

Bodenerosionsmodellierung in verschiedenen Skalen

Modellvergleiche und Praxistauglichkeit am Beispiel von zwei Einzugsgebieten im
Baselbieter Tafeljura (Kanton Basel-Landschaft/Schweiz)

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der Philosophie
vorgelegt der
Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Basel

von

Stefan Meier
aus Bad Säckingen/Deutschland

Basel, 2010

Genehmigt von der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
auf Antrag von

Prof. Dr. Dr. h.c. Hartmut Leser und PD Dr. Daniel Schaub

Basel, den 22.6.2010

Prof. Dr. Eberhard Parlow
Dekan

Originaldokument gespeichert auf dem Dokumentenserver der Universität Basel



Dieses Werk ist unter dem Vertrag „Creative Commons Namensnennung-Keine kommerzielle
Nutzung-Keine Bearbeitung 2.5 Schweiz“ lizenziert. Die vollständige Lizenz kann unter
creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.5/ch
eingesehen werden.

Bodenerosionsmodellierung in verschiedenen Skalen

Modellvergleiche und Praxistauglichkeit am Beispiel von zwei Einzugsgebieten im Baselbieter Tafeljura (Kanton Basel-Landschaft/Schweiz)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VI
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	VI
Vorwort und Dank	VII
1 Einleitung	1
1.1 Bodenerosions- und Stoffhaushaltsmodellierung in Agrarlandschaften	1
1.1.1 Das Umweltproblem Bodenerosion	1
1.1.2 Methoden und Modellansätze	2
1.1.3 GIS-Einsatz in der Modellbildung	4
1.1.4 Modellbildung und Visualisierung	4
1.2 Bodenerosions- und Stoffhaushaltsforschung am Geographischen Institut der Universität Basel	5
1.2.1 Stand der Arbeit innerhalb der Forschungsgruppe Bodenerosion des Geographischen Institutes der Universität Basel	6
1.2.2 Bisherige Erkenntnisse der Feldbeobachtungen der FBB und Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit	7
1.3 Zielsetzung der Arbeit	8
1.3.1 Arbeitshypothesen	10
1.3.2 Methodisches Grundkonzept	12
2 Der Untersuchungsraum	16
2.1 Naturräumliche Einordnung und geologische Verhältnisse	17
2.2 Hydrologische, geomorphologische, pedologische und klimatische Verhältnisse	18
2.3 Landwirtschaftliche Nutzung der Untersuchungsgebiete	20
2.3.1 Veränderungen der landwirtschaftlichen Nutzung in den Untersuchungs- gebieten 1985-1999	21
3 Methodik	22
3.1 Messungen und Beobachtungen im Feld	22
3.1.1 Felddatenerfassung als Grundlage für die Modellbildung	22
3.1.2 Erosionstestparzellen T30 und T50	22
3.1.3 Niederschlag	23
3.1.4 Gebietsabfluss	24
3.1.5 Drainagen	26
3.1.6 Bodenfeuchte	28
3.1.7 Landnutzungskartierung	31

3.1.8 Feststoffhaushalt.....	31
3.1.9 Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffes.....	32
3.1.10 Erosionsschadenskartierungen	33
3.2 Modellansätze in verschiedenen Dimensionen.....	33
3.2.1 Ein dynamisches, empirisches GIS-gestütztes Feststoffmodell (ESSEM).....	33
3.2.1.1 Ausgangslage für die Modellentwicklung.....	33
3.2.1.2 Die verwendeten Eingangsgrößen und ihre Herleitung	36
3.2.1.3 Modellbildung	39
3.2.2 Das ereignisbezogene deterministische Einzugsgebietsmodell E2/3D	45
3.2.2.1 Die Modellgrundlagen.....	46
3.2.2.2 Die verwendeten Eingangsgrößen und ihre Herleitung	47
3.2.2.3 Kalibrierung und Validierung.....	53
3.2.3 EPIC: Ein Modell zur Abschätzung von langjähriger Erosionsgefährdung und Stoffauswaschung.....	55
3.2.3.1 Die verwendeten Eingangsgrößen und ihre Herleitung	58
3.2.3.2 Kalibrierung und Validierung.....	62
3.3 Visualisierung als partizipative Methode zur nachhaltigen Landschaftsplanung	66
3.3.1 Visualisierung von Teilergebnissen der Modellbildung.....	67
3.3.2 Die Zukunft einer Landschaft.....	69
4 Ergebnisse.....	71
4.1 Daten der Messungen und Beobachtungen im Feld (Hydrologische Jahre 1997-1999).....	71
4.1.1 Niederschlag	71
4.1.2 Verdunstung	72
4.1.3 Gebietsabfluss.....	73
4.1.4 Drainagen	74
4.1.5 Bodenfeuchte.....	76
4.1.6 Wasserbilanz in den hydrologischen Jahren 1997-1999	77
4.1.7 Ergebnisse stoffhaushaltlicher Messungen in den Jahren 1997-1999	77
4.1.8 Erosionsschadenskartierungen	82
4.1.8.1 Anzahl und Verteilung der Erosionsereignisse	82
4.1.8.2 Art, Entstehungsursachen und Verteilung der Erosionsformen	85
4.1.8.3 Bodenabtragungsmengen	87
4.1.8.4 Akkumulation und Off-Site-Schäden, Übertritte.....	88
4.1.8.5 Erosion und Landnutzung im EZG Länenbach	88
4.2 Ergebnisse der Erosionsmodellierungen	90
4.2.1 Ein einfaches GIS-gestütztes Modell zur Bestimmung der beitragenden Flächen in chorischer Dimension im Einzugsgebiet Länenbachtal.....	90
4.2.1.1 Kleinsteinzugsgebiete (Subbasins) im Länenbachtal	90
4.2.1.2 Präferentielle Fliesspfade des Oberflächenabfluss	92
4.2.1.3 Identifikation von Übertrittsstellen.....	93
4.2.1.4. Klassierte Übertrittsstellen.....	94
4.2.1.5 Schadenskarten und Modellsimulation.....	95

4.2.2 Erosionssimulation von Starkniederschlagsereignissen im Einzugsgebiet Riedmattbachtal.....	96
4.2.2.1 Simulationsergebnisse und Vergleich mit Feldmessungen.....	96
4.2.2.2 Extremniederschlagsereignis mit Erosion 3D.....	100
4.2.3 Langfristsimulation von Erosion und Auswaschung auf Schlagebene unter verschiedenen Nutzungs- und Bearbeitungsvarianten mit EPIC.....	101
4.2.3.1 Das Einzugsgebiet Länenbachtal.....	102
4.2.3.2 Das Einzugsgebiet Baldeggersee.....	111
4.2.4 Visualisierung als Partizipationsinstrument.....	113
4.2.4.1 Visualisierung von Erosionsereignissen und berechneten Fließpfaden ...	113
4.2.4.2 Visualisierung von Planungsvarianten für eine nachhaltige Landnutzung	115
5 Diskussion.....	117
5.1 Diskussion der Arbeitshypothesen.....	117
5.2 Vergleich der verschiedenen Modellansätze.....	120
5.2.1 Skalenproblematik.....	121
5.2.2 Einfluss ausgewählter Parameter auf die Modellergebnisse.....	123
5.3 Eignung der Modelle als Planungsinstrument in der Praxis.....	124
5.3.1 Praxistauglichkeit.....	124
5.3.2 Planungskarten und Visualisierung als Anwendungs- und Umsetzungsinstrument.....	124
5.3.3 Erosionsschutz als Landschaftsschutz.....	125
6 Schlussbetrachtung.....	127
6.1 Haupterkenntnisse der Arbeit.....	127
6.2 Schlussfolgerungen für die Modellbildung in der Landschaftsökologie.....	129
6.3 Perspektiven und Ausblick.....	132
7 Zusammenfassung.....	133
8 Literaturverzeichnis.....	135

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Übersichtskarte.....	7
Abbildung 1-2: Regelkreis der Bodenerosion.....	13
Abbildung 2-1: Ausschnitt aus der Landeskarte.....	16
Abbildung 2-2: Geologisches Querprofil durch das Länenbachtal.....	17
Abbildung 2-3: Hangneigungsverhältnisse im Einzugsgebiet des Länenbachs.....	19
Abbildung 2-4: Hauptbodenformen des Länenbachtals.....	20
Abbildung 3-1: Erosionstestparzelle T50 im Länenbachtal.....	23
Abbildung 3-2: Elektronische Regenwippe und HELLMAN-Regenschreiber.....	24
Abbildung 3-3: Abflussmessstation P50 im Länenbachtal.....	25
Abbildung 3-4: Karte der Drainagerohre im Länenbachtal.....	26
Abbildung 3-5: Messanordnung am Drainrohr DC.....	27
Abbildung 3-6: TDR-Prinzip.....	29
Abbildung 3-7: Anordnung der TDR-Messsonden.....	29
Abbildung 3-8: TDR-Messanlage an der Testparzelle T50 (Länenbachtal).....	30
Abbildung 3-9: Arbeitsschritte der Schwebstoffbestimmung.....	32
Abbildung 3-10: Bodenerosionsgefährdungskarte.....	35
Abbildung 3-11: Beispiel für den D8-Algorithmus.....	36
Abbildung 3-12: Ausschnitt aus dem EZG Länenbachtal (Höhenschichten DHM 25).....	38
Abbildung 3-13: Ausschnitt aus dem EZG Länenbachtal (Landnutzungsparzellen).....	38
Abbildung 3-14: Ablaufschema des Modells ESSEM.....	39
Abbildung 3-15: Digitales Höhenmodell des Länenbachtals.....	40
Abbildung 3-16: Einzugsgebiet des Länenbachtals. Fliesspfade exkl. Strassen.....	41
Abbildung 3-17: Einzugsgebiet des Länenbachtals. Fliesspfade inkl. Strassen.....	42
Abbildung 3-18: Übertrittstellen von Oberflächenabfluss und Feststoff.....	43
Abbildung 3-19: Schematische Darstellung der Ein- und Ausgabefunktionen von E3D... ..	48
Abbildung 3-20: Verteilung der Ackerschläge im Riedmattbachtal.....	49
Abbildung 3-21: Verteilung der Bodenformen im Riedmattbachtal.....	51
Abbildung 3-22: Bearbeitung der Reliefparameter im E3D-Präprozessor.....	52
Abbildung 3-23: Agrarpolitik 2000.....	56
Abbildung 3-24: Einzugsgebiet des Baldeggersees.....	57
Abbildung 3-25: EPIC Systemfile-Struktur.....	58
Abbildung 3-26: Beispiel für einen Inputdatensatz.....	59
Abbildung 4-1: Niederschlag im Länenbachtal.....	72
Abbildung 4-2: Monatliche Verdunstungssummen.....	72
Abbildung 4-3: Monatliche Abflussmengen des Länenbachtals.....	73
Abbildung 4-4: Vergleich der Schwebstofffrachten von Drainrohr und Länenbach.....	75
Abbildung 4-5: Vergleich der Schwebstofffrachten von Drainrohr und Länenbach.....	75
Abbildung 4-6: Bodenfeuchtenverhältnisse an der Testparzelle T50.....	76
Abbildung 4-7: Monatliche Wasserhaushaltsbilanz für das Länenbachtal.....	77

Abbildung 4-8: Jahresfrachtvergleich des organischen Kohlenstoffes.....	79
Abbildung 4-9: Darstellung aus der Messreihe der Messsonde YSI 6000XL.....	81
Abbildung 4-10: Höhe des Jahresniederschlages im EZG Länenbach.....	83
Abbildung 4-11: Menge und Intensität erosiver Niederschlagereignisse.....	83
Abbildung 4-12: Ausschnitt der Schadenskartierung im EZG Länenbach.....	84
Abbildung 4-13: Bodenabtrag und Anzahl der Erosionsformen im EZG Länenbach.....	85
Abbildung 4-14: Rillenerosion im Länenbachtal.....	86
Abbildung 4-15: Überlagerung aller kartierten Erosionsformen und Übertrittstellen.....	87
Abbildung 4-16: Jährliche kartierte Bodenabtragsmengen im EZG Länenbach.....	88
Abbildung 4-17: Bodenabtrag nach Hauptnutzungsarten im EZG Länenbach.....	89
Abbildung 4-18: Ausgeschiedene Kleineinzugsgebiete.....	91
Abbildung 4-19: Klassierte Kleineinzugsgebiete.....	92
Abbildung 4-20: Ausschnitt aus dem Länenbachtal (Fließpfade, Strassen & Wege).....	93
Abbildung 4-21: Übertrittsstelle von Abb.4-20 in der Realität.....	93
Abbildung 4-22: Übertrittstellen in den Länenbach.....	94
Abbildung 4-23: Klassierte Übertrittstellen in den Länenbach.....	95
Abbildung 4-24: Ergebnis der Schadenskartierung.....	96
Abbildung 4-25: Vergleich von gemessenen und mit E2D sim. Abflusswerten.....	99
Abbildung 4-26: Starkniederschlagsereignis vom 15.06.1987, simuliert mit E3D.....	101
Abbildung 4-27: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Gerste.....	103
Abbildung 4-28: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Gerste.....	104
Abbildung 4-29: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Mais.....	105
Abbildung 4-30: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Mais.....	105
Abbildung 4-31: Bodenabtrag bei Mais mit Zwischenfrucht.....	106
Abbildung 4-32: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Weizen.....	107
Abbildung 4-33: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Weizen.....	107
Abbildung 4-34: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Hafer.....	108
Abbildung 4-35: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Hafer.....	108
Abbildung 4-36: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Kunstwiese.....	109
Abbildung 4-37: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Kunstwiese.....	110
Abbildung 4-38: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Kartoffeln.....	111
Abbildung 4-39: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Kartoffeln.....	111
Abbildung 4-40: Bodenabtrag durch Wassererosion bei Mais.....	112
Abbildung 4-41: Bodenabtrag bei verschiedenen Düngergaben bei Mais.....	113
Abbildung 4-42: Das Länenbachtal in 3D-Darstellung (Blick nach Nordwesten).....	113
Abbildung 4-43: Das Länenbachtal in 3D-Darstellung (mit Fließpfaden).....	114
Abbildung 4-44: Das Länenbachtal in 3D-Darstellung (mit Feldkartierungen).....	115
Abbildung 4-45: Das Länenbachtal in 3D-Darstellung (Erosionsschutzmassnahmen)....	116
Abbildung 4-46: Das Länenbachtal in 3D-Darstellung (Ersionsschutzmassnahmen).....	116
Abbildung 5-1: Verschiedene Modellansätze in zeitlicher & räumlicher Auflösung.....	122

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1: Übersicht über ausgewählte Bodenerosionsmodelle.....	3
Tabelle 2-1: Eigenschaften typischer Bodenformen.....	19
Tabelle 2-2: Änderung der Landnutzung im EZG Länenbach.....	21
Tabelle 2-3: Änderung der Landnutzung im EZG Riedmattbach.....	21
Tabelle 3-1: Kenndaten der Testparzelle T50 (Länenbachtal).....	23
Tabelle 3-2: Im Modell ESSEM verwendeten Eingangsgrößen.....	37
Tabelle 3-3: Bewertungsskala für die Klassierung der Kleineinzugsgebiete.....	44
Tabelle 3-4: Verteilung der Bodenart im Einzugsgebiet Riedmattbachtal.....	50
Tabelle 3-5: Auszug aus dem Parameterdatensatz für das Schweizer Kulturland.....	51
Tabelle 3-6: Regendaten und Resultate der Berechnungsversuche.....	53
Tabelle 3-7: Erosionsereignisse auf der Testparzelle T30.....	54
Tabelle 3-8: N-Düngerinputs für das EZG Baldeggersee und das EZG Länenbachtal.....	61
Tabelle 3-9: Simulierte Varianten pro Bodenstandort.....	63
Tabelle 3-10: Im EPIC File angepasste Stickstoff- und Phosphatpools im Boden.....	63
Tabelle 3-11: Outputvariablen des EPIC Modells.....	65
Tabelle 3-12: Amtliche digitale Daten und Teilergebnisse aus dem Modelle ESSEM.....	68
Tabelle 4-1: Abfluss des Länenbachs.....	74
Tabelle 4-2: Verschiedene stoffhaushaltliche Parameter der Hochwasserereignisse.....	80
Tabelle 4-3: Ergebnisse der Simulation mit E2D der Testparzelle T30.....	98
Tabelle 4-4: Vergleich der gemessenen und simulierten Werte von P30.....	100
Tabelle 5-1: Anforderungen an Modelle von Wissenschaft und Praxis.....	130

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

2D: 2dimensional

3D: 3dimensional

ABAG: Allgemeine Abtragungsgleichung

BALVL: Bewertungsanleitung zum Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes

DGÖK: Digitale Geoökologische Karte

DHM: digitales Höhenmodell

DTM: Digital Terrain Model

E2D: Modell Erosion 2D

E3D: Modell Erosion 3D

EPIC: Erosion Productivity Impact Calculator

ESSEM: Empirical Statistical Soil Erosion Model

EZG: Einzugsgebiet

FBB: Forschungsgruppe Bodenerosion des Geographischen Instituts der Universität Basel

Vorwort und Dank

Es ist nicht genug, zu wissen, man muss auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.

Johann Wolfgang von Goethe,

Bodenerosions- und Stoffhaushaltsforschung hat eine über 30-jährige Tradition am Geographischen Institut der Universität Basel. An dieser Tradition orientiert sich auch die vorliegende Arbeit, die das Ergebnis einer langjährigen Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Basel darstellt, die bis heute im Rahmen eines Lehrauftrages für Kartographie anhält. Sie nahm ihren Anfang in meiner Assistenzzeit am Geographischen Institut der Universität Basel in den Jahren 1997-1998. Aufgrund eines frühzeitigen Wechsels in die Verwaltung des Kantons Aargau und in die teilweise Selbständigkeit konnte die Arbeit zunächst nicht im Rahmen der Assistenzzeit fertig gestellt werden. Massive gesundheitliche und private Beeinträchtigungen zwangen mich immer wieder zu Unterbrüchen bei der Bearbeitung. Nichts desto trotz konnte die Arbeit Dank einer Vielzahl von beteiligten Personen zum Abschluss gebracht werden.

An erster Stelle sei hier Prof. Dr. Dr. h.c. Hartmut Leser genannt. Er schenkte mir als Assistent sein Vertrauen u.a. auch im Bereich der Lehre und initiierte die Arbeit. Es entwickelte sich über die Jahre hinaus eine Zusammenarbeit auch über die Dissertation hinaus in anderen Projekten (u.a. die Mitautorenschaft im Diercke Wörterbuch Geographie). Er liess mir grosse Freiheit bei der Bearbeitung des Themas und stellte mir immer wieder sein Fachwissen und die hervorragende Infrastruktur des Geographischen Institutes zur Verfügung. Ihm zu verdanken ist auch, dass in schwierigen gesundheitlichen und privaten Situationen meinerseits die Arbeit nie ganz aus dem Blickfeld geriet. Ihm gebührt an dieser Stelle mein grosser Respekt und herzlicher Dank.

PD. Dr. Daniel Schaub als Korreferent der Arbeit stand von Anfang an mit Rat zur Seite und war verantwortlich für die Zusammenarbeit mit dem Agrarökonomischen Institut der ETH Zürich, aus dem die Modellierungen mit EPIC hervorgingen. Er war auch darüber hinaus mit mir zusammen ehemaliges Gründungsmitglied der Firma GeoServe GmbH als eines der ersten Spin-Off Unternehmen der Universität Basel überhaupt.

Das Dissertationsprojekt war eine Fortsetzung vorangegangener Arbeiten und es konnte von Vorgängern viel an Infrastruktur übernommen werden. Viele Menschen waren an den Feldarbeiten und Laborauswertungen beteiligt:

Zu nennen sind hier u.a.: Heidi Strohm, Alois Schwarzentruher, Paul Müller, Jesus Blanco, Valerio Ponziani, und Dr. Michael Wüthrich.

Des Weiteren konnte ich während meiner Assistenzzeit und auch darüber hinaus in vielen guten Gesprächen mit meinen Kollegen am Institut Anregungen für meine eigene Arbeit gewinnen. Hier sind zu nennen: Dr. Daniel Schaub, Dr. Christa Kempel-Eggenberger, Dr. Dieter Dräyer, Jochen Fröhlich, Dr. Martin Huber, Dr. Marius Menz, Dr. Marion Potschin,

Dr. Christoph Wüthrich, Dr. Bernd Hebel, Angelika Neudecker, Dr. Edith Beising und Dr. Petra Ogermann. Mein besonderer Dank geht an Günther Bing für die starke Unterstützung bei der Entwicklung eines eigenen Auswertetools für die EPIC Modellierungen und immer wieder tatkräftige Unterstützung in EDV-Angelegenheiten und an Simon Rolli für gemeinsame Entwicklungen im Bereich der Reliefanalyse und des Modells ESSEM.

Speziell bedanken möchte ich mich bei meinen beiden Firmenpartnern, Assistentenkollegen und Freunden Dr. Daniel Rüetschi und Christoph Seiberth. Daniel Rüetschi hat mir wertvolle Anregungen bei der Durchsicht des Manuskriptes gegeben und auch im Bereich der Orthographie wertvolle Dienste geleistet. Christoph Seiberth war als Assistentenkollege stark mitbeteiligt bei der Felddatenerhebung. Von ihm stammt Unterstützung bei den in dieser Arbeit gemachten stoffhaushaltlichen Untersuchungen. Beide standen mir auch in schwierigen privaten und gesundheitlichen Situationen und während Motivationslöchern als Freunde immer wieder zur Seite.

Im Rahmen meiner Assistenzzeit gehörte zu meinen Aufgaben, das PC-Netzwerk der Abteilung Physiogeographie zu betreuen und mich intensiv in den Lehrbetrieb einzubringen. U.a. konnte ich durch die Übernahmen der GIS-Ausbildung in der Physiogeographie mehrere Diplomanden gewinnen, die ich während meiner Assistenzzeit und weit darüber hinaus betreut habe. Es waren dies: Nicole Bay, Mathias Walter, Urs Walther, Miriam Lähns, Urs Peter, Ralf Meier und Daniel Oppliger. Viele dieser Arbeiten fanden direkt oder auch indirekt Eingang in die vorliegende Dissertation. Weitere Aufgaben waren Lehre im Bereich der Kartographie, Hydrogeographie, Geographische Informationstechnologie, Geländepraktika und Allgemeinen Physische Geographie.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei einigen Personen aus meinem privaten Umfeld bedanken, die zum Teil zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben und mich in vielen unterschiedlichen Lebenssituationen begleitet haben:

Meine Eltern Dieter und Ursula Meier, meine Grossmutter Charlotte Meier(+), mein Bruder Ralf Meier, der mir im Bereich der Visualisierung wertvolle Beiträge für die vorliegende Arbeit geliefert hat. Des Weiteren: Lydia Schürmann, Stephan Voigt, Uli Frank, Alfred Postler, Annabelle Butz, Dr. Karl Geck, Dr. Richard Maurer, Berthold Schmidt-Lahr, Harald Sturm, René Burkhard, Wolfgang Lauber, Julia Zielinski und Dr. Rosetta Meier. Zum Schluss ein herzliches Dankeschön an meine beiden Töchter Jana und Lara und meine Lebenspartnerin Corina Gerspach für ihre grosse Geduld und Liebe.

Bad Säckingen im April 2010

Für Jana und Lara

1 Einleitung

1.1 Bodenerosions- und Stoffhaushaltsmodellierung in Agrarlandschaften

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Agrarlandschaften in der Schweiz immer wieder Veränderungen erfahren. Einige davon seien an dieser Stelle genannt: Ausräumung der landwirtschaftlichen Kulturlächen, Begradigungen der Vorfluter, wachsende Schlaggrößen, Betriebsgrößenwandel, Steigerung der Produktivität. Dies führt auf der einen Seite zu einer Rationalisierung, Spezialisierung und steigenden Erträgen in der Landwirtschaft, auf der anderen Seite aber auch zur Verstärkung von Umweltproblemen. Eines der zentralen Probleme war und ist die Bodenerosion.

1.1.1 Das Umweltproblem Bodenerosion

Durch Niederschläge und Wind werden stets Bodenpartikel und Nährstoffe von der Bodenoberfläche abgelöst, wegtransportiert und an anderer Stelle wieder abgelagert (SCHMIDT, J. 1996). Dieser Bodenabtrag ist in gewissen Grenzen ein natürlicher Vorgang. Die Nutzung des Bodens, besonders durch Ackerbau, führt jedoch zu einer deutlichen Verstärkung erosiver Prozesse, so dass es zu teilweise hohen Bodenverlusten kommt, die durch die Boden Neubildung nicht mehr ausgeglichen werden können.

Als Bodenerosion wird somit die weit verbreitete Sonderform der Abtragung des Bodens durch Wasser und Wind bezeichnet, die über den Umfang natürlicher Abtragungsprozesse hinausgeht und durch die Bodenbewirtschaftung begünstigt oder ausgelöst wird. (LESER et al. 2002). Die Bodenerosion führt damit langfristig zu ausgeprägten Flächendifferenzierungen mit z.T. grossen Unterschieden in Substrat-, Wasser-, Humus- und Nährstoffeigenschaften (WEISE 1990). Erosion tritt auf weitgehend ungegliederten ebenen Hängen mehr oder weniger flächenhaft auf. Ausgeprägte linienförmige Erosionsformen sind zumeist an Tiefenlinien gebunden, in denen der oberflächliche Abfluss konzentriert erfolgt (SCHMIDT, J. 1996).

Für beschleunigte Erosion gibt es folgende Ursachen:

- Unzureichende Bodenbedeckung
- Fehlende ganzjährige Vegetationsdecken, z.B. beim Anbau von Mais
- Grosse Schlaglängen
- Zu intensive Bodenbearbeitung
- Hoher Düngemiteinsatz.

Die Schäden, die durch Bodenerosion entstehen, lassen sich in so genannte on site- und off site-Schäden unterscheiden. Die on site-Schäden beziehen sich dabei auf die Verluste von Bodenmaterial auf der Ackerparzelle selbst und schliessen Schäden an den Kulturpflanzen mit ein. Als off site-Schäden werden Schäden bezeichnet, die durch abgelagertes, von der Ackerfläche abgetragenes Bodenmaterial entstehen. Einer der wichtigsten off site-Schäden entsteht, wenn erodiertes Bodenmaterial, das oft mit Nähr- und Schadstoffen aus Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln behaftet ist, in aquatische Ökosysteme (Vorfluter) gelangt und so zur Gewässereutrophierung führt. Die Reichweite des erodierten Bodenmaterials spielt

dabei eine entscheidende Rolle. Diese Arbeit widmet sich unter anderem genau dem Problem der Reichweite der Erosionsprozesse und der neuralgischen Stellen, an denen erodiertes Bodenmaterial in die aquatischen Systeme übertritt.

Bodenerosion ist ein weitreichendes Umweltproblem mit den Folgen des Verlustes an durchwurzelbarem Boden, Verlust von Humus und Pflanzen Nährstoffen, einer generellen Verschlechterung der Bodenstruktur und - als Folge davon - einer weitreichenden Beeinträchtigung des Bodenluft- und -wasserhaushaltes. Schliesslich kommt es zur Schädigung aquatischer Ökosysteme durch den Eintrag von Feststoffen und damit gebundenen Nähr- und Schadstoffpartikeln und nicht zuletzt Schäden an Strassen und sonstiger Infrastruktur, deren Beseitigung erhebliche finanzielle Mittel erfordert.

