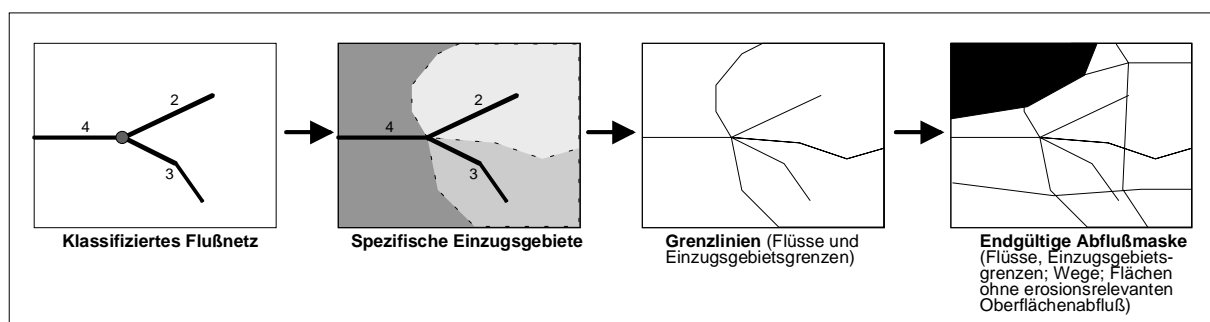
Vor dem Hintergrund der skizzierten Grundidee und den möglichen Schwierigkeiten gab es nur eine Möglichkeit, die Irregular Slope Konzeption im Untersuchungsgebiet korrekt umzusetzen. Diese wird im folgenden anhand der erwähnten **5 großen Analyseschritte** in ihrem grundsätzlichen Ablauf erläutert:

1. Erstellung der geeigneten Abflußmaske (vgl. Abbildung 36 und 37)

Bis auf die eingefügten Wasserscheiden entsprach die erstellte Abflußmaske genau derjenigen, die schon beim Regular Slope Konzept benutzt wurde. Die fließlängenbegrenzenden Wasserscheiden durften nun allerdings nicht mehr auf konventionelle Weise²⁰ ermittelt werden. Eine konventionelle Bestimmung hätte zu einer Unzahl an künstlichen Wasserscheiden geführt (vgl. Kap. 5.4), die jedoch nur bei Durchschnittsberechnungen tolerierbar sind, wie z.B. beim Regular Slope Konzept. Andererseits sind gerade bei Fließlängenberechnungen entgegen der Abflußrichtung Wasserscheiden wichtige Grenzlinien. Das dadurch gestellte Problem war nur zu lösen, indem lediglich die größeren Wasserscheiden bestimmt wurden, also die **Grenzlinien jedes einzelnen Einzugsgebiets**. Diese wurden dann mit den restlichen abflußhemmenden Barrieren (Wege, Wiesen oder Wälder) zu einer endgültigen Abflußmaske kombiniert.

Abbildung 36:

Ermittlung der Wasserscheiden und der Abflußmaske beim Irregular Slope Konzept



Wie in Abbildung 36 zu sehen ist, bestand die Vorgehensweise zur Erstellung der geeigneten Abflußmaske aus **4 aufeinanderfolgenden Schritten**:

1. Analyse der potentiellen Abflußlinien aus einem digitalen Höhenmodell.

²⁰ In der Regel werden Wasserscheiden aus einem Akkumulationsraster ermittelt. Dabei wird das Raster reklassifiziert. Werte von 0 bedeuten Wasserscheiden, Werte größer als 0 dagegen nicht.

2. Klassifikation jedes einzelnen Flußabschnitts mit der Funktion STREAMLINK²¹.
Jedem individuellen Fließabschnitt wurde eine eigene Identifikationsnummer zugewiesen (linkes Bild, = klassifiziertes Flußnetz) und danach mit der Funktion CONTRIBUTING AREA²² sein rückwärtiges Einzugsgebiet ermittelt (Bild Mitte links).
3. Extraktion der Grenzlinien aller Einzugsgebiete.
Von allen Einzugsgebieten wurden die äußeren Grenzen ermittelt und diese in ein vorläufiges Grenzlinienraster umgewandelt (Bild Mitte rechts)²³.
4. Erstellung der endgültigen Abflußmaske.
Durch zusätzliches Einfügen schon bekannter Grenzlinien (Wege, Hindernisse) bzw. -flächen (Wald, Wiesen) und eine abschließende Reklassifizierung (Grenzlinien und Flächen = NoData, laminarer Abfluß auf Ackergebieten = 1) wurde das vorläufige Grenzlinienraster zur endgültigen Abflußmaske transformiert (rechtes Bild = endgültige Abflußmaske; Abbildung 37 = endgültige Abflußmaske im Untersuchungsgebiet).

Abbildung 37:

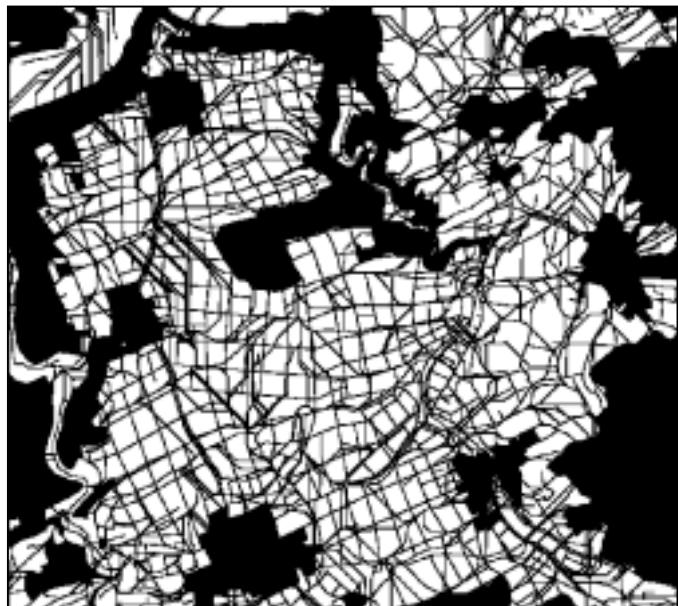
Abflußmaske nach dem Irregular Slope Konzept

schwarze Farbe:

Gebiete ohne erosionsrelevanten Oberflächenabfluß oder hydrologische Barrieren im Sinne der RUSLE-Formel (Wald, Siedlungen, lineare Fließlinien, Wasserscheiden bzw. Grenzen einzelner Einzugsgebiete, Wege, Feldraine)

weiße Farbe:

Gebiete mit Ackernutzung und flächenhaftem Oberflächenabfluß



²¹ Spezielle Rechenfunktion, die nur mit der Skriptsprache Avenue aufgerufen werden kann, siehe GRID tools.

²² s.o.

²³ Hierzu werden spezielle Funktionen benötigt, die in der Erweiterung SHAPE tools enthalten sind. Im Kern müssen dazu die Ränder der Einzugsgebiete in Linien umgewandelt und danach ins Rasterformat konvertiert werden. Dies ist mit den folgenden Schritten möglich (vgl. Funktionen von SHAPE tools):

Convert to Shapefile → Polygon to Polyline → Convert to Grid.

2. Erstellung des geeigneten Fließrichtungsrasters

Zur Erstellung eines geeigneten Fließrichtungsrasters als Grundlage aller Fließlängenberechnungen waren insgesamt **3 aufeinanderfolgende Schritte** notwendig:

- Berechnung eines konventionellen Fließrichtungsrasters aus einem digitalen Höhenmodell
- Umkehrung der Fließrichtungen durch eine einfache Reklassifizierung mit folgender Reklassifizierungsschablone

Tabelle 5:

Reklassifizierungsschablone zur Umkehrung der Fließrichtungen

Normale Fließrichtung	1 (O)	2 (SO)	4 (S)	8 (SW)	16 (W)	32 (NW)	64 (N)	128 (NO)
Umgekehrte Fließrichtung	16 (W)	32 (NO)	64 (N)	128 (NO)	1 (O)	2 (SO)	4 (S)	8 (SW)

Die Ziffern in der Tabelle zeigen die Werte, welche die jeweiligen Fließrichtungen in einem Fließrichtungsraster besitzen, die eingeklammerten Buchstaben die entsprechenden Himmelsrichtungen.

- Einfügen der Grenzlinien und –flächen aus der zuvor erstellten Abflußmaske in das reklassifizierte Fließrichtungsraster

Das Ergebnis aller drei Berechnungsschritte ist auf der nächsten Seite in Gestalt des endgültigen Fließrichtungsrasters zu sehen (Abbildung 38). Es bildete die Grundlage für alle nachfolgenden Fließberechnungen mit Arc/View und damit für die korrekte Erstellung der L-Faktorenkarte selbst. Die später benutzte Berechnungsfunktion FLOWLENGTH verfolgt dabei ein Fließrichtungsraster konsequent in Abflußrichtung und summiert alle zurückgelegten Distanzen auf. Bei datenlosen Bereichen, also den schwarzen Flächen im Fließrichtungsraster stoppt die Berechnung und beginnt dann jenseits wieder von vorne. Auf diese Weise können in einem automatisierten Arbeitsschritt alle Fließlängen genauso ermittelt werden, wie es von der Irregular Slope Konzeption gefordert wird.

3. Berechnung aller Fließlängen und aller m_{0i} -Werte

Vor der Berechnung der L-Faktorenkarte mußten zuerst die entsprechenden Grundlagenkarten gewonnen werden, also eine Karte mit den jeweiligen λ_i -Werten und eine mit den entsprechenden m_{0i} -Werten. Während zur Berechnung der λ_i -**Grundlagenkarte** lediglich die Funktion FLOWLENGTH auf Basis des endgültigen Fließrichtungsrasters angewandt werden mußte, waren zur Analyse der m_{0i} -**Grundlagenkarte** 3 aufeinanderfolgende Berechnungsschritte notwendig (ebenso auf Basis des endgültigen Fließrichtungsrasters):

- Berechnung der normalen Fließlänge (entspricht der schon gemachten Analyse zur Gewinnung der λ_i -Grundlagenkarte).
- Berechnung der mit m_i gewichteten Fließlänge (hier wurde die Fließlänge wie zuvor mit der Funktion FLOWLENGHT berechnet, allerdings durch zusätzliche Berücksichtigung eines Gewichtungsrasters²⁴ mit den schon vorhandenen m_i -Werten. Dadurch wurden alle m_i -Werte auf dem jeweiligen Fließweg aufsummiert).
- Division der mit m_i -gewichtete Fließlängenkarte durch die normalen Fließlängenkarte.

4. Anwendung der erweiterten Formel zur Berechnung der L_i -Faktorenkarte

Voraussetzung zur Berechnung des L_i -Faktors war die erweiterte Berechnungsformel nach WISCHMEIER/SMITH (1974), die schon in Kapitel 2.3 und 3.3.1 beschrieben wurde:

$$L_i = [\lambda_i^{m_{oi}+1} - \lambda_{i-1}^{m_{oi}+1}] / [(\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^{m_{oi}}]$$

Da die beiden Grundlagenkarten λ_i und m_{oi} schon in Abschnitt 3 ermittelt worden waren und die restlichen Werte aus der Pixelgröße abgeleitet werden konnten (Pixelgröße = 5m), sah die abschließende Overlayoperation zur Berechnung der L_i -Faktorenkarte wie folgt aus:

$$L_i\text{-Faktorenkarte} = [\lambda_i\text{-Karte}^{m_{oi\text{-Karte}}+1} - (\lambda_{i-1}\text{-Karte}-5)^{m_{oi\text{-Karte}}+1}] / [5 * 22.13^{m_{oi\text{-Karte}}}]$$

5. Berechnung des eigentlichen Bodenabtrags

Mit den gewonnenen Faktorenkarten, wurde der Bodenabtrag in einer abschließenden Overlayoperation mit folgender Formel ermittelt:

$$A = \text{R-Faktor} * \text{K-Faktor} * \text{S-Faktor} * \text{L-Faktor}$$

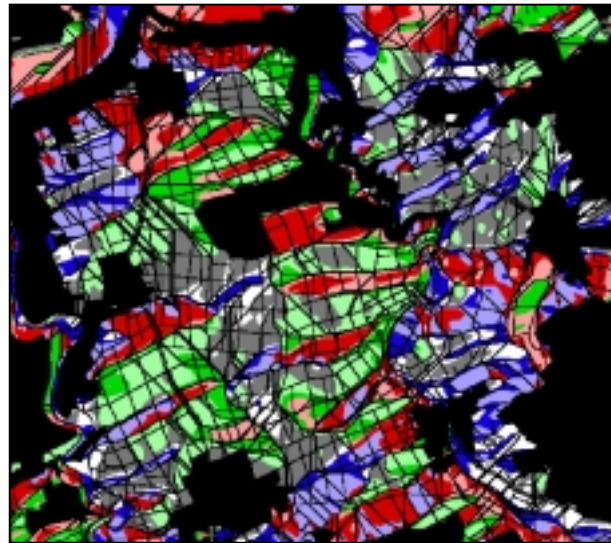
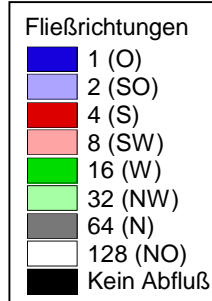
Das Ergebnis der Berechnungen zeigt die Bodenerosionskarte auf der übernächsten Seite (Abbildung 40). Alle dargestellten Untersuchungsergebnisse das Resultat einer exakten Umsetzung des Irregular Slope Konzepts.

²⁴ Zusätzliche Option bei Anwendung der Funktion FLOWLENGHT, vgl. Erweiterung GRID tools.

Abbildung 38:

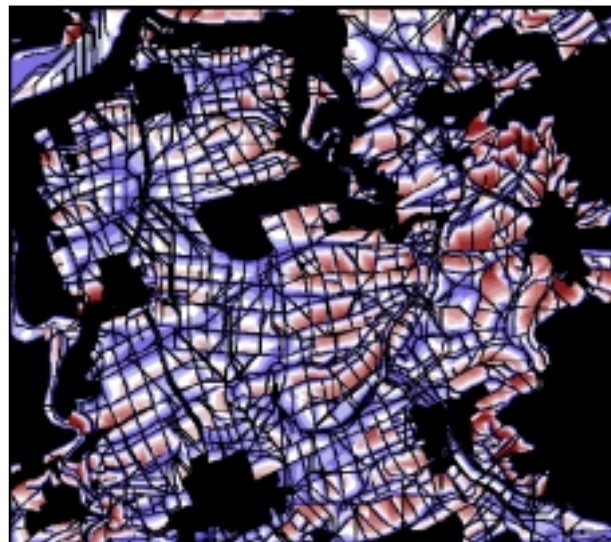
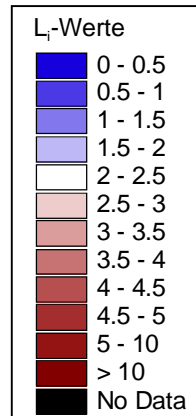
Endgültiges Fließrichtungsraster zur Berechnung von L_i nach dem Irregular Slope Konzept

Alle dargestellten Fließrichtungen sind umgedrehte Fließrichtungen. Sie verlaufen also entgegengesetzt zum wirklichen Wasserfluß. Schwarze Bereiche sind Flächen ohne erosionsrelevanten Abfluß. Alle linienhaften Abflußbarrieren sind in dreifacher Breite dargestellt.

**Abbildung 39:**

L_i -Faktorenkarte, ermittelt nach dem Irregular Slope Konzept

Vereinfachte Darstellung in grober Klassifikation (12 Klassen). Blaue Farben kennzeichnen geringere L_i -Werte als der Gebietsdurchschnitt, rote dagegen höhere Werte.

**Abbildung 40:**

Differenzen zwischen unterschiedlich ermittelten L_i -Faktoren

Die vorliegende Karte zeigt die Unterschiede zwischen L_i -Faktoren, die nach der RUSLE Light Methode berechnet wurden und L_i -Faktoren, die nach der Irregular Slope Methode gewonnen wurden. Dabei stellt die Karte das Ergebnis folgender Subtraktion dar:

$$L_i (\text{Irregular Slope}) - L_i (\text{RUSLE Light})$$

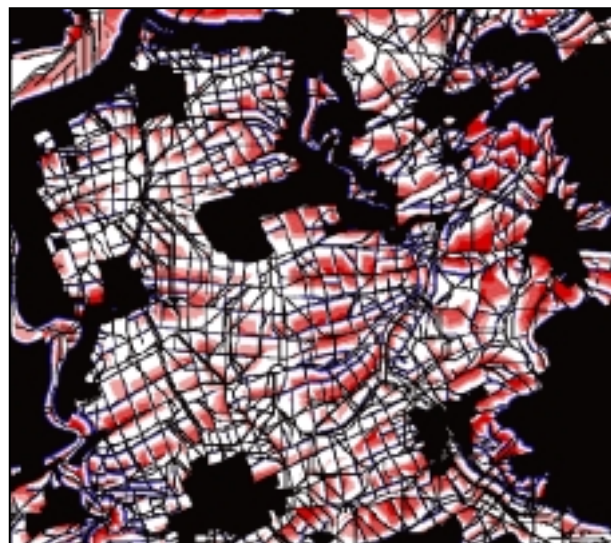
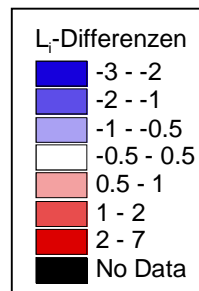
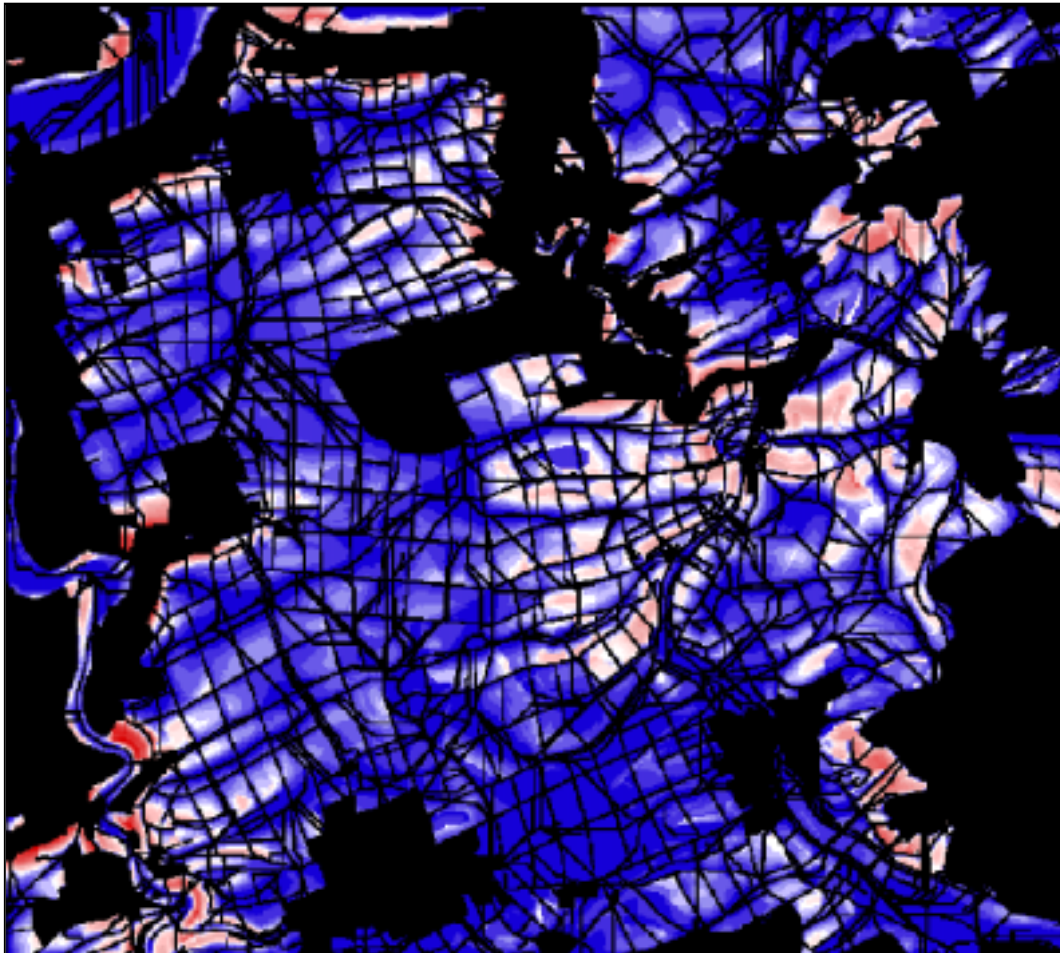
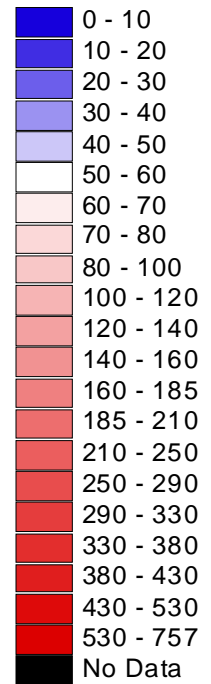


Abbildung 41:**Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der Irregular Slope Konzeption**

Bodenverlust ganzer Flächen unter Schwarzbrachebedingungen. Schwarze Farben kennzeichnen erosionsfreie Gebiete (Wald, Siedlungen und überbaute Gebiete) oder erosionswichtige Linien (Wege, Einzugsgebietsgrenzen, Fließlinien). Wiesen wurden zu Vergleichszwecken wie Ackerflächen behandelt. Hydrologische Barrieren sind in der Übersicht halber in dreifacher Breite dargestellt.



Bodenverlust
in t/ha/Jahr



5.6 Bodenabtrag nach dem Unit Contributing Area Konzept: Ideale Umsetzung der RUSLE-Gleichung mit Arc/View und FLOW 95

Die Bestimmung des Erosionspotentials nach der Unit Contributing Area Methodik folgte genau den Prinzipien, die in **Kap. 3.2.4** ausführlich beschrieben wurden. Da zur Ermittlung der L_i -Faktorkarte die **potentielle Abflußmenge** analysiert werden muß, läßt sich dieses Konzept in keinem Fall mit einem Standard-GIS allein umsetzen. Deshalb war hier die **zusätzliche Nutzung von FLOW 95** unbedingt erforderlich.

Im Vergleich zum Irregular Slope Konzept ist die Umsetzung des Unit Contributing Area Konzepts mit FLOW 95 relativ einfach, da trotz der höheren Genauigkeit keine ausgefeilte Abflußmaske erstellt werden muß. FLOW 95 benötigt nur die anthropogenen Nutzungsbarrieren (Wald, Wiese, Wege, o.ä.) um den Wasserfluß korrekt zu berechnen. Deshalb müssen in der Abflußmaske nur die schon abdigitalisierten Informationen enthalten sein (hydrologische Hindernisse und Ausschlußgebiete aus der Topographischen Karte wie Wald, Wiesen, Wege, Hindernisse; vgl. Abbildung 42). Dadurch reduzieren sich auch die **notwendigen Analyseschritte** auf folgende drei:

1. Berechnung der potentiellen Abflußmenge und aller m_{0i} -Werte auf Basis des digitalen Höhenmodells mit FLOW 95
2. Anwendung der erweiterten Formel zur Berechnung der L_i -Faktorenkarte
3. Berechnung des eigentlichen Bodenabtrags

Abbildung 42:

Abflußmaske nach dem Unit Contributing Area Konzept

Schwarze Farbe:

Gebiete ohne erosionsrelevanten Oberflächenabfluß oder mit hydrologischen Barrieren im Sinne der RUSLE-Formel (Wald, Siedlungen, Wege, Feldraine, Hindernisse)

Weißer Farbe:

Gebiete mit Ackernutzung und flächenhaftem Oberflächenabfluß



Der **grundsätzliche Ablauf aller durchgeführten Berechnungen** verlief nach folgendem Muster:

1. Berechnung der potentiellen Abflußmenge und aller m_{0i} -Werte auf Basis des digitalen Höhenmodells mit FLOW 95

Wie beim Irregular Slope Konzept mußten vor der Anwendung der L_i -Faktorformel die entsprechenden Daten gewonnen werden, also eine Karte mit den jeweiligen λ_i - und m_{0i} -Werten. Allerdings waren hier notwendigerweise andere Ausgangsdaten erforderlich, nämlich folgende **drei Grundlagenkarten**, die mit FLOW 95 analysiert werden mußten:

- Das digitale Höhenmodell des Untersuchungsgebiets
- Die vorhandene Abflußmaske aus Abbildung 41
- Die schon bekannte m_i -Grundlagenkarte aus Kap. 5.1.4 (vgl. Abbildung 26)

Während das digitale Höhenmodell unverändert übernommen werden konnte, waren bei den beiden restlichen Grundlagenkarten vor Verwendung in FLOW 95 einige Vorarbeiten erforderlich und zwar aus folgenden Gründen:

FLOW 95 wurde so programmiert, daß Fließbarrieren und abflußlose Gebiete nur über ein **Gewichtungsraster** berücksichtigt werden können. Zahlen, die größer sind als 0 kennzeichnen dabei die anfängliche Wassermenge im entsprechenden Pixel, Werte von 0 dagegen Fließbarrieren bzw. Flächen ohne Oberflächenabfluß. Durch eine spezielle Vorkehrung wird dafür gesorgt, daß FLOW 95 beim Erreichen von Nullwerten den Wasserfluß komplett stoppt. So werden alle Pixel mit dem Wert 0 als Flächen mit unendlich hoher Versickerung behandelt, die von keinem noch so großen Abfluß überwunden werden können.