Eine Untersuchung der Bodenerosionsgefährdung von MOSIMANN (2003) ergab eine durchschnittliche Erosionsgefährdung für das Baselbiet für das Jahr 2002 von 6.8 Tonnen pro Hektar und Jahr bei einem Maximum von bis zu 35.7 Tonnen pro Hektar und Jahr. Dies bedeutet zwar einen leichten Rückgang der Erosionsgefährdung im Vergleich mit dem Jahr 1992, in dem der durchschnittliche Bodenabtrag bei 7.7 Tonne pro Hektar lag. Es zeigt jedoch deutlich auf, dass Bodenerosion durch Oberflächenabfluss nach wie vor ein erhebliches Umweltproblem im Untersuchungsraum der vorliegenden Arbeit darstellt.

1.1.2 Methoden und Modellansätze

Zur Erosion landwirtschaftlicher Nutzflächen liegt ein umfangreiches, kaum überschaubares Schrifttum vor (SCHMIDT, J. 1996). Folgende Forschungsansätze existieren:

- Forschung, die sich auf die unmittelbare Beobachtung und Erfassung der Erosionsvorgänge und Formen bezieht (z.B. RICHTER 1979; SEILER 1983; JENNE 1987),
- ergänzt durch experimentelle Forschung, um zu grundlegenden verallgemeinerbaren Erkenntnissen zu gelangen (z.B. SCHMIDT, J. 1988),
- und schliesslich Forschung, die sich auf die Vorhersage über den Verlauf und das Ausmass von Erosionsvorgängen als Beitrag für die Planungspraxis und damit die Planung von Schutzmassnahmen konzentriert.

Dies führte zur Entwicklung von *Erosionsmodellen* zur Vorhersage von Erosionsereignissen. Dazu werden oft experimentelle Untersuchungen im Feld zur Erhebung von Eingangsparametern für diese statistischen, empirischen oder physikalischen Modelle durchgeführt. Das wohl bekannteste und weit verbreitetste Modell, welches wie viele Modellansätze auf der statistischen Auswertung von Testflächenmessungen beruht, ist die *USLE* (Universal Soil Loss Equation) von WISCHMEIER & SMITH (1978). Einer der Hauptkritikpunkte an der Verwendung der USLE besteht in der eingeschränkten Übertragbarkeit des Ansatzes auf nicht untersuchte Gebiete. Aus diesem Grund ist die Anwendung der USLE ausserhalb der USA, wo sie entwickelt wurde, sehr problematisch (HENSEL & BORK 1988) und es bedarf in jedem Fall einer Anpassung der einzelnen, in die Gleichung der USLE eingehenden Faktoren an die regionalen Klima- und Bodeneigenschaften (SCHWERTMANN et al. 1990).

Aufgrund der Probleme, die rein empirische Ansätze aufweisen, hat man begonnen, physikalische Erosionsmodelle zu entwickeln. Diese Modelle haben den Vorteil, dass sie auf die meisten Gebiete übertragen werden können. Ihr Parametrisierungsaufwand ist jedoch gross. Die Erhebung der als Eingangsdaten für die Modelle benötigten Boden-, Klima-, Relief-, und Wasserhaushaltsparameter erweist sich als oft unpraktikabel und übersteigt meist die Ressourcen der Planungspraxis.

In dieser Arbeit werden deshalb verschiedene Modelle auf ihre Praxistauglichkeit und ihre Anwendbarkeit in kleinen agrarisch genutzten Einzugsgebieten hin untersucht. Im Mittelpunkt stehen das physikalische Einzugsgebietsmodell *Erosion 3D* (E3D) das Einzelhangmodell *EPIC* (Erosion Productivity Impact Calculator) und ein eigener statistisch-empirischer Ansatz, genannt *ESSEM* (Empirical Statistical Soil Erosion Model), der sich vor allem den Reichweiten der Erosionsprozesse und den Übertrittstellen von erodiertem Bodenmaterial in aquatische Systeme widmet.

Es existiert heute mittlerweile eine ganze Reihe von verschiedenen Erosionsmodellen, deren wichtigste Vertreter in Tabelle 1-1 in einer unvollständigen Auswahl genannt sind.

Tabelle 1-1: Übersicht über ausgewählte Bodenerosionsmodelle. Die in der Forschungsgruppe Bodenerosion des Geographischen Institutes der Universität Basel angewendeten Modelle sind grau unterlegt. Die Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Nach SCHMIDT, J. (1996), verändert.

Modell	Entwickler	Räumlicher Bezug	Zeitlicher Bezug
	<i>Empirisch-statistische Ansätze</i>		
USLE	WISCHMEIER & SMITH 1965	Hang (ungegliedert)	Jahr (langjähriges Mittel)
MUSLE87	HENSEL & BORK 1988	Einzugsgebiet (gegliedert)	Jahr (langjähriges Mittel)
ESSEM	MEIER & ROLLI 1997	Einzugsgebiet (gegliedert)	Ereignis
	<i>Physikalische Ansätze</i>		
CREAMS	KNISEL 1980	Hang (gegliedert)	Einzelereignis
OPUS	SMITH 1988	Hang (ungegliedert)	Einzelereignis
ANSWERS	BEASLEY & HUGGINS 1980	Hang (gegliedert)	Einzelereignis
WEPP	LANE & NEARING 1989	Hang (gegliedert)	Einzelereignis, Langzeitsimulationen
KIEROS/ EUROSEM	WOOLHISER et al. 1990 MORGAN 1992	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis
EPIC	SHARPLEY & WILLIAMS 1990	Einzelhang (ungegliedert)	Einzelereignis Langzeitsimulationen
Erosion 2D/ 3D	SCHMIDT & V. WERNER 1991	Hang (gegliedert)	Einzelereignis

1.1.3 GIS-Einsatz in der Modellbildung

Die rasante Entwicklung der Geographischen Informationstechnologie seit Mitte der 1990er Jahre haben sich auch viele Modellentwickler zu nutze gemacht. Die meisten der Einzugsgebietsmodelle (z.B. E3D) basieren auf Rasterdaten und somit bieten Geographische Informationssysteme (GIS) ideale Voraussetzungen, grosse Datenmengen flächendeckend zu handhaben. Über Schnittstellen können die Daten als Eingangsparameter an die Modelle weitergegeben werden.

Neben dem GIS als Datenlieferant für die Erosionsmodelle und auch als Visualisierungsinstrument für flächendeckende Ergebniskarten auf Einzugsgebietsbasis, bietet GIS von sich aus die Möglichkeit, mit einfachen Überlagerungsverfahren Modelle zu entwickeln (u.a. HUBER 1994). Beispielsweise kann die USLE komplett in einem GIS abgebildet werden (SCHAUB & PRASUHN 1991). Da die Reliefeigenschaften bei der Erosionsmodellierung eine entscheidende Rolle spielen, kommt der digitalen Reliefanalyse, wie sie heute als Standardwerkzeug in den meisten GIS-Programmen zur Verfügung steht, eine gewichtige Rolle zu. Erwähnt sei an dieser Stelle auch das von DRÄYER (1996) entwickelte Basler Bodenerosionsmodell.

Es gibt heute eine Fülle von Arbeiten, die sich mit GIS-gestützten Modellierungsverfahren beschäftigen. In der Regel dient das GIS dabei als Datenmanagement-Werkzeug, das über eine Schnittstelle die Daten an statistisch-empirische oder physikalische Modelle weitergibt und anschliessend die Ergebnisse wieder aufnimmt. Diese Prozedur gehört mittlerweile zum Standard und wird häufig gar nicht mehr explizit erwähnt. Die heutigen Modelle werden in kürzerer Zeit und mit weniger personellen und finanziellen Ressourcen entwickelt und damit für die Planungspraxis immer tauglicher. Die Gründe liegen im Einbinden von Reliefanalysetools und mathematischen Gleichungen (z.B. *Model Builder* von ArcGIS) in hydrologische Analyseverfahren und der Möglichkeit, Überlagerungen und Reklassifizierungen vornehmen zu können.

1.1.4 Modellbildung und Visualisierung

Die rasante Entwicklung der letzten Jahre im Bereich der Hard- und Software schafft inzwischen zahlreiche Möglichkeiten, Landschaft und Landschaftsveränderungen nahezu fotorealistisch zu visualisieren. Es geht also im weitesten Sinne um Landschaftsvisualisierungen.

Der Begriff der Visualisierung beinhaltet eine Kommunikationsform, die auf einer bildlichen Darstellung der zu vermittelnden Aussagen beruht. Sie dient zur Veranschaulichung und Vereinfachung von komplexen Inhalten und Zusammenhängen. Ideen und Konzepte können auf den Raum angewendet werden. Auswirkungen von Planungsvorhaben auf das Landschaftsbild sind dadurch im Voraus beurteilbar (LANGE et al. 2003). In der vorliegenden Arbeit soll die Visualisierung von Modellergebnissen zum Erosionsverhalten der Landschaft einen Beitrag leisten, um komplexe und für den Laien zum Teil wenig verständliche Modellergebnisse und deren Aussagen für die Landschaft verständlich zu machen.

Ausgangsbasis für 3D-Landschaftsvisualisierungen muss immer ein digitales Höhenmodell sein. Ein effizientes Arbeiten scheint dabei nur möglich, wenn eine mehr oder weniger automatisierte 3D-Darstellung von GIS-Datenbeständen erfolgt. Somit stellt die GIS-Datenbasis (vor allem auch jene der Modelloutputs) für die 3D-Visualisierung die wichtigste Voraussetzung dar. Visualisierungen sind jedoch - in Abhängigkeit von den Datengrundlagen und den Kenntnissen der Software - sehr zeitintensiv, so dass klare Fragestellungen und die Einsatzmöglichkeiten in der Landschaftsplanung zu prüfen sind.

Neben den klassischen 2D-Ergebniskarten der Modelloutputs von Erosionsmodellen soll in dieser Arbeit die Methodik der 3D-Visualisierung sowohl von Modellergebnissen als auch von Zukunftsszenarien, die sich aus den Erosionsschutzmassnahmen ergeben, als partizipativer Ansatz zum Einsatz kommen.

1.2 Bodenerosions- und Stoffhaushaltsforschung am Geographischen Institut der Universität Basel

In der Forschungsgruppe Bodenerosion- und Stoffhaushalt des Geographischen Institutes der Universität Basel (FBB) wird seit 1975 unter der Leitung von Prof. Hartmut Leser geoökologische Erosions- und Stoffhaushaltsforschung nach den Prinzipien der Landschaftsökologie betrieben (u.a. MOSIMANN 1980). Der geoökologische Ansatz der Bodenerosionsforschung (LESER 1986) fordert, dass die Bodenerosion eingebettet in andere Landschaftshaushaltsprozesse betrachtet wird.

Von Beginn an stand dabei ein ganzheitlicher Anspruch an das Methodenspektrum zur Erfassung und quantitativen Beschreibung der stoffhaushaltlichen Zusammenhänge im Vordergrund. Der bisherige Schwerpunkt der Arbeiten lag hauptsächlich in der topischen Dimension, so dass ein grosser Erfahrungsschatz bei der Erfassung der stoffhaushaltlichen Prozesse sowohl unter natürlichen als auch unter experimentellen Bedingungen in dieser Dimension zur Verfügung steht (z.B. DIPNER 1986; PRASUHN 1991; HEEB 1991; HOSANG 1995; SCHAUB & PRASUHN 1993). Durch die kontinuierlichen Messungen (Monitoring) des Erosions- und Stoffumlagerungsgeschehens in verschiedenen Einzugsgebieten des Baselbieter Tafeljuras und des Hochrheintals steht heute eine Fülle quantitativer Daten über einen Zeitraum von ca. 20 Jahren zur Verfügung, in welchem zugleich ein starker Wandel in der Agrarstruktur stattfand.

Die Messziele der bisherigen Forschungsarbeiten waren:

- *Die potentielle Erfassung des Erosionsgeschehens in kleinen, in sich homogenen Einheiten auf Testparzellen und Einzelhängen (topische Dimension).*
- *Die Erfassung von Sediment- und Stoffausträgen an den Vorflutern der Einzugsgebiete (chorische Dimension).*

Die bisherigen Arbeiten, in deren Kontinuität die vorliegende Arbeit steht, hatten primär das Ziel, die räumliche und zeitliche Variabilität des Erosionsgeschehens zu erfassen und

dabei auch mögliche präventive Erosionsschutzmassnahmen zu erarbeiten (vergleiche SCHMIDT, R.-G. 1979; SEILER 1983; STAUSS 1983; VAVRUCH 1988; SCHAUB 1989; PRA-SUHN 1991). Neben den nach dem ganzheitlichen Ansatz betriebenen konzeptionellen und messtechnischen Methoden wie Erosionsschadenskartierung, Abtragsmessungen auf Testparzellen und die Erfassung von Stoffumlagerungen auf Ackerschlägen durch flexible Sedimentfangkästen, kommen heute vermehrt digitale Modellansätze zur Beurteilung des Sediment- und Stoffhaushaltsgeschehens in agrarisch genutzten Einzugsgebieten zum Einsatz (DRÄYER 1996; MEIER-ZIELINSKI 1997). Einen hohen Anteil daran hat die in den letzten 15 Jahren rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Geographischen Informationssysteme. Durch diese wurde es möglich, grosse Mengen räumlicher Daten sowohl als Eingabeparameter für physikalisch-mathematische Modelle aufzubereiten (z.B. GRUNWALD 1998), als auch durch verschiedenste Analysetools GIS-gestützte Verfahren zur Beurteilung des Erosionsgeschehens zu entwickeln (DRÄYER 1996; FRÖHLICH et al. 1994).

Zur Beurteilung des Umlagerungsgeschehens und der Reichweiten von Erosionsprozessen bleiben auch in Zukunft gezielte Messungen im Gelände unabdingbar, um die vorhandenen Erosionsmodelle zu kalibrieren und validieren sowie um neue GIS-gestützte Verfahren als Entscheidungshilfe für die Beurteilung des Erosionsverhaltens von Einzugsgebieten - nicht zuletzt für die Planungspraxis - zu entwickeln.

1.2.1 Stand der Arbeit innerhalb der Forschungsgruppe Bodenerosion des Geographischen Institutes der Universität Basel

Die vorliegende Dissertation ist Bestandteil des vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) seit langem unterstützten Bodenerosionsprojektes des Geographischen Institutes der Universität Basel, mit den beiden Hauptuntersuchungsgebieten Tafeljura und Hochrheintal (Abb. 1-1). Dies gewährleistet die für die verschiedenen Modellentwicklungen und Anwendungen wichtige kontinuierliche Felddatenerhebung. Da bei Modellentwicklungen und Anpassungen bestehender Modelle vor allem bei der Parametrisierung ein hoher zeitlicher und personeller Aufwand betrieben werden muss, lag eine enge Zusammenarbeit mit den beiden vom SNF finanzierten Doktoranden, CHRISTOPH SEIBERTH und BERND HEBEL, nahe. Dadurch wurden die Synergien bei der Felddatenerfassung und Modellentwicklung optimal genutzt.

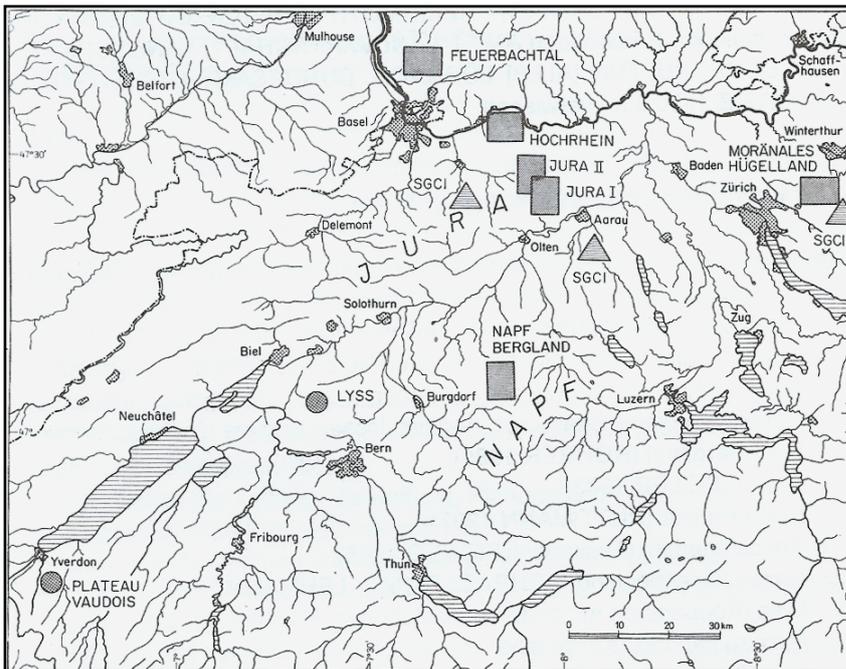


Abbildung 1-1: Übersichtskarte: Bodenerosions-Forschungsgebiete des Geographischen Institutes der Universität Basel. Die Untersuchungsgebiete „Länenbachtal“ und „Riedmattbachtal“ liegen im Gebiet Jura I.

1.2.2 Bisherige Erkenntnisse der Feldbeobachtungen der FBB und Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit

Die kontinuierlichen und langjährigen geökologischen Messungen in den Untersuchungsgebieten Nordwestschweizer Tafeljura und Hochrheintal stellen eine wertvolle Datenbasis für die in dieser Arbeit getätigten Modellentwicklungen und -validierungen dar. Aus der Vielzahl der Untersuchungsergebnisse lässt sich schliessen, dass für die Modellierung von Stoffumlagerungen auf Einzugsgebietsebene folgende Sachverhalte zu beachten sind:

- Ein Grossteil der Gebietsausträge über den Vorfluter findet bei Extremereignissen statt. Daraus ergibt sich bei der Anwendung von ereignisbezogenen Modellen eine Konzentration auf grosse Niederschlagsereignisse.
- Bei den Gebietsausträgen sind oft nur einzelne Flächen für den Stoffaustrag verantwortlich. Diese stoffliefernden, „beitragenden“ Flächen sind je nach Witterung, Bodenzustand, Landnutzung und Jahreszeit räumlich unterschiedlich aggregiert.
- Durch lineare Erosion werden zum Teil lange Umlagerungsstrecken erreicht, die je nach Beschaffenheit der Fliesspfade bis zum Vorfluter reichen können.
- Die Beschaffenheit und Ausprägung der Uferstreifen kann zum Teil zu einem Rückhalt von Sedimentmaterial beitragen (KOCH 2007).
- Modellansätze aus grossparzellierten Gebieten (z.B. USA) sind schwer in der Nordwestschweiz anwendbar, da zahlreiche Flurelemente (Grünstreifen, Hecken usw.) und ein dichteres Wege- und Kanalisationsnetz die Agrarlandschaft prägen (SEIBERTH 2001).

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Es stellten sich in dieser Arbeit folgende methodische und methodologische Fragen:

- Wie und auf welche Weise ist Bodenerosionsmodellierung zu betreiben, um realitätsnahe Modellergebnisse zu erzielen?
- Inwieweit bestehen zwischen Bodenerosionsmodell und Landschafts- bzw. Geoökosystemmodell (LESER 1997) Übereinstimmungen oder Divergenzen?
- Wie können Modellsimulationen in eine praxistaugliche Aussage überführt werden?
- Können Ergebnisse von Erosionsmodellen und Landschaftsvisualisierungen einen politischen Anstoss zu einem generellen Landnutzungswandel liefern und wie müssen wissenschaftliche Modellergebnisse praxistauglich aufbereitet werden?
- Welche Partizipationsverfahren eignen sich, um Forschungserkenntnisse in praxistaugliche Lösungen umzusetzen.

Daraus ergaben sich für die vorliegende Arbeit folgende Forschungsansätze:

- Das Fortführen der Felddatenerhebung mit einer Intensivierung in den Bereichen Bodenwasserhaushalt und Erfassung der Flurstruktur.
- Die Entwicklung und Anwendung von Bodenerosionsmodellen.

Die bisherigen Erfahrungen und Anwendungen der USLE ergaben im Vergleich zu den gemessenen langjährigen Erosionsraten im Tafeljura keine guten Ergebnisse. Zudem ist die USLE wenig geeignet, um Simulationsergebnisse nur einzelner Jahre realistisch abzubilden. Aus diesem Grund wurde das Modell EPIC (WILLIAMS & SHARPLEY 1990), das bereits teilweise an schweizerische Verhältnisse angepasst worden war (MAURER 1995), als Modell für die topische Dimension gewählt.

Dieses angepasste Modell ermöglichte es, eine grosse Anzahl unterschiedlicher Anbauvarianten, Düngungsmethoden und -mengen, verschiedene Bodeneigenschaften und Wetter-situationen in unterschiedlicher Kombination als Inputvariablen zu verwenden und so den Einfluss der einzelnen Faktoren auf das Erosionsverhalten und den Stoffhaushalt in topischer Dimension genauer zu betrachten. Die Simulationsergebnisse können zudem in einem agrarökonomischen Modell als Inputparameter verwendet werden. Dies geschah am Institut für Agronomie der ETH Zürich (KEUSCH 2000) (siehe Kap. 3.2.3).

Der Landnutzungswandel während der letzten 15 Jahre in den Untersuchungsgebieten des Tafeljura (Abnahme des Maisanbaus und Zunahme von Wintergetreide und Grünland), lässt die Vermutung zu, dass sich daraus auch Auswirkungen auf den Stoff- und Sediment-austrag aus den Untersuchungsgebieten ergeben. Da es sich um relativ kleine agrarisch genutzte Einzugsgebiete handelt, wurde das Erosionsmodell EROSION3D an die lokalen Agrarverhältnisse angepasst und verschiedene Niederschlagsereignisse über den Zeitraum des Nutzungswandels (1985-1998) simuliert, um die Tauglichkeit dieses Erosionsmodells für

die Abschätzung von Nutzungsänderungen auf den Sediment- und Stoffaustrag zu testen. Dabei sollte ein Modell eingesetzt werden, das mit Schnittstellen zu einem GIS ausgestattet ist und amtliche digitale Datensätze mit einem geringen Parametrisierungsaufwand verwenden kann. Daher wurde das ereignisbezogene Modell E3D (SCHMIDT, J. 1996) gewählt. Um das Modell für das Einzugsgebiet zu kalibrieren, muss mit der 2D-Variante des Modells (EROSION2D, E2D) zunächst einmal eine Anpassung auf die topische Dimension (d.h. auf Schlagebene, Testparzelle) erfolgen. Hierfür konnten die langjährigen Messungen auf den Erosionstestparzellen verwendet werden (PRASHUN 1991).

Aus den bisherigen Erfahrungen im Umgang mit mathematisch-physikalischen Modellen und den bisherigen Erkenntnissen der Felddatenerhebungen lag es ausserdem nahe, einen eigenen *einfachen empirischen, GIS-gestützten Ansatz* zu entwickeln, mit dem das Erosionsverhalten eines ganzen Einzugsgebietes in Abhängigkeit von naturräumlicher Ausstattung und Witterungsgeschehen des Tafeljura wiedergegeben werden kann. Dabei sollten nicht wie bisher die Lokalisierung der on site-Erosionsschäden im Vordergrund stehen, sondern die Reichweiten (Fliesspfade) des Erosionsprozesses, also der Übertritt von Erosionsmaterial in die Vorfluter.

Auf der Grundlage vorhandener flächendeckender GIS-Daten, welche die naturräumliche Ausstattung (Relief, Boden, Landnutzung, Flurstruktur) des Untersuchungsgebietes Länenbachtal (Tafeljura) zeigen, wurde ein einfaches Überlagerungsmodell entwickelt. Dabei spielte vor allem die digitale Reliefanalyse und die durch langjährige Feldkartierungen (u.a. von Erosionsereignissen) gewonnenen empirischen Erkenntnisse eine grosse Rolle. Ebenfalls konnten die Ergebnisse des von DRÄYER (1996) entwickelten Basler Bodenerosionsmodells mit eingebunden werden.

Die Beurteilung der Simulationsergebnisse sowohl in topischer Dimension, als auch der Ergebnisse auf Einzugsgebietsebene und der Vergleich mit dem einfachen GIS-gestützten Ansatz soll zeigen, auf welchem Art und Weise Erosionsmodellierung in die Planungspraxis integriert werden kann und welche Ansätze am realitätsnahesten das Gebietsverhalten mit einem vertretbaren Aufwand für die Modellparametrisierung widerspiegeln.

Die Planungspraxis und vor allem die politischen Entscheidungsträger sind häufig mit den aus der Forschung heraus entwickelten Modellansätzen und Erkenntnissen überfordert. Gefragt sind deshalb einfache, vernetzte, qualitative Modelle, die einen Prozess in seiner Systemumgebung abbilden und Veränderungen von Systemelementen, als Folge von politischen bzw. planerischen Entscheiden, simulieren können. Dies erfordert eine Vereinfachung der Modellerkenntnisse aus den mathematischen bzw. GIS-gestützten Verfahren in durch Expertenwissen gestützte einfache Systemmodelle.

In dieser Arbeit wird eine kritische Beurteilung der Modellergebnisse im Hinblick auf deren Planungstauglichkeit durchgeführt und versucht, aus den unterschiedlichen Ansätzen einen planungstauglichen Konsens zu entwickeln. Dafür wird die Methode der *3D-Landschaftsvisualisierung*, die auf den Ergebnissen der eingesetzten Modelle E3D und ESSEM beruht, als Möglichkeit ausgelotet.

1.3.1 Arbeitshypothesen

Folgende Arbeitshypothesen werden aufgestellt:

Hypothese 1:

Durch Anwenden eines ereignisbezogenen Einzugsgebietsmodells für Extremereignisse der letzten 15 Jahre in einem langjährigen Untersuchungsgebiet (Riedmattbachtal, 1.1 km²) im Schweizerischen Tafeljura lässt sich der Einfluss eines Nutzungswandels realitätsnah simulieren.

Mit dem Modell können Zukunftsszenarien der Landnutzung und der Gebietsausstattung so simuliert werden, dass der Einfluss von Nutzungsalternativen auf den Feststoffhaushalt überprüft werden kann. Eine Schwierigkeit bei der Anwendung des mathematisch-physikalischen Einzugsgebietsmodells E2/3D ist der hohe Parametrisierungsaufwand, der zusätzlich zum Basismessprogramm weitere Feldmessungen nötig macht. U.a. ist die Anfangsbodenfeuchte vor einem Niederschlagsereignis ein wichtiger Eingabeparameter. Daraus lässt sich Hypothese 2 ableiten.

Hypothese 2:

Die Ausgangsbedingungen (Anfangsbodenfeuchte, Bodenaggregatzustand, Bodenbedeckung) bei extremen Abtragsereignissen spielen eine entscheidende Rolle für die Anwendung von physikalisch-mathematischen Modellen. Im vorliegenden Fall des Modells E3D wird die Ausgangsbodenfeuchte als entscheidender Faktor für die Kalibrierung vermutet.

Daraus leitet sich die Annahme ab, dass der Vergleich von Niederschlagsereignissen aus den Jahren 1983-1997 aufgrund der hohen Sensibilität des Modells auf die Ausgangsbodenfeuchte vor einem Erosionsereignis nur für Extremereignisse mit einem Wassergehaltssättigungsgrad des Bodens von um 100 % möglich ist. Ereignisse, die auf ungesättigtem Boden stattfanden, lassen sich nicht für die Modellvalidierung verwenden.

Hypothese 3:

Es lässt sich mit GIS-Techniken (digitale Reliefanalyse, gewichtete Overlayfunktionen) ein einfaches Modell erstellen, welches das Gebietsverhalten von Extremniederschlagsereignissen in kleinen Einzugsgebieten (chorischen Dimension) in Abhängigkeit von deren naturräumlichen Ausstattung gut widerspiegelt.

In der vorliegenden Arbeit sollen neben dem Einsatz ereignisbezogener Erosionsmodelle mit Hilfe von GIS-Techniken das potentielle Erosionsverhalten in einem der langjährigen Untersuchungsgebiete aufgrund der naturräumlichen Ausstattung dargestellt werden. Das

bisherige von der FBB Basel entwickelte GIS-gestützte Bodenerosionsmodell (DRÄYER 1996) zeigt die potentiellen Erosions- und Akkumulationszonen auf. Es basiert auf der BALVL (Bewertungsanleitung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes; MARKS et al. 1992) und der ABAG (Allgemeine Bodenabtragungsgleichung; SCHWERTMANN et al. 1983; BORK & SCHRÖDER 1996). Verbesserungswürdig erscheinen hier die Erweiterung des Modells hinsichtlich der Reichweiten der Erosionsprozesse und eine verbesserte Einbindung der naturräumlichen Ausstattung.

Hypothese 4:

Der Vergleich der mit GIS-Techniken modellierten Fliesspfade, Übertrittsstellen und des Schadensbildes auf den Ackerschlägen zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den langjährigen Erosionsschadenskartierungen im Gelände.

Die Felderhebungen aus den Jahren 1987-1999 wurden sehr detailliert ausgewertet und die Schadensflächen und Übertrittsstellen digitalisiert. Diese können mit den Modellergebnissen überlagert und verglichen werden.

Hypothese 5:

Durch den Einsatz amtlicher digitaler Datensätze kann der Einsatz des Modells in der Praxis erleichtert werden.

Viele der physikalisch-mathematischen Modelle verlangen Inputparameter, die im Gelände unter dem Einsatz grosser finanzieller und personeller Ressourcen erhoben werden müssen. Durch die Verwendung von standardisierten amtlichen digitalen Datensätzen kann dieser Aufwand minimiert und so die Praxistauglichkeit des eingesetzten Modells erhöht werden (z.B. DRÄYER 1995).

Hypothese 6:

Ein Vergleich der unterschiedlichen Modellansätze belegt für die einfachen GIS-gestützten Modellansätze eine höhere Praxistauglichkeit.

Ihr Nutzen liegt darin, dass bei raschen Veränderungen der Landwirtschaft z.B. sehr schnell Extensivierungsflächen ausgeschieden werden können, welche einen hohen Beitrag zur Verminderung des Feststoffeintrages in die Fliessgewässer leisten. Ebenso lassen sich durch Renaturierungsmassnahmen an den Vorflutern die Übertrittsstellen von Feststoffmaterial in die Vorfluter stark vermindern (KOCH 2007). Daraus ergibt sich Hypothese 7.

Hypothese 7:

Das einfache GIS-gestützte Modell ESSEM stellt ein praxistaugliches Instrument für eine erosionsmindernde und damit nachhaltige Bodennutzung dar.

Das Modell kann aufgrund seiner Einfachheit mit standardisierten Verfahren das landwirtschaftliche Einzugsgebiet modellieren, erreicht aber immer noch einen hohen Grad an wissenschaftlicher Exaktheit.

Hypothese 8:

Die Vielfalt praktischer Fragestellungen in Landschaftsplanung, Gewässer- und Bodenschutz erfordert, wegen der verschiedenen problembedingten Dimensionen von Ansatz und Methode, ein breites Modellangebot.

Sollen langjährige Abtragsraten für einzelne Feldfrüchte auf einzelnen Ackerschlägen abgeschätzt werden, wird ein anderes Modell eingesetzt als bei der Suche von möglichen Extensivierungsflächen in einem Einzugsgebiet im Rahmen der Ökologisierung der Landwirtschaft. Je nachdem welche Thematik und welche Dimension betrachtet werden, müssen unterschiedliche Modelle eingesetzt werden.

Hypothese 9:

Die Visualisierungen von Zukunftsszenarien des Landschaftsbildes und der Landschaftsfunktionen unter Berücksichtigung der durch das ESSEM-Modell gelieferten Ergebnisse fördern den partizipativen Prozess der Landschaftsplanung.

Die aus dem Modell ESSEM gewonnenen Erkenntnisse lassen sich für die Planungspraxis durch moderne Visualisierungsmethoden anschaulich darstellen. Anschliessend lassen sich Planungsalternativen, die Erosionsschutzmassnahmen und alternative Landnutzung beinhalten, aufzeigen. Damit steht eine Methode zur Verfügung, welche die Schlussfolgerungen aus den Modellergebnissen für eine nachhaltige Landschaftsentwicklung in die Planungspraxis umsetzen kann.

1.3.2 Methodisches Grundkonzept

Das langjährige vom Geographischen Institut der Universität Basel betriebene Basismessprogramm wurde von dieser Dissertation vollständig übernommen, teilweise erneuert oder modifiziert und zum Teil auch stark ergänzt. Eine detaillierte Beschreibung der Feldmessungen des Basismessprogramms, die hier nur kurz aufgeführt sind, findet sich in der Arbeit von PRASUHN (1991). Da der Prozess des Erosionsgeschehens nicht losgelöst von den sonstigen stoffhaushaltlichen und wasserhaushaltlichen Prozessen in den Einzugsgebieten

betrachtet werden kann, lässt er sich am besten in Form eines Prozess-Korrelations-Systems darstellen (Abb. 1-2).

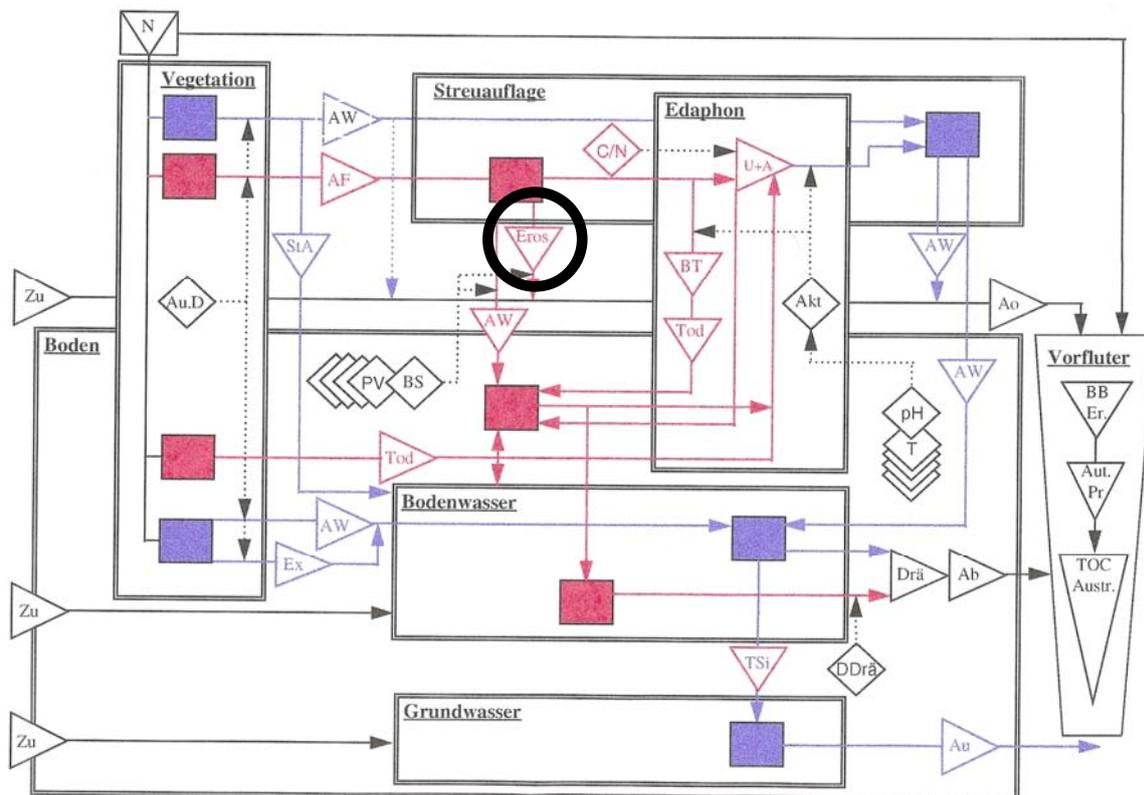


Abbildung 1-2: Regelkreis der Bodenerosion, dargestellt als Prozess-Korrelations-System. Nach LESER (1997), verändert. Die Abbildung zeigt den Prozess der Bodenerosion (Eros) als Teil des Landschaftshaushaltes mit seinen Reglern, Speichern und Prozessen.

Legende zu **Abbildung 1-2:**

 <u>Regler</u>	 <u>Prozess</u>	 <u>Speicher</u>
A u. D Akt. BS C/N DDrä pH PV T	Ab Ao Au AF AW Aut. Pr. BB Er. BT Drä Eros. Ex N StA Tod Tsi U+A Zu	BW Boden Bodenwasser Edaphon Grundwasser Streuauflage Vegetation
Art und Dichte der Vegetation Aktivität der Bodenorganismen Bodenstruktur CN-Verhältnis der Streu Dichte des Drainagenetzes Acidität des Milieus Porenvolumen Temperatur	Basisabfluss Oberflächenabfluss Grundabfluss Abfall/Abwurf Auwachung Autochthone Produktion Bachbeterosion Bioturbation Drainagenabfluss Erosion Exudation Niederschlag Stammabfluss Absterben von Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen Tiefenversickerung Um- und Abbau Zufluss aus anderen Systemen	Bodenwasser Bodenkörper Bodenwasser Konsumenten Detruenten Grundwasser Auflagehorizont und humoser Oberboden Vegetation (ober- und unterirdisch)

Das System erfasst die wichtigsten Prozesse, Speicher und Regler des realen Landschaftsausschnittes. Daraus wird auch die grosse Bedeutung der Felddatenerhebung für die Modellkalibrierung und -validierung ersichtlich. Um dem zum Teil hohen Parametrisierungsaufwand der verwendeten Modelle zu genügen, ist eine gut ausgestattete Felddatenerfassung unerlässlich. Es besteht ein grosser Bedarf an langjährigen Feldmessungen als Inputparameter für Modelle, um die Variabilität des realen Geschehens in der Landschaft unter verschiedenen Bedingungen zu verstehen. Um in der FBB die seit vielen Jahren bestehende Erfassung von stoff- und wasserhaushaltlichen Parametern fortzusetzen, wurde auch vom Verfasser am bisherigen Basismessprogramm (beschrieben u.a. bei PRASUHN 1991) festgehalten.

Folgende Messeinrichtungen wurden in den beiden Einzugsgebieten Länenbachtal und Riedmattbachtal (Baselbieter Tafeljura) betrieben:

- Abflussmesstationen P50 (Abb. 3-3) und P30 mit automatischen Probenehmern bei Hochwassereignissen und Beprobung des Basisabflusses.
- Drainageabflussmessstation zur Dauerbeobachtung (Monitoring) des Stofflieferverhaltens (Feststoff- sowie Nitrat- und Phosphatfrachten) der grossen, in den Länenbach einleitenden Drainagerohre sowie ebenfalls automatische Probenehmer bei Hochwasserereignissen.
- Testparzelle T50 (Abb. 3-1) mit Erosionsmessparzelle (3m x 20m) mit 12.5 % Neigung, die ständig *schwarzbrach* gehalten wird.
- Bodenfeuchtemessstation (Abb. 3-6 bis 3-8): Erfassung der Bodenfeuchte in der Testparzelle T50 zur Bestimmung des Einflusses der Anfangsbodenfeuchte bei Abtragsereignissen.
- Erfassung des Niederschlags und der Luftfeuchte zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration, um Wasserbilanzen zu ermitteln.
- Kartierung der Erosionsschäden (onsite/offsite) bei Starkniederschlagsereignissen zur Verifizierung der GIS-gestützten Modellierung von Fliesswegen und Übertrittsstellen.
- Regelmässige Landnutzungskartierungen: Aufnahme der Landnutzung im Mai und November im Masstab 1:2'500 und gleichzeitige Erfassung der Bearbeitungsrichtung und des Bodenbedeckungsgrades in Prozent.

Die Felddatenerhebung diente sowohl der Fortführung der langjährigen Messreihen als auch zur Parametrisierung der Eingangsdaten der in dieser Arbeit verwendeten Modelle sowie zur Entwicklung eigener, einfacher GIS-gestützter Modellansätze. Nur durch regelmässige Feldbeobachtungen lassen sich die richtigen Modellansätze für die unterschiedlichen Massstabsbereiche wählen. Den Verlust des Bezuges zu realen alltäglichen Prozessen in der Landschaft sollte auch ein am Bildschirm arbeitender Modellierer nicht einfach hinnehmen. Wertvolle Felderfahrung lässt sich auch in absehbarer Zukunft nicht vollständig durch Computersimulationen ersetzen. Gerade bei einem extremen Erosionsereignis, wie

es z.B. im Januar 1999 im Länenbachtal stattgefunden hat, liessen sich neue Erkenntnisse über Fliesswege und Übertrittstellen im Feld gewinnen, die durch eine Modellsimulation nicht wiedergegeben werden konnten. Regelmässige Landnutzungskartierungen, Kartierungen von Übertrittstellen, Messungen am Gebietsausfluss, Erhebung meteorologischer Rahmenparameter und Kartierung nach Erosionsereignissen stellen die Datenbasis für die Modellkalibrierung und -validierung dar und können nicht durch Literaturstudien ersetzt werden. Als weitere, erst in jüngster Zeit vermehrt angewandte Methode kommt die 3D-Visualisierung der Modellergebnisse bzw. von Landschaftsszenarien zum Einsatz.

2 Der Untersuchungsraum

Als Untersuchungsraum für die Erfassung der unterschiedlichsten Felddaten und die Anwendung bzw. Entwicklung der verschiedenen Modellansätze dienten die agrarisch genutzten Wassereinzugsgebiete *Länenbachtal* (LB) (Gemeinde Rothenfluh/Kanton Basel-Landschaft [CH]) und *Riedmattbachtal* (RM) (Gemeinde Anwil/Kanton Basel-Landschaft [CH]) im Nordwestschweizer Tafeljura. Die beiden Untersuchungsgebiete befinden sich auf den Kartenblättern 1068 (Sissach) und dem angrenzenden Blatt 1069 (Frick) des Kartenwerkes 1:25'000 von SWISSTOPO und weisen eine Grösse von 2.7 km² bzw. 1.1 km² auf (Abb. 2-1).

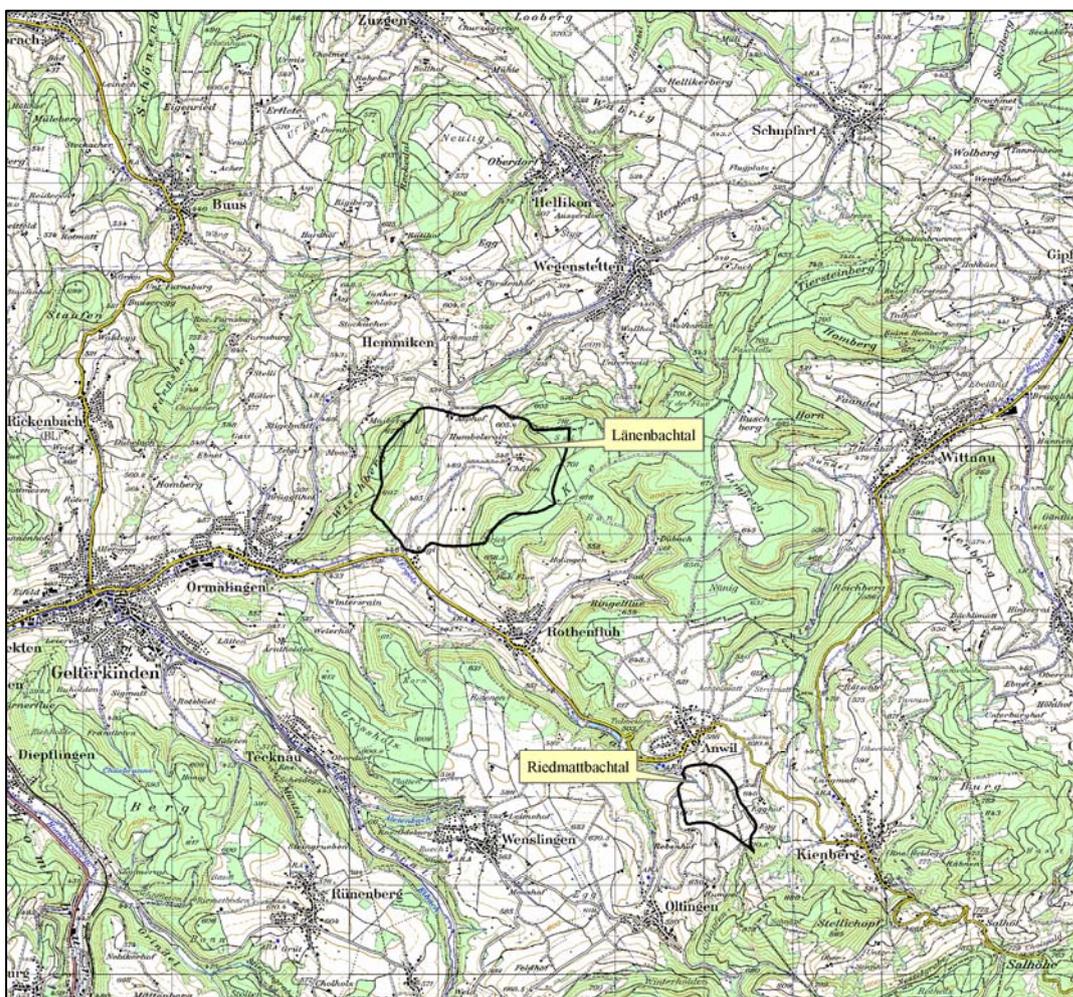


Abbildung 2-1: Ausschnitt aus der Landeskarte 1:50'000 von SWISSTOPO. Die beiden Untersuchungsgebiete liegen im Baselbieter Tafeljura in den Gemeinden Rothenfluh und Anwil.

Die erste Anpassung des EPIC-Modells an schweizerische Verhältnisse erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrarökonomie der ETH Zürich. Dafür wurde ein fiktiver Standort aus dem Einzugsgebiet des Baldeggersees (ca. 68 km², Kanton Luzern) im

Schweizerischen Mittelland verwendet. Da sich jedoch die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Felddatenerfassungen und die Entwicklung des Modells ESSEM nur auf die Einzugsgebiete des Tafeljura beziehen, sei an dieser Stelle auf eine Kurzcharakteristik des Einzugsgebietes Baldeggersee in Kap. 3.2.3 verwiesen.

2.1 Naturräumliche Einordnung und geologische Verhältnisse

Abbildung 2-2 zeigt ein geologisches Profil. Die beiden Untersuchungsgebiete liegen vollständig im Tafeljura, welcher durch die typischen Tafelhochflächen (550-750 Meter NN) und die dazwischen liegenden Eintalungen charakterisiert ist.

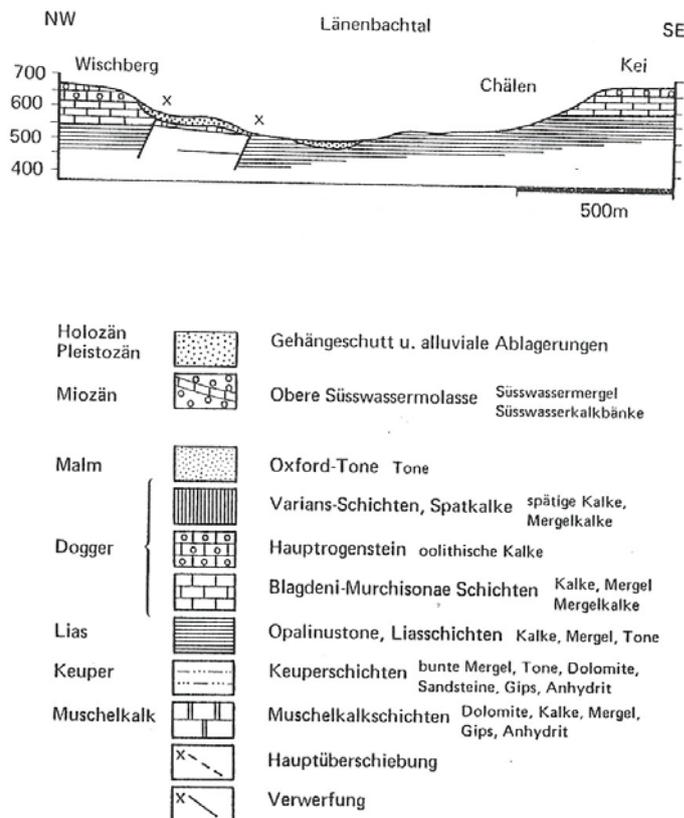


Abbildung 2-2: Geologisches Querprofil durch das Länenbachtal. Typisch sind die Tafelflächen mit den Doggerschichten: Mergel, Kalke und Hauptrogenstein, die im Falle des Länenbachtals als Plateau von Rothenthal bezeichnet werden. Darin hat sich das Einzugsgebiet bis in die Schichten des Opalinustons eingeschnitten. Aus: VAVRUCH (1988).

Detaillierte Beschreibungen der naturräumlichen Verhältnisse und Charakteristika der beiden Einzugsgebiete finden sich in zahlreichen Arbeiten des Basler Geographischen Institutes, u.a. bei SEILER (1983), PRASUHN (1991), VAVRUCH (1988) und DRÄYER (1996) sowie LESER et al. (2002).

2.2 Hydrologische, geomorphologische, pedologische und klimatische Verhältnisse

Für die *hydrologischen Verhältnisse* der Untersuchungsgebiete wird an dieser Stelle lediglich eine Kurzcharakteristik der wichtigsten allgemeinen beschreibenden Parameter der beiden Einzugsgebiete (EZG) dargestellt.

Gemeinsamkeiten		
Jahresniederschlagsmenge und Maximum: 1028 mm (<i>Riedmattbachtal</i>) - 1057 mm (<i>Länenbachtal</i>) (1986-1995); Maximum: Juni – August		
Höhenlage: 445 - 720 m		
Relief: Stark strukturiertes Kleinrelief, wölbungsreich, viele Geländemulden, Rutschungen		
Hangneigung: 7 - 15° (maximal bis 35°; Abb. 2-3)		
Gestein: Wechsellagerung von durchlässigen und schlecht durchlässigen Substraten (Mergel, Ton, Kalkstein)		
Böden: Hanglehm-Pseudogley-Braunerde dominiert (besonders in den erosionsanfälligen Bereichen)		
Bodenwasserhaushalt: Hangwasserbeeinflusst, häufig Hangwasseraustritte		
Gewässer: Hauptvorfluter 1. Ordnung, rasche und starke Reaktion auf Niederschläge		
Unterschiede	EZG Länenbach	EZG Riedmattbach
Grösse	264 ha	46 ha
Landwirtschaftliche Nutzfläche (1999)	157 ha (59%)	43 ha (93%)
Parzellenanzahl (ca.)	140	80
K-Faktoren (USLE)	0.21 - 0.34	0.14 - 0.27

Die Charakteristika der *Oberflächenformen* der beiden Untersuchungsgebiete spiegeln sich in der Karte der Hangneigung wieder, so dass an dieser Stelle nicht detailliert darauf eingegangen werden soll (Abb. 2-3). Nur soviel zum Raummuster: Die sehr steilen Lagen des Oberlaufes des Länenbacheinzugsgebietes und die immer wieder durch steilere Partien unterbrochenen Seitenhänge, auf denen Ackerbau betrieben wird, deuten bereits auf ein hohes Erosionsrisiko bei nicht bodenschonender Anbauweise hin.

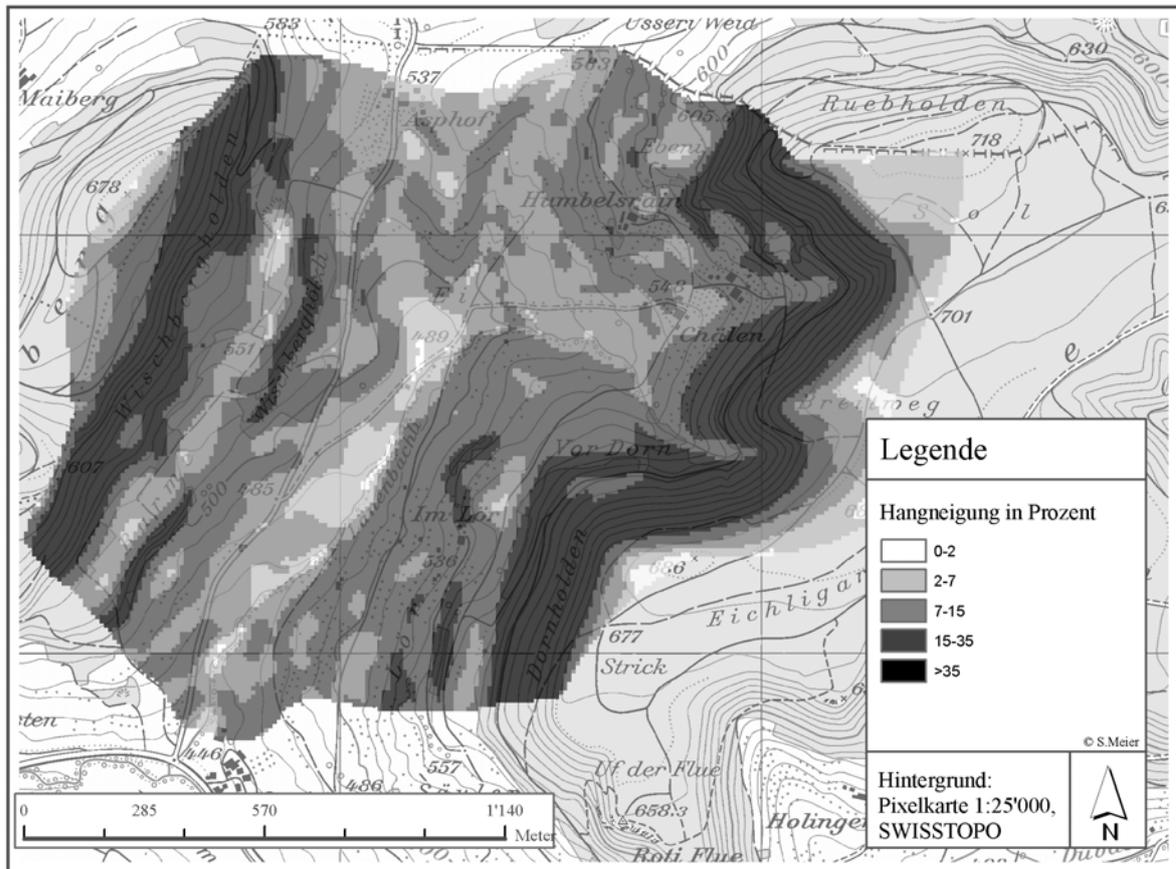


Abbildung 2-3: Hangneigungsverhältnisse im Einzugsgebiet des Länenbach. Die Hangneigung wurde auf Basis des Digitalen Höhenmodells (DHM25) von SWISSTOPO berechnet. Die Rasterzellenauflösung beträgt 6.25 m.

Die Verteilung der Hauptbodenformen in beiden Untersuchungsgebieten zeigt Abbildung 2-4. Deren Haupteigenschaften sind aus Tabelle 2-1 ersichtlich. Eine Übersicht über die Bodenverhältnisse des gesamten Kanton Basel Landschaft zeigt eine von MOSIMANN (1987) erarbeitete Karte.