Unter Berücksichtigung dieses Verhaltens wurde die Abflußmaske in Arc/View entsprechend reklassifiziert (Abflußlose schwarze Flächen bzw. Fließhindernisse = 0, Weiße Gebiete mit Oberflächenabfluß = 1) und danach auf Grundlage des digitalen Höhenmodells in FLOW 95 die **vorläufige Abflußmenge vAm** analysiert. Dabei wurde die Funktion WEIGHED FLOW AKKUMULATION benutzt, wobei die reklassifizierte Abflußmaske als Gewichtungsraster diente.

In gleicher Weise wurde die **kumulierte Summe aller m_i 's** im jeweiligen Einzugsgebiet berechnet. Auch hier wurde die Funktion WEIGHED FLOW ACCUMULATION verwendet, in diesem Fall allerdings mit der schon bekannten m_i -Grundlagenkarte als Gewichtungsraster (vor Verwendung dieses m_i -Gewichtungsrasters mußten jedoch auch hier die entsprechenden Fließbarrieren als Nullwerte eingefügt werden).

Beide mit FLOW 95 berechneten Rasterkarten (vorläufige Abflußmenge vAm und kumulierte Summe aller m_i 's) dienten als Ausgangsbasis für die Ermittlung der potentiellen Abflußmenge und des m_{0i} -Rasters. Die dazu notwendigen Berechnungen konnten wieder in Arc/View durchgeführt werden und liefen nach folgendem Schema ab:

Potentielle Abflußmenge λ_i :

Multiplikation des berechneten Abflußmengenrasters vAm mit dem Faktor 5.

Hintergrund dieser Berechnung war folgender: Durch das gewählte Gewichtungsraster wurden allen Pixeln mit Ausnahme der Fließbarrieren der Initialwert 1 zugewiesen, d.h. eine anfängliche Wassermenge von 1. Damit wurden zwar die relativen Größenverhältnisse der Abflußmengen an unterschiedlichen Orten berechnet, nicht jedoch die absoluten. Durch die nachfolgende Multiplikation dieser Werte mit dem wirklichen Wassergehalt, den eine einzelne Rasterzelle in Wirklichkeit aufweist, werden dagegen alle noch relativen Werte den absoluten Gegebenheiten angepaßt, sprich, die vorläufige relative Abflußmenge wird zur potentiellen Abflußmenge transformiert²⁵. Natürlich ist der gewählte Faktor 5 insofern ein hypothetischer Wert, weil er nicht der wirklichen Wassermenge entspricht, die eine einzelne Zelle vor der Fließberechnung etwa in Form auftreffenden Niederschlags aufweist. Da jedoch die Aussagekraft zweier Konzeptionen (Irregular Slope versus Unit Contributing Area) verglichen werden sollten, mußte zwingend ein Faktor von 5 gewählt werden, weil sich aufgrund der Rastergröße von 5 m auch die Fließlänge beim Irregular Slope Konzept von Pixel zu Pixel um den Faktor 5 erhöht.

Raster mit den m_{0i} -Werten:

Division der Rasterkarte mit den kumulierten m_i -Werten durch die Rasterkarte mit der vorläufigen Abflußmenge vAm .

Da die vorläufige Abflußmenge vAm mit einem Gewichtungsraster ermittelt wurde, bei dem mit Ausnahme der Fließbarrieren alle Pixel den einheitlichen Wert 1 aufwiesen, kennzeichnet vAm nichts anderes als die Summe aller Pixel, die bei dieser neigungsgewichteten Abflußberechnung bisher durchflossen wurden. Durch Division der kumulierten m_i -gewichteten Abflußmenge mit der vorläufigen Abflußmenge vAm konnten daher die jeweiligen m_{0i} -Werte für alle Pixel bestimmt werden.

²⁵ Zumindest dann, wenn alle Zellen den gleichen anfänglichen Wassergehalt aufweisen. Bei unterschiedlichen Initialwerten (z.B. aufgrund unterschiedlichen Niederschlags in einem Gebiet), muß jedoch diese Anpassung vor der eigentlichen Berechnung erfolgen, d.h. im Gewichtungsraster müssen schon die wirklichen Wasserwerte enthalten sein.

2. Anwendung der erweiterten Formel zur Berechnung der L_i-Faktorenkarte

Voraussetzung zur Berechnung des L_i-Faktors war die erweiterte Berechnungsformel nach WISCHMEIER/SMITH (1974), die schon in Kapitel 2.3 und 3.3.1 beschrieben wurde:

$$L_i = [\lambda_i^{m_{oi}+1} - \lambda_{i-1}^{m_{oi}+1}] / [(\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^{m_{oi}}]$$

Da nach den vorherigen Berechnungsschritten sowohl die beiden Grundlagenkarten (λ_i und m_{oi}) nun vorhanden waren und die restlichen Werte aus der Pixelgröße abgeleitet werden konnten (Pixelgröße = 5 m), sah die abschließende Overlayoperation zur Berechnung der entsprechenden L_i-Faktorenkarte wie folgt aus:

$$\text{L}_i\text{-Faktorenkarte} = [\lambda_i\text{-Karte}^{m_{oi\text{-Karte}}+1} - (\lambda_i\text{-Karte}-5)^{m_{oi\text{-Karte}}+1}] / [5 * 22.13^{m_{oi\text{-Karte}}}]$$

Wie zu sehen ist, wurden zur Berechnung der L_i-Faktorenkarte (Abbildung 42) sowohl beim Irregular Slope wie auch beim Unit Contributing Area Konzept genau die gleichen Formeln verwendet. Allerdings und dies soll hier nochmals in aller Deutlichkeit betont werden, wurden die Werte, die hinter den einzelnen Variablen stehen auf völlig unterschiedliche Weise ermittelt.

3. Berechnung des eigentlichen Bodenabtrags

Mit den gewonnen Faktorenkarten wurde der Bodenabtrag in einer abschließenden Overlayberechnung wie folgt ermittelt:

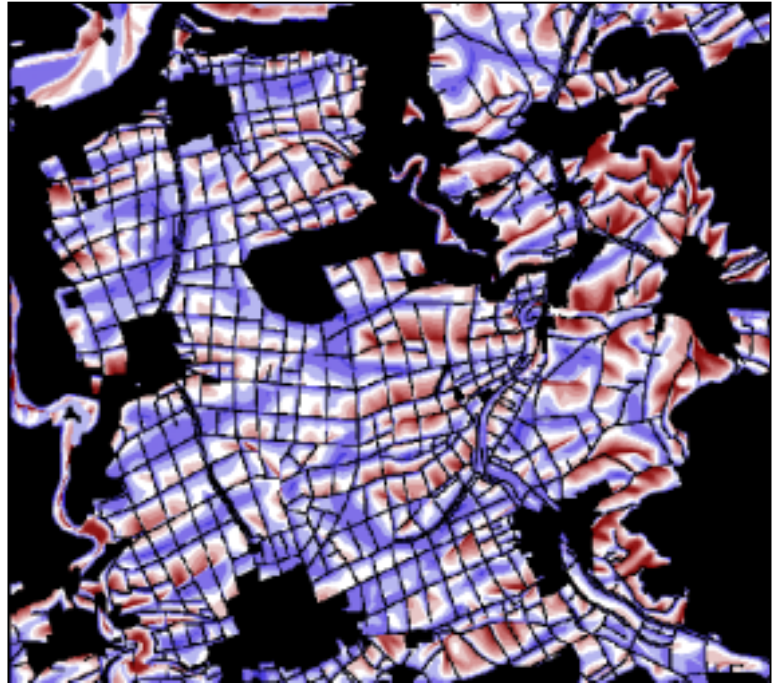
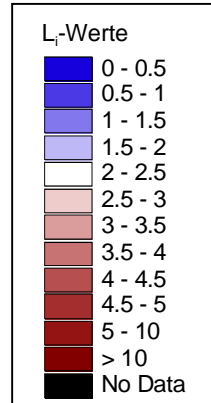
$$\mathbf{A} = \mathbf{R}\text{-Faktor} * \mathbf{K}\text{-Faktor} * \mathbf{S}\text{-Faktor} * \mathbf{L}\text{-Faktor}$$

Die Bodenerosionskarte auf der übernächsten Seite (Abbildung 44) zeigt das Ergebnis aller Berechnungen. Alle dargestellten Untersuchungsergebnisse sind das Resultat einer exakten Umsetzung des Unit Contributing Area Konzepts. Allerdings können die Initialwerte der Wassermenge durchaus anders gewählt werden als im vorliegenden Fall.

Abbildung 43:

L_i -Faktorenkarte, ermittelt nach dem Unit Contributing Area Konzept

Vereinfachte Darstellung in grober Klassifikation (12 Klassen). Blaue Farben zeigen geringere L_i -Werte als der Gebietsdurchschnitt, rote höhere Werte.

**Abbildung 44:**

Differenzen zwischen unterschiedlich ermittelten L_i -Faktoren

Die vorliegende Karte zeigt die Unterschiede zwischen L_i -Faktoren, die nach dem Irregular Slope Konzept berechnet wurden und L_i -Faktoren, die nach der Unit Contributing Area Methode gewonnen wurden. Dabei stellt die Karte das Ergebnis folgender Subtraktion dar:

L_i (Irregular Slope) – L_i (Unit Contributing Area)

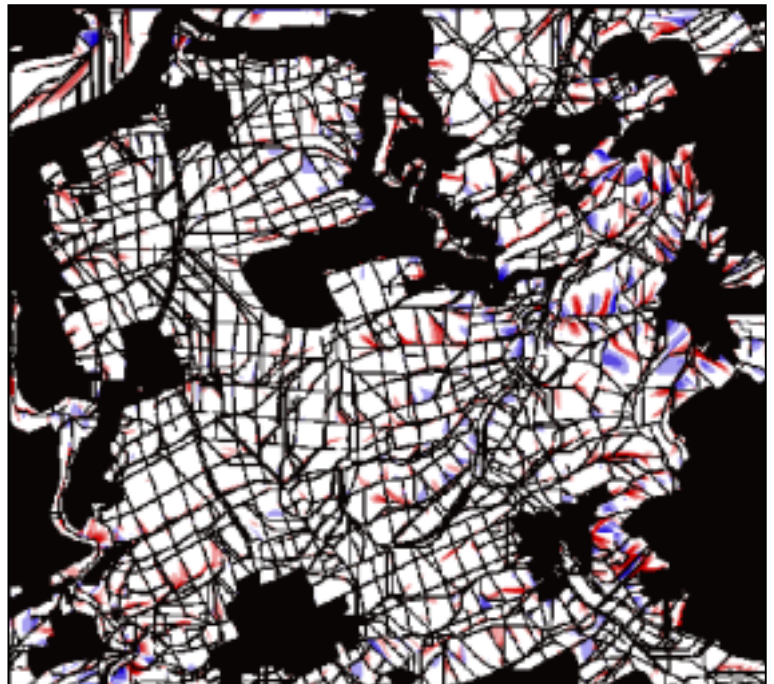
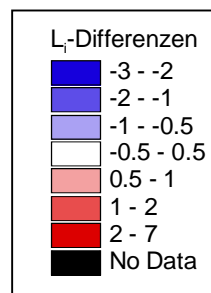
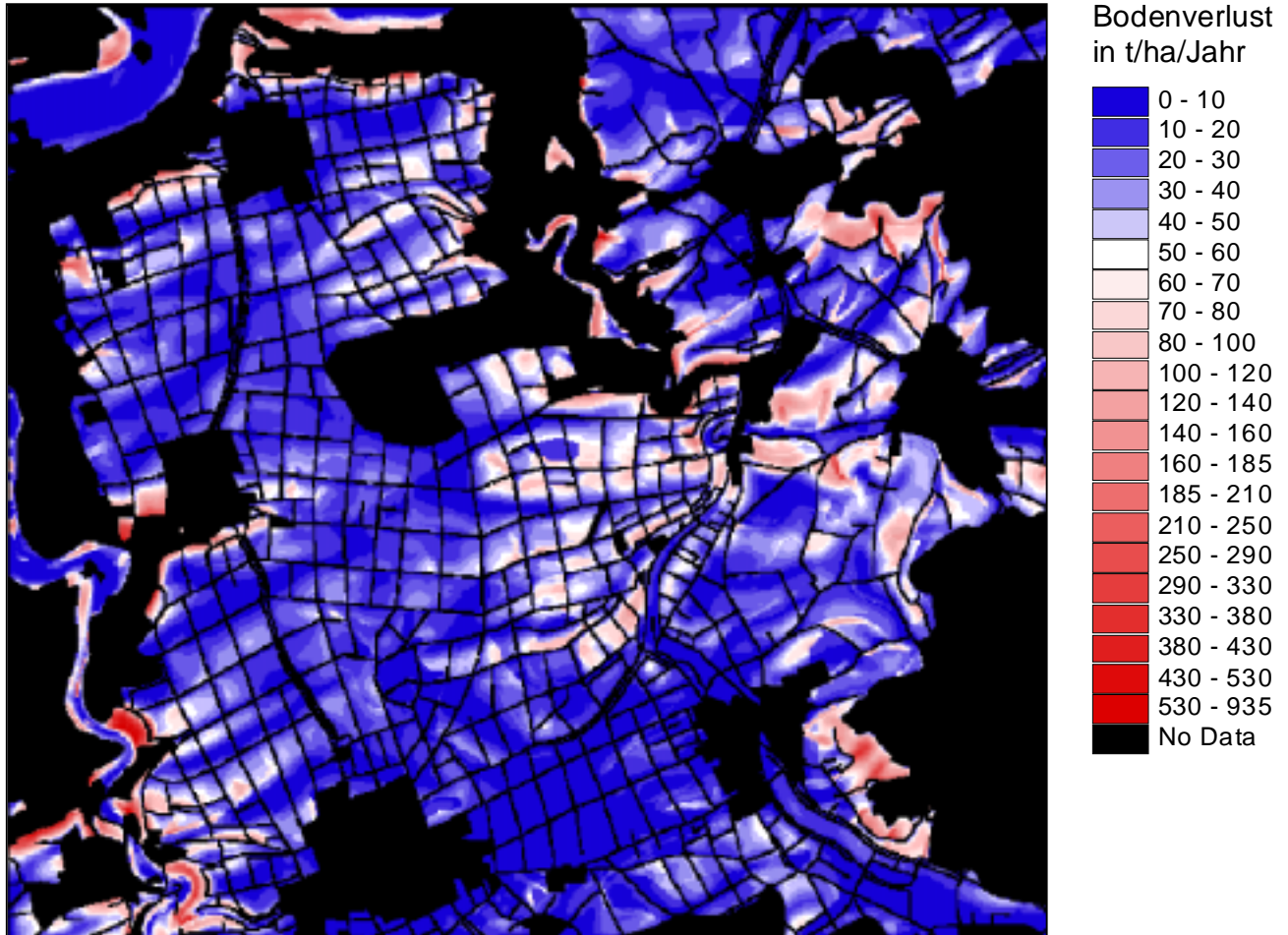


Abbildung 45:**Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet nach der Unit Contributing Area Konzeption**

Bodenverlust ganzer Flächen unter Schwarzbrachebedingungen. Schwarze Farben kennzeichnen erosionsfreie Gebiete (Wald, Siedlungen und überbaute Gebiete) oder erosionswichtige Linien (Wege, Einzugsgebietsgrenzen, Fließlinien). Wiesen wurden zu Vergleichszwecken wie Ackerflächen betrachtet. Hydrologische Barrieren sind auch hier in dreifacher Breite dargestellt.



5.7 Bewertung der Stoffbilanz: **Erweiterte Berechnungen auf Basis der Abtragsgleichungen** **RUSLE und MUSLE 87 mit Arc/View und FLOW 95**

Die Bestimmung der Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet folgte genau den Prinzipien, die schon in **Kap. 3.4** beschrieben wurden. Da die notwendigen Rechenfunktionen in keinem Standard-GIS enthalten sind, mußte auch hier das Programm FLOW 95 verwendet werden.

Grundlage aller Berechnungen waren folgende Karten:

- Die nach der Unit Contributing Area Konzeption berechnete Bodenabtragskarte (Abb. 44)
- Die gleiche Abflußmaske wie beim Unit Contributing Area Konzept
- Das digitale Höhenmodell des Untersuchungsgebiets

Alle drei Ausgangskarten wurden als binäre Rasterdateien exportiert und danach mit FLOW 95 analysiert. Zur Berechnung der Stoffbilanz mit FLOW 95 waren folgende **Analyseschritte** erforderlich:

1. Berechnung des mittleren Bodenabtrags im jeweiligen Einzugsgebiets $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$

Auf Basis der gewonnenen Bodenabtragskarte (A_i) wurde $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ wie folgt ermittelt:

- Ermittlung der kumulierten Erosionssumme im Untersuchungsgebiet mit der Funktion WEIGHED FLOW ACCUMULATION und A_i als Gewichtungsraster. Das Ergebnis war ein Raster, dessen Werte dem Term $\sum A_i$ entsprechen
- Ermittlung der ungewichteten Abflußmenge mit der Funktion WEIGHED FLOW ACCUMULATION und der Abflußmaske aus Kap. 5.5 als Gewichtungsraster. Das Ergebnis war ein Raster, dessen Werte dem Term $\sum n$ entsprechen
- Berechnung von $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ durch die folgende Division in Arc/View:
 Raster ($\sum A_i$) / Raster ($\sum n$)

2. Ermittlung der Stoffbilanz $A_{\text{Saldo } i}$

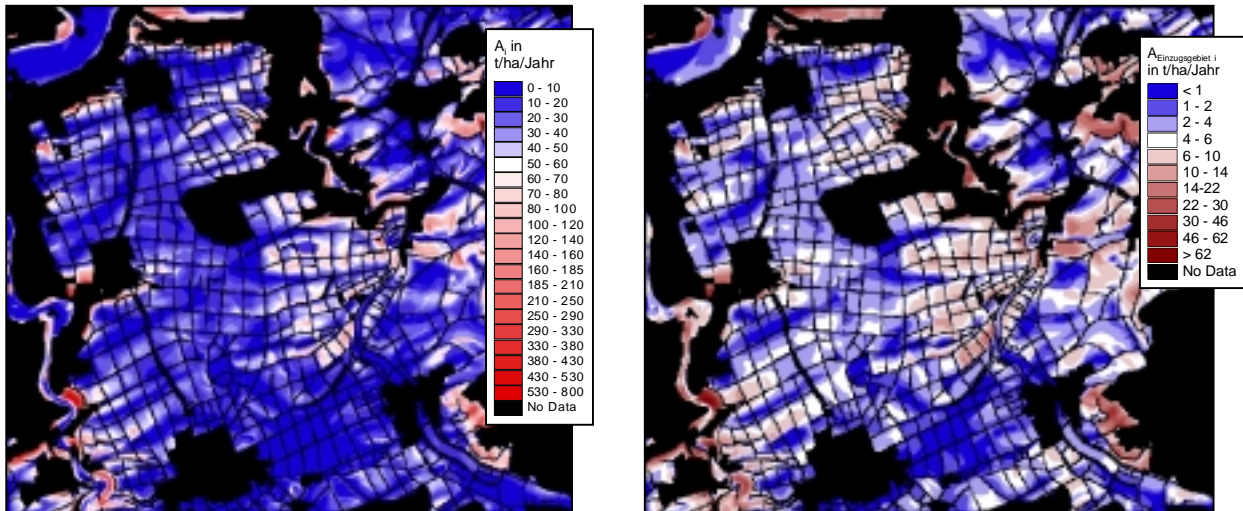
Auf der Basis des gewonnenen Rasters $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ (Abbildung 45) wurde in einem letzten Schritt die Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet ermittelt. Dabei wurde die Funktion WEIGHED FLOW BALANCE ON NEIGHBOURHOOD BASIS mit $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ als Gewichtungsraster benutzt (zur Berechnungsmethodik vgl. Kap. 5.4 und 3.4). Das Ergebnis aller Berechnungen war ein Raster mit den Werten von $A_{\text{Saldo } i}$ (Abbildung 46).

Abbildung 46:

Ausgangsdaten und Zwischenergebnisse bei den Berechnungen zur Stoffbilanz.

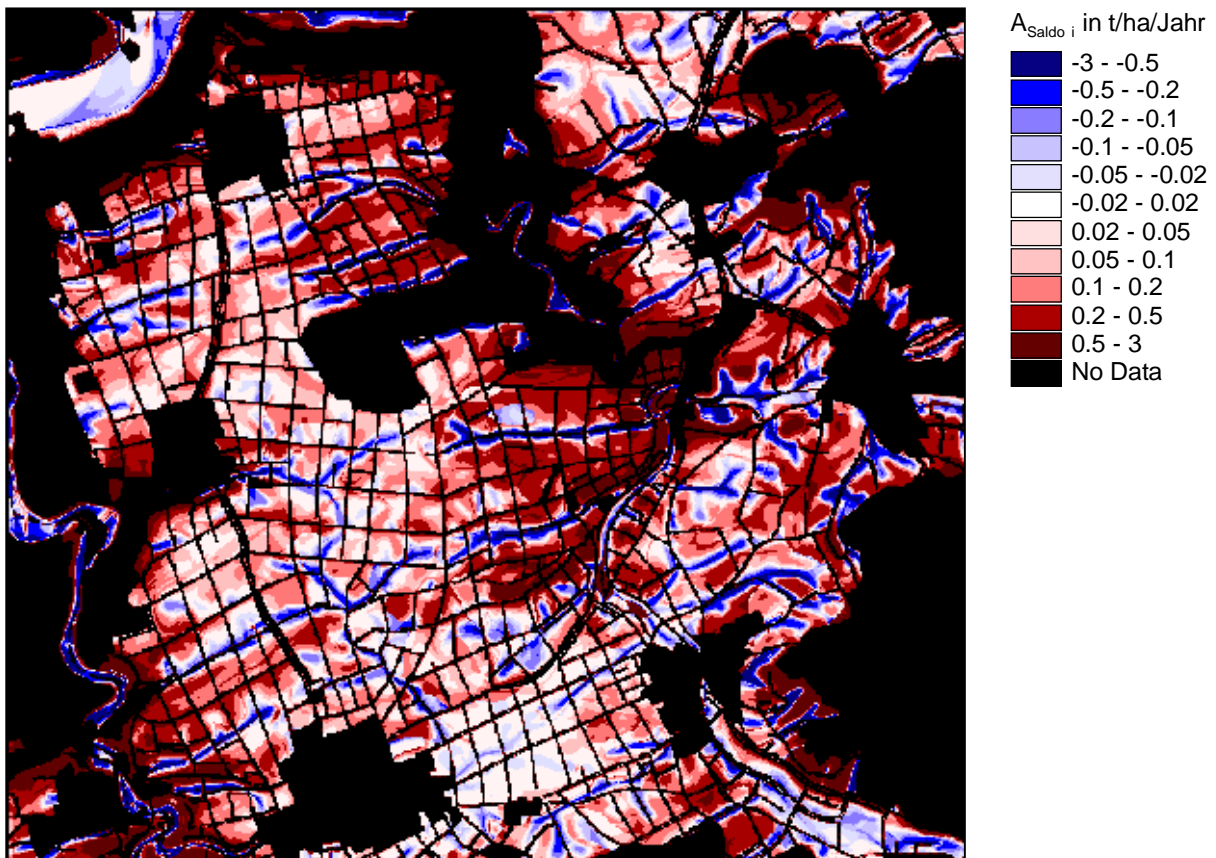
Links: Bodenerosionspotential im Untersuchungsgebiet

Rechts: Mittlerer Bodenabtrag $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$

**Abbildung 47:**

Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet

Effektive Stoffbilanz unter Schwarzbrachebedingungen, berechnet nach der MUSLE 87 Methode auf der Basis von Abtragswerten, die nach der Unit Contributing Area Konzeption gewonnen wurden. Schwarze Farben kennzeichnen Gebiete ohne analysierbaren Stoffumsatz bzw. hydrologische Barrieren. Blaue Flächen sind Gebiete mit effektivem Stoffgewinn (Akkumulationszonen), rote Flächen Gebiete mit effektivem Stoffverlust (Kappung des Bodenprofils). Aufgrund der Berechnungsmethode (= Saldo aus Bodenzu- und abfuhr) sind die Vorzeichen in der Legende umgekehrt: mit -1 multipliziert entsprechen die Legendenwerte den effektiven Zu- bzw. Verlustraten in t/ha/Jahr.



6. Bewertung der Ergebnisse

6.1 Aussagekraft der verschiedenen Konzeptionen auf RUSLE Basis

Da die Unit Contributing Area Konzeption die exakteste unter allen umgesetzten Prognosekonzeptionen ist, kann mit ihr als **Referenzmethode** die Genauigkeit der übrigen drei Konzeptionen beurteilt werden. Weitergehende Überprüfungen wären im Rahmen dieser Arbeit weder sinnvoll noch möglich gewesen. Denn zum einen kann die rezente Erosionsgefährdung (Bruttobodenabtrag) kaum durch herkömmliche Geländearbeiten bestimmt werden (vgl. Kap. 2.1), zum anderen ist die erweiterte RUSLE-Erosionsgleichung durch direkte Messungen hinreichend überprüft und theoretisch abgesichert (RENARD/FOSTER/LAFLÉN 1997, FOSTER/ WISCHMEIER 1974, u.a.).