Tabelle 2-1: Eigenschaften typischer Bodenformen im landwirtschaftlich genutzten Bereich des Länenbach-tals. Gekürzte Zusammenstellung aus detaillierten Angaben von VAVRUCH (1988).

	Blockschutt-Rendzina	Schuttdecken-Rendzina	Schluff-Rendzina-Braunerde	Lehm-Parabraunerde	Lehm-Staugley-Braunerde	Verbraunter Lehm-Amphigley
Vorkommen	Lokal auf Kuppen und an Stufenrändern	Lokal an Rändern von Kuppen und Stufen	Weit verbreitet in den steileren oberen Hangpartien	Sehr lokal im Bereich des Sattels im Norden	Weit verbreitet in tieferen Lagen des Mittel- und Unterlaufs	Lokal in Bachnähe an der Grenze Ober-Mittellauf und Nähe Mündung
Porenraum	Allgemein porenreich, geringes Wasserhaltevermögen	Porös, hoher Anteil Grobporen, rascher Wasserdurchfluss	Heterogene Porenverhältnisse, z.T. schlechte Infiltrationseigenschaften	Hoher Anteil Grobporen, im Oberboden grosse Durchlässigkeit	Dichte Lagerung, ungünstiger Wasserhaushalt, häufig Stauwasser	Grundwasserbeeinflusst
Nährstoffgehalt	Hoch	Hoch	Hoch	Mässig	Hoch	Hoch
Erosionsanfälligkeit	Gering	Gering	Gering bis mässig	Keine Angaben	Erhöht	Keine Angaben

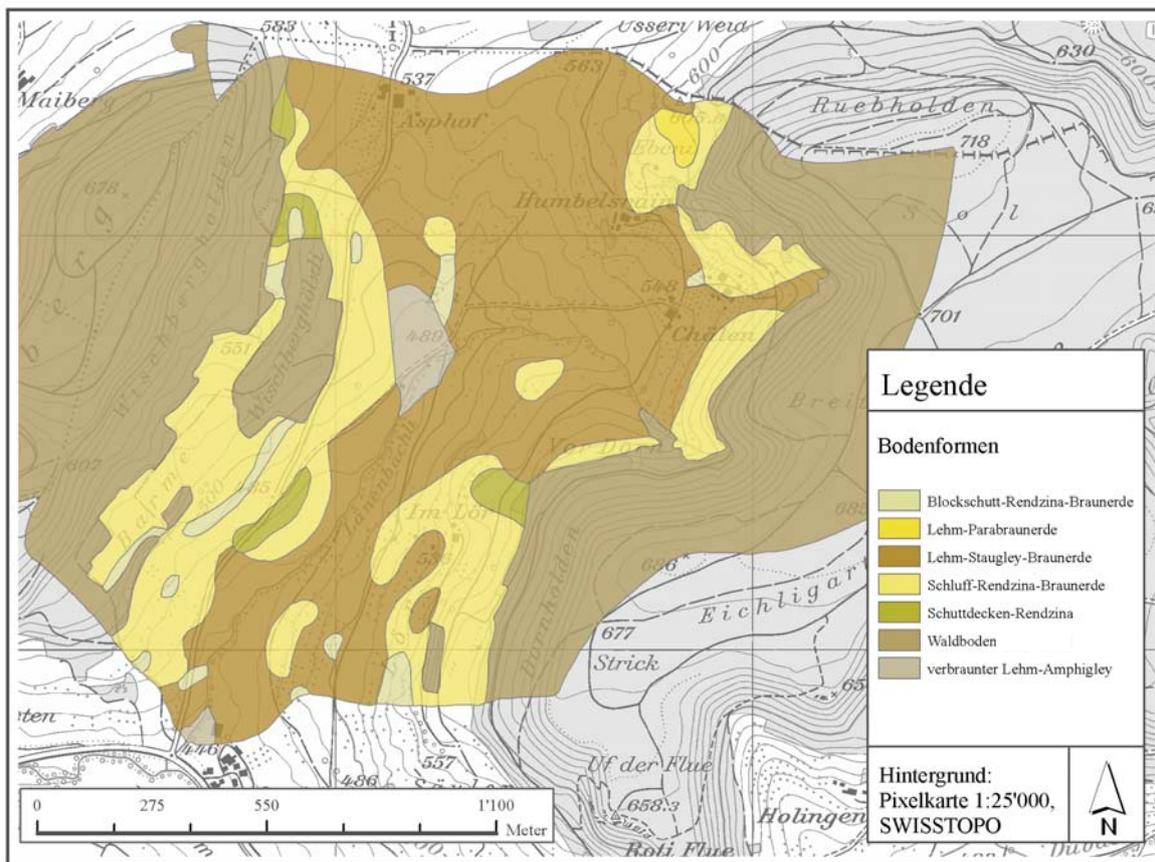


Abbildung 2-4: Hauptbodenformen des Länenbachtals. Die Darstellung der Verteilung der Hauptbodenformen beruht auf den Untersuchungen von VAVRUCH (1988).

Detaillierte Ausführungen über die *klimatischen Verhältnisse* finden sich bei SEILER (1983), VAVRUCH (1988) und BIDER (1978). Die Niederschlagsverhältnisse werden bei MOSER (1984) und REBER (1995) beschrieben. Eine von SCHAUB et al. (1987) gefertigte Isoerodetenkarte zeigt die Verteilung der Jahres-R-Faktoren an, welche die Erosivität des Niederschlages kennzeichnet. Weitere Angaben dazu finden sich in DRÄYER (1996).

2.3 Landwirtschaftliche Nutzung der Untersuchungsgebiete

In beiden EZG wird eine Futterbau-Getreidebau-Wirtschaft betrieben, bei der Mais, Wintergetreide und Kunstwiese (Klee-Gras-Gemisch) im Wechsel angebaut werden. Der Anbau erfolgt in der Regel höhenlinienparallel. Am Feldrand treten jedoch oft Ackerrandfurchen auf (PRASUHN 1991). Die Bodenbearbeitung wird überwiegend konventionell mit Egge und Pflug durchgeführt. Die Parzellengröße auf der beackerten Fläche liegt bei durchschnittlich 0.5 ha/Parzelle.

2.3.1 Veränderungen der landwirtschaftlichen Nutzung in den Untersuchungsgebieten 1985-1999

Im EZG Länenbach ging der Anteil der Äcker seit 1995 bis 1999 um 15 % zu Gunsten der Flächen an Dauergrünland und Kunstwiese zurück (Tabelle 2-2). Dabei hat der Anbau von Mais deutlich abgenommen (von 25 % der beackerten Fläche 1987 auf unter 10 % seit 1995) und der Anteil an Kunstwiesen entsprechend zugenommen (im Sommer von 30 % auf 50 % der bearbeiteten landwirtschaftlichen Fläche). Einige Ackerschläge wurden ganz aus der Fruchtfolge herausgenommen. Schwarzbrachen traten seit dem Winter 1998 bis heute nur noch in Ausnahmefällen auf; im Winter 1993 waren es noch 10 ha (6 %).

Tabelle 2-2: Änderung der Landnutzung im EZG Länenbach von 1983-1999 (Sommer-Landnutzungs-Kartierungen). Die Prozentangaben beziehen sich auf die landwirtschaftliche Nutzfläche von 157 ha .

Untersuchungszeitraum	Dauergrünland	Offenes Ackerland ¹⁾	Kunstwiese	Mais	Wintergetreide
1983 - 1986 ²⁾	Keine Angabe	47 – 55 ha	Keine Angabe	13 – 17 ha	16 – 24 ha
1987 - 1990	92 ha (60 %)	45 ha (29 %)	20 – 23 ha (bis 15 %)	6 – 15 ha (bis 10 %)	9 - 26 ha (bis 17 %)
1991 - 1995	92 ha (60 %)	39 ha (25 %)	23 - 26 ha (bis 17 %)	4 – 9 ha (bis 6 %)	9 - 26 ha (bis 17 %)
1997 - 1999	97 ha (62 %)	26 ha (17 %)	33 – 42 ha (bis 27 %)	0 - 2 ha (bis 1 %)	14 - 24 ha (bis 15 %)

1) Dieser Begriff erfasst *alle* Anbaukulturen ohne Kunstwiese. Offenes Ackerland und Kunstwiese ergeben zusammen die Fruchtfolgefläche, das entspricht allen Parzellen, die im Untersuchungszeitraum wenigstens einmal ackerbaulich genutzt wurden (im Gegensatz zu Dauergrünland ohne Bodenbearbeitung).

Auch im EZG Riedmattbach hat der Grünlandanteil um rund 20 % zugenommen, v.a. auf Kosten der Maisanbaufläche, die seit 1997 bei nahezu Null liegt (Tab. 2-3). Der Anteil der winterlichen Schwarzbracheflächen ist von 4 % auf unter 1% gesunken. Die Wintergetreidefläche erreichte ihr Maximum 1995 (37 %) und schwankt heute wieder um 10 %.

Tabelle 2-3: Änderung der Landnutzung im EZG Riedmattbach von 1978-1999 (Sommer-Landnutzungs-Kartierungen). Die Prozentangaben beziehen sich auf die landwirtschaftliche Nutzfläche von 43 ha (=100%).

Jahr	Dauergrünland und Kunstwiesen	Offenes Ackerland ¹⁾	Mais	Wintergetreide
1978 ²⁾	29 ha (66 %)	14 ha (34 %)	6 ha (14 %)	5 ha (13 %)
1980	31 ha (72 %)	12 ha (28 %)	4 ha (9 %)	7 ha (16 %)
1990	27 ha (63 %)	16 ha (37 %)	4 ha (9 %)	11 ha (25 %)
1999	37 ha (85 %)	6 ha (15%)	0.1 ha (0.3%)	4 ha (10 %)

1) Alle Anbaukulturen ohne Kunstwiese 2) SEILER 1983.

3 Methodik

3.1 Messungen und Beobachtungen im Feld

Sowohl die Kalibrierung bestehender deterministischer Stoffhaushaltsmodelle als auch die Entwicklung neuer GIS-gestützter Modellansätze kommen ohne eine auf Langfristigkeit ausgerichtete Felddatenerhebung nicht aus. Um das seit 1975 bestehende Messprogramm der FBB im Untersuchungsgebiet *Jura 2* (s. Abb.3-1) weiter zu betreiben, steht neben der Modellierungsarbeit auch der regelmässige Feldeinsatz der gebietsbetreuenden Doktoranden auf dem Programm. Im Folgenden werden die eingesetzten Feldmethoden kurz erläutert. Standardmethoden, die bereits in vorhergehenden Arbeiten der FBB detailliert beschrieben wurden, werden nur abgekürzt dargestellt. Das detaillierte methodisch-theoretische und messtechnische Grundkonzept für die Feldmessungen schildert PRASUHN (1991). Neu eingesetzte Methoden werden detaillierter erläutert.

3.1.1 Felddatenerfassung als Grundlage für die Modellbildung

Bodenerosion ist ein seit langem bekanntes, schleichendes Umweltproblem. Seit den 1990er Jahren wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt (u.a. EUROSEM, AGNPS, E3D, EPIC), die es dem Praktiker erlauben sollen, Erosionsschutzmassnahmen an den richtigen Stellen zum richtigen Zeitpunkt vorzunehmen, um damit eine grösstmögliche Schutzwirkung zu erzielen. Die Modelle sollen dabei aufwändige Messungs- und Kartierarbeiten vermeiden helfen. Für viele dieser Modelle besteht jedoch nach wie vor ein eklatanter Mangel an Daten zur Überprüfung der Plausibilitäten der Modellergebnisse (DRÄYER 1996). Aus diesem Grund legt die FBB besonderen Wert auf die sorgfältige und vor allem langfristige kontinuierliche Erhebung der Felddaten. Basismessprogramme werden in den langjährigen Untersuchungsgebieten von den Doktoranden weiterbetrieben und durch kurzfristige Spezialmessprogramme ergänzt, um so die Datengrundlage für die Entwicklung neuer Modellansätze wie auch zur Kalibrierung und Validierung bestehender Modelle zu schaffen. Die Bedeutung der Erhebung langjähriger Messreihen kann nicht oft genug betont werden, da sich die Güte von Modellansätzen nur mit einer Überprüfung von Modellsimulationen anhand tatsächlich im Feld erhobener Daten beurteilen lässt.

3.1.2 Erosionstestparzellen T30 und T50

Bereits seit vielen Jahren werden vom Geographischen Institut der Universität Basel Erosionstestflächen in Gebieten mit zum Teil sehr unterschiedlicher naturräumlicher Ausstattung betrieben (Abb. 3-1, Tab. 3-1). Testparzellen werden in der Bodenerosionsforschung als weltweit verbreitetes Instrument zur detaillierten Untersuchung des Erosionsgeschehens eingesetzt (vgl. PRASHUN 1991).



Abbildung 3-1: Erosionstestparzelle T50 im Länenbachtal.

In der vorliegenden Arbeit wurden innerhalb des Basismessprogramms die Testparzellen mitbetreut und die jeweiligen Abtragsereignisse aufgenommen und ausgewertet. Im Untersuchungsgebiet Riedmattbachtal wurden die Testparzellenmessungen 1994 (nach 17 Messjahren) eingestellt. Die in der Messperiode 1988-1994 gemachten Beobachtungen, besonders die auf der Testparzelle durchgeführten Regensimulationsversuche, wurden zur Kalibrierung des Erosionsmodells E2D verwendet. Im Untersuchungsgebiet Länenbachtal wurden Messungen auf der Testparzelle bis 2004 durchgeführt, 1998/99 in Verbindung mit einer hochaufgelösten Bodenfeuchtenmessung auf der Testparzelle (s. Kap. 3.1.6), um den Einfluss des Bodenfeuchtegehaltes auf den Erosionsprozess detaillierter zu erfassen. Eingehendere Beschreibungen der Testparzellen und ihres gesamten Messprogramms finden sich bei PRASUHN (1991).

Tabelle 3-1: Kenndaten der Testparzelle T50 (Länenbachtal).

Laufzeit	1983 - 2004
Parzellenmasse	3 m x 20 m
Hangneigung	11,9 °
Exposition	WNW
Bodenform	Hanglehm/Hangschutt-Rendzina-Braunerde
Bodenart	toniger Lehm

3.1.3 Niederschlag

Die Niederschlagsmessung in den Untersuchungsgebieten T50 (Länenbachtal) und T30 (Riedmattbachtal) wurde sowohl mit HELLMANN-Regenschreibern als auch mit HELLMANN-Regentotalisatoren durchgeführt (Abb. 3-2). Die Niederschlagsintensität und der daraus abgeleitete R-Faktor der USLE wurden im Untersuchungsgebiet T50 erfasst. Dazu wurden neben dem mechanischen Regenschreiber (*480 mm Regenstreifenpapier entspricht*

24 h) seit 1997 auch eine elektronische Regenwippe und ein Datenlogger mit einer Auflösung von 10 Minuten eingesetzt. Die hohe Auflösung und die Erfassung mittels Datenloggers haben den Vorteil, dass beim Digitalisieren der Regenstreifen Fehler vermieden werden und der Niederschlagsinput zu der in Kap. 3.1.6 beschriebenen Bodenfeuchtenmessung auf der Testparzelle T50 direkt in Beziehung gesetzt werden kann. Die Aufstellhöhe der Niederschlagsammler, aus denen die Monatswerte für die Wasserhaushaltsbilanz berechnet wurden, sowie die Lage im Relief und die Instrumenteneigenschaften bestimmen Art und Ausmass der Messfehler. Der Korrektur dienen die von SEVRUK (1985) ermittelten Korrekturfaktoren für die Juraregion, die im Sommer bei 7-8 % und im Winter bei 8-12 % liegen.



Abbildung 3-2: Elektronische Regenwippe (links) und HELLMAN-Regenschreiber (rechts). Durch die elektronische Aufzeichnung mittels Datenlogger können die Messwerte unmittelbar zu den Bodenfeuchtemessungen mittels TDR-Methode in Beziehung gesetzt werden (s. Kap. 3.1.6).

3.1.4 Gebietsabfluss

An der Pegelmessstelle P50 (Länenbachtal) wurde einerseits mit einem mechanischen Pegelschreiber (HKW-Grundwasserschreibpegel, ALPINA HYDROMETRIE), andererseits mit einem hochauflösenden und sensiblen ISCO-Flowmeter (Modell 2870) gemessen (Abb. 3-3). Da der Länenbach an der Pegelmessstelle über eine natürliche Bachsohle verfügte, muss durch regelmässige Eichmessungen eine ständig aktualisierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung (P/Q) erstellt werden. Die Eichmessungen erfolgten sowohl mittels einer Flügelradmessung (OTT-Kleinflügelrad C2) als auch über eine Leitfähigkeitsmessung

mit der Salzverdünnungsmethode. Das Prinzip der Salzverdünnungsmethode beruht darauf, dass sich die spezifische Leitfähigkeit des Wassers durch Zufuhr von Salz proportional zu der zugeführten Salzmenge erhöht und dabei das Salz in seiner Masse unverändert erhalten bleibt. Dadurch kann über die Messung der Leitfähigkeit die Wassermenge, welche eine definierte Salzmenge löst, bestimmt und somit eine Abflussberechnung abgeleitet werden.

Die vom mechanischen Pegelschreiber aufgezeichneten Pegelstreifen wurden digitalisiert und für die Monatsbilanzierungen sowie für die Berechnungen von Schwebstofffrachten bei Hochwasserereignissen ausgewertet. Für die Auswertung der Hochwasserwellen wurden neben den mechanischen Pegelstreifen die vom ISCO-Flowmeter aufgezeichneten Werte herangezogen. Die genauen Berechnungsmethoden der Abflussmengen können bei SEIBERTH et al. (1997) nachgelesen werden.



Abbildung 3-3: Abflussmessstation P50 im Länenbachtal. Neben einem mechanischen Pegelschreiber ist der ISCO-Sampler zu sehen, der bei Hochwasserereignissen eine automatische Probenahme erlaubt.

Im Gegensatz zum *Länenbachtal* ist im *Riedmattbachtal* ein V-Profil an der Pegelmessstelle mit einem Überlauf installiert, so dass nach einer einmaligen Eichung und vorausgesetzt, dass die Lage des Profils sich nicht verändert, die aufgestellte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Bestand hat, und auf ständige neue Eichmessungen verzichtet werden kann. Die weitere Ausstattung an der Pegelmessstelle P30 entspricht genau derjenigen von P50. Im Jahr 2000 wurden jedoch die Abflussmessung und die damit verbundenen stoffhaushaltli-

chen Messungen eingestellt, so dass das Untersuchungsgebiet Riedmattbach seit Juni 2000 nicht mehr zum Basismessprogramm im Testgebiet Jura2 gehört.

3.1.5 Drainagen

Im August 1999 wurde, zusätzlich zum Basismessprogramm an der Pegelmessstelle P50, eine weitere Pegelmessstelle am grössten in den Länenbach einleitenden Drainagerohr (DC, Durchmesser ca. 75 cm) eingerichtet, welches ca. 30 % der drainierten Böden des gesamten Einzugsgebietes entwässert (MEIER, S. 1996; Abb. 3-4).

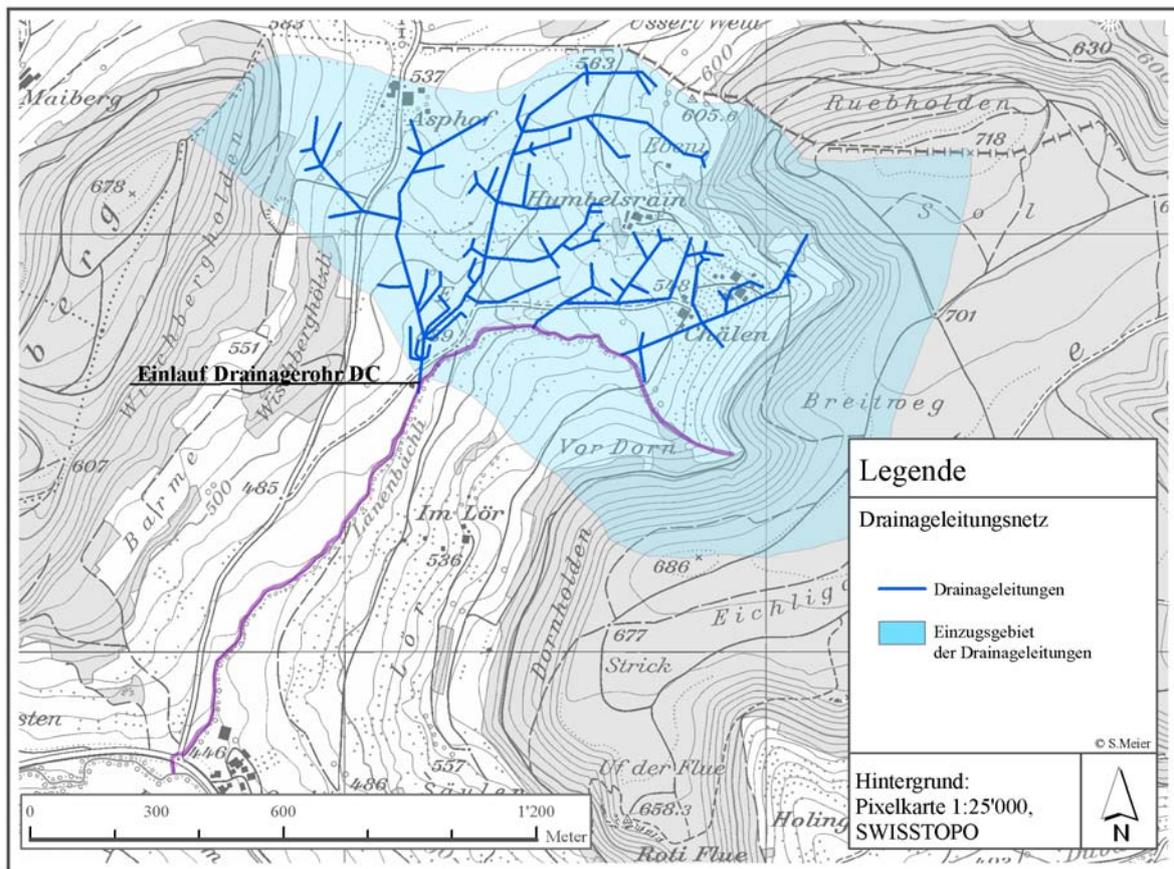


Abbildung 3-4: Karte der Drainagerohre im Länenbachtal. Das Drainrohr DC entwässert ca. 30 % der Böden des gesamten Einzugsgebietes.

Neben zwei mechanischen Pegelmessern, mit welchen die Abflusspenden sowohl vom Oberlauf des Baches als auch vom Drainagerohr erfasst werden konnten, wurden zwei IS-CO-Sampler (Modell 2700) eingesetzt, um bei Hochwasserereignissen die Schwebstoffe sowie die Frachten von Nitrat und Phosphat aus dem Drainagerohr zu erfassen (Abb. 3-5). Mit diesen Messungen konnte der Einfluss des Drainageleitungsnetzes und der an die Drainageleitungen angebundenen Strassenentwässerungsschächte auf den Schwebstoffaus-

trag des Einzugsgebietes ermittelt werden. Damit liess sich dieser Einfluss im Modell ES-SEM qualitativ berücksichtigen.



Abbildung 3-5: Messanordnung am Drainrohr DC. Das linke Bild zeigt die beiden ISCO-Flowmeter zur automatischen Probenahme bei Hochwasserereignissen am Einlauf des Drainrohres *DC* und am Oberlauf des Länenbaches. Das rechte Bild zeigt den Einlauf des Drainrohres *DC*.

Vom ISCO-Flow Meter der Pegelmessstelle P50 wurde eine Kabelverbindung zum ca. 800 Meter bachaufwärts gelegenen Drainageeinlauf gelegt, um bei einem Hochwasserereignis ein synchrones Auslösen der Probenahmen an P50 und am Drainageeinlauf zu gewährleisten. Damit können die Berechnungen der Schwebstofffracht an der Pegelmessstelle direkt mit den Austrägen über das Drainageleitungsnetz verglichen und Kennwerte für den Drainageeinfluss auf den Feststoffhaushalt ermittelt werden. Die Abflusseichung der Drainwasserspende erfolgte parallel zu P50 mit der Salzverdünnungsmethode. Weitere Eichmessungen mit Hilfe eines Flügelrades wurde schon von MEIER, S. (1996) durchgeführt und dienten ebenfalls als Kontrollwerte bei der Aufstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Drainageeinlauf. Die Berechnung der Schwebstofffrachten der Drainageleitungen erfolgte nach derselben Methode wie bei der Pegelmessstelle P50.

Neben der ereignisbezogenen Beprobung wurde mit Hilfe zweier weiterer Probenehmer ein Monitoring des Abflusses sowohl am Länenbach als auch am Drainageeinlauf durchge-

führt (AMMON 2000). Einzelne charakteristische Aussagen davon werden mit in die Diskussion einbezogen, sofern sie für die Modellanwendungen in dieser Arbeit relevant sind.

3.1.6 Bodenfeuchte

Der Anfangswassergehalt des Bodens spielt beim Erosionsprozess eine entscheidende Rolle. Der Sättigungsgrad des Porenvolumens kann den *Splash*-Prozess, also die Ablösung der einzelnen Bodenteilchen in Abhängigkeit von der Aggregatstabilität, unterschiedlich stark beeinflussen. Der Anfangswassergehalt ist einer der bedeutsamsten Eingabeparameter für die meisten dynamisch-deterministischen Bodenerosionsmodelle, so auch für das in dieser Arbeit eingesetzte Modelle E2/3D (SCHMIDT, J. 1996).

Um den Einfluss des Anfangswassergehaltes auf den Erosionsprozess auf den tonreichen Böden des Tafeljura besser bestimmen zu können, wurde in der Erosionstestparzelle T50 unter standardisierten Bedingungen eine Bodenfeuchtemessstation installiert. Damit konnten der jahreszeitliche Verlauf der Bodenfeuchte, die Reaktion des Bodenwasserhaushaltes auf Starkniederschläge und vor allem der Anfangswassergehalt eines Niederschlagsereignisses mit messbarem Bodenabtrag bestimmt werden. Im April 1998 wurde – zusätzlich zum Basismessprogramm – auf der Testparzelle T50 eine komplexe Messstation installiert. Um zeitlich hochaufgelöste Feuchtemessungen durchführen zu können, erwies sich die gravimetrische Feuchtebestimmung mit Probenahme und anschließender Laborauswertung als zu träge und allein schon wegen des Zeitaufwandes als nicht praktikabel. Aus diesem Grunde wurde eine vollautomatische Messstation eingerichtet, welche sich der Time Domain Reflectometry-Methode (TDR) bedient (Abb. 3-6). Diese ist eine schnelle und indirekte Methode zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden. Aus der Messung der Dielektrizitätszahl und der Temperatur des Bodens sowie der Schätzung der Porosität und Dielektrizitätszahl der Bodenmatrix lässt sich der Wassergehalt der Bodenmatrix berechnen. Vor allem für die Bestimmung von Wassergehaltsänderungen hat sich diese Methode bewährt (ROTH 1989).

Die Bestimmung des Wassergehaltes basiert letztlich auf der hohen Dielektrizitätszahl des Wassers. Mit $\epsilon = 81$ bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt sie wesentlich höher als jene der übrigen Bodenbestandteile. Der Bodenwassergehalt wird in zwei Schritten bestimmt:

1. Durch die Messung der Dielektrizitätszahl des Bodens und
2. durch die anschließende Berechnung des Wassergehaltes mit Hilfe eines Modells.