Vor diesem Hintergrund mußte ich mich damit begnügen, lediglich die **relative Genauigkeit der Regular Slope, Irregular Slope und RUSLE Light Konzeption** zu beurteilen. Zu diesem Zweck wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (Irregular Slope)
- Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (RUSLE Light)
- Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (Regular Slope)

Je nach Genauigkeit der Methodik, waren die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Positive Werte bedeuten, daß der Bodenabtrag im Vergleich zur Unit Contributing Area Konzeption unterschätzt wird, negative signalisieren eine Überschätzung. Werte nahe Null zeigen eine perfekte Übereinstimmung mit der Referenzmethode.

Die entsprechende Untersuchungskonzeption (Regular Slope, Irregular Slope, RUSLE Light) ist dann hinreichend genau, wenn folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Mittelwert und Standardabweichung der berechneten Karte liegen nahe 0.
- Es treten keine großen Maximal- und Minimalwerte auf.
- Die Abweichungen vom Nullwert sind nach beiden Seiten (positive und negative Achse) gleichmäßig verteilt.

Welche der drei alternativen Untersuchungskonzeptionen (Regular Slope, Irregular Slope, RUSLE Light) diese Bedingungen am besten erfüllt, zeigen die folgenden Abbildungen und Tabellen:

Tabelle 6:

Abweichungen von der Referenzmethode (1)

Die unteren Tabellen zeigen die Ergebnisse einer Subtraktion zweier Erosionskarten. Dabei wurde immer folgende Formel benutzt: Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (alternative Konzeption). Die linke Spalte zeigt die Größe der Abweichungen an, die rechte den Flächenanteil, den diese am gesamten Untersuchungsgebiet besitzen. Positive Werte signalisieren, daß der Bodenabtrag im Vergleich zur Unit Contributing Area Methodik unterschätzt wird, negative zeigen eine Überschätzung an.

Differenz: Unit Contributing Area - Irregular Slope		Differenz: Unit Contributing Area - RUSLE Light		Differenz: Unit Contributing Area - Regular Slope	
Differenz in t/ha/Jahr	Fläche in %	Differenz in t/ha/Jahr	Fläche in %	Differenz in t/ha/Jahr	Fläche in %
-342 - -100	0.0	-388 - -100	0.5	-109 - -100	0.1
-100 - -50	0.2	-100 - -50	1.2	-100 - -50	1.4
-50 - -15	1.7	-50 - -15	4.6	-50 - -15	8.2
-15 - -5	4.9	-15 - -5	8.0	-15 - -5	15.8
-5 - 5	74.6	-5 - 5	53.2	-5 - 5	72.7
5 - 15	12.4	5 - 15	18.1	5 - 15	1.1
15 - 50	5.1	15 - 50	11.8	15 - 50	0.7
50 - 100	0.8	50 - 100	1.8	50 - 100	0.1
100 - 344	0.3	100 - 613	0.7	100 - 188	0.0
	100.0		100.0		100.0

Tabelle 7:

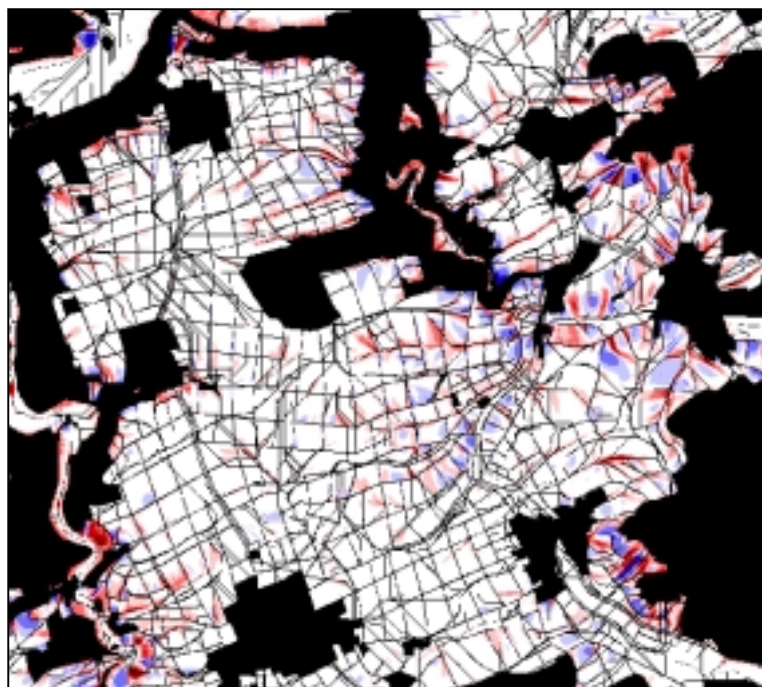
Abweichungen von der Referenzmethode (2)

Die untere Tabelle zeigt die Abweichungen der jeweiligen Untersuchungskonzeption von der Unit Contributing Area Methode in t/ha/Jahr. Grundlage der angegebenen Zahlen waren statistische Berechnungen, die sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet bezogen.

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Irregular Slope	-342	344	3	13
RUSLE Light	-388	613	4	25
Regular Slope	-109	188	-5	12

Abbildung 48:

Ungenauigkeiten bei der Irregular Slope Konzeption

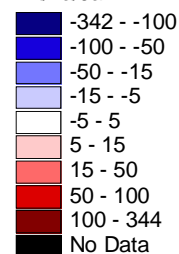


Nebenstehende Karte ist das Ergebnis folgender Berechnung:

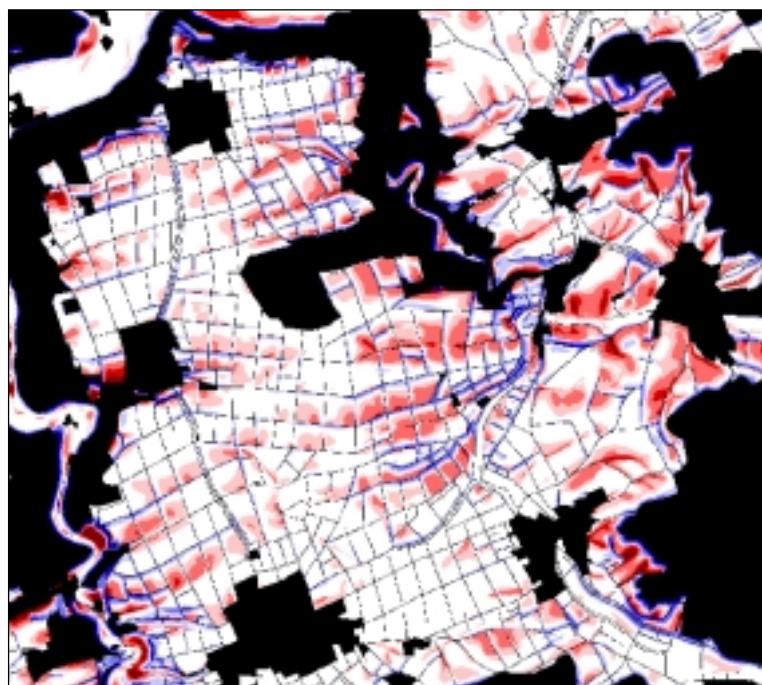
Erosionskarte (Unit Contributing Area) –
Erosionskarte (Irregular Slope)

Blaue Farben kennzeichnen Gebiete, bei denen der Bodenabtrag überschätzt wird, über roten Flächen wird er unterschätzt. Alle Werte beziehen sich auf die Erosionsgefährdung bei potentieller Schwarzbrache. Bei durchschnittlichen C-Werten von etwa 0.1 (konventioneller Getreideanbau) ergeben sich Abweichungen von bis zu 34 t/ha/Jahr

Abtragsunterschiede
in t/ha/Jahr

**Abbildung 49:**

Ungenauigkeiten bei der RUSLE Light Konzeption



Nebenstehende Karte ist das Ergebnis folgender Berechnung:

Erosionskarte (Unit Contributing Area) –
Erosionskarte (RUSLE Light)

Blaue Farben kennzeichnen Gebiete, bei denen der Bodenabtrag überschätzt wird, über roten Flächen wird er unterschätzt. Alle Werte beziehen sich auf die Erosionsgefährdung bei potentieller Schwarzbrache. Bei durchschnittlichen C-Werten von etwa 0.1 (konventioneller Getreideanbau) ergeben sich Abweichungen von bis zu 61 t/ha/Jahr

Abtragsunterschiede
in t/ha/Jahr

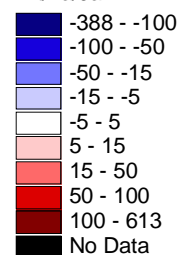
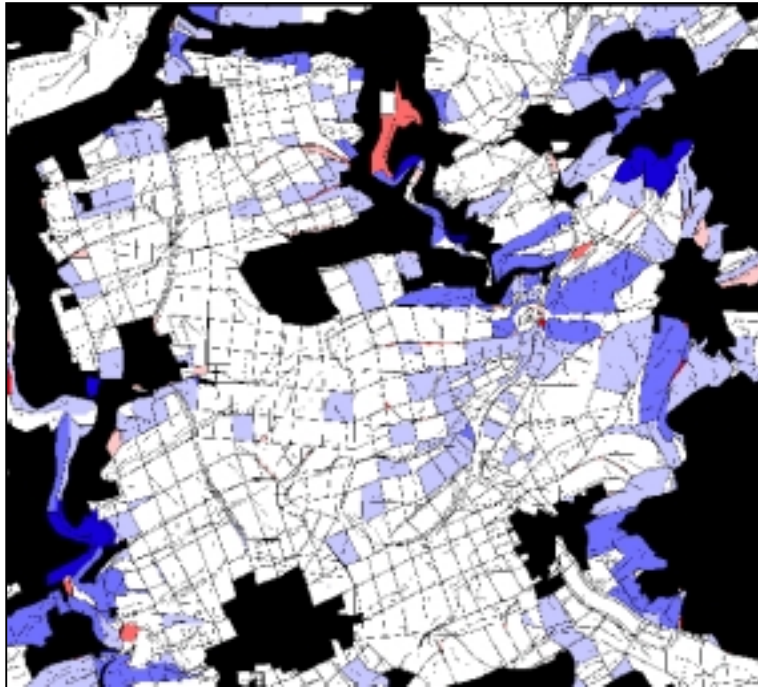


Abbildung 50:

Ungenauigkeiten bei der Regular Slope Konzeption



Nebensiehende Karte ist das Ergebnis folgender Berechnung:

Erosionskarte (Unit Contributing Area) –
Erosionskarte (Regular Slope)

Blaue Farben kennzeichnen Gebiete, bei denen der Bodenabtrag überschätzt wird, über roten Flächen wird er unterschätzt. Alle Werte beziehen sich auf die Erosionsgefährdung bei potentieller Schwarzbrache. Bei durchschnittlichen C-Werten von etwa 0.1 (konventioneller Getreideanbau) ergeben sich Abweichungen von bis zu 19 t/ha/Jahr.

Abtragsunterschiede
in t/ha/Jahr

Dark Blue	-109 - -100
Blue	-100 - -50
Light Blue	-50 - -15
Very Light Blue	-15 - -5
White	-5 - 5
Light Red	5 - 15
Red	15 - 50
Dark Red	50 - 100
Black	100 - 188
Black	No Data

Der Bodenabtrag, der von den drei alternativen Prognosekonzeptionen im Untersuchungsgebiet errechnet wurde, unterscheidet sich in charakteristischer Weise von den Referenzwerten. Abtragsprognosen auf Basis der Irregular Slope und Regular Slope Konzeption sind noch relativ genau, beim RUSLE Light Konzept treten starke Abweichungen auf. Allerdings kann das Regular Slope Konzept nicht mit den beiden anderen verglichen werden, da es auf Durchschnittswerten großer Flächen basiert und die Abweichungen dadurch zwangsläufig sehr viel niedriger ausfallen.

Im einzelnen können für jede der drei Konzeptionen folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

Irregular Slope:

Diese Konzeption ist die bei weitem genaueste und kann beim Fehlen eines geeigneten Analyseprogramms wie FLOW 95 zur Bodenerosionsprognose eingesetzt werden. Zwar **überschätzt sie den Bodenabtrag leicht**, weil die Erhöhung der Abflußmenge an Konfluenzzonen nicht berücksichtigt wird, dieser Nachteil kann jedoch verschmerzt werden. Gebiete mit einem großen Anteil an Konfluenzzonen sind vorwiegend im Gipskeuper des Untersuchungsgebiets zu finden, über der ackerbaulich genutzten Gäufläche fehlen sie weitgehend.

Unter ausschließlicher Berücksichtigung der Gäufläche bzw. Gebieten mit ähnlicher Topographie dürfte die durchschnittliche Abweichung weit unter dem berechneten Mittelwert von 3 liegen. Trotzdem ist die Irregular Slope Methodik nicht perfekt, doch in der Regel können ihre methodischen Fehler in Anbetracht der oft ungenauen Ausgangsdaten vernachlässigt werden (siehe unten).

RUSLE Light:

Obwohl sie sehr häufig in der Praxis verwendet wird, eignet sich die RUSLE Light Konzeption weniger zur Prognose des Bodenabtrags. Auf beinahe der Hälfte aller Flächen im Untersuchungsgebiet wird der Bodenabtrag entweder über- oder unterschätzt. Die fehlende Berücksichtigung der Abflußmenge macht sich hier besonders stark bemerkbar. In der Nähe von Wasserscheiden und anderweitigen hydrologischen Barrieren werden zu hohe Abtragsraten prognostiziert, bei größeren Entfernungen zu geringe. Da Feldgrenzen in der Regel den Wasserfluß nicht unterbrechen (vgl. Kap. 3.2.1 und Abbildung 18/1), werden die Fließlängen auch unter mitteleuropäischen Bedingungen sehr schnell größer als 100 m. Insofern **unterschätzt die RUSLE Light generell den Bodenabtrag**. Problematisch sind vor allem die starken lokalen Abweichungen, die auch über der relativ einheitlichen Gäufläche auftreten. Meiner Meinung nach lohnt es sich daher nicht, die RUSLE Light Konzeption bei GIS-gestützten Erosionsuntersuchungen anzuwenden. Selbst unter mitteleuropäischen Bedingungen sind die Abweichungen zu groß, als das sie den Aufwand einer GIS-gestützten Untersuchung rechtfertigen könnten. Eine einfache visuelle Interpretation anhand einer topographischen und einer Bodenkarte führt zu einem qualitativ gleichwertigen Ergebnis, und das in wesentlich kürzerer Zeit.

Regular Slope:

Neben der RUSLE Light ist die Regular Slope Konzeption die am häufigsten angewandte Prognosemethode in der Praxis. Doch auch sie eignet sich meiner Meinung nach nicht für GIS-gestützte Bodenerosionsuntersuchungen. Die Untersuchungsflächen sind bei korrekter Anwendung viel zu groß und durch die Vermischung von Erosions- und Akkumulationsbereichen werden die Ergebnisse schwer interpretierbar (vgl. Kap. 3.2.1 und Abbildung 18/2). Ein weiterer Nachteil ist die **tendenzielle Überschätzung des Bodenabtrags durch die Regular Slope Konzeption** (siehe Abb.50). Da sie auf der RUSLE-Standardformel basiert, die keine begrenzenden Faktoren (Detachment limited erosion bzw. transport limited erosion) kennt, prognostiziert sie selbst bei konvex-konkaven Hängen immer einen zu hohen Bodenabtrag. Besonders drastisch wirkt sich jedoch ihre Anwendung bei einem vorwiegend konkavem Relief aus. Hier treten erosionsbegrenzende Faktoren an beiden Enden eines

Hanges auf (vgl. Kap. 2.3, Abb.4) und verursachen einen wesentlich geringeren Bodenabtrag, als nach der Regular Slope Konzeption berechnet wird. Da auf der Gäufläche und wahrscheinlich auch in anderen wichtigen Anbaugebieten konkave Hangneigungen bei weitem dominieren, dürfte in der Realität immer ein viel zu hoher Bodenabtrag berechnet werden. Dies ist vermutlich auch der Grund dafür, daß in der Literatur gelegentlich die Meinung vertreten wird, die RUSLE-Erosionsgleichung überschätze den Bodenabtrag (BARTH 1997, PRASUHN/SCHAUB 1997). Doch nicht die RUSLE-Gleichung überschätzt den Bodenabtrag, sondern nur ihre vereinfachte Form (Standardgleichung, Regular Slope Konzeption) und dies besonders bei einem vorwiegend konkavem Relief. Vergleiche zwischen gemessenen Abtragungswerten im Gelände und prognostizierten Werten auf Basis der Regular Slope Konzeption sind daher nicht zulässig¹.

Alle Schlußfolgerungen beziehen sich auf die relativen Abweichungen zur Referenzmethode. Eine Überprüfung der absoluten Genauigkeit war im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich. Die Aussagekraft von Erosionsprognosen hängt jedoch nicht nur von der benutzten Untersuchungskonzeption ab, sondern vielmehr von der **Qualität der Ausgangsdaten**. Selbst die genaueste Prognosemethodik kann nicht besser sein, als das verfügbare Datenmaterial. Ein sehr sensibler Punkt ist in diesem Zusammenhang vor allem die Qualität des benutzten Höhenmodells. Amtliche Höhenmodelle sind notorisch ungenau, selbsterstellte aber meistens auch. Aufgrund der Berechnungsalgorithmen gelingt es nur in den seltensten Fällen, mit moderner GIS-Software exakte digitale Höhenmodelle zu erstellen. Durch eine lineare Interpolation weist das berechnete Höhenmodell immer mehr oder weniger starke Neigungssprünge auf². Eine empfohlene Glättung mit einem Mittelwertfilter reduziert diese Fehler zwar, doch gleichzeitig wird die Höhengenaugigkeit reduziert. Insofern sind selbst bei exakter Umsetzung der Unit Contributing Area Konzeption keine hundertprozentig genauen Ergebnisse zu erwarten. Doch darin liegt auch nicht der Sinn GIS-gestützter Erosionsprognosen, sondern vielmehr in der Ermittlung gefährdeter Gebiete.

¹ vgl. BARTH (1997). In dieser Arbeit werden gemessene Abtragungswerte mit prognostizierten verglichen und die These aufgestellt, die USLE-Gleichung überschätze den Bodenabtrag. Die prognostizierten Abtragungswerte basierten jedoch auf der Regular Slope Methode. Die Krümmung im Gelände wurde nicht angegeben.

² Diese Tatsache gilt generell bei jedem erstellten Höhenmodell, bei rasterorientierten DEMs oder bei Höhenmodellen, die mit Hilfe eines TINs erstellt wurden.

6.2 Aussagekraft von Stoffbilanzbewertungen auf Basis von RUSLE und MUSLE 87

Stoffbilanzbewertungen sind im Gegensatz zu herkömmlichen Erosionsprognosen **im Gelände nachprüfbar**. Sie zeigen die Folgen erosiver Prozesse auf das Bodenprofil. Durch den Vergleich mit einer Bodenkarte lassen sich daher Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Werten leicht feststellen. **Allerdings eignen sich nur Kolluvien und anderweitige Bodenakkumulationen zu Kontrollzwecken, gekappte Profile dagegen nicht**. Die Gründe dafür sind schnell beschrieben:

- Kolluvien und Bodensedimentationen treten in Tiefenlinien und lokalen Senken auf. Sie sind **örtlich fixiert**. Wechselnde Erosionsraten am Ober- und Mittelhang beeinflussen lediglich die Höhe kolluvialer Ablagerungen, der Ort der Ablagerungen bleibt jedoch gleich. Dagegen sind stark gekappte Bodenprofile weniger an bestimmte Positionen gebunden. Sie treten nur dort auf, wo über eine lange Zeit starke erosive Kräfte wirken konnten. Das Ausmaß der Erosionsgefährdung verändert sich jedoch mit Nutzungswechseln sehr stark. Daher spiegeln gekappte Bodenprofile nur die Erosionsgeschichte wieder, Bodenakkumulationen treten jedoch unabhängig von wechselnden Erosionsraten immer an den gleichen Stellen auf.
- Erodirtes Bodenmaterial wird in den Tiefenlinien des Reliefs **konzentriert abgelagert**. Selbst geringe Abtragsraten im rückwärtigen Einzugsgebiet führen auf diese Weise zu klar ausgebildeten Kolluvien. Die korrelierten Ablagerungen sind im Gelände deshalb viel leichter sichtbar, als verschieden stark gekappte Bodenprofile. Daher liefern auch Bodenkarten im Maßstab 1:25000 genaue Informationen über auftretende Kolluvien und Auenlehmablagerungen. Die sehr feinen Unterschiede im Zentimeterbereich bei gekappten Bodenprofilen erfassen sie dagegen nicht.

Vor dem Hintergrund dieser Argumente haben ich mich entschlossen, nur Kolluvien und Auenböden zu Kontrollzwecken zu benutzen. Damit kann die Aussagekraft von Stoffbilanzierungen aber nur teilweise überprüft werden. Ob die Bodenprofile an den entsprechenden Orten wirklich in dem Ausmaß verkürzt werden, wie von der MUSLE 87 prognostiziert wird, muß offen bleiben. Vergleiche mit anderen Modellgleichungen (MUSLE 87 versus OPUS, siehe HENSEL 1991) haben zwar gezeigt, daß auf Basis der MUSLE 87 sehr gute Resultate zu erzielen sind, eine Kontrolle anhand realer Bodenprofile fand nach meinen Kenntnissen bisher nicht statt. Dennoch lassen sich auch durch eingeschränkte Kontrollen auf der Basis von Bodenakkumulationen wichtige Rückschlüsse ziehen, wie die folgende Seite zeigt.

Abbildung 51:

Stoffbilanz nach der MUSLE 87:

Prognostizierte und tatsächliche Bodenablagerungen

Diese Abbildung entspricht Abbildung 47 und zeigt die prognostizierte Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet. Im Unterschied zur Abbildung 47 sind jedoch hier Bodenablagerungen, die in der Realität zu finden sind, eingezeichnet. Die gelben Umrandungen zeigen das Auftreten von Kolluvien und Auenböden im Untersuchungsgebiet.



Wie in Abbildung 51 zu sehen ist, besteht eine große Übereinstimmung zwischen prognostizierten und realen Bodenakkumulationen im Untersuchungsgebiet. An fast allen Flächen, wo mit der MUSLE 87 eine Bodensedimentation prognostiziert wurde, sind in Wirklichkeit auch Kolluvien bzw. Auenböden zu finden. In einigen Ausnahmefällen stimmen jedoch prognostizierte und reale Werte nicht überein. Die **hauptsächlichsten Unstimmigkeiten** sind in Abbildung 51 durch numerierte Pfeile gekennzeichnet. Sie sollen kurz erläutert werden:

1. An kleineren lokalen Senken werden Kolluvien prognostiziert, die in der Bodenkarte nicht eingezeichnet sind. Dies erklärt sich dadurch, daß Bodenablagerungen erst ab einer gewissen Höhe als Kolluvien klassifiziert werden (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung, AG BODEN 1994). Ablagerungen im Zentimeterbereich werden in normalen Bodenkarten nicht

aufgeführt. In diesem Fall liefern die prognostizierten Werte wichtige Zusatzinformationen, die aus der normalen Bodenkarte nicht ersichtlich sind. Ein Widerspruch zwischen Prognose und Realität kann deshalb hier nicht gesehen werden.

2. Die RUSLE bzw. MUSLE 87 Formel prognostiziert nur den Bodenabtrag, der von einem überwiegend laminaren Oberflächenabfluß verursacht wird. Stärkere hydraulische Kräfte in linearen Abflußbahnen werden von beiden nicht berücksichtigt. Deshalb treten an Stellen mit hohen Hangneigungen und einem starken linearen Abfluß zwangsläufig Fehler auf. Ähnliche Flächen müßten daher vor einer abschließenden Bewertung ausgeschlossen werden.
3. Bei sehr flachen und großen Becken liefert die MUSLE 87 optisch ungenaue Resultate. Dies liegt an der Berechnungsmethode, die in diesen Fällen nur Werte knapp unter 0 liefert und damit ein unbeeinflußtes Bodenprofil signalisiert (vgl. Kap. 3.4).
4. Diese Unstimmigkeit ist die bei weitem wichtigste unter allen Vieren. Sie zeigt, **daß die MUSLE 87 in der üblichen Form nicht gültig ist**. Im Geländebereich, auf den der Richtungspfeil 4 in Abbildung 51 zeigt, werden Kolluvien prognostiziert, die dort niemals vorhanden sein können. Denn zum einen liegt das entsprechende Gebiet an einem gestreckten Mittelhang mit Neigungen von etwa 5°, zum anderen besitzt gerade hier der Oberflächenabfluß sein höchstes Erosionspotential ($L \cdot S = \max.$). Fälle wie diese treten jedoch häufiger auf, weil bei genauerer Betrachtung die MUSLE 87 einen **schwerwiegenden logischen Fehler** besitzt: sie berücksichtigt den K-Faktor.