Die Messeinrichtung (Abb. 3-8) besteht aus einem mit einer 12 Volt-Solaranlage betriebenen Messmast, in dem sich ein CR10-Datalogger (CAMPELL) befindet, der die Aufzeichnung der Messungen und die Verwaltung der Messsoftware vornimmt, die eigens für die eingerichtete Station programmiert werden musste. Mit Hilfe eines eingebauten TEKT-RONIX Cable Tester wird ein elektromagnetischer Impuls auf die im Boden befindlichen Sonden geleitet. Die Anordnung der Sonde in der Bodenmatrix ist in Abb. 3-7 dargestellt.

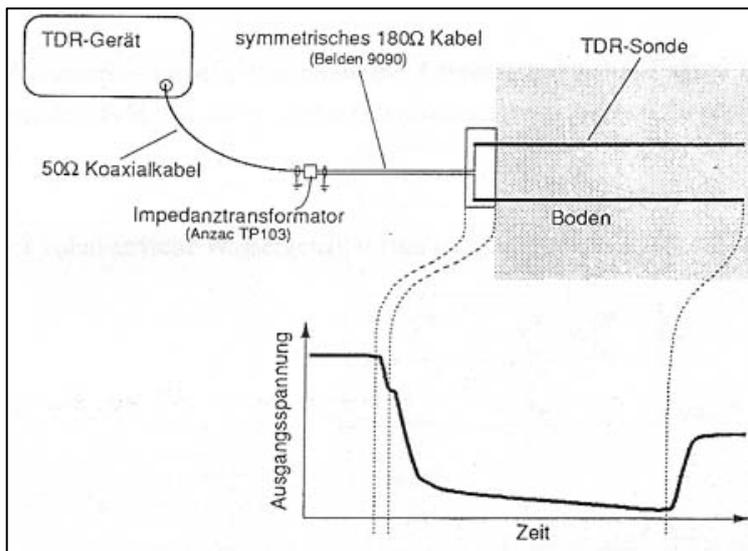


Abbildung 3-6: TDR-Prinzip. Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Boden. Das TDR-Gerät zeichnet das an Impedanzsprüngen reflektierte Signal als Funktion der Zeit auf.

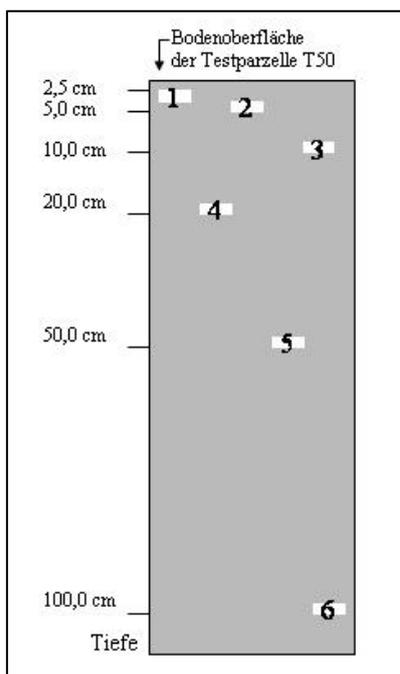


Abbildung 3-7: Anordnung der TDR-Messsonden im Boden der Testparzelle T50. Die Sonden befinden sich in unterschiedlichen Tiefen, um die Vorrückfront des Wassers im Boden zu erfassen. Das Messintervall beträgt zehn Minuten und ist identisch mit der elektronischen Niederschlagsmessung, die ebenfalls vom gleichen Datalogger aus gesteuert wird. Auf diese Weise kann der Niederschlagsinput direkt zur Wassergehaltsänderung im Boden in Beziehung gesetzt werden.

Die Versuchsanordnung erwies sich jedoch im Laufe der Feldsaison als technisch sehr anfällig. Datenausfälle waren die Folge. Immerhin konnte das Verhalten der Bodenfeuchteänderungen in Abhängigkeit von der Witterung und im Zusammenhang mit Erosionsereignissen über einige Monate hinweg beobachtet werden. Die Station bedurfte eines Wartungsintervalls von einer Woche, da die Fülle der 10 Minutenmessungen der Bodenfeuchte in sechs verschiedenen Tiefen ein Datenvolumen produzierten, das allenfalls für maximal eine Woche auf den eingesetzten Speichermedien Platz fand.



Abbildung 3-8: TDR-Messanlage an der Testparzelle T50 (Länenbachtal). Im Hintergrund ist der Messturm mit dem Solarpanel für die Stromversorgung und den Kästen für Datalogger und Sondenanschlüsse zu erkennen. Im Vordergrund befindet sich ein zweiter Datalogger für die Aufzeichnung der elektronischen Niederschlagsmessung.

Die Auswertung der Sondersignale und die anschließende Umsetzung in einen volumetrischen Feuchtegehalt wurde mit dem Ansatz von ROTH (1989) durchgeführt. Detailliertere Informationen zur TDR-Methode - unter anderem zur Kalibration der Messsonden und zum Aufbau und Technik der gesamten Anlagen - finden sich bei WÜTHRICH, M. (1998).

3.1.7 Landnutzungskartierung

Seit 1975 wird im Einzugsgebiet *Riedmattbachtal* und seit 1982 im Einzugsgebiet *Länenbachtal* die aktuelle Landnutzung zweimal pro Jahr im Feld kartiert. Diese Kartierarbeiten werden in der Regel von Studenten der Kartographie-Einführungsveranstaltung, nach vorheriger Instruktion des Übungsleiters, vorgenommen. Neben der Kartierung der aktuellen Landnutzung werden als weitere erosionsbeeinflussende Faktoren der aktuelle Bedeckungsgrad durch eine einfache Abschätzung sowie die Bearbeitungsrichtung der Parzellen erhoben. (Höhenlinienparallel oder in Falllinie). Durch diese ununterbrochenen Landnutzungserhebungen steht eine optimale Grundlage für die Modellanwendung des in dieser Arbeit eingesetzten Erosionsmodells E3D (SCHMIDT, J. 1996) zur Verfügung. Ausserdem können aufgrund der lückenlosen Kartierung Analysen zur Landnutzungsentwicklung der letzten 25 Jahre angestellt werden. Dafür wurden die Daten in einem Geographischen Informationssystem analysiert und ausgewertet. Die Landnutzung als wichtige Einflussgrösse auf das Erosionsrisiko hat sich in den letzten Jahren in beiden untersuchten Einzugsgebieten gewandelt. Für die Darstellung zukünftiger Landnutzungsszenarien und deren Visualisierung (siehe Kap. 3.3) muss immer von der vergangenen und aktuellen Nutzung ausgegangen werden, um realistische Zukunftsszenarien zu entwickeln. Für die Darstellung von Landschaftsveränderungen, die zum grossen Teil auf Nutzungsänderungen zurückzuführen sind, bedarf es einer fundierten Datenbasis in einem Geographischen Informationssystem. Dem wurde durch die regelmässige Landnutzungskartierung und deren Digitalisierung Rechnung getragen.

3.1.8 Feststoffhaushalt

Eine weitere wichtige Komponente des Basismessprogramms stellt die Beprobung der Hochwasserwellen mit ihrer Schwebstofffracht dar. Nach PRASUHN (1991) können die Hochwasserereignisse bis zu 90 Prozent der gesamten Jahresfracht an Feststoffen ausmachen, so dass eine Konzentration der Modellsimulationen auf diese Ereignisse unabdingbar erscheint. Für die Kalibrierung der Modellsimulationen müssen die Simulationsergebnisse mit den Frachtberechnungen aus den Hochwasseranalysen in Beziehung gesetzt werden können. Die Probenahme erfolgte bei beiden Einzugsgebieten (P50 und P30) an der Pegelmessstelle mit Hilfe eines automatischen Probenehmers (ISCO-Flowmeter Modell 2870). Der Beginn der automatischen Probenahme wird durch das Überschreiten einer festgelegten Pegelstandshöhe ausgelöst. Die 24 Proben werden anschliessend im Labor filtriert, getrocknet und gewogen (Abb. 3-9). Anschliessend kann mit Hilfe der Abflussdaten eine Frachtberechnung vorgenommen werden. Auf die verschiedenen Methoden der Frachtberechnung und die auftretenden Probleme soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Detailliertere Angaben finden sich bei SEIBERTH et al. (1997).

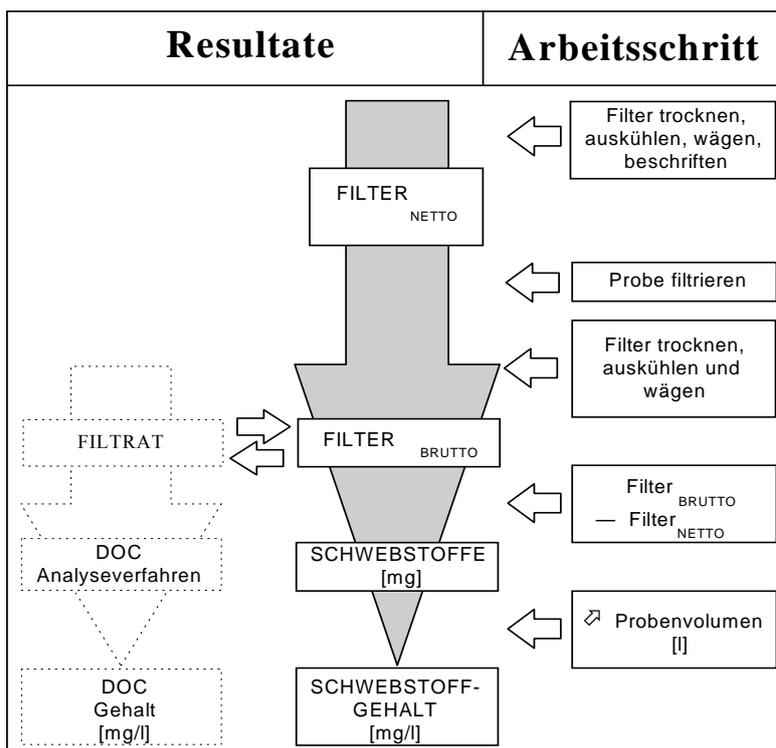


Abbildung 3-9: Arbeitsschritte der Schwebstoffbestimmung der Hochwasserproben. Ersichtlich sind auch die Schnittstellen zur DOC-Bestimmung.

3.1.9 Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffes

Durch die Erfassung der DOC- und POC-Konzentrationen bzw. des Verhältnisses von organischem zu mineralischem Anteil am Gesamtschwebstoffgehalt lassen sich Aussagen über

- die Herkunft der Schwebstoffe und
- stattgefundenere Bodenerosion im Einzugsgebiet

machen. Um Aufschluss über die am Austrag beteiligten Stoffquellen, die präferentiellen Fließspfade sowie das zeitliche Eintreffen verschiedener Abflusskomponenten (Zwischen-, Oberflächen- und Drainageabfluss) zu geben, wurden bei allen Proben jene Inhaltsstoffe analysiert, die Tracerfunktion besitzen. So wurden neben der Sedimentkonzentration auch die Konzentrationen von Kohlenstoff, Phosphor und teilweise des Nitrats und Ammoniums erfasst. In der Untersuchungsperiode 1996-1999 konnten 18 Hochwasserereignisse registriert und untersucht werden. Genauere Angaben zur Labormethode finden sich in WÜTHRICH (2001).

3.1.10 Erosionsschadenskartierungen

Durch die regelmässigen Feldbegehungen der gebietsbetreuenden Doktoranden war es möglich, über viele Jahre das Erosionsgeschehen auf den Ackerschlägen in sehr hohem Detaillierungsgrad aufzunehmen. Die Aufnahme erfolgte nach vorgegebenen Standards (ROHR et al. 1990). Das Erosionsschadensbild im Ackerschlag wurde vermessen, kartiert und in einer Photodokumentation festgehalten. Die parzellenscharfe Kartierung erfolgte in den Massstäben 1:1'000 bis 1:5'000. Die beobachteten Formen müssen dabei Mindestgrößen und -flächen einnehmen, um im Kartiermassstab erfassbar zu sein. Als zusätzliche Informationen wurden bei jeder Kartierung erhoben: Oberflächenabfluss, Oberflächenwasser, Angaben zu Mikrorelief, Kulturart und Bearbeitungszustand der betroffenen Fläche sowie spezielle Erosionsursachen (Fremdwasserzufluss, exfiltrierender Hangwasseraustritt, Fahrspuren, Ackerrandfurchen etc.).

Neben den flächenhaften Erosionsschäden wurden auch linienhafte Erosions- und punktuelle Akkumulationsstellen sowie auch Übertrittstellen von Erosionsmaterial in die Vorfluter erfasst. Die seit 1987 dokumentierten Schadensbilder in den Untersuchungsgebieten Länenbachtal und Riedmattbachtal wurden in einer einfachen Datenbank erfasst und die einzelnen Ereignisse in einem GIS digitalisiert. Dabei wurden für einzelne Erosionsereignisse die betroffenen Teilflächen auf den unterschiedlichen Ackerflächen nach ihrer maximalen flächenhaften Ausdehnung digitalisiert. Weiter wurden die dazugehörigen linienhaften Erosionsformen und die punktuellen Übertrittstellen mit dem GIS erfasst. Diese lassen sich daher mit den Attributdaten der einzelnen Ereignisse verknüpfen und erlauben eine detaillierte Flächenanalyse. Sowohl Kernräume des Erosionsgeschehens innerhalb eines Einzugsgebiets, als auch die neuralgischen Übertrittstellen und Fliesspfade, welche immer wieder bei Extremereignissen betroffen sind, können auf diese Art und Weise herausgefiltert werden. Anschliessend erfolgte der Vergleich mit den durch die GIS-gestützten Modellsimulationen erarbeiteten Gefährdungskarten. (vgl. OGERMANN et al. 2003).

3.2 Modellansätze in verschiedenen Dimensionen

In den folgenden Kapiteln werden die drei in dieser Arbeit verwendeten Modellansätze erläutert: ESSEM, E2/3D und EPIC. Diese Modelltypen wurden aufgrund ihrer Eignung für die untersuchten Einzugsgebiete und die zu beantwortenden Fragestellungen ausgewählt. Daran anschliessend folgt die Darstellung eines Visualisierungsansatzes mit dem - aufbauend auf dem Modell ESSEM - die Landschaft in einem der Untersuchungsgebiete in verschiedenen Szenarien dargestellt wird.

3.2.1 Ein dynamisches, empirisches GIS-gestütztes Feststoffmodell (ESSEM)

3.2.1.1 Ausgangslage für die Modellentwicklung

Das im Folgenden beschriebene Modell hat seinen Ursprung in der seit 1990 in Basel betriebenen GIS-gestützten geoökologischen Raumbewertung. Seit dieser Zeit wird im Projekt "Digitale Geoökologische Karte" (DGÖK) untersucht, wie der konzeptionelle und me-

thodische Rahmen der Landschaftsökologie mit GIS-Methoden verknüpft werden kann (FRÖHLICH et al. 1994). Die seit 1992 systematisch für die Untersuchungsgebiete digitalisierten Datensätze sind Grundlage für die nachstehende Methodik des empirischen GIS-gestützten Stoffhaushaltsmodells ESSEM (Empirical Statistical Soil Erosion Model). Dabei wird auf dem von DRÄYER et al. (1995) entwickelten GIS-gestützten Bodenerosionsmodell aufgebaut (GVEM BS; DRÄYER, 1996; Abb. 3-10). Bei DRÄYER waren die Ziele:

1. *Lokalisierung der durch Bodenerosion gefährdeten Bereiche und*
2. *Bestimmung der Bodenerosionsgefährdungsstufen (qualitativ) und der Bodenabtragsmengen pro Flächeneinheit (quantitativ).*

Dieser Ansatz beruht auf einer Erweiterung und Anpassung der Bestimmung der Erosionsschutzfunktion in der BALVL. Die BALVL basiert auf der GÖK 25-Aufnahme und bewertet auf dieser Grundlage das Leistungsvermögen des Naturhaushaltes in der Landschaft. Sowohl die Kartieranleitung GÖK 25 als auch die BALVL, die aufeinander abgestimmt sind, verfolgen das Ziel, den Bedürfnissen der Praktiker gerecht zu werden.

Das GVEM BS zeigt sehr gut die erosionsgefährdeten Bereiche auf und kann sogar quantitative Angaben zu den Abtragsmengen machen. Als kritischer Punkt sei aber erwähnt, dass zwar ein guter Überblick über die räumliche Verteilung der erosionsgefährdeten Bereiche in einem agrarisch genutzten Einzugsgebiet gegeben werden kann, die Reichweite von Erosionsprozessen und vor allem der Bereich der Übertrittstellen von Abtragsmaterial in den Vorfluter jedoch weniger gut lokalisiert wird. Zum Modellansatz von DRÄYER gibt es zahlreiche Alternativen mit sehr ähnlichen Rechenalgorithmen. Die meisten der GIS-gestützten Modelle mit dem Ziel, Erosionsprognosekarten zu entwickeln, beruhen auf dem Ansatz der USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1978) oder der abgewandelten ABAG. Beispiele hierfür finden sich u.a. bei MITASOVA et al. (1996) oder HENSEL & BORK (1988).

Diese Modellansätze sind inzwischen zum grössten Teil in GIS-Systeme integriert und dadurch heute als Standardinstrumente in der Erosionsgefährdungsanalyse anzusehen. *Oftmals fehlt es aber an Aussagen zu den Reichweiten der Stoffverlagerungen und den Übertrittsstellen von Feststoffmaterial in die Vorfluter. Übertrittsstellen sind jene neuralgischen Punkte, an denen das Oberflächenmaterial in den Vorfluter gelangt und so zur Gewässerentrophierung beiträgt.*

An diesem Punkt setzt das Modell ESSEM an. Es sollen nicht nur die erosionsgefährdeten Bereiche durch einen detaillierteren Einbezug von Eingabeparametern lokalisiert werden, sondern auch jene neuralgischen Stellen im Gelände ausgewiesen werden, an welchen der Verlust von Bodenmaterial durch den Übertritt in den Vorfluter am grössten ist. Dadurch lassen sich Revitalisierungsmassnahmen, Extensivierungsmassnahmen der Landwirtschaft und eine nachhaltige Bodennutzung besser planen. ESSEM muss somit als *Ergänzung* zum bisherigen GVEM BS betrachtet werden. Es soll dieses nicht ersetzen.

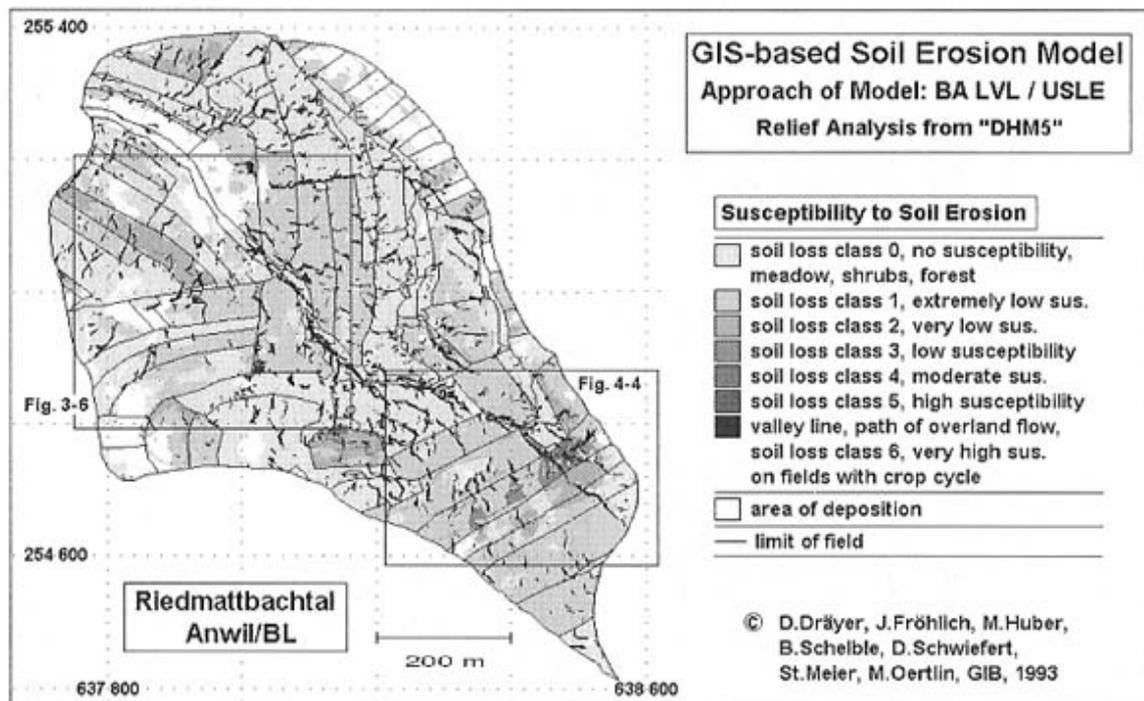


Abbildung 3-10: Bodenerosionsgefährdungskarte als Endprodukt des einfachen Basler GIS-gestützten Bodenerosionsmodell GVEM BS. Beispiel: Riedmattbachtal (aus: DRÄYER 1996).

Aus den bisherigen Betrachtungen ergeben sich für das Modell ESSEM folgende Ziele:

1. Bestimmen jener Fliesspfade, welche die grössten Mengen Oberflächenmaterial liefern.
2. Bestimmen der Übertrittstellen von Oberflächenmaterial in den Vorfluter.
3. Klassieren dieser Übertrittstellen aufgrund folgender Faktoren:
 - Grösse des Kleinstzugsgebietes der Übertrittstelle.
 - Erosionsgefährdung des Kleinstzugsgebietes der Übertrittstellen aufgrund des Modells GVEM BS.
 - Abschätzung der Barrierewirkungen durch erosionsmindernde Massnahmen, z.B. Landnutzung, Uferstreifen (REHM 1995, KOCH 2007) oder von Renaturierungsflächen, sofern diese aus Felderhebungen bekannt sind.

Die klassierten Übertrittstellen können anschliessend mit den langjährigen Felddaten verglichen und damit das Modell verifiziert werden, um darauf aufbauend Schutzmassnahmen sehr gezielt an wenigen relevanten Punkten zu realisieren.

3.2.1.2 Die verwendeten Eingangsgrößen und ihre Herleitung

Die sehr gute digitale Datenlage des Geographischen Institutes und die immer bessere Verfügbarkeit hochaufgelöster amtlicher digitaler Datensätze (z.B. digitale Höhenmodelle) ermöglichen das Modellieren in einem standardisierten GIS ohne einen hohen Parametrisierungsaufwand, wie er z.B. bei der Verwendung von physikalischen Erosionsmodellen betrieben werden muss.

Verwendete Software:

Gearbeitet wurde mit der Standardsoftware ArcVIEW 3.2 und ArcGIS 9.2 mit diversen Erweiterungen (Spatial Analyst, 3D-Analyst). Für die Relieffanalyse (Berechnung der Teileinzugsgebiete und Fliesspfade) wurde auf das Raster-GIS IDRISI zurückgegriffen. Der Im- und Export zwischen den beiden GIS-Systemen stellte dabei keinerlei Problem dar. Inzwischen existieren zahlreiche Softwaretools zur *automatischen Relieffanalyse*, speziell im Bereich der hydrologischen Modellierung, u.a. auch zur Berechnung von Fliesspfaden in hydrologischen Einzugsgebieten.

Die Software ArcVIEW bietet dabei schon als Standard die Möglichkeit, auf der Basis eines Rasterhöhenmodells den Fliessweg vom Oberflächenabfluss auf einem 8 Zellen-Algorithmus zu berechnen (Abb. 3-11).

219.14		216.47		211.07
	0.59 3.6 %	3.51 21.8 %	6.30 35.1 %	
223.10	-3.12 0 %	219.98	1.01 6.3 %	218.97
	0.35 2.2 %	1.52 9.4 %	2.84 17.6 %	
219.49		218.46		215.97

Abbildung 3-11: Beispiel für den D8-Algorithmus, der die Höhendifferenz zwischen Rasterelementen und ihren tiefer gelegenen Nachbarn ermittelt. Höhenwerte sind grau hinterlegt, die Höhendifferenz ist kursiv. Der fett geschriebene Wert zeigt die tatsächliche Fliessrichtung an. So kann für jede einzelne, mit einem Höhenwert versehene Rasterzelle der Abflussweg bestimmt werden, ebenso auch die Fliesspfade für das ganze Einzugsgebiet.

Für die Berechnung der Fliesspfade wurde ein Algorithmus gewählt, der auch die Grösse des Einzugsgebietes jeder einzelnen Rasterzelle mit berücksichtigt und als Zusatzmodul im Raster-GIS IDRISI zur Verfügung steht. Die weiteren Modellschritte wurden anschliessend komplett mit der Software ArcVIEW unter Verwendung des Model-Builders bearbeitet. Tabelle 3-2 zeigt die einzelnen Eingangsdaten für das Modell und ihre Herkunft. Die einzelnen Bearbeitungsschritte sind im Ablaufschema in Abbildung 3-14 dargestellt.

Tabelle 3-2: Im Modell ESSEM verwendete Eingangsgrößen, die Herkunft der Daten und die Datenart (Vector oder Rasterdaten). Das digitale Höhenmodell DHM25, das Strassen- und Wegenetz aus dem Modell Vector200 und die Pixelkarte PK25 stammen von SWISSTOPO. Alle anderen Eingangsdaten sind Eigenerhebungen der Forschungsgruppe Bodenerosion des Geographischen Institutes der Universität Basel. Nicht alle Daten flossen unmittelbar in das Modell ein, sondern dienten zum Teil der Überprüfung der Modellergebnisse und wurden über das Modell GVEM BS indirekt ins Modell ESSEM eingefügt (u.a. die Bodenformen).

	Bezeichnung	Herkunft	Datenart
1.	Digitales Höhenmodell (DHM25)	SWISSTOPO	Vector
2.	Parzellengrenze - Landnutzung	Forschungsgruppe Bodenerosion Basel (FBB)	Vector
3.	Bodenformenareale - Bodenformen	FBB	Vector
4.	Drainageleitungen	FBB	Vector
5.	Vector200 - Strassen, Wege usw.	SWISSTOPO	
6.	Erosionskartierungen - Punktuelle Ereignisse (Übertrittstellen) - Linienhafte Ereignisse - Flächenhafte Ereignisse	FBB	Vector
7.	Pixelkarte vom Einzugsgebiet (PK25)	SWISSTOPO	Raster

Um beispielhaft einen visuellen Eindruck von der Datenlage zu vermitteln, sind die Datensätze für einen kleinen Ausschnitt des Einzugsgebiets Länenbachtal dargestellt (Abb. 3-12 und 3-13). Als wichtigster Inputdatensatz diente dabei das DHM25. Von ihm wurden mit der digitalen Reliefanalyse die wichtigsten Reliefparameter abgeleitet. Als zentral erweist sich auch das Vector200-Datenmodell der SWISSTOPO. Dadurch wurde der Einfluss des Wege- und Strassennetzes auf das Abfluss- und Abtragsverhalten bestimmt.

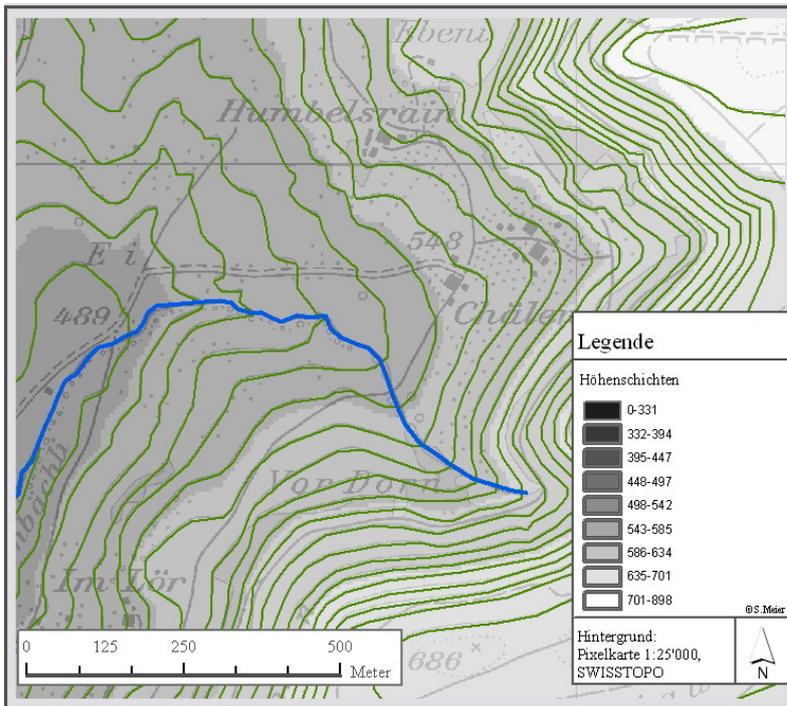


Abbildung 3-12: Ausschnitt aus dem EZG Länenbachtal: Dargestellt ist die Pixelkarte PK25, unterlegt mit den Höhenschichten aus dem DHM25. Die Abbildung zeigt die Steilheit des Geländes vor allem im Quellgebiet des Länenbaches.

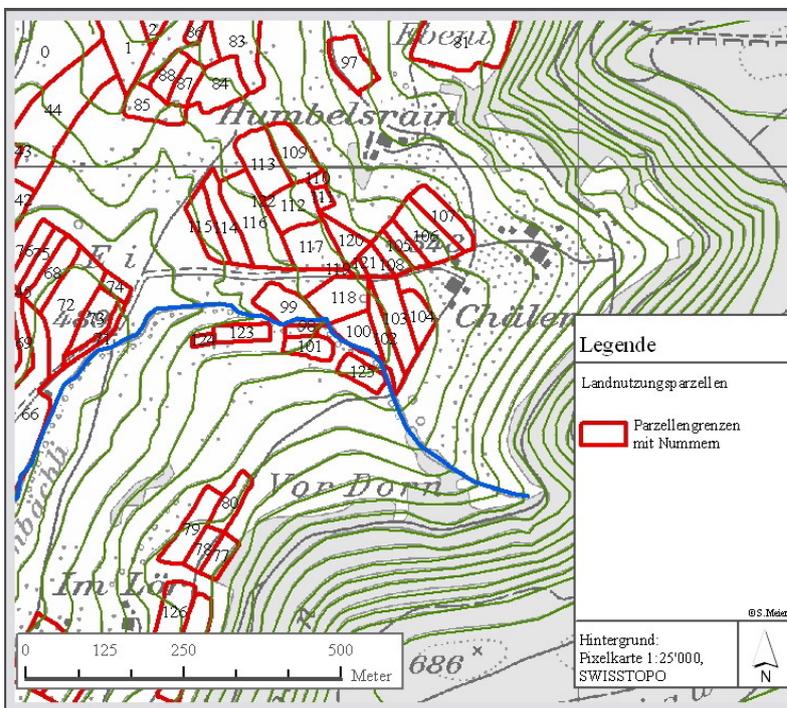


Abbildung 3-13: Ausschnitt aus dem EZG Länenbachtal. Dargestellt sind die Landnutzungsparzellen und die Isohypsen aus dem DHM25. Zwischen den einzelnen Fruchtfolgeflächen herrscht vorwiegend Dauergrünland vor. Die Abbildung gibt einen Eindruck von der Kleinparzellierung des Untersuchungsgebietes.

5.2.1.3 Modellbildung

Modellaufbau

Im Folgenden werden die Ableitungen aus den einzelnen Primärdaten und die verwendeten Überlagerungstechniken dargestellt. Abbildung 3-14 zeigt das Ablaufschema für das Modell ESSEM. Die einzelnen Modellschritte wurden in verschiedenen Programmen durchgeführt und werden im Folgenden detailliert erläutert.

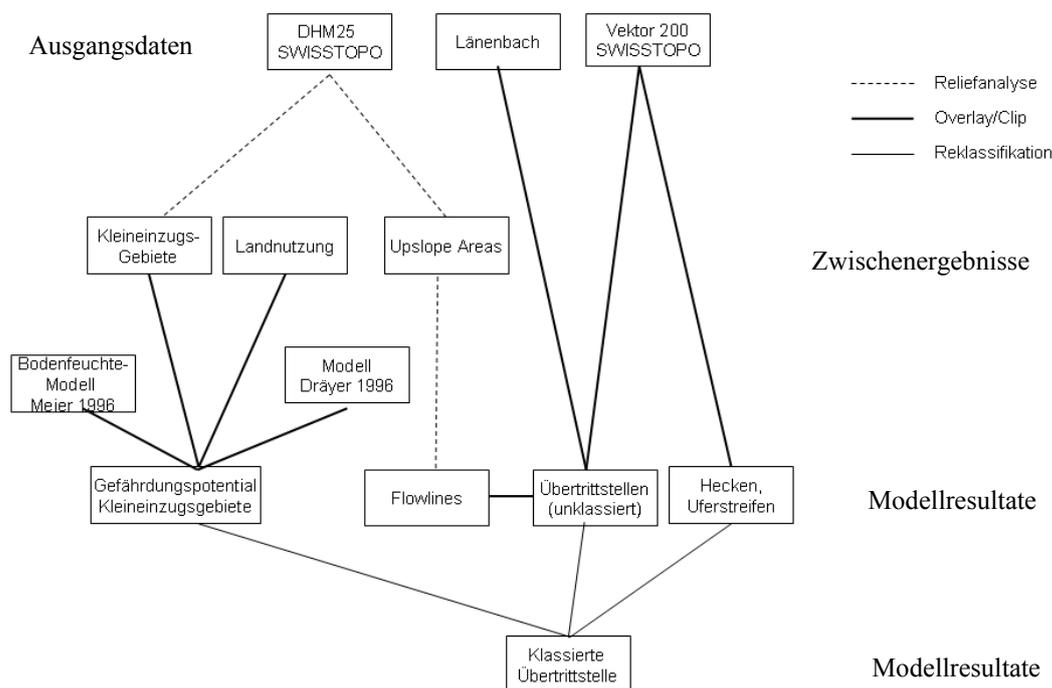


Abbildung 3-14: Ablaufschema des Modells ESSEM. Es stellt die Ausgangsdaten, die Zwischenergebnisse und die einzelnen Modellierungsschritte dar.

Das Ergebnis des Modells bilden die *klassierten Übertrittstellen* in den Vorfluter. Das Gefährdungspotential der Übertritte kann somit bestimmt und geeignete Massnahmen können an den einzelnen Übertrittstellen eingeleitet werden. Die Ausgangsdaten für die Modellbildung bilden das DHM25, der Verlauf des Länenbachs, das Model Vector200, sowie das Modell GVEM BS. Neben der digitalen Reliefanalyse, die im GIS IDRISI durchgeführt wurde, kamen einfache Geo-Verarbeitungsfunktionen wie „Clip“ und „Merge“ zur Anwendung.

Erster Modellschritt: Die Reliefanalyse

Das digitale Höhenmodell DHM25 wurde im Raster-GIS IDRISI einer digitalen Reliefanalyse unterzogen (FARRENKOPF 1987) (siehe. auch Kap. 3.2.1.2). Ziel der Analyse war, sowohl Kleineinzugsgebiete („subbasins“) zu berechnen als auch die Fliesspfade des Oberflächenabfluss herauszuarbeiten. Dabei wurde das digitale Höhenmodell am Verlauf des

Strassen- und Wegenetzes korrigiert. Es wurde im Verlauf des Wegenetzes eingetieft, um den Einfluss des Strassen- und Wegenetzes bei Oberflächenabfluss zu betonen. Die Eintiefung des Höhenmodells wurde mit einem Standard-GIS-Werkzeug von ArcVIEW durchgeführt (Abb. 3-15).

In den Abbildungen 3-16 und 3-17 ist der Vergleich zwischen einer Reliefanalyse *mit* Berücksichtigung des Strassen- und Wegenetzes im Höhenmodell und *ohne* dessen Berücksichtigung dargestellt.

Insgesamt wurden mittels Reliefanalyse folgende Zwischenergebnisse erzielt:

- *Kleineinzugsgebiete des Länenbachtals (klassiert nach Grösse).*
- *Gewichtete Fliesspfade („Flowlines“) des Oberflächenabflusses ohne bzw. mit Strassen- und Wegenetz.*

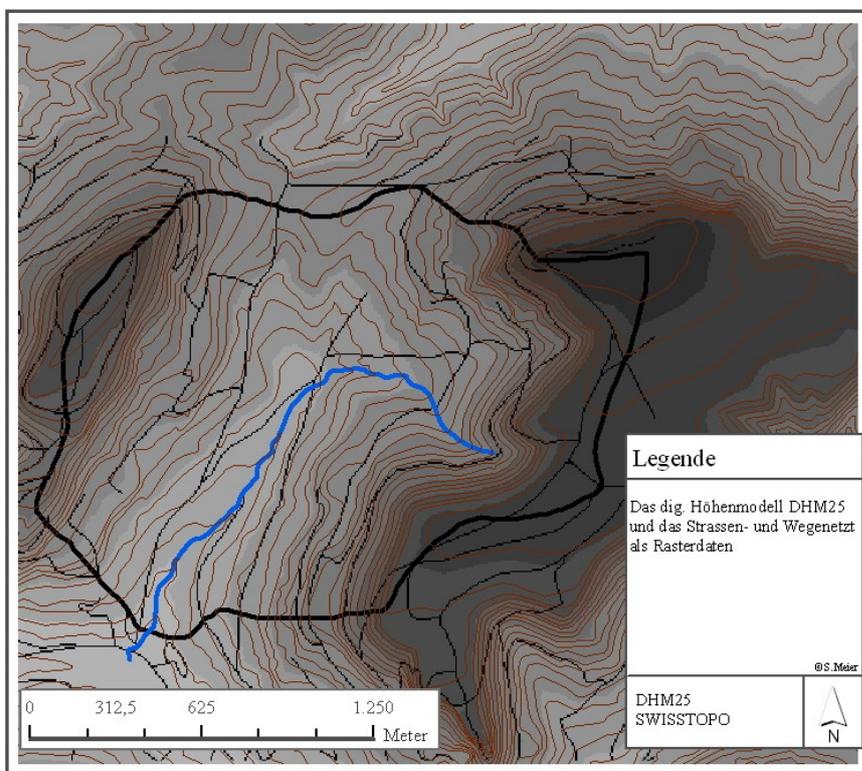


Abbildung 3-15: Digitales Höhenmodell des Länenbachtals. Es dient als Ausgangsbasis für die digitale Reliefanalyse. Das Modell wurde auf Grundlage der Isohypsen und weiterer einzelner Höhenpunkte aus dem Originaldatensatz der SWISSTOPO berechnet. Dazu diente die Standard-GIS-Funktion des 3D-Analyst von ArcVIEW. Anschliessend wurde das Höhenmodell, das nun als Raster vorlag, im Verlauf des Strassen- und Wegenetzes eingetieft. Das so korrigierte Modell konnte für die Berechnung der Fliesspfade verwendet werden.

Das Strassen- und Wegenetz wurde in das digitale Höhenmodell integriert, da die zahlreichen, im Feld erhobenen Erosionsschadensereignisse die Bedeutung des Flurwegenetzes belegten.

An dieser Stelle sei deshalb noch einmal auf die grosse Bedeutung der Felddatenerhebung hingewiesen. Eine rein auf dem digitalen Höhenmodell beruhende Reliefanalyse wird der

tatsächlichen Situation im Gelände nicht gerecht, da der Einfluss des Strassen- und Wegenetzes im Modellergebnis nicht wiedergegeben wird. Die langjährigen Schadenskartierungen und Beobachtungen im Gelände haben jedoch gezeigt, dass gerade das Strassen- und Wegenetz das Abflussverhalten im Einzugsgebiet entscheidend beeinflusst und so zu einer Verstärkung bestimmter Fliesswege beitragen kann, was wiederum zu einer Vergrösserung der Transportkapazität für Oberbodenmaterial führt. Gerade bei grossen Erosionsereignissen, wie im Januar 2000, wurden starker Oberflächenabfluss und Feststofftransport auf dem Strassen- und Wegenetz festgestellt.

Aus den Abbildungen 3-16 und 3-17 sind die Unterschiede zwischen der Reliefanalyse ohne bzw. mit Strassen- und Wegenetz ersichtlich. Hierbei zeigt sich ganz klar der grosse Einfluss anthropogen geschaffener Kulturlandschaftsstrukturen auf das Abflussverhalten eines Kleineinzugsgebietes. Die Fliesspfade des Oberflächenabflusses werden durch das Strassen- und Wegenetz umgeleitet und in ihrer Stärke verändert. Mit dem Oberflächenabfluss transportiertes Bodenmaterial gelangt zum Teil an ganz anderen Stellen in den Vorfluter als ohne Strassen und Wege. Daraus ergeben sich wiederum planerische Konsequenzen für die Anlagen des Strassen- und Wegenetzes.

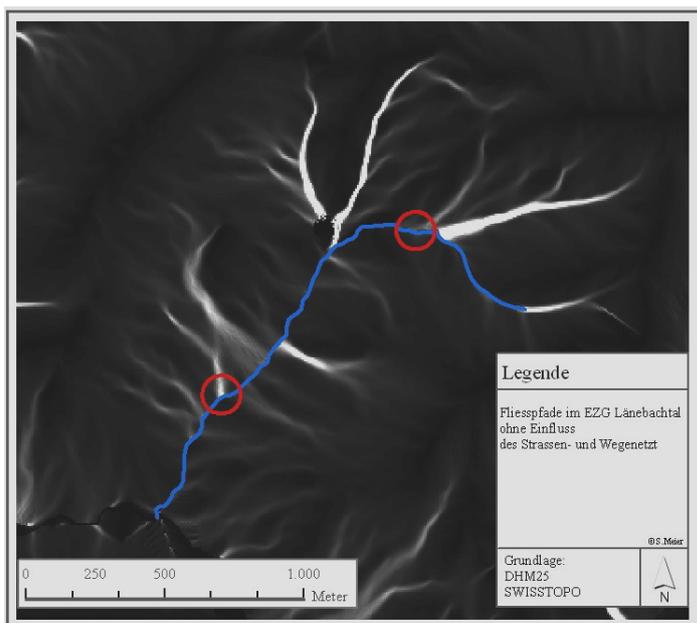


Abbildung 3-16: Einzugsgebiet des Länebachtals. Berechnung der Fliesspfade allein auf Basis des digitalen Höhenmodells DHM25. In den roten Kreisen sind die potentiellen Übertrittstellen in den Vorfluter dargestellt. Die Übertrittstellen entstehen allein aufgrund der Fliesspfadberechnung. Wie Abb. 3-17 zeigt, verschieben sich die Übertrittstellen aufgrund des Strassen- und Wegenetzes beträchtlich.

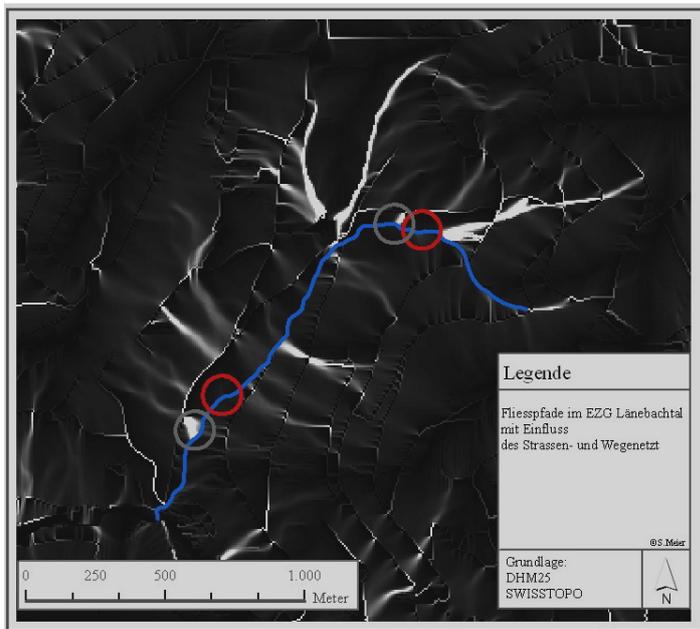


Abbildung 3-17: Einzugsgebiet des Lännebachtals. Dargestellt sind die Fließpfade inklusive der Einflüsse des Strassen- und Wegenetzes. In den grauen Kreisen befinden sich jene Übertrittstellen, die aufgrund des Einflusses des Strassen- und Wegenetzes auf die Fließpfadberechnung an anderer Stelle entstehen als in Abb. 3-16.

Zweiter Modellschritt: *Bestimmen der Übertrittstellen*

Der zweite Modellschritt beinhaltet die Modellierung der potentiellen Übertrittstellen, an denen erodiertes Oberbodenmaterial in den Vorfluter bzw. auf das Strassen- und Wegenetz gelangen kann. Das geschah mittels einer einfachen Overlay-Funktion im GIS: Wo Fließpfade den Vorfluter oder das Strassen- und Wegenetz überlagern, werden diese Stellen herausgefiltert (Abb. 3-18). Dadurch ergeben sich zwei Kategorien von Übertrittstellen:

1. *Übertritt Ackerland → Strassen/Wege.*
2. *Übertritt Ackerland → Vorfluter.*

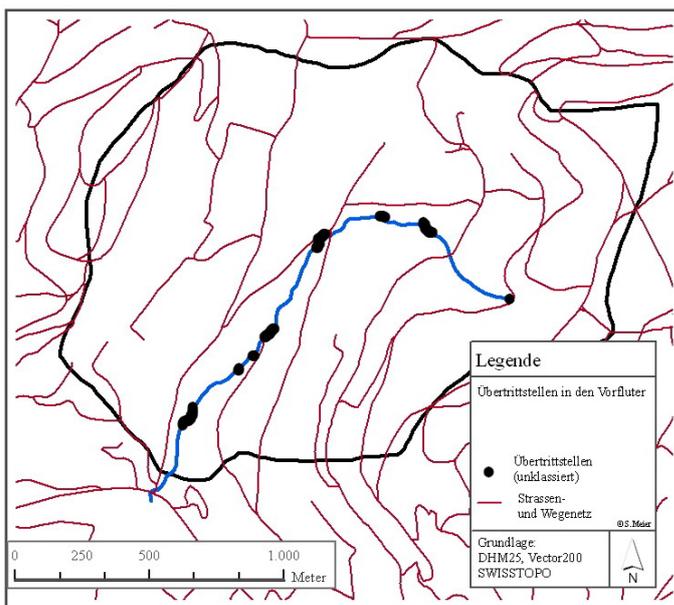


Abbildung 3-18: Übertrittstellen von Oberflächenabfluss und transportiertem Feststoff in den Länenbach. Die Übertrittstellen stellen diejenigen Punkte dar, wo die Fliesspfade den Vorfluter erreichen. Die Fliesspfade wurden aufgrund der Berechnungen mit integriertem Strassen- und Wegenetz ausgeschieden.

Dritter Modellschritt: *Klassierung der Übertrittstellen*

Die Klassierung der Übertrittstellen erfolgt in mehreren Einzelschritten:

- Bestimmung der Grösse der Kleinstezugsgebiete der einzelnen Übertrittstellen (Reliefanalyse).
- Bestimmung des Anteils stark erosionsgefährdeter Ackerschläge innerhalb des Kleinstezugsgebietes (Einbindung des Modells GVEM BS). Durch eine Überlagerung der Erosionsgefährdungskarte des GVEM BS mit den Kleinstezugsgebieten kann der prozentuale Anteil der in den Kleinstezugsgebieten gefährdeten Flächen bestimmt werden. Dadurch können die Kleinstezugsgebiete nach Gefährdungsgrad klassiert werden.
- Bestimmung von erosionsmindernden Faktoren im Verlauf der Fliesspfade (z.B. Hecken, Gebüsch, Vegetationsfilter). Die Daten dafür werden dem Datensatz Vector200 der SWISSTOPO entnommen.

Wie schon erwähnt, stellt die Ausgangsbodenfeuchte vor einem Erosionsereignis einen weiteren wichtigen Regler dar. Um diesen Faktor zumindest in den beiden Extremen „sehr trockene“ bzw. „sehr feuchte“ Ausgangsbedingungen zu berücksichtigen, wird eine bereits bestehende, am Geographischen Institut entwickelte Bodenfeuchtemodellierung eingearbeitet (MEIER, S. 1996). Dadurch kann der Bodenwasserhaushalt, der für die Reichweite des Oberflächenabflusses mitentscheidend ist, berücksichtigt werden.

Folgende Extremfälle können dabei berücksichtigt werden:

1. Sehr trockene Ausgangsbodenverhältnisse: Hoher Anteil Trockenrisse, schlechte Versickerungseigenschaften des Bodens. Die Bodenwasserleitfähigkeit ist sehr gering, so dass es bei einem erosionsauslösenden Extremniederschlagsereignis zu starkem Oberflächenabfluss kommt.
2. Sehr hohe Ausgangsbodenfeuchte (Boden gesättigt): Der Boden ist nicht mehr in der Lage, Oberflächenwasser aufzunehmen, es kommt zu erhöhtem Oberflächenabfluss.

Das durch den unterschiedlich hohen Anteil an negativen Wasserhaushaltseigenschaften in den Kleinstezugsgebieten generierte Verteilungsmuster des Bodenwasserhaushaltes wurde bei der Modellierung mitberücksichtigt. Die Teileinzugsgebiete wurden nach ihrem Gefährdungspotential nach der in Tabelle 3-3 dargestellten Matrix klassiert.

Tabelle 3-3: Bewertungsskala für die Klassierung der Kleinstezugsgebiete. Innerhalb der einzelnen Kleinstezugsgebiete wurden folgende Parameter miteinander verschnitten: Grösse des Kleinstezugsgebietes (von klein bis gross in 5 Klassen), das Verhältnis von Ackerland zu Grünland, die Breite der durch die Reliefanalyse berechneten Fliesspfade, das Gefährdungspotential gemäss Modell GVEM BS (Anteil der stark gefährdeten Areale, in 5 Klassen) und schliesslich die erosionsmindernden Faktoren wie Uferstreifen und Hecken in den Fliesslinien. Dadurch ergibt sich für jedes Kleinstezugsgebiet eine Bewertungszahl, die eine Klassierung zwischen einem sehr geringen (1 Punkt) bis zu einem sehr grossen (23 Punkte) Gefährdungspotential aufweist.

Gefährdungspotential	sehr gering	gering	mittel	gross	sehr gross
Grösse des Teileinzugsgebietes	1	2	3	4	5
Anteil Ackerland/Grünland innerhalb Teileinzugsgebiet	1 (20/80)	2(40/60)	3 (50/50)	4 (60/40)	5 (80/20)
Breite der Fliesspfade	1	2	3	4	5
Gefährdungspotential ausgewiesen durch Modell GVEM BS	1	2	3	4	5
Anteil geringen Versickerungspotentials	1	1	1	2	3
Uferstreifen	-2	-2	-2	-1	0
Hecken	-2	-2	-2	-1	0
Summe	1	5	9	16	23

Vierter Modellschritt: *Klassierung der Übertrittstellen*

Anschliessend können die ausgeschiedenen Übertrittstellen in den Vorfluter (hier: Länenbach) mit den klassierten Kleinstezugsgebieten verknüpft werden. Den Übertrittstellen wird die Klassierung jener Kleinstezugsgebiete zugewiesen, an die sie grenzen und deren Stoffeintragsverhalten durch die Kleinstezugsgebiete beeinflusst wird.

Zusammenfassung und Bewertung der Methodik

An dieser Stelle sind alle Arbeitsschritte zusammengefasst dargestellt:

1. Bereitstellen der Ausgangsdatensätze. Aufbereiten des digitalen Höhenmodells zur Bearbeitung im GIS IDRISI. Einbinden des Strassen- und Wegenetzes in das digitale Höhenmodell.
2. Berechnung der Fliesspfade des Oberflächenabflusses im GIS IDRISI.
3. Berechnung der Kleineinzugsgebiete aufgrund des digitalen Höhenmodells im GIS IDRISI.
4. Ermitteln potentieller Übertrittstellen von Oberflächenmaterial entlang der Fliesspfade.
5. Klassierung der Übertrittstellen aufgrund der Erosionsgefährdung im dazugehörigen entsprechenden Kleineinzugsgebiete (Einbindung des Modells GVEM BS).
6. Dynamisierung des Modells. Einbinden der Bodenfeuchteverhältnisse für zwei Extremsituationen.
7. Einbinden des Retentionspotentials der Fliesstrecken und Übertrittsstellen.
8. Klassierung der Übertrittstellen.
9. Vergleich der klassierten Übertrittsstellen mit den langjährigen Erosionsschadenskartierungen.

Die Methodik beruht auf dem Einsatz von amtlichen digitalen Daten, digitaler Reliefanalyse und einfachen Komponentengleichungssystemen, die mit Standard-GIS-Funktionen durchgeführt werden können. Sie beruht auf den zum Teil langjährigen Felddatenerhebungen und Schadenskartierungen und weist somit eine stark empirische Komponente auf. An dieser Stelle sei bereits kurz das Ergebnis des Modells vorweggenommen: Der Vergleich mit den langjährigen Schadenskartierungen zeigt, dass die in das Modell eingeflossenen Überlegungen zu vernünftigen Resultaten führen und die Methode als geeignet einzustufen ist, um in einem schnellen Verfahren einen guten Überblick über die potentiellen Übertrittsstellen und somit die Gewässergefährdung zu erhalten.

3.2.2 Das ereignisbezogene deterministische Einzugsgebietsmodell E2/3D

Das Modell E2/3D (SCHMIDT, J. 1996) entstand als Planungs- und Beratungsinstrument für die landwirtschaftliche Praxis. Die 2D-Variante des Modells entstand, um für Einzelhänge den Abtrag und deren Disposition für extreme Niederschlagsereignisse zu berechnen. Weiterhin erlaubt sie die Abschätzung der kumulativen Erosion über längere Zeiträume hinweg.

Durch Szenarien mit unterschiedlichen Nutzungsvarianten und Bodeneigenschaften, vor allem der Bodenfeuchte, lassen sich auch Landnutzungsänderungen und Auswirkungen unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse auf den Bodenabtrag abschätzen. Das Modell wurde für die Simulation von Starkniederschlagsereignissen im Riedmattbachtal gewählt,

weil es sich besonders für Einzelhänge und kleine Einzugsgebiete bewährt hat. In Modellvergleichen unterschiedlichster physikalischer Erosionsmodelle (MEIER, S. et al. 1998) stellte sich E2/3D als das für die kleinparzellierte Schweizer Agrarlandschaft und für die zur Verfügung stehenden Parameter aus dem Einzugsgebiet Riedmattbachtal als am besten geeignet heraus. Neben der Verfügbarkeit eines Modells sind die vorhandenen Modelleingangsparameter und die Möglichkeit der Kalibrierung des Modells durch Felddaten ebenfalls von grosser Bedeutung für die Auswahl eines bestimmten Modelltyps.