Wie in Kap. 2.4 und 3.4 beschrieben wurde, prognostiziert die MUSLE 87 die Stoffbilanz, indem die Bodenzufuhr vom Bodenverlust abgezogen wird. Sowohl die Bodenzufuhr als auch der Bodenverlust werden unter Beachtung aller Faktoren der RUSLE bzw. USLE Gleichung ermittelt, d.h. auf Basis der Formel $A_i = R_i \cdot K_i \cdot L_i \cdot S_i \cdot C_i \cdot P_i$ bzw. $A_{\text{Landschaft } i} = R_i \cdot K_i \cdot L_i \cdot S_i$. Die Faktoren R/L/S unterscheiden sich jedoch grundlegend vom K-Faktor. Das Produkt von $R \cdot L \cdot S$ kennzeichnet die Erosionskraft des Oberflächenabflusses, K die Bodenerodibilität. Sinken die Werte von $R \cdot L \cdot S$, dann verringert sich das energetische Potential des Oberflächenabflusses, das Wasser kann die mitgeführten Bodenpartikel nicht mehr weitertransportieren und lagert einen Großteil von ihnen ab. Verringert sich jedoch der K-Wert (z.B. durch einen Wechsel von schluffigen zu stark tonigen Böden wie in diesem Fall, vgl. Bodenkarte im Anhang), dann erodiert der Oberflächenabfluß weniger Bodenpartikel. Im ersten Fall ($R \cdot L \cdot S$) führen sinkende Werte zu einer **Übersättigung** an Bodenpartikeln, im zweiten (K) zu einer **Untersättigung**. **Ein untersättigter Oberflächenabfluß lagert aber keine Bodenpartikel ab.**

Mit A_i als Ausgangswert aller erweiterten Berechnungen auf der Basis der MUSLE 87 wird jedoch der K-Faktor gleich behandelt wie L, S oder R. Danach hat ein niedrigerer Bodenabtrag A_i seine Ursache entweder in einem geringeren $R*S*L$ -Wert oder aber in einem geringeren K-Wert. **Verringert sich A_i , dann wird durch die MUSLE 87 automatisch eine Bodenakkumulation prognostiziert** (vgl. Abbildung 52), unabhängig davon wie diese Veränderung ausgelöst wurde. Liegen die Ursachen in einem verringerten $R*S*L$ -Wert, dann ist die prognostizierte Bodenakkumulation korrekt, weil das energetische Potential des Oberflächenabflusses erniedrigt wurde. Liegen die Ursachen jedoch in einem geringeren K-Wert, dann stimmen die vorhergesagten Kolluvien nicht mit der Realität überein. Ein Wechsel von einem schluffigen zu einem tonigen Boden führt zu keiner Bodenakkumulation !

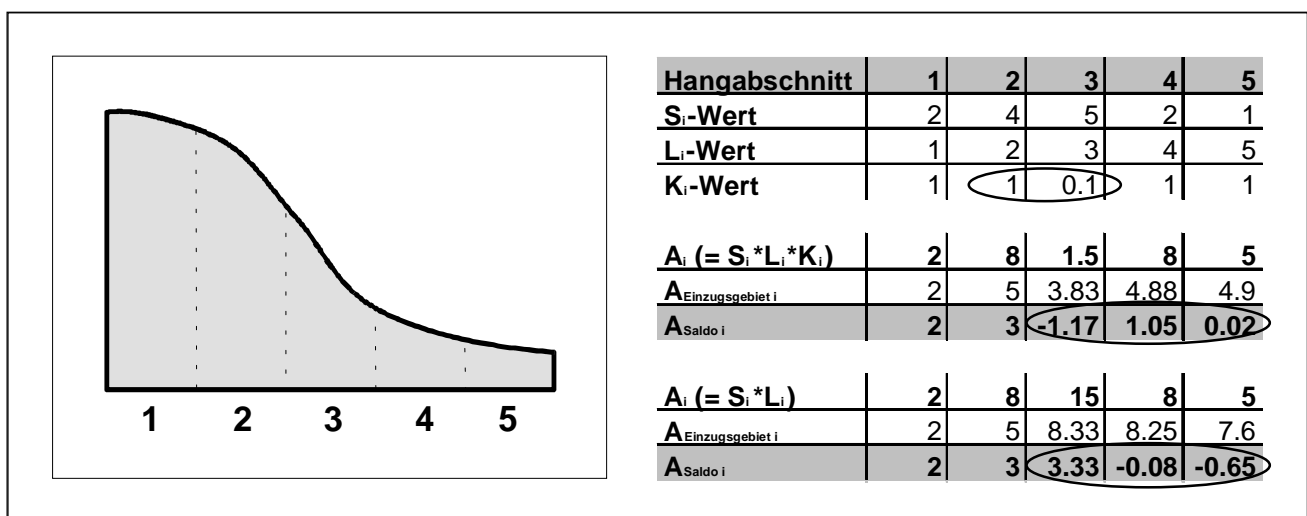
Aus diesen Gründen **darf der K-Faktor bei Stoffbilanzberechnungen nach der MUSLE 87 niemals berücksichtigt werden**. A_i ist daher mit folgender Formel zu berechnen:

$$A_{\text{Landschaft } i} = R_i * S_i * L_i \quad \text{bzw.} \quad A_i = R_i * S_i * L_i * C_i * P_i$$

Abbildung 52:

Logischer Fehler bei der MUSLE 87 – Erosionsgleichung

Die untere Abbildung veranschaulicht den grundlegenden logischen Fehler der MUSLE 87 bei Bestimmung der Stoffbilanz anhand eines hypothetischen Beispiels. Die Berücksichtigung des K-Faktors bei Berechnung von A_i (mittlere Tabelle) führt bei bestimmten Situationen zu fehlerhaften Ergebnissen. Erst mit der Herausnahme von K aus allen Berechnungen, d.h. der ausschließlichen Berücksichtigung der abflußrelevanten Faktoren L, S und R (in diesem Beispiel nicht angeführt), werden korrekte Ergebnisse möglich (untere Tabelle). Die eingekreisten Ziffern in der obersten Tabelle zeigen den Wechsel von einem erosionsanfälligen zu einem erosionsresistenten Boden, die umrandeten Ziffern in den beiden unteren Tabellen die entsprechenden Auswirkungen.



Es wird deutlich, wie wichtig realitätsnahe Kontrollen einer Erosionsgleichung sein können bzw. wie schnell eine zuvor einleuchtende Konzeption durch ein einzelnes Ereignis revidiert werden muß. Erst das zufällige Auftreten einer tonigen Pararendzina am Mittelhang deckt den

grundlegenden Fehler der MUSLE 87 – Gleichung auf. Mit normalen Vergleichen à la MUSLE 87 versus OPUS können Fehler dieser Art nicht erkannt werden. Insofern ist es nicht verwunderlich, daß in der Literatur keine Hinweise zum besonderen Status des K-Faktors zu finden sind (vgl. HENSEL 1991, BORK/ HENSEL 1988, BORK 1991, BORK/SCHRÖDER 1996) und somit alle bisherigen Stoffbilanzierungen auf Basis der MUSLE 87 korrigiert werden müssen. Wird jedoch der K-Faktor bei der Berechnung von A_i ignoriert, dann lassen sich mit der MUSLE 87 genaueste Ergebnisse erzielen. Dies zeigen die folgenden Abbildungen, wo die Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet unter ausschließlicher Berücksichtigung des R-, L- und S-Faktors ermittelt wurde.

Abbildung 53:

Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87:

Prognostizierte und tatsächliche Bodenablagerungen ohne Berücksichtigung von Waldflächen und hydrologischen Barrieren

Diese Abbildung zeigt die prognostizierte Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87 – Methodik, d.h. Unterschiede in der Bodenerodibilität wurden ignoriert und die Stoffbilanz aus den Werten von $A_i = R_i * L_i * S_i$ ermittelt. Darüber hinaus wurden auch Waldflächen und hydrologische Barrieren nicht berücksichtigt. Die gelben Umrandungen zeigen Siedlungsflächen oder Gebiete mit anthropogen überprägten Böden, die dünnen schwarzen Linien geben die Ausdehnung von real existierenden Kolluvien und Auenböden an. Einzelne schwarze NoData – Flächen sind Gebiete, an denen der Wertebereich der Legende unterschritten wird. Diese waren aufgrund eines Bugs in Arc/View nicht darstellbar (vgl. entsprechende Rasterdatei auf der beiliegenden CD-ROM).

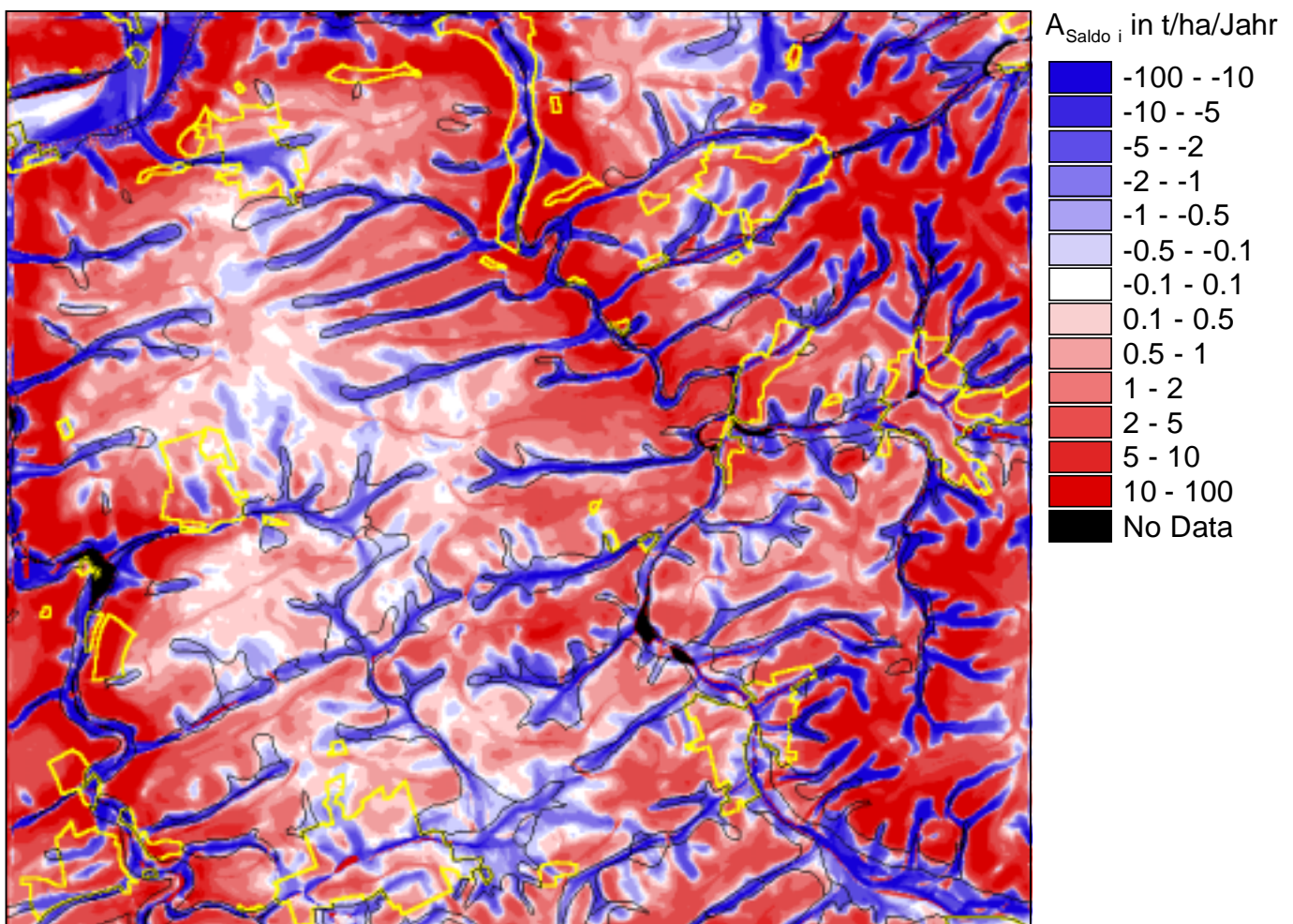
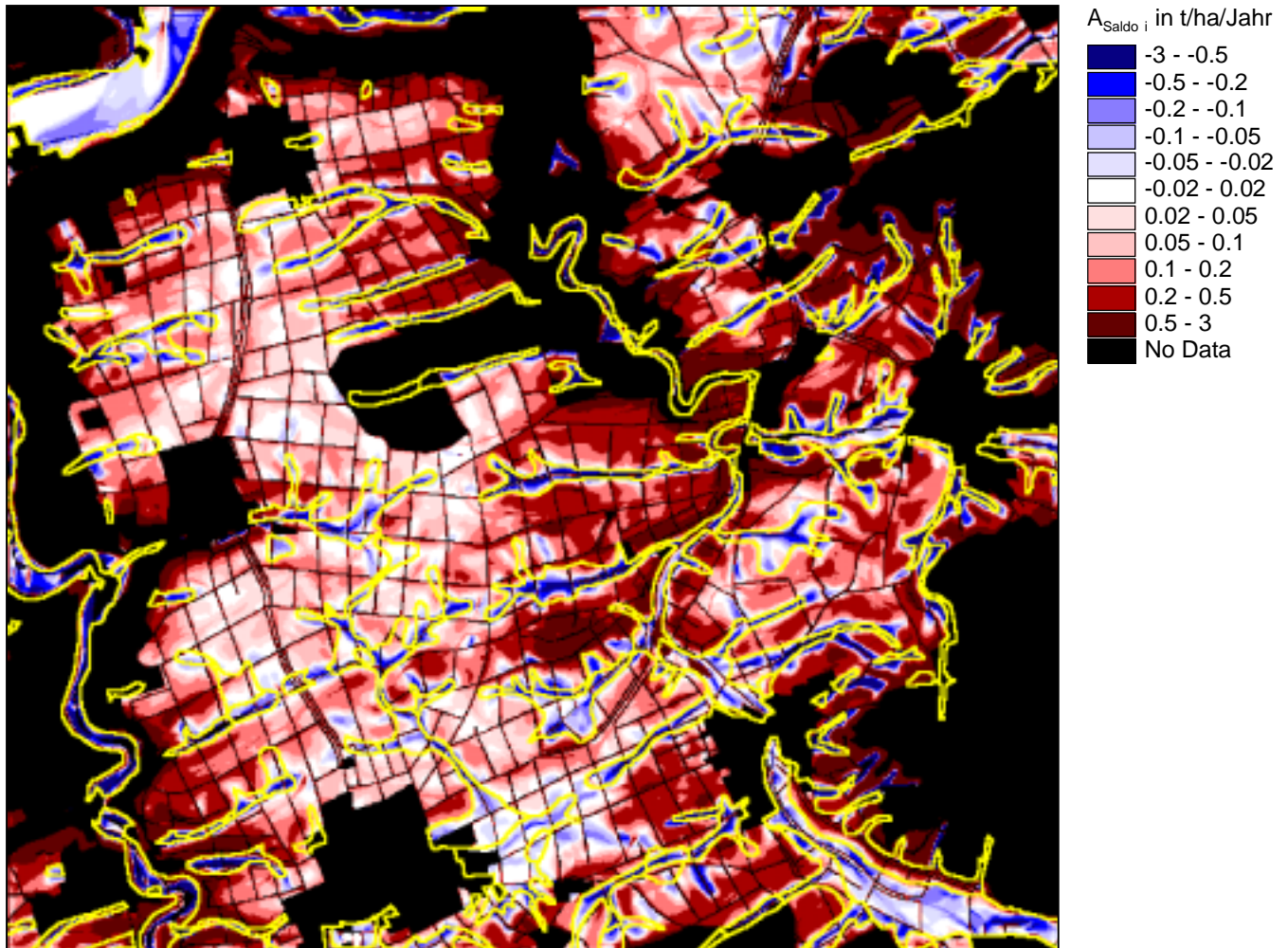


Abbildung 54:

Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87:

Prognostizierte und tatsächliche Bodenablagerungen mit Berücksichtigung von Waldflächen und hydrologischen Barrieren

Diese Abbildung zeigt die prognostizierte Stoffbilanz nach der revidierten MUSLE 87 – Methodik, d.h. Unterschiede in der Bodenerodibilität wurden ignoriert und die Stoffbilanz aus den Werten von $A_i = R_i * L_i * S_i$ ermittelt. Die gelben Umrandungen zeigen das Auftreten von Kolluvien und Auenböden im Untersuchungsgebiet.



7. Anwendungen von Erosionsprognosen

7.1 Praktischer Erosionsschutz

Bodenerosionsprognosen sind die entscheidende Voraussetzung für Erosionsschutzmaßnahmen, weil sie **zur Analyse und zur Vorbeugung von Erosionsschäden** eingesetzt werden können. Eine Erosionskarte liefert wichtige Informationen über gefährdete Standorte und die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen. Nachfolgende Berechnungen erlauben die Entwicklung von Strategien, mit denen der Bodenabtrag gezielt reduziert werden kann.

Im allgemeinen gibt es zwei unterschiedliche Wege, die Bodenerosion bei Bedarf zu senken (vgl. DIETZ 1982, KAINZ 1991, KRETSCHMAR 1992, SCHWERTMANN et al. 1990, STOCKING 1988, RENARD/FOSTER/LAFLÉN 1997, u.a.):

- **Nutzung geeigneter Fruchtfolgen und Anbaumethoden**

Fruchtfolgen und Anbaumethoden sind bezüglich ihrer C-Werte sehr unterschiedlich (vgl. Tabelle 1, S.24). Während konventionelle Anbaumethoden aus vielerlei Gründen den Bodenabtrag erhöhen (Herbiziteinsatz, Unterpflügen von Pflanzenresten direkt nach der Ernte, flaches Saatbeet, u.a.), führen Techniken wie Mulchsaat oder Spurlockerung zu einer drastischen Verringerung der Bodenerosion. Ähnliches gilt für die unterschiedlichsten Fruchtfolgen. Da in Mitteleuropa erosionsfördernde Nutzungsweisen dominieren, sind die Möglichkeiten, den Bodenabtrag auf diese Weise zu vermindern äußerst vielfältig.

- **Veränderungen im Gelände**

Neben einer veränderten Nutzungsweise kann der Bodenabtrag auch über direkte Eingriffe im Gelände reduziert werden. Maßnahmen dieser Art zielen vor allem auf eine Veränderung der topographischen Faktoren L und S. Beispiele direkter Eingriffe sind u.a. Terrassierungen, die Schaffung von Feldrainen und anderen hydrologischen Barrieren oder eine Neuordnung der Ackerflur. Veränderungen im Gelände sind in vielen Fällen mit hohen Kosten verbunden und erschweren später oft eine rationelle Bearbeitung. Deswegen dürfte eine starke Umgestaltung auf ernsthafte Widerstände stoßen, zumal erst in der jüngeren Vergangenheit viele Hindernisse entfernt wurden. Andererseits läßt sich mit effektiv eingesetzten Barrieren die Bodenerosion entscheidend vermindern, vor allem dann, wenn eine veränderte Nutzungsweise allein nicht ausreichend ist.

Ob Maßnahmen zum Erosionsschutz ergriffen werden müssen bzw. welche der beiden Möglichkeiten dann den größten Nutzen bringt, kann erst nach erweiterten Berechnungen entschieden werden. Voraussetzung ist dabei eine Karte mit dem landschaftsbezogenen Erosionspotential $A_{\text{Landschaft}}$. Auf ihrer Basis lassen sich mit der beschriebenen Formel $(C*P)_{\text{Max}} = A_{\text{Max}}/A_{\text{Landschaft}}$ (vgl. Kap. 2.2.2.4, S.23) die erlaubten Nutzungsweisen bei verschiedenen Abtragungsgrenzen ermitteln.

Bei hohen Werten von $(C*P)_{\text{Max}}$ kann eine Vielzahl an unterschiedlichen Fruchtfolgen und Anbaumethoden verwendet werden, ohne daß ein hoher Bodenabtrag zu befürchten ist. Bei niedrigen Werten von $(C*P)_{\text{Max}}$ werden die Auswahlmöglichkeiten entsprechend eingeschränkt. Je nach Ausprägung von $(C*P)_{\text{Max}}$ sind folgende Szenarien generell denkbar:

- **Hohe Werte von $(C*P)_{\text{Max}}$: $(C*P)_{\text{Max}} > 0.3$**

Dieser günstige Fall tritt vor allem bei einem relativ ebenem Relief auf. Selbst erosionsfördernde Nutzungsweisen führen dort zu keinem nennenswerten Bodenabtrag. Daher sind weder Schutzmaßnahmen noch Erhebungen von Nutzungsdaten erforderlich.

- **Mäßig hohe Werte von $(C*P)_{\text{Max}}$: $0.05 < (C*P)_{\text{Max}} < 0.3$**

Dieser Fall tritt in mäßig reliefierten Landschaften häufig auf. Die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen hängt dabei von den lokalen $(C*P)_{\text{Max}}$ – Werten ab. Bei Werten über 0.2 sind auch erosionsfördernde Nutzungsweisen wie Maisanbau möglich, bei Werten zwischen 0.1 und 0.2 und konventionellen Anbaumethoden nur noch Getreideanbau oder ähnliche Fruchtfolgen. Sinkt $(C*P)_{\text{Max}}$ dagegen auf einen Wert von unter 0.1, dann ist ein konventioneller Anbau nicht mehr möglich. Hier müssen bodenschonende Anbauverfahren verwendet werden, die eine hohe zusätzliche Bedeckung garantieren (Mulchsaat, verspätetes Unterpflügen von Ernteresten, o.ä.). Weitergehende und teure Schutzmaßnahmen wie Terrassierungen oder die Schaffung von Feldrainen sind jedoch noch nicht notwendig, da bei $(C*P)_{\text{Max}}$ – Werten von über 0.05 ein flächendeckender Erosionsschutz fast immer noch mit alternativen Anbaumethoden erreicht werden kann.

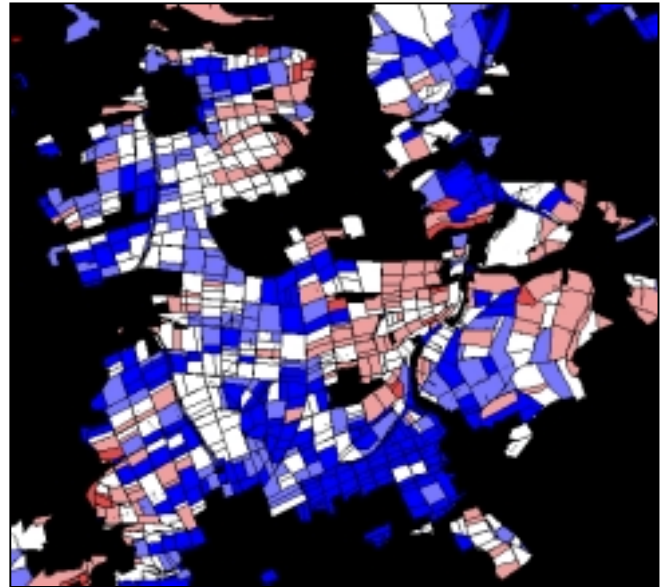
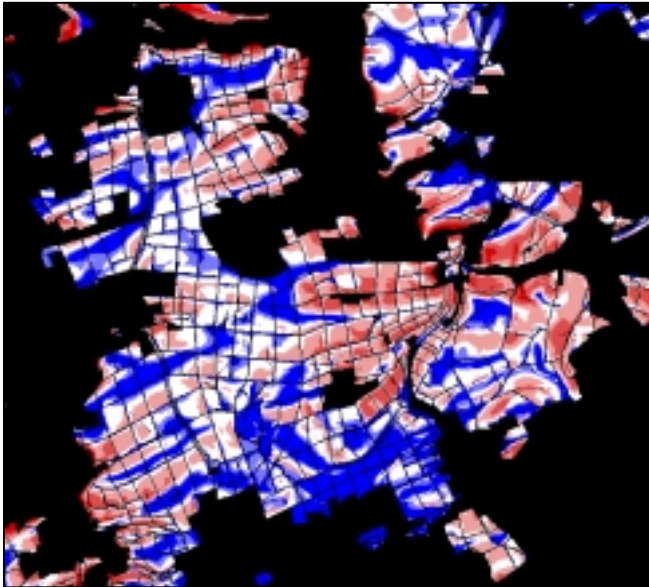
- **Niedrige Werte von $(C*P)_{\text{Max}}$: $(C*P)_{\text{Max}} < 0.05$**

Dieser Fall tritt vor allem an sehr steilen Hängen auf. Hier ist der Bodenabtrag selbst bei erosionsschonenden Anbaumethoden zu hoch und ein nachhaltiger Ackerbau nur mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen wie Terrassierungen oder der Schaffung von hydrologischen Barrieren möglich.