Die Hauptziel der Anwendung von E3D in der vorliegenden Arbeit war, den Landnutzungswandel der letzten 20 Jahre und den damit verbundenen Einfluss auf das Austragsverhalten von Bodenmaterial im Kleineinzugsgebiet Riedmattbachtal mit Hilfe eines ereignisbezogenen physikalischen Modells zu simulieren und an realen Felddaten zu eichen. Dazu muss ein Modell verwendet werden, das mit den in den langjährigen Felddatenerhebungen gewonnenen Messdaten als Eingabeparameter auskommt. Weitere Eingabeparameter, welche nicht aus dem vorhandenen Datenmaterial (z.B. Bodenformenkarte, Landnutzungs- und Erosionsschadenskartierungen) abgeleitet werden können, würden die Simulationsergebnisse mit einer zu grossen Unsicherheit behaften. Die Anwendung des Modells erfolgte in zwei Schritten:

1. Schritt: Das Modell E2D wurde auf der Testparzelle T30 angewendet. Dabei wurden Regensimulationen aus den Jahren 1987 und 1988 verwendet. Durch die idealisierten Rahmenbedingungen bei Regensimulationsversuchen (bekannte Regenintensität und Ausgangsbodenfeuchte) konnte das Modell sehr gut kalibriert werden.
2. Schritt: Anschliessend wurden dann E3D für Starkniederschlagsereignisse aus den Jahren 1988 bis 1999 angewendet.

Das Modell enthält verschiedene Kalibrierungsfaktoren. Durch die Anwendung der Einzelhangvariante E2D können die Kalibrierungsfaktoren für die 3D-Variante besser angepasst werden.

3.2.2.1 Die Modellgrundlagen

Bei E3D handelt es sich um ein physikalisches Erosionsmodell. Dadurch ist eine weitgehend problemlose Übertragbarkeit auf verschiedene Räume/Landschaften gewährleistet. Dem Modell liegen folgende Anforderungen zugrunde (aus SCHMIDT, J. 1996):

- Es muss einfach handhabbar sein, um auch fachfremden Personen nach kurzer Einarbeitungszeit den Umgang mit dem Modell zu ermöglichen.
- Die Zahl der Eingabeparameter muss sich auf ein Minimum beschränken.
- Es muss physikalisch begründet und damit auf andere Gebiete übertragbar sein.
- Es basiert auf der Simulation von Einzelereignissen.

Der Modellansatz lässt sich in drei Teilprozesse gliedern:

1. Infiltration des Niederschlagswassers und die damit verbundene Entstehung von Oberflächenabfluss bei Überschreiten der Infiltrationsrate des Bodens.
2. Der Prozess der Ablösung der Bodenteilchen als Folge des Überfließens mit Oberflächenwasser und des Aufpralls der Regentropfen.
3. Hydraulischer Transport der abgelösten Bodenpartikel mit dem Oberflächenabfluss.

Eine detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmässigkeiten und Formeln würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und kann bei SCHMIDT, J. (1996) nachgelesen werden.

3.2.2.2 Die verwendeten Eingangsgrössen und ihre Herleitung

An dieser Stelle wird der Parameterkatalog von E2D beschrieben. Anschliessend werden die Herleitung der für die 3D-Einzugsgebietsvariante benötigten flächenhaften Eingabeparameter dargestellt. Das detaillierte Vorgehen bei der Messung des Abtragsverhaltens auf der Erosionstestparzelle T30 durch Regensimulationen bei unterschiedlicher Bearbeitung der Testparzelle wurde von PRASUHN (1991) dokumentiert.

Für die Simulation der Abtragsereignisse auf der Testparzelle T30, Riedmattbachtal (Einzehang) werden folgende Parameter benötigt:

1. Reliefparameter: Hanglänge [m], Hanggeometrie (x-y Koordinaten)
2. Niederschlagsparameter: Niederschlagsdauer [min], Intensität [mm/min]
3. Bodenparameter: Korngrössenverteilung [%], Lagerungsdichte [kg/m^3], Gehalt an org. Kohlenstoff [%], Anfangswassergehalt [Vol.-%], Erosionswiderstand [N/m^2], Oberflächenrauigkeit [$\text{s/m}^{1/3}$], Bedeckungsgrad [%] und ein modellspezifischer Korrekturfaktor (Infiltration) [-].

Die Testparzelle weist eine durchschnittlich gleichmässige Hangneigung auf und die Hanglänge der Testparzelle (10 m) ist exakt bekannt, so dass die Ableitung der Reliefparameter keine Probleme bereitete. Die Niederschlagswerte konnten aus der Arbeit von PRASUHN (1991) entnommen werden. Die durchschnittliche Intensität der Regensimulationen betrug zwischen 60-70 mm/h, die Dauer zwischen 15 und 60 Minuten. Die Bodenparameter entstammen detaillierten, wiederholten Laboranalysen und Messungen im Feld.

Modellaufbau und Eingangsgrössen für das Modell EROSION3D

Aufbauend auf E2D wurde mit E3D eine Modellversion entwickelt, mit der flächendeckend kleine Einzugsgebiete auf Rasterbasis simuliert werden können. Die Rasterstruktur weist bezüglich des digitalen Höhenmodells den Vorteil auf, dass sie weit verbreitet ist und unabhängig in verschiedenen Softwareumgebungen gehandhabt werden kann.

Die Eingabeparameter

Die Eingabeparameter sind ähnlich denjenigen von E2D und orientieren sich an den Grundprozessen des Erosionsgeschehens in landwirtschaftlich genutzten Gebieten. Das Modell benötigt alle Eingangsdaten als Rasterdaten. An dieser Stelle stellt sich die Frage der Auflösung der Eingabeparameter. Da das digitale Höhenmodell massgebend für die Erosionssimulation in E3D ist, macht es Sinn, die Auflösung der Eingabeparameter stark von der Qualität des digitalen Höhenmodell (DHM) abhängig zu machen. Über die Qualität von digitalen Höhenmodellen gibt es inzwischen einige Forschungsarbeiten. z.B. die Arbeit von JACOBSEN (2001). Die Qualität des von der FBB verwendeten DHM kann nach langjährigen Erfahrungen in verschiedensten Modellen als genügend gut für E3D bezeichnet werden.

E3D ist mit einem so genannten Präprozessor ausgestattet, der die rasterbasierte Erzeugung der Eingabeparameter erleichtert. Mit Hilfe des Präprozessors werden die drei für das Hauptprogramm benötigten Eingabedatensätze (Relief-, Boden- und Niederschlagsparameterdatei) erstellt (Abb. 3-19).

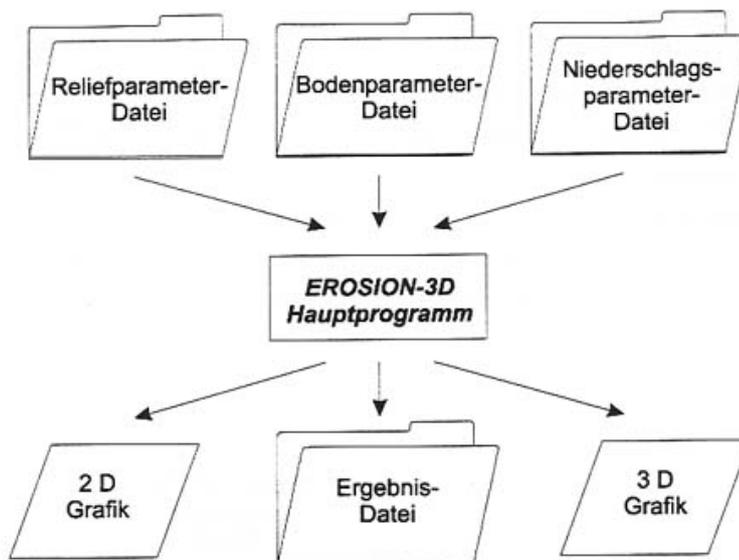


Abbildung 3-19: Schematische Darstellung der Ein- und Ausgabefunktionen von E3D (aus: SCHMIDT, J. 1996). Die durch den Präprozessor entstandenen Relief-, Boden-, und Niederschlagsparameterdateien liegen als Rasterdaten für das gesamte Einzugsgebiet vor und werden dann im eigentlichen Hauptprogramm miteinander verarbeitet. Die Ergebnisse können als 2D- und 3D-Grafiken und die Abtragsverhältnisse numerisch ausgegeben werden.

Die Erstellung der Bodenparameterdatei

Die Erstellung der Bodenparameterdatei kann im Modell auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen: Mit dem ersten können alle benötigten Einzelbodenfaktoren auf Rasterzellen basierend im Präprozessor zur Bodenparameterdatei vereinigt werden. In diesem Fall sind die stark von der Landnutzung und damit saisonal geprägten Parameter für die einzelnen zu simulierenden Ereignisse immer wieder neu zu berechnen.

Aus diesem Grund wurde der zweite Weg zur Erstellung des Bodenparameterdatensatzes gewählt, den das Modell als Alternative bietet: Dieser sieht die schlagbezogene Erstellung der Bodenparameter in Abhängigkeit von den jahreszeitlich wechselnden Bodeneigenschaften und des Bedeckungsgrades der Feldfrüchte vor. Als Datengrundlage dienen die digitalisierten Ackerparzellen im EZG des Riedmattbachtals (Abb. 3-20). Aufgrund der Landnutzungskartierungen ist es möglich, den einzelnen Feldfrüchten mit Hilfe eines eigens für die Modellanwendung erstellten Parameterkataloges wachstumsabhängige Bodenparameter zuzuweisen.

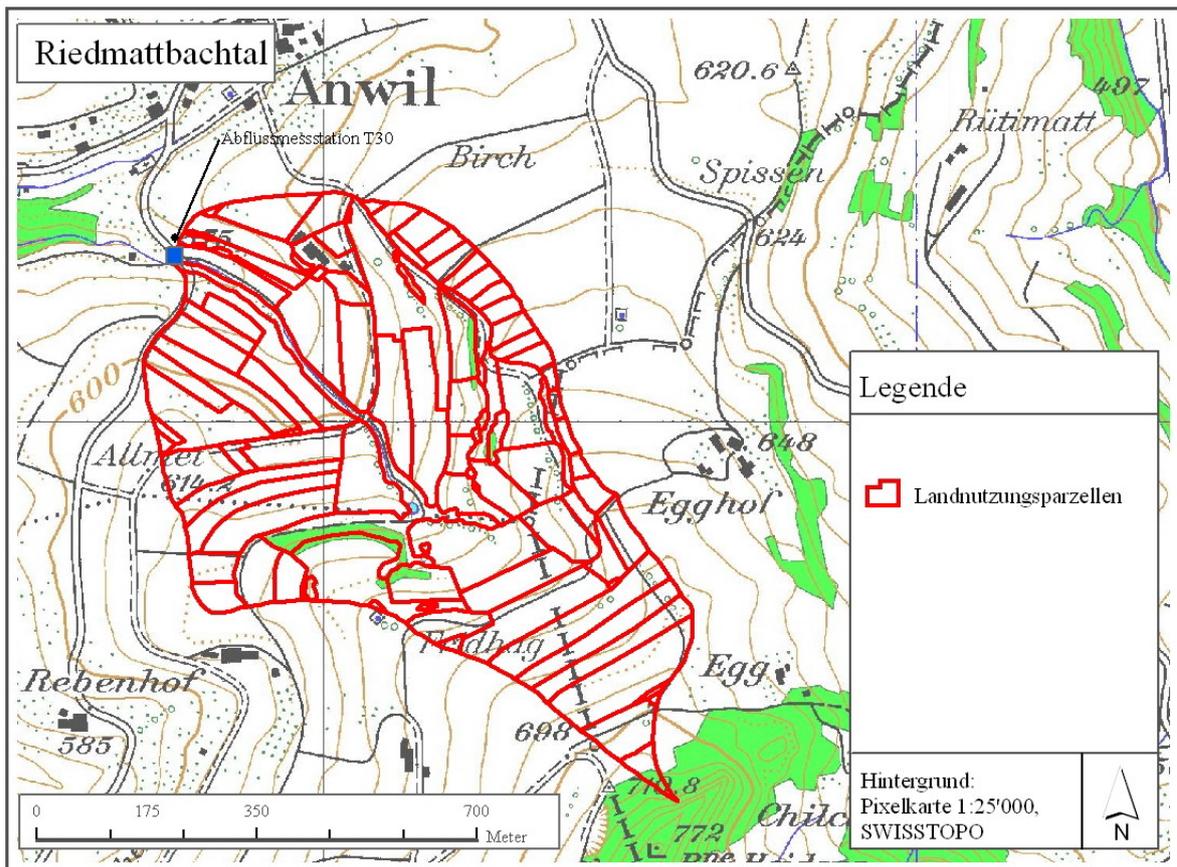


Abbildung 3-20: Verteilung der Ackerschläge im Riedmattbachtal. Das Gebiet ist sehr klein parzelliert. Die Abflussmessungen an Station T30 wurden im Jahr 2000 nach 25 Jahren eingestellt.

Der Parameterkatalog für die Bodeneingangsparameterdatei enthält folgende Angaben:

- Bedeckungsgrad in 5 %-Schritten.
- Erosionswiderstand in N/m^2 unterschieden für:
 - konventionelle Bearbeitung
 - konservierende Bearbeitung (Zinkenrotor)
 - für sehr tonige Lehmböden
- Rauigkeit nach *MANNING* in $\text{s}/(\text{m}^{1/3})$
 - für konventionelle Bearbeitung
 - für konservierende Bearbeitung
- Lagerungsdichte in kg/m^3
- Organischer Kohlenstoffgehalt
(für Acker 2, Wiese/Weide 5, Wald 8 und Strassen 0).

Neben diesen wachstumsabhängigen Parametern fließen weitere Bodenparameter in die Parameterdatei ein:

- Anfangsbodenfeuchte
- Korrekturfaktor für die hydraulische Leitfähigkeit
- Korngrößenverteilung für neun Klassen (Feinton bis Grobsand, gemäss DIN-Einteilung; Tab. 3-4 und Abb. 3-21)

Tabelle 3-4: Verteilung der Bodenart im Einzugsgebiet Riedmattbachtal in Prozent.

Bodenart	gs	Mfs	Gu	Mu	fu	T
%	3,7	4,9	22,2	13,3	14,3	41,6

Der Parameterdatensatz für die Erstellung der schlagbezogenen Bodenparameterdatei wurde kulturartspezifisch mit einer zeitlichen Auflösung von 14 Tagen erstellt. So können für jede Simulation Parameterwerte für die entsprechende Landnutzung mit einer Abweichung von höchstens +/- 7 Tagen in der Vegetationszeit der Fruchtarten erstellt werden (Tab. 3-5). Als Grundlage für die fruchtartspezifische Erstellung des Parametersatzes dienen die Angaben bei MOSIMANN & RÜTTIMANN (1995). Daher handelt es sich um Durchschnittswerte, die bei extremen Witterungsbedingungen vom Durchschnittswert abweichen können. Aufbauend auf den halbjährigen Landnutzungskartierungen können so den einzelnen Ackerschlägen entsprechende Parameter für das Erstellen der Bodeninputdatei zugeordnet werden.

Die Erstellung der Reliefparameterdatei

Die Erstellung der Reliefparameterdatei erfolgte auf Basis des digitalen Höhenmodells 1:25'000 (DHM25) der SWISSTOPO mit einer Rasterzellenauflösung von 6.25 m. Dafür wurde das DHM25 mit Hilfe eines GIS aufbereitet und mit verschiedenen Anpassungen für die Modelleingabe versehen. Unter anderem wurde mit Hilfe des digitalen Vektormodells 1:200'000 (Vector200) der SWISSTOPO das Strassen- und Wegenetz im Höhenmodell betont, da hier bevorzugte Fliesspfade für den Oberflächenabfluss auftreten (siehe auch Kap 3.2.1). Im anschliessenden Präprozessor von E3D wurden dann die entsprechenden Reliefparameter aus dem DHM berechnet (Abb. 3-22). Dabei wurden für jedes einzelne Raster-element nach der vorherigen Beseitigung abflussloser Hohlformen (Standard-GIS-Operation „fill sinks“) folgende Faktoren berechnet:

- Hangneigung
- Exposition
- reale geneigte Flächengrösse
- Abflusswege und Abflussverteilung
- Gewässernetz
- Länge des Fliessweges
- Abflusskonzentration
- Einzugsgebiet.

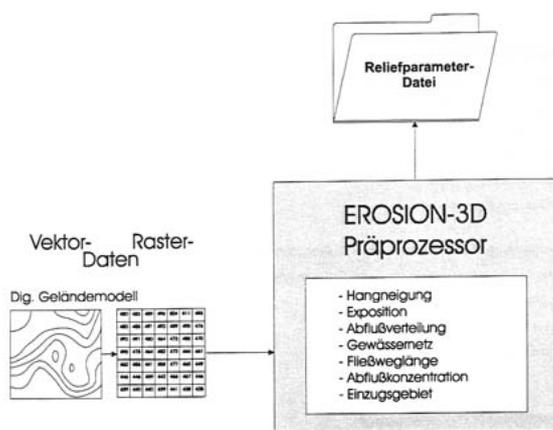


Abbildung 3-22: Bearbeitung der Reliefparameter im E3D-Präprozessor.

Die Erstellung der Niederschlagsparameterdatei

Die Berechnung des Feststoffein- bzw. -austrages erfolgt bei E3D jeweils nur für *einen* zeitlichen Abschnitt eines Niederschlagsereignisses. Dadurch können die unterschiedlichen Intensitäten eines Starkniederschlagsereignisses in die Modellsimulation einbezogen werden. Es wurde eine zeitliche Auflösung von zehn Minuten gewählt.

Das Erosion 3D-Hauptprogramm

Nach der ereignisbezogenen Erstellung der drei Inputparametersätze (Relief, Boden und Niederschlag) werden die Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden in einer Ergebnisdatei abgelegt. Sie lassen sich sowohl in tabellarischer Form als auch als Quadratrasterkarte darstellen. Die Darstellung als Rasterkarte bietet Vergleichsmöglichkeiten mit Schadenskartierungen. So können die berechneten Fliesspfade des Oberflächenabfluss und das dargestellte Erosionsschadensbild anhand der Felddatenerhebungen überprüft werden. Den genauen Ablauf der einzelnen Berechnungsschritte im Hauptprogramm gibt das Handbuch zu E3D (SCHMIDT, J. 1996) vor.

3.2.2.3 Kalibrierung und Validierung

Simulation der Beregnungsversuche auf der Testparzelle T30

Die Kalibrierung von E2D kann durch Anpassung der Anfangsbodenfeuchte, die in der Regel nur schätzungsweise bekannt ist, sowie durch Änderung des so genannten *K-Wertes*, eines modellspezifischen Korrekturfaktors, der den Erosionswiderstand des Boden widerspiegelt, erfolgen. Die Beregnungsversuche auf der Testparzelle haben den grossen Vorteil, dass die Ausgangsbedingungen, unter anderem der *Ausgangsfeuchtegehalt* des Bodens, vor den Simulationen exakt bestimmt wurde und somit eine Kalibrierung allein durch den modellspezifischen K-Wert erfolgen kann. Die Beregnungsversuche bieten daher eine ideale Voraussetzung, um das Modellverhalten bei unterschiedlicher Ausgangsbodenfeuchte zu überprüfen und anhand dieser Daten anschliessend eine solide Grundlage für die Anwendung der Einzugsgebietsvariante E3D zu haben.

Simuliert wurden die Beregnungsversuche aus den Jahren 1987 und 1988 unter Einbezug unterschiedliche Bearbeitungsvarianten. Die detaillierte Aufstellung der einzelnen Beregnungsversuche und der Umgebungsparameter zeigt Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Zusammenstellung der Regendaten und der wichtigsten Resultate der Beregnungsversuche mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Die Daten dienen zur Kalibrierung von E2D mit standardisierter Anfangsbodenfeuchte (aus: PRASHUN 1991).

Beschreibung, Datum	Versuch	Regendaten						Abflußdaten				Abtragedaten			
		Dauer [min]	Intens. [mm/h]	Energie [J/m ² *mm]	EI ₃₀ [N/h]	EI ₃₀ b. Abfluß [N/h]	Abfluß [l/m ²]	Abfluß- rate [l/min]	Abfluß vom N [%]	Infiltr. [%]	Sed.-Gehalt [g/l]	Abtrag [t/ha]	Abtrag* stand. [t/ha]	RSA [%]	
Bodenart: TL richtungslos oberflächlich geloockert	31.8.87 TL	60	63,59	19,62	79,34	26,45	7,91	1,31	12,43	87,57	29,62	2,34	1,41	7,71	
	FL	30	69,00	19,84	47,23	3,02	11,17	3,19	32,37	67,63	29,63	3,31	1,69	18,29	
	NL	13	60,44	19,48	15,42	1,29	6,34	4,66	49,10	50,90	27,38	1,76	1,17	29,80	
Saattrillen längs	21.9.87 TL	60	64,96	19,68	83,03	24,91	8,85	1,44	13,63	86,37	13,71	1,21	0,69	3,80	
	FL	30	65,46	19,70	42,20	3,17	8,62	2,72	26,32	73,68	24,54	2,11	1,20	13,08	
	NL	15	63,36	19,61	19,68	1,33	5,26	3,16	33,20	66,80	19,90	1,05	0,63	13,88	
Saattrillen quer	5.10.87 TL	53	68,29	19,81	81,61	29,26	10,40	1,89	17,24	82,76	24,41	2,54	1,32	11,60	
	FL	25	67,39	19,78	37,42	3,49	10,08	3,73	35,89	64,11	30,20	3,04	1,63	30,33	
	NL	15	65,92	19,72	21,42	1,86	7,53	4,66	45,70	54,30	22,99	1,86	1,73	30,14	
Tieffurche	30.5.88 TL	90	61,30	19,52	110,93	81,91	0,59	0,06	0,64	99,36	13,07	0,08	0,05	0,18	
	unbearbeitet	12.7.88 TL	120	72,44	19,97	209,59	94,32	8,43	0,70	5,82	94,18	22,18	1,87	0,86	2,33
	Trockenrisse	FL	30	72,96	19,99	53,20	1,92	8,50	2,70	23,29	76,71	30,55	2,60	1,18	12,74
	NL	15	72,64	19,98	26,35	1,02	4,66	2,78	25,66	74,34	21,67	1,01	0,46	10,00	
Saattrillen längs, TL Ab- bruch n. 10 l	2.11.87 TL	28	66,00	19,72	40,80	19,80	1,14	0,38	3,65	96,35	14,27	0,16	0,09	1,04	
	FL	30	60,48	19,48	35,64	2,18	6,17	1,92	20,39	79,61	14,10	0,87	0,58	6,37	
	NL	15	64,00	19,64	20,11	1,45	7,74	4,40	48,36	51,64	20,05	1,55	0,92	20,14	

Neben den Berechnungsversuchen wurden weitere Grossregenereignisse auf der Testparzelle mit E2D simuliert. Tabelle 3-7 können deren Daten sowie die auf der Testparzelle gemessenen Abflüsse und Sedimentabträge entnommen werden.

Tabelle 3-7: Erosionsereignisse auf der Testparzelle T30 zwischen 1988-1994. Grau hinterlegt sind die mit E2D simulierten Ereignisse.

Datum	Abtrag kg	Abtrag t/ha	Abfluss L	Sed.-Konz. g/L	R-Faktor	N in mm
10.05.1988	1.982	1.98	12.75	155.42	11.4	29.3
10.05.1988	0.31	0.16	3.01	103.19	11.4	29.3
05.06.1988	0.1	0.05	3.5	28.57	3.6	22.8
23.07.1988	10.499	5.25	48.28	217.46	5.7	24
29.07.1988	2.137	1.07	17.58	121.56	0.4	6.8
13.06.1989	0.048	0.02	3.741	12.83	1.6	2.6
02.07.1989	122.146	61.07	332	367.90	77.8	68.4
25.07.1989	0.196	0.1	6.016	32.58	5.6	14.6
01.08.1989	0.207	0.1	2.902	71.33	3	25
08.08.1989	0.088	0.04	2.388	36.85	1.9	14.1
19.06.1990	0.108	0.05	5.557	19.50	3.2	21.6
26.06.1990	1.638	0.87	55.7	29.40	4.4	10
01.07.1990	5.086	2.54	58.2	87.40	7.5	27
14.08.1990	39.197	19.6	190	210.00	16.1	21.9
04.10.1990	0.232	0.12	1.52	152.70	9.1	37.8
05.05.1993	0.118	0.059	11.3	10.44		
07.07.1993	10.861	5.4305	128	84.85	31.8	46.8
14.07.1993	5.232	2.616	63	83.05	21	43.1
21.07.1993	27.001	13.5005	131.5	205.33	51.3	8.3
25.08.1993	4.624	2.312	68.5	67.50	11.6	39.6
20.07.1994	1.03	0.515	19	54.21	9.1	18.3
27.07.1994	0.07	0.035	2.2	31.82	5.4	10.5
03.08.1994	17.76	8.88	42	422.86	72	41
10.08.1994	9.03	4.515	120	75.25	2.1	12.5
17.08.1994	1.83	0.915	15.5	118.06	9.6	21.4

Anschliessend an die Simulationen mit E2D wurden mit E3D die im Untersuchungsgebiet Riedmattbachtal erfassten Hochwasserereignisse mit Sedimentaustrag und die in der Regel damit einhergehenden Erosionsschäden auf den Ackerschlägen simuliert. Dazu wurden Ereignisse ausgewählt, welche man als Extremereignisse bezeichnen kann, die eine Einschätzung des Ausgangszustandes der Bodenfeuchte vor dem Ereignis als realistisch erscheinen lassen.

Folgende reale Starkniederschlagsereignisse wurden mit E3D im Einzugsgebiet des Riedmattbaches simuliert:

15.06.1987, 09.07.1987, 26.07.1987, 30.07.1987, 08.05.1988, 04.06.1988, 30.08.1988, 29.11.1988, 24.01.1994, 18.05.1994, 06.08.1994, 24.08.1995, 14.09.1995.

Nach der Aufbereitung der Nutzungsdaten mit Hilfe des in Kap 3.2.2.2 erwähnten Parameterkataloges und Erstellung der Niederschlaginputdatei wurden die Simulationen mit unterschiedlichen Anfangsbodenfeuchten und Variationen des K-Wertes kalibriert. Nach der Kalibrierung wurde an zwei Extremereignissen eine Validation des Modells durchgeführt, um Aussagen über die Modellgüte und die Eignung des Modells zur Abschätzung des Erosionsverhaltens bei unterschiedlicher Landnutzung im EZG des Riedmattbaches vornehmen zu können. Im Vordergrund stand dabei die Frage nach dem Einfluss der Landnutzung bzw. ob sich der in den letzten 15 Jahren vollzogene Landnutzungswandel auch in den Feldmessungen widerspiegelt und ob das Modell diese Ergebnisse mit hoher Genauigkeit wiedergeben kann.

3.2.3 EPIC: Ein Modell zur Abschätzung von langjähriger Erosionsgefährdung und Stoffauswaschung

Das Modell EPIC wurde 1995 erstmals für Schweizer Agrarverhältnisse in einer Oberlehrerarbeit am Geographischen Institut der Universität Basel angewendet (MAURER 1995). Die Aufgabenstellung lag damals darin, den langjährigen Rückgang der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenerosion mit dem Modell zu simulieren, um anschliessend die Ergebnisse in einem Ökonomiemodell (SCHMID et al. 1997) an der ETH Zürich einzusetzen.