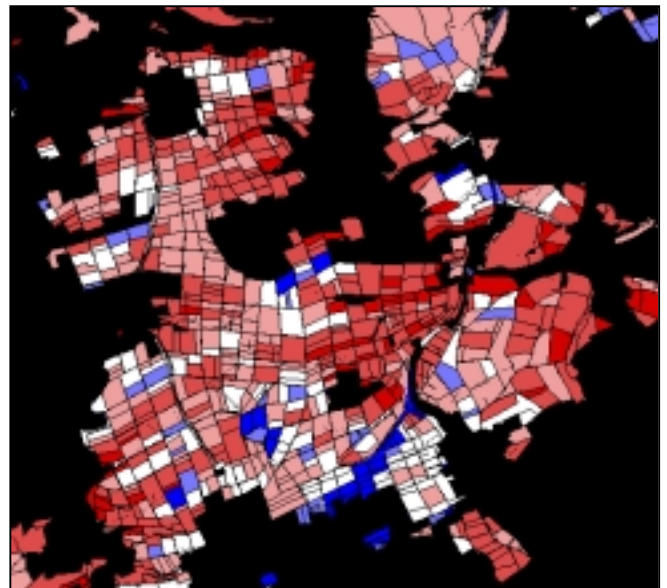
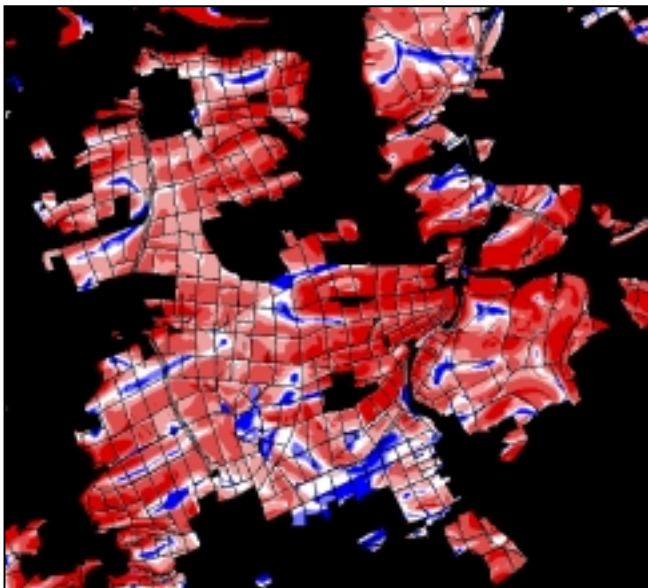
Das folgende Beispiel (Abbildung 55, nächste Seite) zeigt, welche Standorte im Untersuchungsgebiet für bestimmte Nutzungsweisen geeignet sind und bei welchen zusätzliche Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen. Dabei wurden die erlaubten Nutzungsweisen für zwei unterschiedliche A_{Max} – Werte berechnet: für 1t/ha/Jahr bzw. für 3t/ha/Jahr.

Abbildung 55:

Erlaubte Nutzungsweisen bei verschiedenen Abtragungsgrenzen



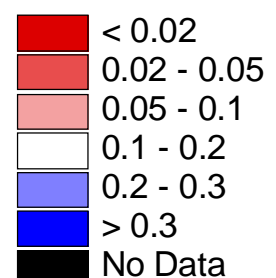
Mögliche Nutzungsweisen bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 3t/ha/Jahr



Mögliche Nutzungsweisen bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 1t/ha/Jahr

Erläuterungen zu Abbildung 55:

Die oberen Abbildungen zeigen die Eignung für bestimmte Nutzungsweisen. Um den maximal erlaubten Bodenabtrag von 1t/ha/Jahr (unten) bzw. 3t/ha/Jahr (oben) zu unterschreiten, müssen die Nutzungsweisen unter den entsprechenden Werten von $(C*P)_{Max}$ liegen. Erreichen sie höhere Werte, dann wird die Höchstgrenze beim Bodenabtrag überschritten. Bei den linken Abbildungen wurden die Werte punktgenau ermittelt, bei den rechts stehenden auf ganze Felder bezogen. Die Feldgrenzen auf der rechten Seite wurden aus einem Satellitenbild abdigitalisiert (Quelle: D-SAT 2 von Topware) und sollen nur die Anwendbarkeit auf ganze Flächen illustrieren. Da das Datum der Satellitenaufnahmen nicht bekannt war und vermutlich in den frühen 80er Jahren anzusetzen ist, entsprechen die Nutzungsflächen mit Sicherheit nicht mehr der heutigen Situation.

 $(C*P)_{Max}$ 

Wie Abbildung 55 zeigt, steigt mit zunehmendem A_{Max} die Anzahl der erlaubten Nutzungsweisen.

Bei einer Höchstgrenze von 1t/ha/Jahr könnte auf vielen **Feldern** (Abbildung 55, rechte Seite) keine konventionelle Landwirtschaft mehr betrieben werden, da $(C*P)_{\text{Max}}$ – Werte von unter 0.02 nur bei Futterwiesen oder mit sehr erosionsschonenden Anbaumethoden (Mulchsaat, o.ä.) zu erreichen sind. Im Gegensatz dazu bieten Höchstgrenzen von 3t/ha/Jahr mehr Spielraum. Auf beinahe allen abdigitalisierten Parzellen wäre hier eine konventionelle Landwirtschaft möglich. Für erosionsfördernde Kulturen stünden darüber hinaus genügend alternative Flächen an anderen Standorten zur Verfügung.

Wird dagegen eine Reduzierung der Bodenverlagerung **innerhalb einzelner Felder** (Abbildung 55, linke Seite) angestrebt, dann gelten diese Schlußfolgerungen nicht mehr. Ein Bodenabtrag von unter 3t/ha/Jahr ist hier an vielen Standorten nur noch mit erosionsschonenden Anbauweisen möglich. Bei 1t/ha/Jahr ist der Spielraum verschiedener Anbaumethoden dagegen erschöpft. In diesem Fall müßten zusätzliche Maßnahmen zur Senkung der Abflußmenge und des L-Faktors ergriffen werden, wie z.B. die Schaffung von Feldrainen oder Streifensaaten an Standorten mit hoher Reliefenergie. Da jedoch diese notwendigen hydrologischen Barrieren eine rationelle Bearbeitung erschweren, sollten sie nur äußerst sparsam eingesetzt werden. Auch hier bieten Bodenerosionsprognosen entscheidende Hilfestellungen, weil sie diejenigen Gebiete zeigen, in denen hydrologische Barrieren den maximalen Nutzen bringen. In Abbildung 55 wären dies beispielsweise alle Flächen mit einem $(C*P)_{\text{Max}}$ – Wert von unter 0.02 (bei $A_{\text{Max}} = 1\text{t/ha/Jahr}$) bzw. von unter 0.05 (bei $A_{\text{Max}} = 3\text{t/ha/Jahr}$). Über diesen Flächen ist das energetische Potential des Oberflächenabflusses am größten und daher sind dort hydrologische Barrieren auch effektiver als anderswo.

Wie einschneidend vorbeugende Schutzmaßnahmen sein müssen, hängt immer von der lokalen Topographie und den maximal zulässigen Abtragshöchstgrenzen ab. Obwohl im oberen Beispiel nur mit zwei unterschiedlichen Höchstgrenzen (1t/ha/Jahr und 3t/ha/Jahr) gearbeitet wurde, sind auch andere Grenzwerte denkbar. So fordern SCHWERTMANN et al. (1990) und MARKS et al. (1992) **unterschiedliche Höchstgrenzen in Abhängigkeit von der Profiltiefe**. Bei mächtigen Parabraunerden wären demnach 10t/ha/Jahr erlaubt, über flachen Pararendzinen nur 1t/ha/Jahr. Es ist aber fraglich, ob für tiefgründige Böden wirklich höhere Grenzwerte gelten sollen. Denn zum einen werden auch bei einer geringfügigen Kappung die ökologischen Funktionen der mitteleuropäischen Schichtungsböden schwerwiegend beeinträchtigt, zum anderen sind flachgründige Böden nicht unbedingt schützenswerter als tiefgründige. Gerade unter ökonomischen Gesichtspunkten sollten die tiefgründigen Parabraunerden verstärkt bewahrt werden, da auf ihnen die höchsten Erträge zu erzielen sind. Jenseits der unterschiedlichen Ansichten zum Bodenbestandsschutz muß jedoch auch berücksichtigt

werden, daß ein Großteil der Erosionsschäden weit entfernt vom Abtragsort auftritt (Eutrophierung, Gewässerverschmutzung o.ä.). Um diese sogenannte Offsite-Schäden zu reduzieren, sind **einheitliche und relativ niedrige Grenzwerte** notwendig. Über die genaue Höhe des tolerierbaren Bodenabtrags herrscht jedoch auch hier Uneinigkeit. VOGL (1995) fordert zwar eine generelle Höchstgrenze von 1t/ha/Jahr, doch in Abhängigkeit von spezifischen Teilproblemen und ökonomischen Erwägungen sind auch andere Grenzwerte denkbar (vgl. AUERSWALD/SCHMIDT 1986, S.44f, AUERSWALD 1991). Ein maximal tolerierbarer Bodenabtrag von 1t/ha/Jahr dürfte unter ökologischen Gesichtspunkten insgesamt die sinnvollste Lösung sein, praktisch durchsetzbar sind solch strenge Werte jedoch kaum. Selbst bei einem relativ flachen Relief wie im Untersuchungsgebiet sind 1t/ha/Jahr nur durch massive Einschränkungen und Auflagen zu erreichen. Ein weniger scharfer Höchstwert wie 3t/ha/Jahr ist in der Praxis leichter umsetzbar (vgl. Abbildung 55) und politisch weniger brisant. Auf lange Sicht und unter dem Aspekt des Gewässerschutzes dürften aber strenge Höchstgrenzen im Bereich von 1t/ha/Jahr unumgänglich sein.

7.2 Weitere potentielle Anwendungen

Obwohl die Erosionsgleichungen RUSLE und MUSLE 87 ursprünglich zu Zwecken des Bodenbestandschutzes entwickelt wurden, können sie auch auf anderen Gebieten nützliche Dienste leisten. Da der Bodenabtrag eng mit dem Oberflächenabfluß und dem Stofftransport verknüpft ist, erlauben die prognostizierten Werte von A_i , $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$, und $A_{\text{Saldo } i}$ Rückschlüsse auf wichtige Vorgänge in der Landschaft. Aus der Vielzahl an möglichen Anwendungen sollen nur einige exemplarisch genannt werden:

1. Genauere Bodenkartierungen

Stoffbilanzierungen mit der revidierten MUSLE 87 können eine wertvolle Hilfe bei der Aufnahme von Bodenprofilen im Gelände sein. Sie liefern dem Kartierer eine genauere Grundvorstellung über das Auftreten bestimmter Böden (gekappte Bodenprofile oder Kolluvien). Dadurch kann das Gelände gezielter beprobt werden und die Zahl der notwendigen Bohrungen verringert sich. Auch bei der späteren Erstellung einer Bodenkarte sind Stoffbilanzierungen nützlich. Grenzen zwischen Kolluvien und anderen Böden können damit viel objektiver festgelegt werden, als dies bei bisherigen Bodenkartierungen der Fall war. Trotz ihres unbestreitbaren Nutzens darf jedoch eines nicht vergessen werden. Stoffbilanzierungen prognostizieren Sedimentationen und Profilverkürzungen unter ausschließlicher Berücksichtigung der potentiellen Abflußmenge und -intensität. Insofern ist

das Ergebnis ein theoretischer Wert, der nicht in jedem Falle mit der Realität übereinstimmen muß. Ohne eine umfassende Sachkenntnis über geoökologische Zusammenhänge sind mit Stoffbilanzierungen gravierende Fehlteile möglich.

2. Rückschlüsse über verborgene Einflüsse im Gelände

Stoffbilanzierungen auf Basis der revidierten MULSE 87 liefern theoretische Werte unter Annahme zweier grundlegender Voraussetzungen:

- Es findet eine ungestörte Entwicklung statt.
- Neben dem Oberflächenabfluß gibt es keine weiteren Einflüsse, welche die Entwicklung von Kolluvien und gekappten Bodenprofilen bestimmen.

Starke und langanhaltende Abweichungen von diesen Grundvoraussetzungen führen dazu, daß prognostizierte und reale Werte nicht übereinstimmen, vor allem im Fall gekappter Bodenprofile. In dieser Situation kann ein Vergleich zwischen prognostizierten und realen Werten wichtige Rückschlüsse über bestimmte Einflüsse und Entwicklungen liefern. So können beispielsweise bei **historischen Untersuchungen** langanhaltende Nutzungen besser nachgewiesen werden. Ein stark gekapptes Bodenprofil an einer Position mit nur mäßiger Erosionsgefährdung signalisiert, daß dort über einen sehr langen Zeitraum Ackerbau betrieben wurde. Mit herkömmlichen Untersuchungsmethoden sind Nachweise dieser Art oft nicht möglich: Anthropogene Spuren wie Pebble Tools gibt es über gekappten Profilen nicht und historische Dokumente decken meist nur einen Zeitraum von wenigen Jahrhunderten ab.

3. Analyse periglazialer Deckschichten in Agrargebieten

Auch in den neuesten Bodenkarten fehlen flächendeckende Angaben über das Auftreten und die Dicke anstehender Deckschichten. In Agrargebieten wurden die periglazialen Schuttdecken bereits an vielen Standorten nennenswert verkürzt. Von ihnen hängen jedoch wichtige Bodenfunktionen ab. Genauere Daten liefern jedoch nur die punktuell untersuchten Einzelprofile, die nicht ohne weiteres auf die gesamte Fläche übertragen werden können. Mit vorherigen Stoffbilanzierungen kann jedoch auf Basis der untersuchten Einzelprofile eine flächenhafte Deckschichtenkarte erstellt werden. Dabei dienen die Einzelprofile als Datengrundlage, eine Karte der prognostizierten Stoffbilanz als Interpolationshilfe.

4. Bestimmung von Verarmungs- und Eutrophierungszonen im Gelände

Verlagerte Bodensedimente verursachen am Ort ihrer Ablagerung i.d.R. eine Eutrophierung, während über gekappten Profilen der Boden an Nährstoffen verarmt. Stoffbilanzierungen erfassen das quantitative Ausmaß dieser Veränderungen und ermöglichen

dadurch die Entwicklung umfassender Schutzkonzepte und angepaßter Nutzungsweisen, wie z.B. eine bedarfsorientierte Düngung durch Methoden des Precision Farmings.

5. Vorbeugender Gewässerschutz

Tiefenlinien und Senken sind in vielen mitteleuropäischen Landschaften von äußerst wasserdurchlässigem Gestein unterlagert (Dolinen im Karst, Pleistozäne Schotter in Glaziallandschaften, o.ä.). Hier kann belastetes Oberflächenwasser sehr leicht in grundwasserführende Schichten übertreten und damit weitreichende Probleme verursachen. Mit Stoffbilanzierungen und normalen Erosionsprognosen kann ermittelt werden, wo und in welchem Umfang vorbeugende Schutzmaßnahmen einzusetzen sind. Eine Stoffbilanzierung zeigt dabei, an welchen Orten sich das belastete Oberflächenwasser konzentriert, eine Erosionskarte die wichtigsten Liefergebiete. Anhand dieser prognostizierten Daten lassen sich konkrete Schutzmaßnahmen ermitteln. Die dafür notwendige Strategie würde aus 3 aufeinanderfolgenden Schritten bestehen:

1. Direkte Messung der Belastung von Grund- bzw. Oberflächenwasser am Entnahmepunkt. Bei einer hohen Belastung müßte der nächste Schritt durchgeführt werden.
2. Bestimmung der am stärksten belasteten Senken mit einer Stoffbilanzierung auf Basis der revidierten MUSLE 87. Liegen diese Senken über stark durchlässigem Gestein, dann müßte der nächste Schritt durchgeführt werden.
3. Bestimmung derjenigen Standorte im Einzugsgebiet, von denen die höchsten Stoffmengen exportiert werden. Zur Vermeidung von weiteren Schäden müßten an diesen Standorten erosionsmindernde Maßnahmen ergriffen bzw. der Düngemittelaustrag minimiert werden.

6. Berechnung von Flußfrachten und –ablagerungen

Prognostizierte Werte von $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$ zeigen die Menge an Bodenmaterial, welche den jeweiligen Standort am Ende verläßt. Werden sie am Rand eines Flußverlaufs ermittelt, dann kann damit die Bodenmenge bestimmt werden, die letztendlich in das Flußbett verfrachtet wird.

Neben den beschriebenen Beispielen sind noch eine Unzahl an weiteren Anwendungen für Erosionsprognosen nach der RUSLE und MUSLE 87 denkbar. Eine detaillierte Übersicht an praktischen Beispielen bieten TOY/OSTERKAMP (1995). Da mit beiden Gleichungen wichtige Parameter des Stofftransports- und Landschaftshaushalts erfaßt werden, dürften sie für fast alle geoökologischen Fragestellungen in der einen oder anderen Weise von großem Nutzen sein.

8. Schlußwort

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Prognosekonzepte zur Bewertung der Bodenerosion mit einem Geographischen Informationssystem umgesetzt und auf ihre Plausibilität überprüft. Es zeigte sich, daß vereinfachende Bewertungskonzeptionen ungeeignet sind, den Bodenabtrag und die damit ausgelösten Schäden genau zu erfassen. Hochwertige Prognosen des Bruttobodenabtrags und der Stoffbilanz sind nur mit genauen Abflußdaten möglich.

Herkömmliche GIS – Programme und ihre einfachen Single Flow Algorithmen lassen aber eine genaue Abflußanalyse nicht zu. Ohne Programmierkenntnisse oder zusätzliche Software scheitert daher eine genaue Bodenerosionsprognose schon im Ansatz. Die Folgen dieses Mißstandes zeigen sich in der Praxis auf zweierlei Weise:

- Es werden ungenaue Erosionsprognosen durchgeführt.
- Die Gültigkeit einer Erosionsgleichung kann nicht ausreichend überprüft werden.

Aus diesen Gründen bewegen sich viele Erosionsprognosen und –gleichungen in einem beinahe luftleeren Raum fernab der Realität. Methodische Fehler werden nicht entdeckt, weil Kontrollen mit den wirklichen Verhältnissen im Gelände nicht auf breiter Basis stattfinden können. Mit der beiliegenden Software FLOW 95 sind dagegen genaue Abflußanalysen und fehlerfreie Umsetzungen der RUSLE und MUSLE 87 möglich. Dadurch können beide Erosionsgleichungen in unterschiedlichsten Landschaften überprüft werden. Da nur die MUSLE 87 eine direkte Kontrolle anhand von Bodenprofilen zuläßt, konnte auch nur sie in dieser Arbeit überprüft werden. Es zeigte sich, daß die MUSLE 87 einen schwerwiegenden logischen Fehler aufweist und alle bisherigen Stoffbilanzierungen auf Basis der MUSLE 87 korrigiert werden müssen. Durch eine kleine Modifikation sind aber mit der MUSLE 87 Stoffbilanzierungen möglich, die mit den realen Verhältnissen im Gelände sehr gut übereinstimmen.

Exakte Prognosen des Bruttobodenabtrags und der Stoffbilanz sind vielseitig einsetzbar. Mit ihnen lassen sich nicht nur wirksame Schutzstrategien gegen die Bodenerosion entwickeln, sondern sie liefern auch wertvolle Daten bei anderen geoökologischen und praktischen Fragestellungen. Ob für Bodenkartierungen, historische Untersuchungen oder im Gewässerschutz, fast überall bringt der Einsatz von RUSLE und MUSLE 87 einen bedeutenden Informationsgewinn. Dennoch müssen die Ergebnisse in jedem Fall hinterfragt werden, da beide

Erosionsgleichungen nur wenige Größen berücksichtigen und von einer ungestörten Entwicklung unter den heutigen Bedingungen ausgegangen wird. Insofern sind Erosionsprognosen nur eine wichtige Ergänzung bei der Analyse geökologischer Sachverhalte. Da sie auf unterschiedliche Weise interpretiert werden können und ferner die Qualität der Ausgangsdaten berücksichtigt werden muß, steht und fällt ihr Nutzen mit dem geökologischen Sachverstand des Interpreten.

Obwohl Erosionsgleichungen RUSLE und MUSLE 87 nicht der allerneueste Schrei in der Erosionsforschung sind, sind ihre Tage deswegen noch lange nicht gezählt. Physikalische Erosionsgleichungen wie das in den USA entwickelte Modell WEPP 97 verlangen eine zu hohe Datenqualität. Genaue Ausgangsdaten sind jedoch nur in den wenigsten Fällen flächendeckend vorhanden und müssen normalerweise erst unter hohem Kostenaufwand gewonnen werden. Insofern stellt sich die Frage, ob eine weitere Verbesserung von Erosionsgleichungen überhaupt sinnvoll ist und die verfügbaren Ressourcen nicht eher zur Erweiterung des Datenbestandes und bestehender GIS – Software genutzt werden sollten. Eine Erosionsgleichung, die nur durch selbsterstellte Analyseprogramme umgesetzt werden kann, wird niemals auf breiter Basis eingesetzt werden.

Trotz der enormen Möglichkeiten von Bodenerosionsprognosen sollte man ihren eigentlichen Zweck niemals aus den Augen verlieren. Die genaueste Prognose bleibt nutzlos, wenn die notwendigen Schutzmaßnahmen nicht im Gelände umgesetzt werden. Viel wichtiger als umfangreiche Erosionsprognosen sind konkrete Maßnahmen vor Ort. Insofern sind Erosionsprognosen lediglich nützliche Werkzeuge. Ob sie letztendlich auch zu konkreten Erosionsschutzmaßnahmen führen, steht auf einem anderen Blatt.

9. Literaturverzeichnis

AG BODEN (1994):

Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl. Hannover.

AHNERT, F.(1996):

Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart.

ANONYMOUS (1984):

The USLE: Some reflections. Walter H. Wischmeier talks about the USLE's development and use. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 39.Jg., H.2, S.105-107.

AUERSWALD, K. (1987):

Sensivität erosionsbestimmender Faktoren. In: *Wasser und Boden*, 1987, H.39, S.34-38.

AUERSWALD, K. (1991):

Onsite- und Offsite-Schäden durch Bodenerosion. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (= Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.75-82.

AUERSWALD, K. (1992):

Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen unter deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG). In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 1992, H.33, S.137-144.

AUERSWALD, K.; FLACKE, W.; NEUFANG, L. (1988):

Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten. Modellgrundlagen der dABAG. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1988, H.151, S.369-373.

AUERSWALD, K.; FLACKE, W.; NEUFANG, L. (1990):

Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a Digital Terrain Model for Computing High Resolution Maps of Soil Loss Resulting from Rainwash. In: *Catena*, 1990, H.17, S.383-397.

AUERSWALD, K.; JUNG, W. (1991):

Erstellung hochauflösender Erosionsprognosekarten mit Hilfe der dABAG. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1991, H.61, S.9-12.

AUERSWALD, K.; SCHMIDT, F. (1986):

Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. München (Bayerisches Geologisches Landesamt). (= GLA-Fachberichte. 1).

AUERSWALD, K.; WESTROP, J.; JUNG, W.D. (1994):

Eignung der mit DGM/GIS geschätzten Hangneigungen für die Erosionsprognose. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1994, H.74, S.75-76.

BARTH, B. (1997):

Bodenerosionssimulation mit GIS. Untersuchungen auf repräsentativen saarländischen Ackerstandorten. Saarbrücken, Geographisches Institut, Dissertation. (= Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität des Saarlandes, Bd. 43).

BARTHELME, N. (1988):

GIS Technologie. Geoinformationssysteme, Landinformationssysteme und ihre Grundlagen. Berlin, Heidelberg.

BARWINSKY, K.; HARBECK, R. (1990):

Die topographische Information als Basis raumbezogener Informationssysteme. In: *Geo-Informationssysteme (GIS)*, 1990, H.4, S.1-2.

BILL, R. (1996):

Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Heidelberg.

BILL, R.; FRITSCH, D. (1991):

Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software, Daten. Karlsruhe.

BLASZCZYNSKI, J. (1992):

Regional soil loss prediction utilizing the RUSLE/GIS interface. Aus: Johnson, A.I.; Petterson, C.B.; Fulton, J.L. (editors) (Hrsg.): *Geographic information systems (GIS) and mapping. Practices and standards*. Philadelphia (USA) (ASTM). (= ASTM Special Technical Publication. 1126) S.122-131.

BORK, H.-R. (1991):

Bodenerosionsmodelle - Forschungsstand und Forschungsbedarf. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (= Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.51-67.

BORK, H.R.; HENSEL, H. (1988):

Computer aided Construction of Soil Erosion and Deposition Maps. In: *Geologisches Jahrbuch, Reihe A*, Jg.1988, H.104, S.357-371.

BORK, H.R.; SCHRÖDER, A. (1996):

Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. Aus: Blume, H. P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R. u.a. (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*. Landsberg/Lech. S.1-43 (Kap.6.3.5).

BUCK, A. (1996):

Bestimmung des Bodenerosionspotentials mit Hilfe der Fernerkundung und digitaler Zusatzdaten im Landschaftsschutzgebiet der "Sächsischen Schweiz". Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut, Diplomarbeit.

DARRAH, K.S.; ROSS, D. (1997):

Application and comparison of the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the Revised USLE (RUSLE) on a construction site in Summit County, Ohio. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 52.Jg., H.4, S.300-301.

DE ROO, A.P.J. (1993):

Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. Validity and applicability of the 'ANSWERS' model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands) and one in Devon (UK). Utrecht (Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht) (= Nederlandse Geografische Studies. 157).

DE ROO, A.P.J. (1996):

Soil erosion assessment using G.I.S. In: *Water Science and Technology Library*, 1996, H.26, S.339-356.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. (1995):

GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape. A comparison of model results with soil map information. In: *Catena*, 1995, H.25, S.389-401.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. (1996a):

A GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS faktor on topographically complex landscape units. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 51.Jg., H.5, S.427-433.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. (1996b):

Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and their Implications for Predicting Ephemeral Gullies. In: *International Journal of GIS*, 1996, H.10, S.311-331.

DIETZ, T. (1982):

Praxisnahe Lösungsmöglichkeiten für die Einschränkung der Bodenerosion. Aus: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) (Hrsg.): *Bodenerosion. Ursachen des Bodenabtrags und Gegenmaßnahmen*. Frankfurt a.M.. (= Arbeiten der DLG. 174) S.17-36.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR FERNSTUDIENFORSCHUNG AN DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN**(Hrsg.) (1997):**

Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse. Ein interdisziplinäres Studienbuch. Berlin, Heidelberg, New York.

DIKAU, R. (1989):

The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. Aus: Raper, J. (Hrsg.): *Three dimensional applications in Geographical Information Systems*. London, New York, Philadelphia. S.51-77.

DIKAU, R. (1992):

Aspects of constructing a digital geomorphological base map. In: *Geologisches Jahrbuch, Reihe A*, 1992, H.122, S.357-370.

DIKAU, R. (1993):

Geographical Information Systems as Tools in Geomorphology. In: *Zeitschrift für Geomorphologie - SUPPLEMENTBAND*, 1993, H.92, S.231-239.

GÜNDRA, H.; JÄGER, S.; SCHROEDER, M.; DIKAU, R. (1995):

Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg. Stuttgart. (= Agrarforschung in Baden-Württemberg. 24).

DISSMEYER, G.F.; FOSTER, G.R. (1980):

A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. Atlanta (USA) (= USDA Forest Service Technical Publications SA-TP).

DRAEYER, D. (1995):

Bestimmung der Bodenerosionsgefährdung unter Verwendung amtlicher GIS-Daten. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 134.Jg., H.4, S.201-214.

SCHIRMER, H. (1955):

Mittlere Jahressummen des Niederschlags (mm) für das Gebiet der Bundesrepublik. Zeitraum 1891-1930, Maßstab 1:200000 (45 Karten und 1 Übersichtskarte). Bad Kissingen.

DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1979):

Das Klima der Bundesrepublik Deutschland. Lieferung 1: Mittlere Niederschlagshöhen für Monate und Jahr - Zeitraum 1931-1960. Offenbach a.M. (Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes).

EASTMAN, J.R. (1995):

IDRISI for Windows. User's Guide Version 1.0. Worcester, MA (USA).

ERDMANN, K.H.; ROSCHER, S. (1991):

Untersuchungen zur Bodenerosion im Bonner Raum unter Einsatz eines geographischen Informationssystems. In: *Arbeiten Rheinische Landeskunde*, 1991, H.60, S.93-104.

ESRI (1991):

Cell-based Modelling with GRID 6.0. Analysis, display and management. Redlands (USA).

ESRI (1991a):

GRID 6.0 Command References. Redlands (USA).

ESRI (1992):

Cell-based Modeling with GRID 6.1. Supplement - Hydrologic and distance modeling tools. Redlands. (= Arc/Info User's Guide).

ESRI (1994):

PC Arc/Info. The world's leading Desktop Geographic Information System. Redlands.

ESRI (1995):

Understanding GIS. The Arc/Info Method. 3rd edition. Redlands.

ESRI (1996):

ArcView GIS. The Geographic Information System for Everyone. Redlands.

ESRI (1996a):

ArcView Spatial Analyst. Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. Redlands.

ESRI (1996b):

Avenue. Customization and Application Development for ArcView. Redlands.

ESRI (1996c):

Data Automation Kit. Redlands.

FERREIRA, V.A.; WEESIES, D.C.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. (1995):

The site and condition specific nature of sensitivity analysis. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.5, S.493-497.

FLECK, W. (1995):

Ermittlung von K-Faktoren. Reichsbodenschätzung und Bodenbestandsaufnahme. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg) (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.56-67.

FOSTER, G.R.; WISCHMEIER, W.H. (1974):

Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction. In: *Transactions of the ASAE*, 1974, H.17, S.305-309.

FRIEDRICH, K. (1993):

Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung Digitaler Höhenmodelle für ein Bodeninformationssystem in Hessen. In: *Geologisches Jahrbuch Hessen*, 1993, H.121, S.151-168.

FRIELINGHAUS, M. (1996):

Erosionsformen. Aus: Blume, H. P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R. u.a. (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*. Landsberg/Lech. S.1-21 (Kap. 6.3.1.2.).

FROELICH, J.; DRAEYER, D.; HUBER, M. (1994):

GIS-Methoden in der landschaftsökologischen Raumbewertung mit einem Beispiel zur Bestimmung der Bodenerosionsgefährdung. In: *Die Erde*, 125.Jg., H.1, S.1-13.

GARDNER, T.W.; CONNORS-SASOWSKI, K.; DAY, R.L. (1990):

Automated extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. In: *Zeitschrift für Geomorphologie - SUPPLEMENTBAND*, 1990, H.80, S.57-68.

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1963):

Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000. Blatt 7519 Rottenburg. Freiburg i.B..

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1969):

Geologische Karte von Tübingen und Umgebung 1: 50000. Freiburg i.B..

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1990):

Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:25000. Blatt 7519 Rottenburg. Freiburg i.B..

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1992):

Bodenkarte von Baden Württemberg 1:25000. Tabellarische Erläuterung Blatt 7519 Rottenburg. Freiburg i.B..

GEYER, O. F.; GWINNER, M. P. (1986):

Geologie von Baden-Württemberg. 3. Auflage. Stuttgart.

GOLD, C.M. (1989):

Surface interpolation, spatial adjacency and GIS. Aus: Raper, J. (Hrsg.): *Three dimensional applications in Geographical Information Systems*. London, New York, Philadelphia. S.21-35.

GOUDIE, A. (1994):

Mensch und Umwelt. Eine Einführung. Heidelberg, Berlin, Oxford. S.179-198.

GOUDIE, A. (1995):

The Changing Earth. Rates of geomorphological processes. Oxford. S.123-174.

GRIFFIN, M.L.; BEASLEY, D.B.; FLETCHER, J.J.; FOSTER, G.R. (1988):

Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 43.Jg., H.6, S.326-331.

GRISSINGER, E.H. (1996):

Rill and Gullies Erosion. Aus: Agassi, M. (Hrsg.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York. S.153-168.

HAIDER, J. (1995):

Faktoren der ABAG und dABAG. Bestimmung und Genauigkeit. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU BadenWürttemberg) (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.37-55.

HALLAM, C.A.; SALISBURY, J.M. (1996):

GIS and watershed analysis - not just for mapping anymore. In: *American Water resources Association Technical Publication Series TPS*, 96.Jg., H.3, S.317-326.

HASSENPFUG, W. (1992):

Winderosion. Aus: Blume, H.P. (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes. Bödenökologie und -belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 2. Auflage*. Landsberg/Lech (ecomed). S.183-197.

HENSEL, H. (1991):

Verfahren zur EDV-gestützten Auswertung der Bodenerosionsgefährdung von Hängen und Einzugsgebieten. Berlin (Technische Universität Berlin). (= Bodenökologie und Boden-genese. 2).

JÄGER, S. (1995):

1. Fassung Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg. Aussagemöglichkeit kleinmaßstäblicher Betrachtungen. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.109-127.

JAMSA, K.; KLANDER, L. (1998):

1001 Visual Basic 5.0 Programmier tips. Bonn.

KAGERER, J. (1995):

Erstellung von Erosionsprognosekarten mit dem Modell dABAG. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (=Materialien zum Bodenschutz. 4) S.32-36.

KAINZ, M. (1991):

Schutzmaßnahmen gegen Bodenerosion. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (=Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.83-98.

KAPPAS, M.; SCHWETER, M. (1997):

Untersuchung der Erosionsgefährdung in Agrarlandschaften mit dem geographischen Informationssystem IDRISI. Server der Uni Salzburg (www.sbg.ac.at/geo/idrisi/beitraeg/kappas.htm).

KIEFER, L. (1995):

Erosionsgefährdungskarten in der Flurneuordnung. Herstellung, Anwendung und Erfahrungen. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.68-76.

KLEEFISCH, B.; KOETHE, R. (1993):

Wege zur rechnergestützten bodenkundlichen Interpretation digitaler Reliefdaten. In: *Geologisches Jahrbuch, Reihe F: Bodenkunde*, 1993, H.27, S.59-122.

KÖSEL, M. (1996):

Der Einfluß von Relief und periglazialen Deckschichten auf die Bodenausbildung im mittleren Rheingletschergebiet von Oberschwaben. Universität Tübingen, Geographisches Institut, Dissertation.

KRETZSCHMAR, R. (1992):

Wassererosion. Aus: Blume, H.P. (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes. Bödenökologie und –belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen*. 2. Auflage. Landsberg/Lech. S.165-183.

KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGGER, G. (1994):

Bodenkunde. 5. Auflage. Stuttgart.

SCHMIDT, A. (1964):

Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000. Erläuterungen zu Blatt 7519 Rottenburg. (Nachdruck von 1964). Stuttgart (Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).

LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995):

Topographische Karte 1:25000. Blatt 7519 Rottenburg a.N. (Normalausgabe, 3.Auflage). Stuttgart.

LESER, H. (1977):

Feld- und Labormethoden der Geomorphologie. Berlin, New York.

LESER, H. (1986):

Bodenerosion - Erforschung eines geoökologischen Prozesses. In: *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, 1986, H.11, S.1-17.

LESER, H.; PRASUHN, V. (1990):

Möglichkeiten der Erosionsschadenskartierung im Felde und daraus entwickelte Schadens- und Gefährdungskarten. Überlegungen zu deren methodischen und arbeitstechnischen Prinzipien. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1990, H.61, S.25-32.

LO KWONG, F.A. (1995):

Erosion assessment of large watersheds in Taiwan. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.2, S.180-183.

MARKS, R.; MÜLLER, M.J.; LESER, H.; KLINK, H.-J. (1992):

Anleitung zur Bewertung des Landschaftshaushaltes (BALVL). 2.Auflage. Trier. (= Forschungen zur deutschen Landeskunde. 229)

MEYER, L.D. (1984):

Evolution of the universal soil loss equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 1984, H.2, S.99-104.

MITCHELL, J.K.; BUBENZER, G.D. (1980):

Soil Loss Estimation. Aus: Kirkby, M.J.; Morgan, R.P.C. (Hrsg.): *Soil Erosion*. Norwich (England). (= British geomorphological research group) S.17-62.

MOSIMANN, T. (1993):

Bodenschutzkonzepte. In: *Geographische Rundschau*, 45.Jg., H.6, S.336-373.

MOORE, I.D.; BURCH, G.J. (1986):

Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. In: *Soil Science Society of America Journal*, 1986, H.50, S.1294-1298.

MOORE, I.D.; BURCH, G.J. (1986a):

Modeling Erosion and Deposition: Topographic Effects. In: *Transactions of the ASAE*, 1986, H.29, S.1624-1630.

MÜLLER, S. (1976):

Zur Quantifizierung der Erosions-Schutzwirkung des Waldes. In: *Allgemeine Forstzeit-schrift*, 1976, H.31, S.317-318.

MURSCHEL, B.; CLEMENS, G. (1995):

Abschätzung der Bodenerosion durch Feldversuche und modellanalytische Ansätze. Ermittlung von K-Faktoren. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.128-147.

NEARING, M.A.; LANE, L.J.; LOPES, V.L. (1994):

Modeling Soil Erosion. Aus: Lal, T. (Hrsg.): *Soil erosion research methods*. 2.Auflage. Del Ray Beach (USA). S.127-156.

PRASUHN, V.; SCHAUB, D. (1997):

Bodenerosionskarte der Schweiz. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1997, H.83, S.115-118.

PÉCSI, M.; RICHTER, G. (1996):

Löss. Herkunft – Gliederung – Landschaften. Berlin, Stuttgart. (= Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Supplementband 98).

QUINN, P.F.; BEVEN, K.J.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. (1991):

The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. In: *Hydrological Processes*, 1991, H.5, S.59-79.

RAZAVI, A.H. (1997):

ArcView GIS/Avenue Developer's Guide. Second Edition. Santa Fe (USA).

REHFUESS, K.E. (1990):

Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2. Auflage. Hamburg, Berlin.

RENARD, K.G.; FERREIRA, V.A. (1993):

RUSLE model description and database sensitivity. In: *Journal of Environmental Quality*, 22.Jg., H.3, S.485-466.

RENARD, K.G.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. (1996):

Soil Loss Estimation. Aus: Agassi, M. (Hrsg.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York. S.169-202.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J.P. (1991):

RUSLE. Revised Universal Soil Loss Equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 46.Jg., H.1, S.30-33.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A. (1997):

Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Draft August (USA) (US Department of Agriculture). (= Agriculture Handbook. 703).

RENARD, K.G.; LAFLEN, J.M.; FOSTER, G.R.; MCCOOL, D.K. (1994):

The Revised Universal Soil Loss Equation. Aus: Lal, T. (Hrsg.): *Soil erosion research methods*. 2.Auflage. Del Ray Beach (USA). S.105-124.

RICHTER, G. (1965):

Bodenerosion. Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. Bonn Bad Godesberg.

RICHTER, G. (1980):

Über das Bodenerosionsproblem in Mitteleuropa. In: *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 1980, H.54, S.1-37.

ROHR, W.; MOISMANN, Th.; BONO, R.; RÜTTIGMANN, M.; PRASHUN, V. (1990):

Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen. Basel. (= Basler Beiträge zur Physiogeographie. 14).

ROSCHER, S.; ERDMANN, K.H. (1991):

Der Einsatz eines geographischen Informationssystems in der Bodenerosionsforschung. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 66.Jg., H.2, S.1013-1016.

ROSNER, H.J. (1997):

Verarbeitung geographischer Daten. Methodische Bausteine zu Statistik und GIS. Tübingen. (Eberhard-Karls Universität Tübingen). (= Kleinere Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität Tübingen).

SAVABI, M.R.; FLANAGAN, D.C.; HEBEL, B.; ENGEL, B.A. (1995):

Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.5, S.477-483.

SCHÄFER, W.; NEEMANN, W.; KRUSE, B. (1991):

Bodenerosion durch Wind. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (= Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.37-50.

SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K. (1995):

Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 2. Auflage. Berlin, Wien.

SCHMIDT, J. (1995):

Anwendung des Modells EROSION-2D im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.88-108.

SCHRÖDER, D. (1991):

Ursachen und Ausmaß der Erosion. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (= Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.16-27.

SCHWERTMANN, U. (1982):

Grundlagen und Problematik der Bodenerosion. Aus: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) (Hrsg.): *Bodenerosion. Ursachen des Bodenabtrags und Gegenmaßnahmen*. Frankfurt a.M. (= Arbeiten der DLG. 174) S.9-16.

SCHWERTMANN, U. (1991):

Aktuelle Probleme der Bodenerosion. Eine Einführung. Aus: Schwertmann, U.; Auerswald, K. (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion*. Hamburg. (= Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft. 205) S.9-15.

SCHWERTMANN, U.; VOGL, W.; KAINZ, M. (1990):

Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Auflage. Stuttgart.

SEMMELE, A. (1981):

Landschaftsnutzung unter geowissenschaftlichen Aspekten in Mitteleuropa. Frankfurt a.M. (Goethe-Universität Frankfurt). (= Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D.).

SEMMELE, A. (1983):

Grundzüge der Bodengeographie. 2. Auflage. Stuttgart.

SEMMELE, A. (1986):

Angewandte konventionelle Geomorphologie. Beispiele aus Mitteleuropa und Afrika. Frankfurt a.M. (Goethe-Universität Frankfurt). (= Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D.).

SEMMELE, A. (1993):

Karteninterpretation aus geoökologischer Sicht - erläutert an Beispielen der Topographischen Karte 1:25000. Frankfurt a.M. (Goethe-Universität Frankfurt). (= Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D.).

SHARMA, P.P. (1996):

Interrill Erosion. Aus: Agassi, M. (Hrsg.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York. S.125-152.

SIGLE, M. (1991):

Die Erstellung von Bodenerosionsgefährdungskarten auf der Basis eines digitalen Geländemodells. In: *Geo-Information-Systeme (GIS)*, 1991, H.4, S.2-7.

SIGLE, M. (1995):

Erosionsgefährdungskarten des DGM-Systems SCOP. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.77-87.

SIVERTUN, A. (1993):

Geographical Information Systems (GIS) as a Tool for Analysis and Communication of Multidimensional Data. Umea (Schweden).

STAR, J.; ESTES, J. (1990):

Geographic Information Systems. An Introduction. Englewood Cliffs, New Jersey (USA).

STOCKING, M.A. (1988):

Assessing vegetative cover and management effects. Aus: Lal, R. (Hrsg.): *Soil erosion research methods*. Ankeny (USA). S.162-185.

STROBL, J. (1988):

Reliefanalyse mit dem Computer. Anwendungsmöglichkeiten digitaler Geländemodelle in der physischen Geographie. In: *Geographische Rundschau*, 1988, H.5, S.38-43.

THEOCHAROPOULOS, S.P.; DAVIDSON, D.A.; MCARTHUR, J.N.; TSOULOCHA, F. (1995):

GIS as an aid to soil surveys and land evaluation in Greece. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.2, S.118-124.

TORRI, D. (1996):

Slope, Aspect and Surface Storage. Aus: Agassi, M. (Hrsg.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York. S.77-106.

TOY, T.J.; OSTERKAMP, W.R. (1995):

The applicability of RUSLE to geomorphic studies. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.5, S.498-503.

UNGER, P.W. (1996):

Common Soil and Water Conservation Practices. Aus: Agassi, M. (Hrsg.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York. S.239-266.

VOGL, W. (1995):

Tolerierbare Bodenerosion. Grenzwerte für den Bodenschutz. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.22-31.

VOGL, W.; BECHER, H.H. (1985):

Schätzung der Erodibilität des Bodens (K-Faktor) aus der Körnungsansprache nach der Reichsbodenschätzung. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 1985, H.26, S.179-183.

WEISS, T. (1995):

Triangulated irregular network modells in GIS. Server der Uni Saarbrücken (http://www.uni-sb.de/philmak/fb6/fr66/tpw/gis/tin_dem/tin.htm).

WEISS, T. (1995a):

Gridded digital elevation models in GIS. Server der Uni Saarbrücken (http://www.uni-sb.de/philmak/fb6/fr66/tpw/gis/tin_dem/dem.htm).

WELLER, F. (1995):

Landschaften und Böden in Baden-Württemberg. Aus: LfU Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handbuch Boden: Prognose von Bodenerosion. Workshop*. Karlsruhe (LfU Baden-Württemberg). (= Materialien zum Bodenschutz. 4) S.4-21.

WIESNER, K.P. (1986):

Programme zur Erfassung von Landschaftsdaten, eine Bodenerosionsgleichung und ein Modell der Kaltluftentstehung. Heidelberg (Geographisches Institut der Universität Heidelberg). (= Heidelberger Geographische Arbeiten. 79).

WILSON, J.P. (1986):

Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 41.Jg., H.3, S.179-184.

WISCHMEIER, W.H. (1976):

Use and misuse of the universal soil loss equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 1976, H.31, S.5-9.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. (1978):

Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Washington D.C. (Science and Education Administration USDA). (= USDA Agricultural Handbook No.537).

YODER, D.; LOWN, J. (1995):

The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation*, 50.Jg., H.5, S.484-489.

ZIPF, A. (1996):

Einführung in GIS und ARC/INFO. Heidelberg (Selbstverlag des Geographischen Institutes der Universität Heidelberg).

Benutzte Software für alle GIS-Analysen:

<u>Dateneingabe und -aufbereitung:</u>	<u>GIS-Analysen und Darstellung:</u>
- Micrografx Picture Publisher 95	- IDRISI für Windows 2.0
- Micrografx Designer 95	- ESRI Arc/View 3.0 + Spatial Analyst 1.0
- ESRI PC Arc/Info 3.5	- FLOW 95, programmiert mit Microsoft Visual Basic 5.0 LE
- Microsoft Excel 95	- 3DEM 6.0 (Freeware, erhältlich unter http://www.monumental.com/rshorne)
- StatSoft STATISTICA 4.5	
- Topware D-SAT 2	

10. Anhang

10.1 Datentabelle zur Berechnung der K – Werte aus der Bodenkarte

Legende:

Mit Hilfe dieser erstellten Tabelle wurden die K-Werte im Untersuchungsgebiet berechnet. Die Ausgangsdaten wurden den tabellarischen Erläuterungen zur Bodenkarte 7519 Rottenburg entnommen. Die jeweilige Spaltennummer wird hinter jeder Erläuterung in Klammern angegeben (TE = Tabellarische Erläuterungen).

Einheit: Laufende Nummer der Bodenform aus der Bodenkarte 7519 (vgl. TE, Spalte 2)

Nr.: Laufende Nummer der Kartiereinheit (vgl. TE, Spalte 4). Aus Platzgründen wurden diejenigen Einheiten, die nur einen geringen Flächenanteil (Anteil =1) besitzen zusammengefaßt (GX = X verschiedene Kartiereinheiten mit einem geringen Flächenanteil)

Anteil: Flächenanteil der jeweiligen Bodengruppe an der Gesamtfläche der jeweiligen Bodenform (vgl. TE, Spalte 6)

Gewicht: Relatives Gewicht der jeweiligen Bodengruppe (vgl. Kap. 5.1.3, Tabelle 2)

Bodentyp: Bodengenetische Einheit (vgl. TE, Spalte 13), Werte bei wichtigen und häufigen Bodenformen eingetragen

Schichten: Geologischer Profiltyp oberhalb 10 dm Tiefe (vgl. TE, Spalte 16), Werte nur bei wichtigen und häufigen Bodenformen eingetragen

Nutzung: Anthropogene Nutzungsweise (vgl. TE, Spalte 19, 29 und 30); LN = Landwirtschaft

K: K-Wert in Stufen (vgl. TE, Spalte 41)

K(B): K-Wert (Stufenwert), der bei nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt wird (nur LN, vgl. Kap. 5.1.3)

K(U): Durchschnittlicher K-Wert (Stufenwert) der jeweiligen Untergruppe (vgl. Kap. 5.1.3)

K(G): Durchschnittlicher K-Wert (Stufenwert) der gesamten Bodenform (vgl. Kap. 5.1.3)

K-Wert: Wirklicher K-Faktor nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert	
2	1.1	3	8	Rf*	(De)mo	LN, Wald	4	4	2.7	2.8	0.23	
	1.2			Rf*	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	1.3			Rf*	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	2.1	3	8	B-Rf	(De)mo	LN, Wald	4	4	2.8			
	2.2			B-Rf	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	2.3			B-Rf	(De)mo	LN, Wald	3	3				
	2.4			B-Rf	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	3.1	2	3	Rf	(De)mo "	LN, Wald	3	3	2.8			
	3.2			Rf	(De)mo	LN, Wald	4	4				
	3.3			Rf	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	3.4			Rf	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	4.1	2	3	Bf	(De)mo	LN, Wald	4	4	3			
	4.2			Bf	(De)mo "	LN, Wald	2	2				
	4.3			Bf	(De)mo	LN, Wald	3	3				
	G6	1	1		(De)mo	LN, Wald	2.4	2.4	2.4			
	3	1.1	3	8			nur Wald	3	-	-	2.3	0.17
1.2						nur Wald	4	-				
1.3						nur Wald	2	-				
1.4						nur Wald	2	-				
2.1		3	8			nur Wald	4	-	-			
2.2						nur Wald	3	-				
2.3						nur Wald	2	-				
3.1		2	3			nur Wald	4	-	2			
3.2						LN, Wald	2	2				
3.3						nur Wald	2	-				
4.1		2	3			nur Wald	3	-				
4.2						nur Wald	2	-				
5.1		2	3			nur Wald	1	-	-			
6.1		2	3			kein Wald/LN	2	-	2.5			
6.2						nur LN	3	3				
6.3						nur LN	2	2				
G5	1	1			LN, Wald	2.9	2.9	2.9				

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert	
5	1.1	3	8	B-Rf	(De)kuD	LN, Wald	4	4	2.8	3	0.26	
	1.2			B-Rf	(De)kuD "	LN, Wald	2	2				
	1.3			B-Rf	(De)kuD	LN, Wald	3	3				
	1.4			B-Rf	(De)kuD "	LN, Wald	2	2				
	2.1	3	8	B-Zfm	(De)ku,,c	nur LN	4	4	3.5			
	2.2			B-Zfm	(De)ku,,c	nur LN	3	3				
	3.1	3	8	Z-Bm	(De)ku	nur LN	4	4	3			
	3.2			Z-Bm	(De)ku "	nur LN	2	2				
	3.3			Z-Bm	(De)ku	nur LN	3	3				
	4.1	2	3	Rf	(De)kuD	LN, Wald	4	4	2.7			
	4.2			Rf	(De)kuD "	LN, Wald	2	2				
	4.3			Rf	(De)kuD "	LN, Wald	2	2				
	G3	1	1				nur LN	2.5	2.5	2.5		
	6	1.1	3	8		kmG	nur LN	1	1	1	1.4	0.09
2.1		3			kmG,,c	nur LN	3	3	2			
2.2					kmG,,c	nur LN	2	2				
2.3					kmG,,c	nur LN	1	1				
3.1		2	3		Ba//kmG	nur LN	1	1	2			
3.2					Ba//kmG	nur LN	3	3				
4.1		2	3		(Ba)kmG_juG	LN, Wald	1	1	1			
5.1		2	3		Ba/kmG_juG	nur LN	1	1	2			
5.2					Ba/kmG_juG	nur LN	3	3				
G4		1	1				nur LN	1.9	1.9			1.9
7	1.1	5	21			nur LN	4	4	4	4	0.40	
	1.2					nur LN	4	4				
	1.3					nur LN	4	4				
	1.4					nur LN	4	4				
	2.1	2	3			nur LN	4	4	4			
	2.2					nur LN	4	4				
	G3	1	1				nur LN	3.5	3.5	3.5		
9	1.1	3	8			nur LN	2	2	2.5	2.4	0.18	
	1.2					nur LN	3	3				
	2.1	3	8			nur LN	3	3	3			
	2.2					nur LN	3	3				
	3.1	2	3			nur LN	1	1	1			
	4.1	2	3			nur LN	3	3	3			
G0	1	1				-	-	-	-			
10	1.1	3	8			LN, Wald	2	2	2.7	2.7	0.22	
	1.2					LN, Wald	2	2				
	1.3					LN, Wald	4	4				
	2.1	3	8			LN, Wald	2	2	3			
	2.2					LN, Wald	4	4				
	3.1	3	8			LN, Wald	3	3	2.3			
	3.2					LN, Wald	2	2				
	3.3					LN, Wald	2	2				
	4.1	2	3			nur LN	4	4	3.3			
	4.2					nur LN	2	2				
	4.3					nur LN	4	4				
G1	1	1				LN, Wald	2.5	2.5	2.5			
11	1.1	4	14			nur LN	3	3	3	3	0.26	
	1.2					nur LN	3	3				
	2.1	3	8			nur LN	3	3	3			
	2.2					nur LN	3	3				
	2.3					nur LN	3	3				
G8	1	1				nur LN	3.5	3.5	3.5			

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert
12	1.1	3	8		Ba/kmG	LN, Wald	1	1	2.7	2.6	0.21
	1.2				(De)Ba/kmG	LN, Wald	4	4			
	1.3				(De)Ba/kmG	LN, Wald	3	3			
	2.1	3	8		(De)Ba/kmG	nur Wald	4	-			
	2.2				(De)Ba/kmG	nur Wald	4	-			
	2.3				(De)Bah/kmG	nur Wald	3	-			
	3.1	2	3		Ba	nur LN	1	1	1.5		
	3.2				Ba	nur LN	1	1			
	3.3				(De)Ba	nur LN	3	3			
	3.4				Ba	nur LN	1	1			
	4.1	2	3		Ba//kmG	LN, Wald	1	1	1.7		
	4.2				Ba//kmG	LN, Wald	1	1			
	4.3				(De)Ba//kmG	LN, Wald	3	3			
	5.1	2	3		(De)Ba	nur LN	3	3	3		
	5.2				(De)Ba	nur LN	3	3			
	5.3				(De)Ba	nur LN	3	3			
	6.1	2	3		(De)Ba/kmG	nur Wald	4	-			
	6.2				(De)Ba/kmG	nur Wald	4	-			
	6.3				(De)Ba/kmG	nur Wald	3	-			
7.1	2	3		(z)Ba//kmG	nur LN	4	4	4			
G5	1	1			nur LN	2.1	2.1	2.1			
13	1.1	4	14		Ba	nur LN	1	1	1.7	1.8	0.13
	1.2				Ba	nur LN	1	1			
	1.3				Ba	nur LN	1	1			
	1.4				(De)Ba	nur LN	3	3			
	1.5				y//Ba	nur LN	2	2			
	1.6				y/Ba	nur LN	2	2			
	2.1	2	3		Ba	nur LN	1	1	2		
	2.2				(De)Ba	nur LN	3	3			
	3.1	2	3		Ba	nur LN	1	1	1.5		
	3.2				Ba	nur LN	1	1			
	3.3				Ba	nur LN	1	1			
	3.4				(De)Ba	nur LN	3	3			
	4.1	2	3		Ba//kmG	nur LN	1	1	2		
4.2				(De)Ba//kmG	nur LN	3	3				
G5	1	1			LN, Wald	2.5	2.5	2.5			
14	1.1	3	8		Ba/kmG	nur LN	1	1	2.7	2.2	0.16
	1.2				(De)Ba/kmG	nur LN	4	4			
	1.3				(De)Ba/kmG	nur LN	3	3			
	2.1	3	8		Ba/kmG_kmMB	nur LN	1	1	2		
	2.2				(De)Ba/kmG_kmMB	nur LN	3	3			
	3.1	2	3		Ba/kmG_kmMB	nur LN	1	1	2		
	3.2				Ba/kmG_kmMB	nur LN	3	3			
	4.1	2	3		Ba/kmG_kmMB	nur LN	1	1	2		
	4.2				Ba/kmG_kmMB	nur LN	3	3			
	5.1	2	3		Ba/kmG_kmMB	nur LN	1	1	2		
	5.2				(De)Ba/kmG_kmMB	nur LN	3	3			
	G5	1	1			nur LN	2.35	2.35	2.35		
	16	1.1	2	3			nur Wald	4	-	-	2.8
1.2						nur Wald	3	-			
2.1		2	3			nur Wald	1	-	-		
2.2						nur Wald	2	-			
3.1		2	3			nur Wald	2	-	-		
3.2						nur Wald	1	-			
4.1		2	3			nur Wald	4	-	-		
5.1		2	3			nur Wald	4	-	-		
6.1		2	3			nur Wald	4	-	-		
6.2						nur Wald	2	-			
7.1		2	3			nur Wald	2	-	-		
7.2						nur Wald	2	-			
7.3						nur Wald	2	-			
GX	1	1			nur Wald	-	-	-			

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert	
17	1.1	4	14		(De)Ba//ku	nur LN	4	4	3.8	3.6	0.34	
	1.2				(De)Ba//ku	nur LN	4	4				
	1.3				(De)Ba//ku	nur LN	4	4				
	1.4				(De)Ba//ku	nur LN	3	3				
	2.1	2	3		Ba//ku	nur LN	1	1	3			
	2.2				(De)Ba//ku	nur LN	4	4				
	2.3				(De)Ba//ku	nur LN	4	4				
	3.1	2	3		(De)Ba	nur LN	4	4	3.8			
	3.2				(De)Ba	nur LN	4	4				
	3.3				(De)Ba//ku	nur LN	4	4				
	3.4				(De)Ba//ku	nur LN	3	3				
	G4	1	1		v.a. kuS	nur LN	2.45	2.45	2.5			
	18	1.1	3	8			nur Wald	4	-	-	3.3	0.29
		1.2					nur Wald	2	-			
1.3						nur Wald	4	-				
1.4						nur Wald	4	-				
2.1		3	8			nur Wald	4	-	-			
2.2						nur Wald	2	-				
3.1		3	8			nur Wald	4	-	-			
3.2						nur Wald	2	-				
4.1		2	3			nur Wald	4	-	-			
4.2						nur Wald	4	-				
5.1		2	3			nur Wald	4	-	-			
5.2						nur Wald	4	-				
5.3						nur Wald	4	-				
G4		1	1			nur Wald	-	-	-			
19	1.1	3	8			nur Wald	4	-	-	3.2	0.28	
	1.2					nur Wald	4	-				
	1.3					nur Wald	4	-				
19	2.1	2	3			nur LN	3	3	3			
	3.1	2	3			nur LN	3	3	3.3			
	3.2					nur LN	3	3				
	3.3					nur LN	3	3				
	3.4					nur LN	4	4				
G13	1	1			v.a. LN	3.5	3.5	3.5				
21	1.1	3	8		De/ku '	nur LN	4	4	3	3.4	0.31	
	1.2				De/ku "	nur LN	2	2				
	1.3				De/ku '	nur LN	3	3				
	2.1	3	8		De/Ba	nur LN	4	4	3.8			
	2.2				De/Ba	nur LN	4	4				
	2.3				De/Ba//ku	nur LN	4	4				
	2.4				De/Ba//ku	nur LN	3	3				
	3.1	2	3		De/ku '	nur LN	4	4	2.8			
	3.2				De/ku "	nur LN	2	2				
	3.3				De/ku '	nur LN	3	3				
	3.4				De/ku "	nur LN	2	2				
	4.1	2	3		De/ku	nur LN	4	4	4			
	4.2				(De)Mi/ku	nur LN	4	4				
	5.1	2	3		Mi/ku	nur LN	3	3	3.5			
5.2				(De)Mi/ku	nur LN	4	4					
G11	1	1			nur LN	3.05	3.05	3.1				

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert	
30	1.1	5	21		De/Mi	mST; nur Wald	2	-	4.7	4.6	0.51	
	1.2				De/Mi	LN, Wald	5	5				
	1.3				De/Mi	LN, Wald	4	4				
	1.4				Y//Mi	LN, Wald	5	5				
	2.1	2	3		De/Mi//Ba	mST; nur Wald	2	-	4			
	2.2				De/Mi//Ba	LN, Wald	4	4				
	2.3				De/Mi/mo_ku	LN, Wald	4	4				
	3.1	2	3		Lo	nur LN	5	5	4.5			
	3.2				Lo//Mi	nur LN	5	5				
	3.3				Lo	nur LN	4	4				
	3.4				Lo//Mi	nur LN	4	4				
	4.1	2	3		De/Mi	LN, Wald	5	5	4.3			
	4.2				De/Mi	LN, Wald	4	4				
	4.3				De/Mi//Ba	LN, Wald	4	4				
G3	1	1				v.a. LN	4.35	4.35	4.4			
31	1.1	4	14		Mi	nur LN	3	3	4	3.7	0.35	
	1.2				(De)Mi	nur LN	5	5				
	1.3				(De)Mi	nur LN	4	4				
	2.1	3	8		Mi//Ba	nur LN	3	3	3.3			
	2.2				Mi//ku_mo_kmG	nur LN	3	3				
	2.3				(De)Mi//ku_mo	nur LN	4	4				
G12	1	1				v.a. LN	3.75	3.75	3.8			
32	1.1	3	8		Mi//Ba k	nur LN	3	3	3.5	3.4	0.31	
	1.2				(De)Mi//Ba k	nur LN	4	4				
	2.1	2	3		Mi//qM k	nur LN	3	3	3			
	3.1	2	3		Mi k	nur LN	3	3	3			
	3.2				Mi/Ba k	nur LN	3	3				
	3.3				Mi/Ba k	nur LN	3	3				
	4.1	2	3		Mi k	nur LN	3	3	3.3			
	4.2				Mi/Ba k	nur LN	3	3				
	4.3				(De)Mi/Ba k	nur LN	4	4				
	5.1	2	3		Mi/Ba	nur LN	3	3	3.5			
	5.2				(De)Mi/Ba	nur LN	4	4				
	6.1	2	3		z/Mi	nur LN	4	4	4			
	6.2				z/Mi//Ba	nur LN	4	4				
G2	1	1				nur LN	2.8	2.8	2.8			
33	1.1	3	8		Lo	nur LN	3	3	3.7	3.7	0.35	
	1.2				Lo	nur LN	4	4				
	1.3				Lo	nur LN	4	4				
	2.1	3	8		Lo	nur LN	3	3	3.3			
	2.2				Lo//Mi	nur LN	3	3				
	2.3				Lo	nur LN	4	4				
	3.1	3	8		Lo	nur LN	4	4	3.7			
	3.2				Lo//Mi	nur LN	3	3				
	3.3				Lo//Mi	nur LN	3	3				
	4.1	2	3		Lo//Mi	nur LN	4	4	4			
	4.2				Lo//Mi	nur LN	4	4				
	5.1	2	3		Lo	nur LN	5	5	4.5			
	5.2				Lo//Mi	nur LN	5	5				
	5.3				Lo	nur LN	4	4				
	5.4				Lo//Mi	nur LN	4	4				
	6.1	2	3		Lo//Mi	nur LN	3	3	3.5			
	6.2				Lo//Mi	nur LN	4	4				
	G8	1	1				nur LN	3.65	3.65	3.7		

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert	
36	1.1	4	14			nur Wald	4	-	-	4	0.40	
	1.2					nur Wald	4	-				
	1.3					nur Wald	4	-				
	2.1	3	8			nur Wald	4	-	-			
	2.2					nur Wald	4	-				
	2.3					nur Wald	3	-				
	3.1	2	3			nur Wald	5	-	-			
	3.2					nur Wald	4	-				
37	1.1	4	14			LN, Wald	5	5	4.8	4.3	0.45	
	1.2					LN, Wald	5	5				
	1.3					LN, Wald	5	5				
	1.4					LN, Wald	4	4				
	2.1	3	8			LN, Wald	2	2	3.5			
	2.2					LN, Wald	5	5				
	3.1	2	3			LN, Wald	5	5	4.3			
	3.2					LN, Wald	4	4				
	3.3					LN, Wald	4	4				
	38	1.1	4	14			nur LN	5	5	4.6		4.5
1.2						nur LN	5	5				
1.3						nur LN	4	4				
1.4						nur LN	4	4				
1.5						nur LN	5	5				
2.1		2	3			nur LN	4	4	4			
2.2						nur LN	4	4				
2.3						nur LN	4	4				
3.1		2	3			nur LN	5	5	4.8			
3.2						nur LN	5	5				
3.3						nur LN	4	4				
3.4						nur LN	5	5				
4.1		2	3			nur LN	5	5	4.3			
4.2						nur LN	4	4				
4.3						nur LN	4	4				
4.4						nur LN	4	4				
5.1		2	3			nur LN	5	5	4.5			
5.2						nur LN	4	4				
5.3					nur LN	5	5					
5.4					nur LN	4	4					
39	1.1	4	14			nur LN	3	3	3	3	0.26	
	1.2					nur LN	3	3				
	1.3					nur LN	3	3				
	1.4	4	8			nur LN	3	3	3			
	2.1					nur LN	3	3				
	2.2					nur LN	3	3				
	2.3			nur LN	3	3						
	3.1	2	3			nur LN	3	3	3			
3.2					nur LN	3	3					
40	1.1	3	8			nur LN	5	5	4.7	4.5	0.49	
	1.2					nur LN	4	4				
	1.3					nur LN	5	5				
	2.1	3	8			nur LN	5	5	4.3			
	2.2					nur LN	4	4				
	2.3					nur LN	4	4				
	3.1	3	8			nur LN	5	5	4.5			
	3.2					nur LN	4	4				
	3.3					nur LN	5	5				
	3.4					nur LN	4	4				
	4.1	2	3			nur LN	5	5	4.6			
	4.2					nur LN	5	5				
	4.3					nur LN	5	5				
4.4					nur LN	4	4					
4.5					nur LN	4	4					

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert
41	1.1	3	8			nur LN	3	3	3	3.2	0.28
	1.2					nur LN	3	3			
	2.1	3	8			nur LN	4	4	3.3		
	2.2					nur LN	3	3			
	2.3					nur LN	3	3			
	3.1	2	3			nur LN	4	4	4		
	3.2					nur LN	4	4			
4.1	2	3			nur LN	3	3	3			
42	1.1	5	21			nur LN	2	2	3.8	3.7	0.35
	1.2					nur LN	5	5			
	1.3					nur LN	4	4			
	1.4					nur LN	4	4			
	1.5					nur LN	4	4			
	2.1	2	3			nur LN	4	4	4.3		
	2.2					nur LN	5	5			
	2.3					nur LN	4	4			
	2.4					nur LN	4	4			
	3.1	2	3			nur LN	2	2	2.25		
	3.2					nur LN	1	1			
	3.3					nur LN	4	4			
	3.4					nur LN	2	2			
	3.5					nur Wald	4	-			
43	1.1	5	21			nur LN	3	3	3.5	3.5	0.32
	1.2					nur LN	4	4			
	2.1	3	8			nur LN	3	3	3.5		
	2.2					nur LN	4	4			
45	1.1	6	27			nur LN	4	4	3.5	3.5	0.32
	1.2					nur LN	3	3			
	1.3					nur LN	3	3			
	1.4					nur LN	4	4			
46	1.1	4	14			LN, Wald	2	2	1.8	2.2	0.16
	1.2					LN, Wald	1	1			
	1.3					LN, Wald	2	2			
	1.4					LN, Wald	2	2			
	2.1	3	8			LN, Wald	2	2	2.3		
	2.2					LN, Wald	2	2			
	2.3					LN, Wald	3	3			
	3.1	2	3			LN, Wald	2	2	3		
	3.2					LN, Wald	4	4			
	4.1	2	3			LN, Wald	2	2	3		
4.2					LN, Wald	2	2				
48	1.1	3	8			nur LN	4	4	4	3.4	0.31
	1.2					nur LN	4	4			
	1.3					nur LN	4	4			
	2.1	3	8			nur LN	3	3	2.8		
	2.2					nur LN	4	4			
	2.3					nur LN	1	1			
	2.4					nur LN	3	3			
	3.1	2	3			nur LN	4	4	3.7		
	3.2					nur LN	3	3			
	3.3					nur LN	4	4			
	4.1	2	3			nur LN	3	3	3		
	5.1			2	3			nur Wald			

Einheit	Nr.	Anteil	Gewicht	Bodentyp	Schichten	Nutzung	K	K (B)	K (U)	K (G)	K-Wert
49	1.1	4	14			nur Wald	4	-	-	2.7	0.22
	1.2					nur Wald	3	-			
	1.3					nur Wald	2	-			
	2.1	2	3			nur Wald	1	-	-		
	2.2					nur Wald	1	-			
	3.1	2	3			nur Wald	4	-	-		
	3.2					nur Wald	2	-			
	4.1	2	3			nur Wald	4	-	-		
	4.2					nur Wald	2	-			
	4.3					nur Wald	2	-			
	5.1	2	3			nur Wald	3	-	-		
	5.2					nur Wald	2	-			

10.2 Der Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95

Der **Algorithmus von FLOW 95** berechnet die potentielle Abflußmenge in jedem Fall korrekt. Er unterscheidet sich damit grundlegend von **herkömmlichen Multiple Flow Algorithmen**¹, wie sie beispielsweise beim Programm USLE2D verwendet werden. Konventionelle Multiple Flow Algorithmen, deren Funktionsweise schon in Kap. 5.4 beschrieben wurde, berücksichtigen einen wichtigen Ausnahmefall nicht. Sie sind nicht in der Lage, den Wasserfluß über eine ebene Fläche zu berechnen und produzieren deswegen fehlerhafte Resultate.

Digitale Höhenmodelle weisen in den meisten Fällen kleinere Mängel auf (vgl. ESRI 1991a, ESRI 1992), die im allgemeinen als **Senken oder Spitzen** bezeichnet werden. Spitzen sind Gebiete, die von niedrigeren Pixeln umrandet werden. Senken sind Gebiete, die von höherliegenden Pixeln umgeben sind. Obwohl sie auch natürlichen Ursprungs (Depressionen in Glazial- oder Karstlandschaften, o.ä.) sein können, sind die meisten Senken und Spitzen in einem digitalen Höhenmodell Ungenauigkeiten bzw. Berechnungsfehler. Eine Senke von der Größe eines einzelnen Pixels tritt im wirklichen Gelände kaum auf, wohl aber sehr häufig in einem digitalen Höhenmodell.

¹ Alle Multiple Flow Algorithmen ohne die spezielle Funktionalität von FLOW 95 werden im folgenden als herkömmlich bzw. konventionell bezeichnet. Sie berechnen die Abflußmenge ausnahmslos nach dem in Kap. 5.4 beschriebenen Berechnungsprinzip. Randbedingungen werden von ihnen nicht beachtet. Da in der Fachliteratur noch keine Hinweise auf zu berücksichtigende Randbedingungen zu finden sind (vgl. DESMET/GOVERS 1996a, 1996b; QUINN et al. 1991), dürften konventionelle Multiple Flow Algorithmen die Regel sein.

Senken verschlucken jedoch alles zugeführte Oberflächenwasser wie ein schwarzes Loch und unterbrechen damit den Wasserfluß. Aus diesem Grund müssen vor jeder hydrologischen Berechnung alle Senken aus dem digitalen Höhenmodell entfernt werden. Ohne die **Entfernung abflußloser Senken** wird jede hydrologische Berechnung zum Vabanquespiel, weil selbst ein einzelnes tiefer liegendes Pixel das ganze Ergebnis unbrauchbar machen kann.

Die einfachste Möglichkeit, eine abflußlose Senke aus einem digitalen Höhenmodell zu entfernen, bietet die **Funktion „Fill“ in Arc/View oder Arc/Info**. „Fill“ durchsucht ein Geländemodell nach Senken und füllt diese auf. Dabei werden alle tiefer liegenden Pixel soweit erhöht, bis sie den Höhenwert ihrer Umgebung erreichen. Dort wo zuvor eine abflußlose Senke war, befindet sich nun eine ebene Fläche (vgl. Abbildung 56, linke Seite).

Ein **praxisorientierter Multiple Flow Algorithmus** muß nun dafür sorgen, daß der Wasserfluß diese ebene Fläche bei Bedarf überschreiten kann. Tut er das nicht, dann war die ganze Mühe der Senkenentfernung umsonst. Ohne eine spezielle Anpassung ist jedoch ein Multiple Flow Algorithmus aber nicht in der Lage, den Wasserfluß über ebene Flächen ununterbrochen weiterzuführen. Wie in Kap. 5.4 beschrieben, findet bei einer Neigung von Null kein Wasserfluß zu einem benachbarten Pixel statt. Die generelle Berechnungsweise bei einem Multiple Flow Algorithmus muß daher im Fall ebener Flächen aufgehoben und durch eine spezielle Routine ersetzt werden. Konventionelle Multiple Flow Algorithmen wie bei der Software USLE2D behandeln dagegen ebene Flächen wie geneigte. Sie machen keinen Unterschied zwischen aufgefüllten Senken und den restlichen Flächen, sondern führen das in Kap. 5.4 beschriebene Berechnungsprinzip ausnahmslos durch. Über aufgefüllten Senken wird deswegen der Wasserfluß unterbrochen und das Ergebnis in ähnlicher Weise fehlerhaft, wie dies auch ohne eine Entfernung der Fall gewesen wäre.

Im Gegensatz dazu wurde in FLOW 95 eine spezielle Routine eingebaut, die aufgefüllte Senken als solche erkennt und entsprechend behandelt (vgl. Abbildung 58). Treten ebene Flächen auf, dann ändert FLOW 95 die Berechnungsweise. Die bisherige Multiple Flow Berechnungsmethode wird außer Kraft gesetzt und eine spezielle Ausnahmeroutine tritt in Kraft. Dabei wird die ebene Fläche als eine Art See betrachtet und alles zugeflossene (und schon vorhandene) Wasser aufsummiert.

Jedem einzelnen Pixel der ebenen Fläche wird dabei ein durchschnittlicher Wasserwert zugewiesen, der wie folgt berechnet wird:

Wassermenge pro Pixel = zugeflossene Wassermenge / Größe der ebenen Fläche in Pixeln

Pixel mit einem Auslaß bekommen dagegen einen anderen Wasserwert zugewiesen, der nach folgender Formel berechnet wird:

Wassermenge pro Auslaßpixel = zugeflossene Wassermenge / Anzahl der Pixel mit Auslaß

Auf diese Weise wird die aufgefüllte Senke in zwei verschiedene Klassen von Pixeln aufgeteilt, Pixel ohne Auslaß mit geringen Wasserwerten und Pixel mit Auslaß und sehr hohen Wasserwerten. Da die gesamte Wassermenge der ebenen Fläche auf alle Pixel mit Auslaß gleichmäßig verteilt wird, ist ein ununterbrochener Wasserfluß sichergestellt.

Nach dieser speziellen Ausnahmefallbehandlung setzt FLOW 95 den Multiple Flow Algorithmus wieder in Kraft und rechnet mit der in Kap. 5.4 beschriebenen Berechnungsmethode weiter.

Die Abbildungen 56 und 57 zeigen die Funktionsweise eines konventionellen Multiple Flow Algorithmus und des Algorithmus von FLOW 95 im Vergleich. In Abbildung 56 werden die grundlegenden Unterschiede dargestellt, in Abbildung 57 die praktischen Auswirkungen anhand eines hypothetischen Höhenmodells. Da sich der Algorithmus von FLOW 95 je nach Höhenmodell unterschiedlich verhält, ist er sehr vielseitig anwendbar. Bei einem unkorrigierten Höhenmodell mit lokalen Senken verhält sich der Algorithmus von FLOW 95 wie ein ganz konventioneller Multiple Flow Algorithmus. Nur bei einem korrigierten Höhenmodell mit aufgefüllten Senken tritt die erweiterte Funktionalität von FLOW 95 in Kraft. Auf diese Weise ist das Ergebnis einer Abflußberechnung mit FLOW 95 in jedem Fall vorhersehbar und hängt nur von den Ausgangsdaten ab. FLOW 95 ist eignet sich deshalb auch für Abflußanalysen, bei denen aus bestimmten Gründen auf die Korrektur eines Höhenmodells verzichtet werden muß (z.B. bei hochauflösenden Abflußanalysen in Karst- oder Jungmoränenlandschaften, wo die Wasserbewegung in Hohlformen berechnet werden soll).

Abbildung 56:**Funktionsweise zweier Multiple Flow Algorithmen – Konventionell versus FLOW 95**

Die linke Seite dieser Abbildung zeigt das Profil zweier Höhenmodelle, eines unkorrigierten mit einer abflußlosen Senke und eines korrigierten, bei dem die abflußlose Senke aufgefüllt wurde. Die rechte Seite zeigt das Verhalten zweier Multiple Flow Algorithmen bei der Berechnung der Abflußmenge. Im oberen rechten Bild wird der Wasserfluß aufgrund der lokalen Senke unterbrochen. Beide Algorithmen (der Konventionelle und der von FLOW 95) produzieren hier wegen der fehlerhaften Datenlage keine korrekten Resultate. Auch im mittleren rechten Bild ist der Wasserfluß unterbrochen. Dies liegt jedoch nicht an fehlerhaften Ausgangsdaten, sondern am verwendeten Algorithmus. Der konventionelle Multiple Flow Algorithmus ist auch bei einem korrigierten Höhenmodell nicht in der Lage, den Wasserfluß korrekt zu berechnen. Er unterbricht ihn und macht das gesamte Ergebnis ab der ebenen Fläche unbrauchbar. Im unteren rechten Bild hingegen garantiert der Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95 einen ununterbrochenen Wasserfluß. Durch eine spezielle Ausnahmefallbehandlung wird die ebene Fläche als aufgefüllte Senke erkannt und der Wasserfluß ununterbrochen fortgeführt. Damit sind alle berechneten Abflußdaten - auch die unterhalb der aufgefüllten Senke - korrekt.

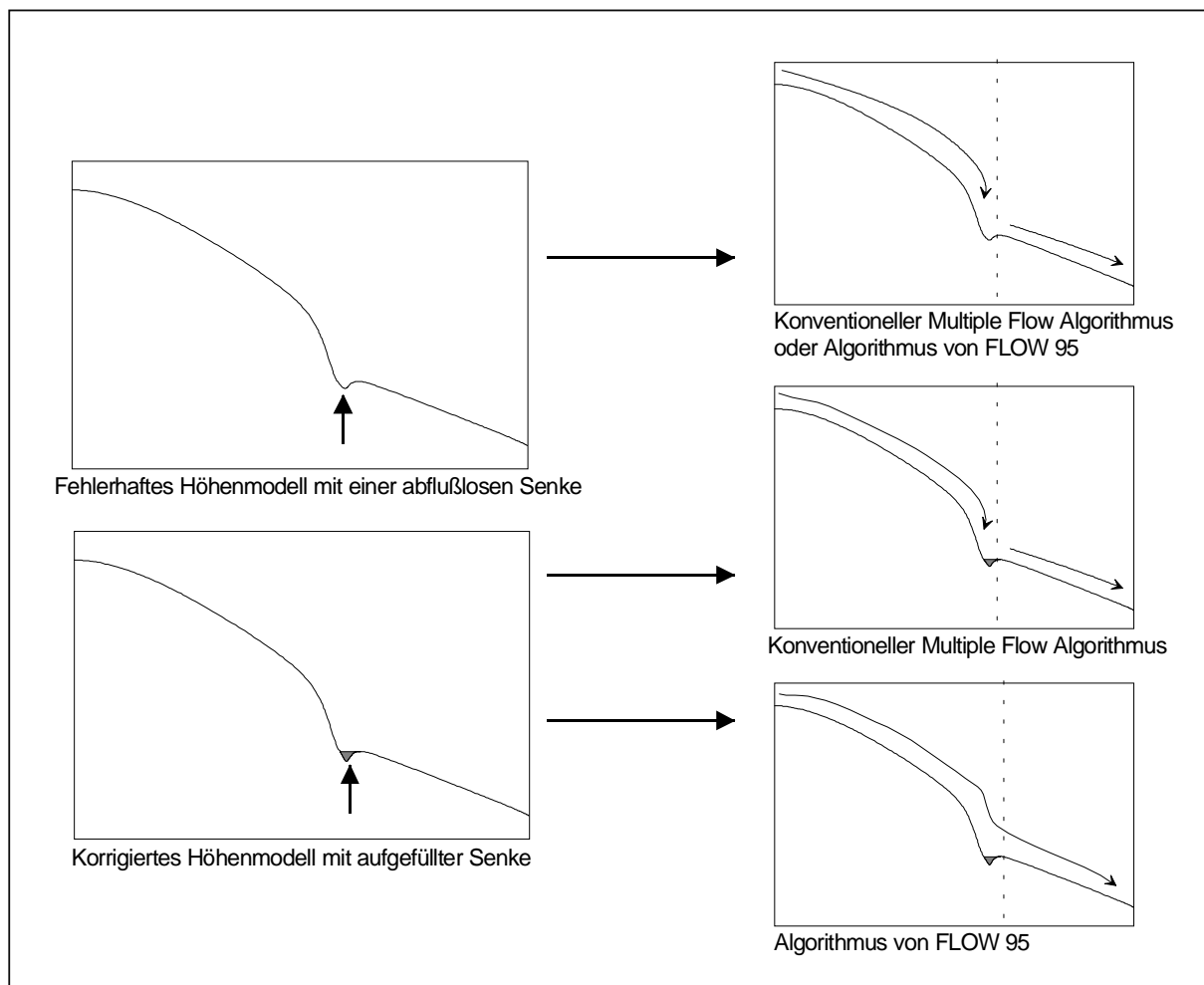
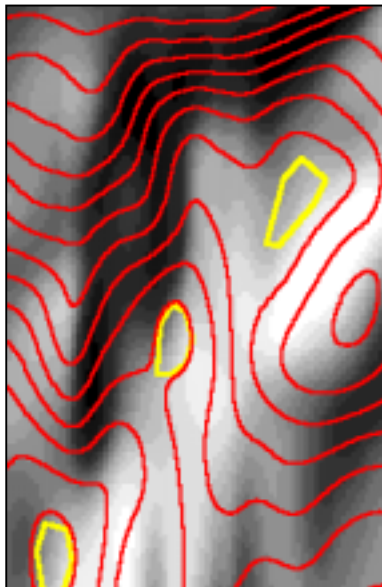


Abbildung 57:

Vergleich zweier Multiple Flow Algorithmen am Beispiel eines unkorrigierten und eines korrigierten Höhenmodells

**Rechte Karte:**

Ausschnitt eines digitalen Höhenmodells in schattierter Darstellung und roten Höhenlinien. Die gelb umrandeten Flächen sind lokale Senken, die bei Anwendung der Arc/View bzw. Arc/Info Funktion „Fill“ aufgefüllt werden.

Karten unten:

Abflußmenge, berechnet mit unterschiedlichen Multiple Flow Algorithmen. Die Höhe der Abflußmenge steigt von rot nach blau. Gelb umrandete Flächen sind abflußlose bzw. aufgefüllte Senken.

Karte links unten:

Abflußmenge, berechnet aus dem **unkorrigierten Höhenmodell** mit lokalen Senken. Hier wird mit konventionellen Multiple Flow Algorithmen und dem Algorithmus von FLOW 95 das gleiche Ergebnis erzielt.

Mittlere Karte unten:

Abflußmenge, berechnet aus dem **korrigierten Höhenmodell** mit vorheriger Auffüllung der lokalen Senken. Ein **konventioneller Multiple Flow Algorithmus** ohne spezielle Ausnahmeroutine unterbricht hier den Wasserfluß.

Karte rechts unten:

Abflußmenge, berechnet aus dem **korrigierten Höhenmodell** mit vorheriger Auffüllung der lokalen Senken. Der **Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95** mit seiner speziellen Ausnahmeroutine ermöglicht hier einen ununterbrochenen Wasserfluß.

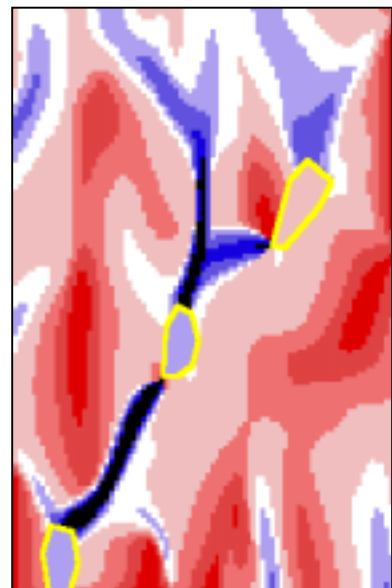
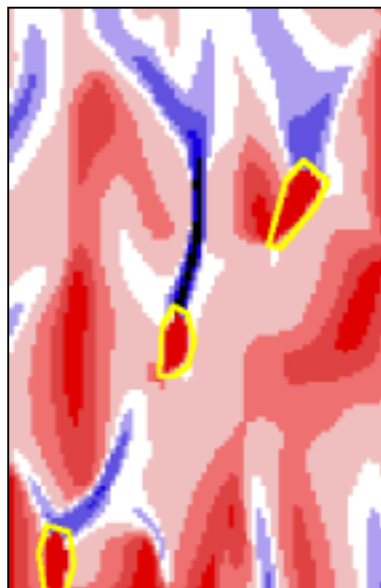
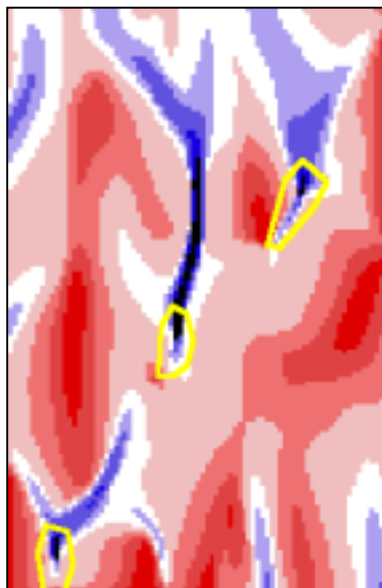
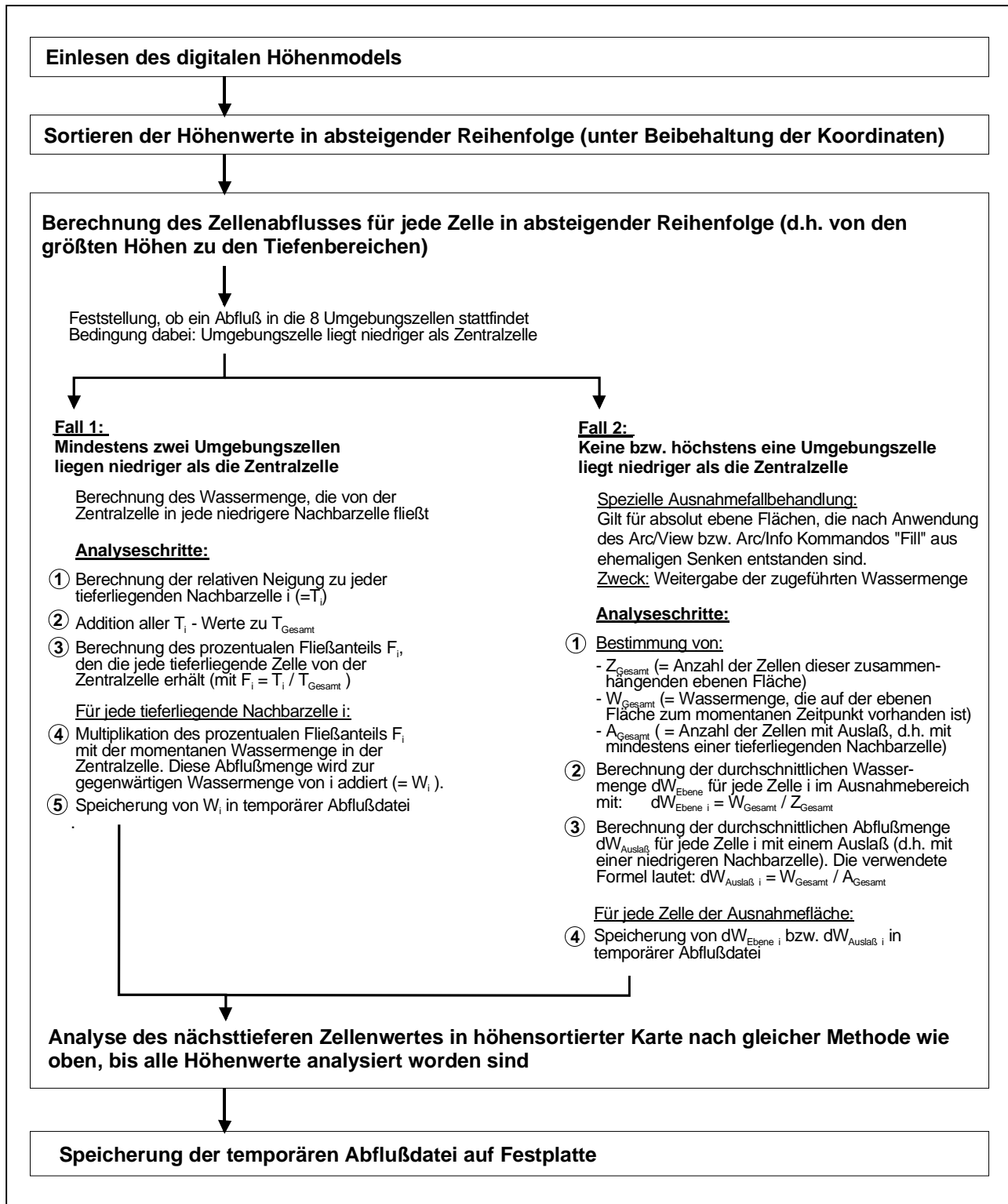


Abbildung 58:

Flußdiagramm des Multiple Flow Algorithmus von FLOW 95 zur Berechnung der Abflußmenge (Grundprinzip in stark vereinfachter Darstellung)



10.3 Arc/View Extensions GRID tools und SHAPE tools

Die beiden Extensions GRID tools und SHAPE tools sind selbstprogrammierte Zusatzmodule für die ESRI Software Arc/View. Sie sorgen für eine wesentlich erweiterte Funktionalität und gewährleisten die korrekte Umsetzung des Irregular Slope Konzepts mit Arc/View (vgl. Kap. 5.5). Auf der beiliegenden CD-ROM sind beide Erweiterungen mit genaueren Erklärungen enthalten. Eine kurze Übersicht der erweiterten Funktionalität liefern die folgenden Tabellen.

Tabelle 9:

GRID tools – zusätzliche Funktionen:

Analysefunktionen	Management von GRID's	Hydrologische Funktionen
1. Cost Distance 2. Cost Path 3. Curvature 4. Extended Hillshade 5. Neighbourhood Statistics (Block Mode)	1. Flip/Mirror 2. Rotate 3. Shift Grid 4. Resample/Aggregate 5. Warp 6. Merge 7. Combine 8. Sample 9. Extract by Graphic 10. Extract by Attributes 11. Majority 12. Region Group 13. Nibble 14. Boundary Clean 15. Expand/Shrink 16. Thin 17. Zonal Geometry	1. Flow Direction 2. Derive Sinks 3. Snap Pour Points 4. Fill 5. Flow Accumulation 6. Flow Length 7. Focal Flow 8. Watershed 9. Contributing Area 10. Stream Link 11. Stream Order

Tabelle 10:

SHAPE tools – zusätzliche Funktionen:

Konvertierungsfunktionen	Analyse/Datenextraktion	Räumliche Manipulationen
1. Polygon to Polyline 2. Polyline to Polygon 3. Polyline to Points 4. Theme to DXF 5. Theme to MIF 6. Theme to Arc/Info Generate 7. Theme to Graphics	1. ID Number 2. XY Coordinates 3. Calculate Features 4. Buffer 5. Centroid 6. Histogram 7. Draw Nodes 8. XY Dump	1. Shift Features 2. Remove Vertices 3. Merge 4. Intersect 5. Clip from Graphic 6. Rotate Shape

10.4 Inhalt und Verzeichnisstruktur der beiliegenden CD ROM

[ABFLUSSANALYSE]

[INFO]

[MULTIPLE_FLOW]: Abflußmenge, berechnet mit FLOW 95

[SINGLE_FLOW]: Abflußmenge, berechnet mit Arc/View

abflußmenge.avl: Legende zur Abflußmenge

[EROSIONSPROGNOSEN]

[1_GRUNDDATEN]: Ausgangsdaten aller durchgeführten Untersuchungen

[DEM]: Höhenmodell des Untersuchungsgebiets

[INFO]

boden.(shp/dbf/shx): Bodenkarte (Shapefile)

nutzung.(shp/dbf/shx): Nutzungskarte (Shapefile)

parzellen.(shp/dbf/shx): Abdigitalisierte Feldgrenzen (Shapefile)

relief.(shp/dbf/shx): Abdigitalisierte Höhenlinien (Shapefile)

wege.(shp/dbf/shx): Wegekarte (Shapefile)

[2_MASKEN]: Erstellte Masken

[ABFLUSSLINIEN]: Lineare Abflußlinien

[ACKERFLAECHE]: Maske der Ackerflächen

[AGRARFLAECHE]: Maske der landwirtschaftlichen Nutzfläche (Äcker und Wiesen)

[EINZUGSGEBIET]: Grenzen der Einzugsgebiete

[INFO]

[IRREGULAR]: Abflußmaske beim Irregular Slope Konzept

[LIGHT]: Abflußmaske beim RUSLE Light Konzept

[REGULAR]: Abflußmaske beim Regular Slope Konzept

[UNIT_CONTR]: Abflußmaske beim Unit Contributing Area Konzept

[WEGE]: Wegemaske

[3_FAKTORKARTEN]: RUSLE-Faktorenkarten zur Ermittlung des Bruttobodenabtrags

[INFO]

[K_FAKTOR]: Karte der Bodenerodibilität (K-Faktoren)

[L_IRREGULAR]: L-Faktorkarte, ermittelt nach dem Irregular Slope Konzept

[L_UNIT_CONTR]: L-Faktorkarte, ermittelt nach dem Unit Contributing Area Konzept

[M_FAKTOR]: Karte des m_1 -Werte

[R_FAKTOR]: Karte des R-Faktors

[S_FAKTOR]: Karte des S-Faktors

[4_ERGEBNISSE]

[MUSLE_87]: Ergebnisse der Stoffbilanzierung im Untersuchungsgebiet

[INFO]

[MUSLE]: Stoffbilanz, berechnet mit Berücksichtigung des K-Faktors

[REV_MUSLE]: Stoffbilanz, berechnet ohne Berücksichtigung des K-Faktors

[REV_MUSLE_3]: Durch drei dividierte Stoffbilanzkarte (zwecks Berücksichtigung der durchschnittlichen Bodenerodibilität, die im Untersuchungsgebiet etwa 0.31 beträgt), berechnet ohne Berücksichtigung des K-Faktors

aueböden.(shp/dbf/shx) (Shapefile)

kolluvium_flach.(shp/dbf/shx) (Shapefile)

kolluvium_tief.(shp/dbf/shx) (Shapefile)

[RUSLE]: Prognostizierter Bruttobodenabtrag im Untersuchungsgebiet

[A_IRREGULAR]: Bruttobodenabtrag A, berechnet nach der Irregular Slope Konzeption

[A_LIGHT]: Bruttobodenabtrag A, berechnet nach der RUSLE Light Konzeption

[A_REGULAR]: Bruttobodenabtrag A, berechnet nach der Regular Slope Konzeption

[A_UNIT_CONTR]: Bruttobodenabtrag A, berechnet nach der Unit Contributing Area Konzeption

[INFO]

[EROSIONSPROGNOSEN] (Forts.)

[5_STOFFHAUSHALT]: Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet ohne Berücksichtigung des K-Faktors

[MIT_BARRIEREN]: Stoffbilanzierung unter Berücksichtigung abflußhemmender Hindernisse

[A_EINZUG_I]: Durchschnittlicher Bodenverlust im Einzugsgebiet $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$

[A_I]: Bruttobodenabtrag A_i

[A_SALDO_I]: Stoffbilanz $A_{\text{Saldo } i}$

[INFO]

[WASSERMENGE]: Potentielle Wassermenge

[OHNE_BARRIEREN]: Stoffbilanzierung ohne Berücksichtigung abflußhemmender Hindernisse

[A_EINZUG_I]: Durchschnittlicher Bodenverlust im Einzugsgebiet $A_{\text{Einzugsgebiet } i}$

[A_I]: Bruttobodenabtrag A_i

[A_SALDO_I]: Stoffbilanz $A_{\text{Saldo } i}$

[INFO]

[WASSERMENGE]: Potentielle Wassermenge

[6_BODENSCHUTZ]: Erlaubte Nutzungsweisen im Untersuchungsgebiet

[CP_1T]: $(C*P)_{\text{max}}$ bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 1t/ha/Jahr (punktgenau)

[CP_1T_FELD]: $(C*P)_{\text{max}}$ bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 1t/ha/Jahr; bezogen auf ganze Parzellen

[CP_3T]: $(C*P)_{\text{max}}$ bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 3t/ha/Jahr (punktgenau)

[CP_3T_FELD]: $(C*P)_{\text{max}}$ bei einem erlaubten Bodenabtrag von höchstens 3t/ha/Jahr ; bezogen auf ganze Parzellen

[INFO]

cp_max.avl: Legende zu den erstellten Nutzungskarten

[7_AUSWERTUNG]: Genauigkeit der einzelnen Prognosekonzeptionen im Vergleich zum Unit Contributing Area Konzept

[INFO]

[UNIT-IRREG]: Genauigkeit der Irregular Slope Konzeption, berechnet durch A_i (Unit Contributing Area) – A_i (Irregular Slope)

[UNIT-LIGHT]: Genauigkeit der RUSLE Light Konzeption, berechnet durch A_i (Unit Contributing Area) – A_i (RUSLE Light)

[UNIT-REGULAR]: Genauigkeit der Regular Slope Konzeption, berechnet durch A_i (Unit Contributing Area) – A_i (Regular Slope)

musle.avl: Legende zur Stoffbilanz (Stoffhaushalt mit Barrieren)

musle_all.avl: Legende zur Stoffbilanz (Stoffhaushalt ohne Barrieren)

rusle.avl: Legende zum Bodenabtrag A_i

[SOFTWARE]

[ARCVIEW EXTENSIONS]

[BESCHREIBUNG]: Genaue Beschreibung beider Extensions. Dateien im html-Format.

gridtools.avx: Arc/View Extension GRID tools

shptools.avx: Arc/View Extension SHAPE tools

[FLOW 95]: Installationsdateien des Programs FLOW 95 (reduzierte Version mit einer maximalen Analysegröße von 1300*1300 Pixeln)

10.5 Separates Kartenmaterial

In der **Kartenhülle** auf der hinteren Umschlagsseite befinden sich die wichtigsten Karten aller Untersuchungen. Im Gegensatz zu ihren Pendants im Textteil sind sie in einem einheitlichen Maßstab gehalten und erlauben damit einen direkten Vergleich untereinander. Die wichtigsten Daten des Untersuchungsgebiets sind auf transparente Folien gedruckt, die über die entsprechenden Karten gelegt werden können. Insgesamt sind in der Kartenhülle folgende Blätter vorhanden:

1. Folie: Koordinaten des Untersuchungsgebiets
2. Folie: Isohypsenkarte des Untersuchungsgebiets
3. Folie: Landwirtschaftliche Nutzung im Untersuchungsgebiet
4. Folie: Im Gelände auftretende Kolluvien und Auenböden

1. Karte: Höhenmodell des Untersuchungsgebiets
2. Karte: Vereinfachte Bodenkarte
3. Karte: Bodenerodibilität (K-Faktoren nach der RUSLE)
4. Karte: Bodenabtrag bei potentieller Schwarzbrache; ermittelt nach der Regular Slope Konzeption
5. Karte: Bodenabtrag bei potentieller Schwarzbrache; ermittelt nach der RUSLE Light Konzeption
6. Karte: Bodenabtrag bei potentieller Schwarzbrache; ermittelt nach der Irregular Slope Konzeption
7. Karte: Bodenabtrag bei potentieller Schwarzbrache; ermittelt nach der Unit Contributing Area Konzeption
8. Karte: Stoffbilanz im Untersuchungsgebiet; ermittelt mit den Erosionsgleichungen RUSLE und MUSLE 87 ohne Berücksichtigung hydrologischer Hindernisse und des K-Faktors
9. Karte: Genauigkeit der Regular Slope Konzeption im Vergleich zur Unit Contributing Area Konzeption; ermittelt durch folgende Berechnung:
Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (Regular Slope)
10. Karte: Genauigkeit der RUSLE Light Konzeption im Vergleich zur Unit Contributing Area Konzeption; ermittelt durch folgende Berechnung:
Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (RUSLE Light)
11. Karte: Genauigkeit der Irregular Slope Konzeption im Vergleich zur Unit Contributing Area Konzeption; ermittelt durch folgende Berechnung:
Bodenabtrag (Unit Contributing Area) – Bodenabtrag (Irregular Slope)