Dieses Modell wurde von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe in den USA entwickelt mit dem Ziel, die Beziehungen zwischen Bodenerosion, Ernteproduktion und den damit verbundenen Prozessen mit Hilfe eines mathematischen Modells zu simulieren. Daraus entstand 1984 das Modell EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator; SHARPLEY & WILLIAMS 1990). Neben der Simulation des Prozesses der Erosion und des Ernteertrages bietet EPIC jedoch noch viel weiter reichende Anwendungsmöglichkeiten. Viele hydrologische Parameter sowie stoffhaushaltliche Kennwerte wie Nitrat- und Phosphatauswaschung lassen sich mit EPIC simulieren. Das Modell ist besonders geeignet für Langfristsimulation bis zu 100 Jahren, kann aber im Gegensatz zum Einzugsgebietsmodell E3D nur auf Schlagebene angewendet werden. Das Modell wird mit einer umfangreichen Datenbank zu Wetter, Boden und Bearbeitungsvarianten aus den USA geliefert. Um überhaupt mit dem Modell arbeiten zu können, mussten diese zunächst in einem ersten Schritt für die Schweizer Agrarverhältnisse angepasst werden.

Für den Einsatz des Modells in dieser Arbeit gibt es folgende Gründe:

Zum Einen ging es um eine weiterführende Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrarökonomie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, die mit der Oberlehrerarbeit von MAURER (1995) startete. Zum Anderen sollte die Anwendung eines mathematisch basierten Erosionsmodells auf Schlagebene erfolgen, womit langjährige Wirkungen der

Bodenerosion und des Stoffaustrages auf einzelne besonders gefährdete Ackerschlägen im Einzugsgebiet des Länenbachs abgeschätzt und mit den vorhandenen Felddaten in Beziehung gesetzt werden sollten. Es ging aber auch um den Praxistest eines solchen Modells als Langfristvorhersage- und Planungsinstrument (Abb. 3-23, siehe auch Kap. 1.3.1).

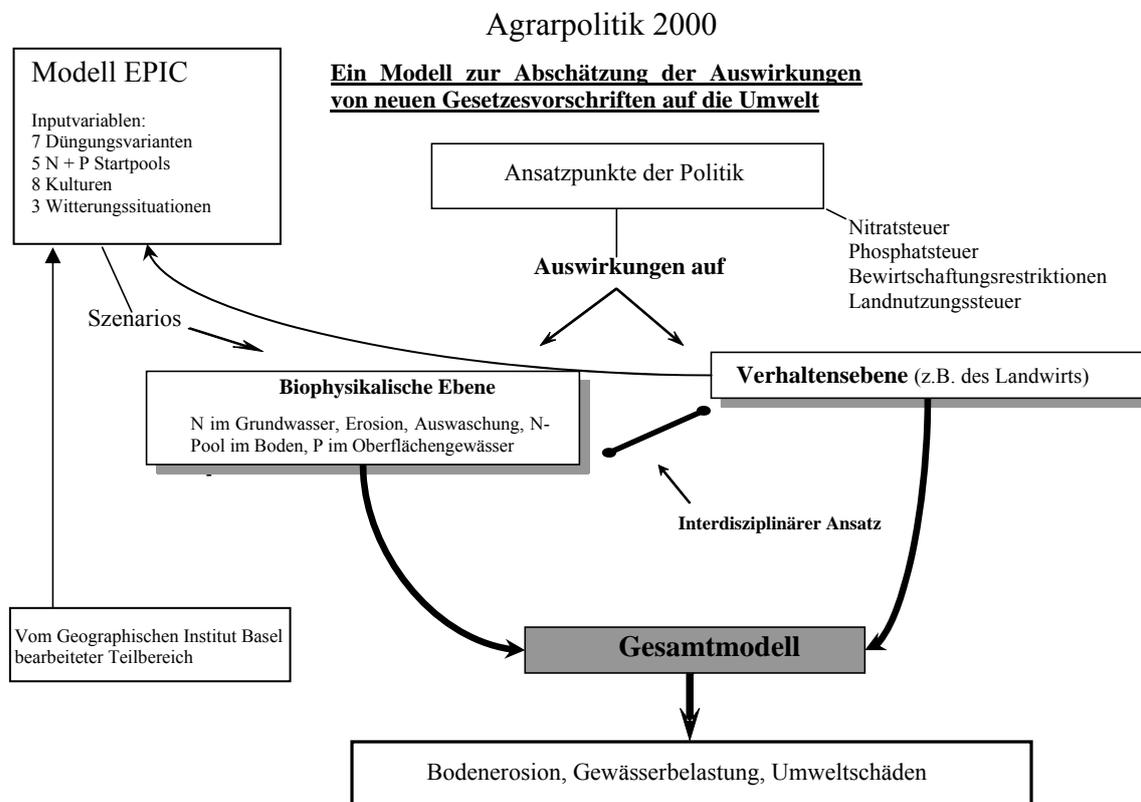


Abbildung 3-23: Agrarpolitik 2000. Die Grafik zeigt die Auswirkungen von politischen Entscheidungen auf Bodenerosion, Gewässerbelastung und Umweltschäden. Das Modell EPIC liefert die Szenarien für die biophysikalische Ebene des Gesamtmodells. Die Verhaltensebene (z.B. der Landwirte) beeinflusst dabei die Modellsimulationen mit EPIC z.B. über die unterschiedlichen Düngegaben.

In der bereits erwähnten ersten Anwendung des Modells wurden bisher nur sehr wenige Feldfrüchte (vor allem Fruchtfolgen) sowie sehr einheitliche Düngungs- und Bearbeitungsvarianten untersucht. Um die Folgen der Erosion in ein ökonomisches Modell einbeziehen zu können, ist es notwendig, ein breites Spektrum von möglichen Bearbeitungsvarianten, Feldfrüchten und vor allem auch von Düngungsvarianten zu simulieren. Da es für eine solche Bandbreite bisher keine ausreichenden Messergebnisse gibt, hat man sich für das Modell EPIC entschieden. Damit soll eine grosse Fülle an Daten simuliert werden, um so die für die ökonomische Modellierung (Projekt an der ETH Zürich) notwendigen Erosions-, Stoffhaushalts- und Wachstumsdaten zu erhalten. Um die Boden- und Wetterverhältnisse aus den früher bereits gemachten Modellsimulationen (MAURER 1995) übernehmen zu können, wurde zunächst das EZG des Baldeggersees gewählt (Abb. 3-24).

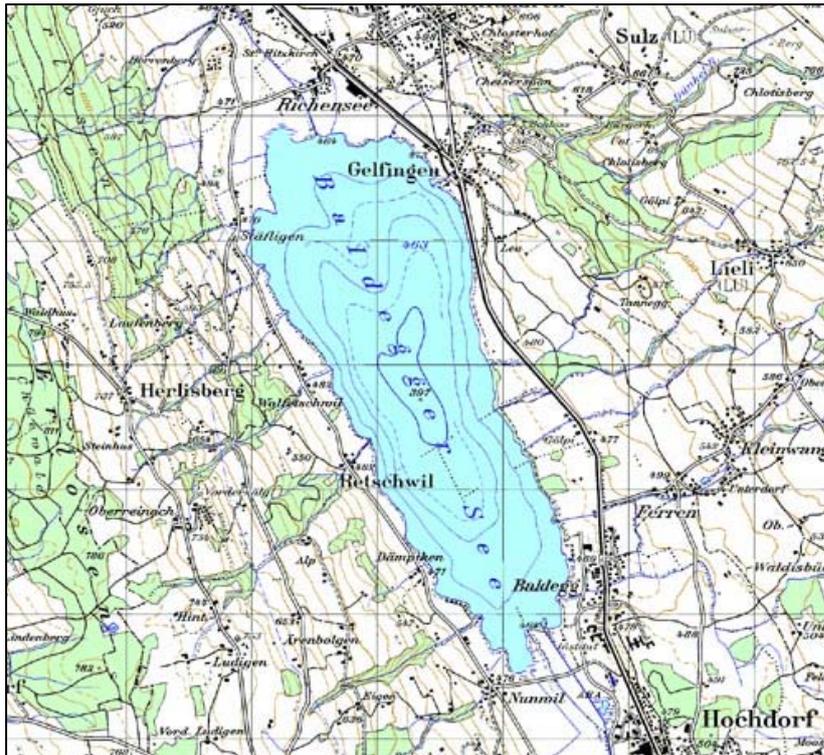


Abbildung 3-24: Einzugsgebiet des Baldeggersees (Swiss Map 50, SWISSTOPO).

Anschliessend wurden Boden- und Wetterparameter für das langjährige Untersuchungsgebiet des Geographischen Institutes, das Länenbachtal erarbeitet und mit denselben Modellvorgaben simuliert.

EPIC setzt sich aus 10 Hauptprozesskomponenten zusammen: 1. Wetter, 2. Wasserhaushalt, 3. Erosion, 4. Nährstoffzufluss, 5. Pestizide, 6. Bodentemperatur, 7. Bodenbearbeitung, 8. Erntezuwachs, 9. Bearbeitungsmanagement, 10. Volkswirtschaft.

Die einzelnen mathematisch-physikalischen Formeln, welche den Prozesskomponenten zugrunde liegen, finden sich detailliert bei WILLIAMS & SHARPLEY (1990).

An dieser Stelle sollen der Funktionsumfang und der Modellaufbau sowie die für die Simulation benötigten Anpassungen eingehender beschrieben werden:

Im Modell EPIC werden neun Systemfiles als Berechnungsgrundlage für die Simulation eines einzigen Inputdatensatzes verwendet. Das heisst, der erstellte Inputdatensatz wird mit den neun Systemfiles im eigentlichen Hauptprogramm verarbeitet, und es wird ein Outputfile mit den ermittelten Ergebnissen berechnet. Die einzelnen Systemfiles können mit speziellen Editoren angepasst werden (Abb. 3-25).

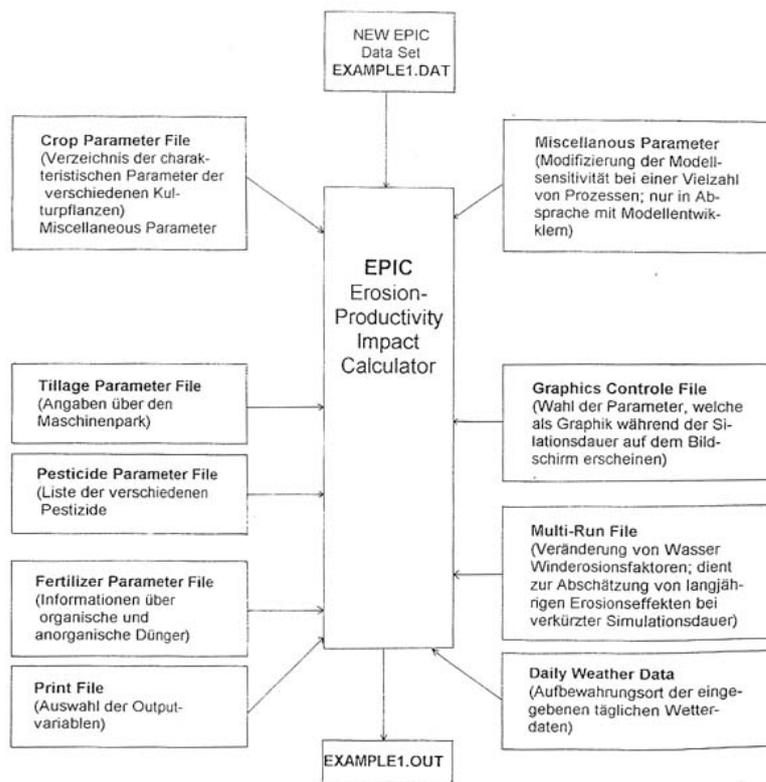


Abbildung 3-25: EPIC-Systemfile-Struktur (aus: MAURER 1995 nach WILLIAMS & SHARPLEY 1990). Dargestellt sind die neun Parameterdateien, die im EPIC-Hauptprogramm miteinander verarbeitet werden.

Da in dieser Arbeit ca. 16'000 Simulationsläufe nötig waren, jede Simulation mit unterschiedlichen Eingabeparametern erfolgte und die Ausgabeparameter aus einer Datei herausgelesen werden mussten, war es nötig, sowohl die eigentlichen Simulationsläufe wie auch die Auswertung der Ausgabefiles mit Hilfe eigener Zusatzprogramme zu automatisieren.

Erst damit war es bei den zur Verfügung stehenden Personalressourcen möglich, eine solche Fülle an Simulationsvarianten berechnen zu können. An dieser Stelle muss klar darauf hingewiesen werden, dass das Modell für eine solche große Anzahl von Simulationsvarianten wenig geeignet ist. *Nur durch die Programmierung eigener Schnittstellen zu den Input und Outputdatensätzen waren die erwünschten Ergebnisse zu erzielen.* Die Schnittstelle wurde mit Hilfe der Programmiersoftware IDL realisiert.

3.2.3.1 Die verwendeten Eingangsgrößen und ihre Herleitung

Das Modell setzt sich aus verschiedenen Eingabedatensätzen zusammen, die bei einem Simulationslauf nacheinander abgefragt werden.

Das Inputfile (Input.dat)

Im Hauptinputfile werden für die einzelnen Feldfrüchte, die Witterungssituation, der Standort (Bodenparameter) sowie der Düngerinput festgelegt. EPIC bietet die Möglichkeit,

bei langjährigen Simulationen ganze Fruchtfolgen zu simulieren. Bei der vorliegenden Fragestellung wurde aber nur ein Bearbeitungsjahr und somit eine einzige Feldfrucht simuliert (Abb. 3-26).

Körnermais, konventionell, organische Düngung, trockenes Jahr														12:56	
08.Juli 1998															
90 cm Profil, 110 kg N, mittlerer Pool															
2	1	1	1	03	0	47	0	0	3	0	1	1	0	0	0
1.00	85.0								.0	47.00	540.0			.0	
1.0	15.0	345.0													
100.0	.1000	1.00	2.												
		.0	.0												
2.02	4.67	8.77	12.02	17.55	20.26	22.81	22.40	18.83	11.90	6.23	2.81				
-2.87	-1.28	.76	2.87	7.46	10.73	12.74	12.62	9.39	5.01	.96	-1.94				
2.13	1.98	2.27	1.96	1.57	2.08	1.43	1.37	1.52	2.07	1.08	2.23				

Abbildung 3-26: Beispiel für einen Inputdatensatz (Originaldaten): Er enthält die Wettersituation (Niederschlag, Windverhältnisse, Temperatur), die Bodenparameter (Gründigkeit, Org.-C, Horizontabfolge usw.) sowie die Bearbeitungsvarianten und den Düngerinput.

Die Daten für die Inputdatensätze wurden im Falle des EZG Baldeggersee nicht im Feld erhoben, sondern entstammen der Literatur. Im Falle des EZG Länenbach wurde jedoch bei den Bodenparametern auf die im Gelände erhobene Bodenkartierung zurückgegriffen.

Erstellung der Inputdatensätze

Wetterdaten

Die Erstellung der Wetter-Inputdatei wurde mit Hilfe des Wettergenerators WXPARM (Weather Parameter Calculator) bewerkstelligt, der als Zusatzprogramm zu EPIC besteht. Damit lassen sich die statischen Größen für die tägliche Verteilung des Niederschlages kalkulieren. Als Grundlage für die Erstellung wurden die Wetterdaten der Station Bero-münster der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt verwendet. Aus den langjährigen Messreihen wurden dabei aufgrund empirischer Erfahrungen verschieden "erosive" Jahre herausgefiltert, welche dann vom Wettergenerator für die Simulation der einzelnen Tageswerte herangezogen wurden.

Simuliert werden sollten drei unterschiedliche Witterungssituationen, wie sie im langjährigen Durchschnitt anzutreffen sind:

1. Ein "wenig erosives" Jahr.
2. Ein "normal erosives" Jahr.
3. Ein "stark erosives" Jahr.

Mit Hilfe des Wettergenerators wurde nach diesen Vorgaben dann ein Set von Zufallszahlen für die einzelnen in EPIC benötigten Wetterparameter erzeugt.

Folgende Wetterparameter werden als Monatswerte für die Erstellung der Niederschlagsinputdatei vom Wettergenerator benötigt:

Niederschlag (mm) – Standardabweichung der tägl. Niederschläge – Schiefe der tägl. Niederschläge – Regentage – min. Temperatur – max. Temperatur – jeweils Standardabweichung der min. und max. Temperatur – mittl. Strahlung (MJ/m²) und relative Feuchte.

Die Einstellungen des Wettergenerators wurden so gewählt, dass für die Simulation der einzelnen Feldfrüchte und Bearbeitungsvarianten jeweils dieselben drei unterschiedlichen Witterungssituationen erzeugt wurden. Für die Simulation im Einzugsgebiet des Länenbachtals erfolgte die Wetterdateninputerstellung durch die Verwendung der FBB-eigenen langjährigen Niederschlagsmessreihen.

Boden- und Reliefdaten

Simulationsgebiet Baldeggersee

Hier wurde eine *schwach gleyige tiefgründige Braunerde* mit Moräne und Molasseunterlage als Ausgangssubstrat als Hauptlieferant der Bodendaten herangezogen (FAC 1989; SCHUDEL 1990), welche teilweise ergänzt und etwas verändert wurden. Der simulierte Acker wurde mit einer Steigung von 10 % und einer Schlaglänge von 100 Metern angenommen.

Simulationsgebiet Länenbachtal

Hier wurde die von VAVRUCH (1988) am Geographischen Institut erhobene Bodenkartierung zugrunde gelegt und eine *Hanglehm-/Hangschutt-Rendzina-Braunerde* als Lieferant der Bodenparameter herangezogen. Der simulierte Acker wurde auch hier mit einer 10 % Steigung und einer Schlaglänge von 100 Meter angenommen. Diese entspricht zwar nicht genau den gegebenen Verhältnissen im Gelände, da die Hanglängen in der Regel etwas geringer ausfallen. Um aber die beiden unterschiedlichen Simulationsgebiete aufgrund der Bodeneigenschaften miteinander vergleichen zu können, wurde die Reliefparameter bei beiden Einzugsgebieten identisch gewählt.

Folgende Bodenparameter werden vom Modell als Inputdaten benötigt:

Horizontmächtigkeit (m) – Lagerungsdichte (t/m³) – Sandanteil (%) – Schluffanteil (%) – Tonanteil (%) – pH – org. Substanz (%) – Skelettanteil (%) – labile P-Konz. (g/t³) – Bodenbedo.

Düngungsdaten

Tabelle 3-8 enthält die N-Düngerinputs.

Tabelle 3-8: N-Düngerinputs für das EZG Baldeggersee und das EZG Länenbachtal.

Kultur	Erste Gabe N in kg/ha	Zweite Gabe N in kg/ha	Dritte Gabe N in kg/ha	Totaldüngung kg/ha	Normdüngung kg/ha
Winterweizen	82	30	50	162	140
Wintergerste	54	30	50	134	110
Kartoffeln	95	40		135	120
Mais	75	40		115	110
Zuckerrüben	80	40		120	100
Raps	100	40		140	140

Abfluss

Es werden Angaben über das Infiltrationsverhalten des eingegebenen Bodens im EPIC-Modell benötigt. Je nach Bodentyp unterscheidet EPIC zwischen vier verschiedenen Gruppen. Diese beziehen sich auf die Verhältnisse in den USA (WILLIAMS & SHARPLEY 1990), konnten aber auf die hiesigen Verhältnisse übertragen werden. Für die schluffreichen Böden des EZG Baldeggersee wurde der TYP C und für die tonreichen Böden des Tafeljuras TYP D verwendet.

Erosion

Das EPIC-Programm bietet dem Benutzer eine Vielzahl unterschiedlicher im Programm enthaltener Erosionsmodelle zur Berechnung der Erosionsraten an. Die Wahl fiel nicht zuletzt aufgrund der bisherigen Modellerfahrungen am Geographischen Institut der Universität Basel auf die USLE. Auf die Entstehung und die Probleme der USLE soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Zahlreiche bisherige Arbeiten am Geographischen Institut haben sich bereits mit dem Problem auseinandergesetzt (u.a. SCHAUB & PRASHUN 1991; siehe auch Kap. 1.3). Die USLE besteht aus sechs zu ermittelnden Faktoren, aus denen der langjährige mittlere Abtrag errechnet werden kann.

Einstellungen der EPIC-Files

EPIC wurde zum ersten Mal von MAURER (1995) in der Schweiz eingesetzt. Neben dem Hauptprogramm werden verschiedene EPIC-Files (Bodenbearbeitung, graphische Ausgabe, Drucken der Ergebnisfiles usw.) als Grundlage für die Simulation eines Inputdatensatzes unbedingt benötigt. Um die schweizerischen Agrarverhältnisse richtig wiedergeben zu können, mussten diese Files neu geschaffen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Anpassungen kurz dargestellt:

1. „Miscellaneous Parameters File“:

Die im EPIC-Programm als „pests“ bezeichneten Insekten, Unkräuter und Krankheiten wurden ausgeschaltet, damit diese die Erträge nicht beeinflussen.

2. Crop Parameters File:

Hier wurden Pflanzenwachstumsparameter für Kunstwiese und Zwischenfrüchte angepasst.

3. Tillage Parameters File

Es musste ein gänzlich neues, auf die Schweiz angepasstes Tillage Parameter File mit den in der Schweiz verwendeten landwirtschaftlichen Maschinen erstellt werden. Dieses wurde von GOETZ (1997) erstellt und nach den ersten Modellversuchen anhand der gewonnenen Erfahrungen noch ergänzt.

4. Graphics control File

In diesem File kann z.B. der Verlauf der Erosionsrate oder des Pflanzenwachstums graphisch dargestellt werden. Aufgrund der heute sehr leistungsfähigen Rechner ist die Simulationsdauer für ein Ereignis jedoch dermassen gering, dass eine Darstellung der Graphik keinen Sinn mehr macht. Somit wurde dieses File nicht benötigt.

5. Print File

Hier wurden die Outputvariablen eingestellt. Die detaillierte Beschreibung der Outputvariablen folgt in Kap 3.2.3.2.

3.2.3.2 Kalibrierung und Validierung

Ausgehend von den von MAURER (1995) erstellten Inputdatensätzen wurden zunächst die Inputdatensätze für die Simulationen des EZG Baldeggersee erstellt.

Wie in der Einleitung von Kap. 3.2.3 bereits erwähnt, ging es darum, eine breite Vielfalt unterschiedlichster, typischer und häufig angebauter Feldfrüchte zu simulieren.

Und dabei unterschiedlichste Düngungsvarianten und -gaben, Bearbeitungsvarianten und drei unterschiedlichen Witterungssituationen zu berücksichtigen. Tabelle 3-9 gibt einen Überblick über die simulierten Varianten.

Nach diesen für das Erosionsverhalten durchgeführten Simulationen wurde das Auswaschungsverhalten von Stickstoff und Phosphat in Bezug auf den Ausgangspool dieser beiden Nährstoffe im Boden näher untersucht. Dabei wurden folgende Varianten simuliert (Tab. 3-10):

Tabelle 3-9: Simulierte Varianten pro Bodenstandort. An den drei Standorten wurden insgesamt 16'848 Simulationsläufe durchgeführt.

Kultur	Anzahl Varianten	Kürzel	Düngung		Zwischenfrucht	Minimalbodenbearbeitung	Witterung erosiv (<i>wet</i>), nichterosiv (<i>dry</i>) normal (<i>norm</i>)
			Min.	Org.			
							dry / wet / norm
Körnermais	1296	M	X	X	X	X	dry / wet / norm
Sommerhafer	1296	H	X	X	X	X	dry / wet / norm
Winterweizen	864	W	X	X	-	X	dry / wet / norm
Wintergerste	864	G	X	X	-	X	dry / wet / norm
Kartoffeln	432	K	X	X	-	-	dry / wet / norm
Kunstwiese 1. Jahr	432	1	X	X	-	-	dry / wet / norm
Kunstwiese 2. Jahr	432	2	X	X	-	-	dry / wet / norm

Tabelle 3-10: Im EPIC-File angepasste Stickstoff- und Phosphatpools im Boden.

P-Pool Stufe im Boden	N-Pool Stufe im Boden
Standard	Standard
Standard + 15%	Standard + 15%
Standard + 30%	Standard + 30%
Standard - 15%	Standard - 15%
Standard - 30%	Standard - 30%

Erläuterung zu den einzelnen Varianten

Feldfrüchte

Aus repräsentativen Gründen wurden die am häufigsten angebauten Feldfrüchte verwendet. Es wurden jeweils zwei Vegetationsperioden simuliert. Die erste Vegetationsperiode wurde aber nicht ausgewertet, sondern verworfen. Sie diente dem Modell als Vorlauf. Damit sollen die für die eigentliche Simulation idealen pedologischen Vorbedingungen, z.B. bezüglich Stickstoff- und Phosphatpool sowie Feuchtesituation, erreicht werden.

Düngung:

Es wurden folgende Düngungsstufen simuliert: Neben einer Normdüngung, die sich auf die Standarddüngergaben für die einzelnen Feldfrüchte auf einem IP-Betrieb beziehen, wurden eine Nulldüngung sowie folgende weitere Düngungsstufen berechnet:

Normdüngung -30 % , -60 % , -90 % , sowie Normdüngung +30 % , +60 % , +90 % , so dass sich insgesamt acht unterschiedliche Düngungsstufen ergaben. Die Düngergaben wurden im EPIC-Hauptfile eingegeben. Unterschieden wurde ebenfalls zwischen einer mineralischen Düngung und einer organischen Düngungsvariante. Die mineralische Düngung (in kg/N) setzt sich zusammen aus unterschiedlichen Anteilen P_2O_5 , K_2O und Mg. Diese verteilt sich je nach Frucht auf zwei (Körnermais) bis sechs (Kunstwiese) Gaben pro Jahr, die jeweils mit einer Bearbeitungsvariante im EPIC-File eingegeben werden. Verwendet werden die handelsüblichen Dünger *Landor*, *Ammonsalpeter*, *Thomasmehl* und *Kali40*.

Die organische Düngung erfolgt durch Gülle (in kg Trockensubstanz), wobei auch hier zwischen zwei bis sechs Gaben pro Jahr unterschieden wurde. Dabei kann im Falle von Weizen, Hafer und Gerste die dritte Gabe auch in Form von mineralischem Dünger erfolgen.

Zwischenfrucht

Die Zwischenfrucht bei den Feldfrüchten Mais und Hafer wurde durch die Gabe einer Gründüngung zu Beginn der Vegetationsperiode simuliert. Diese wurde ebenfalls den verschiedenen Düngungsstufen angepasst. Die Norm für die Gründüngung beträgt 30 kg N/Jahr.

Minimalbodenbearbeitung

Bei den Früchten Körnermais, Hafer, Winterweizen und Wintergerste wurde zwischen einer konventionellen Bearbeitung und einer minimalen, bodenschonenden Bearbeitungsvariante unterschieden. Diese äussert sich im Einsatz unterschiedlicher Bearbeitungsgeräte und in der Anzahl der Bearbeitungsschritte auf dem Feld. Die Eingaben dazu werden wiederum im EPIC-File festgelegt.

Die Outputvariablen

EPIC bietet die Möglichkeit, neben den stoffhaushaltlichen Aspekten auch eine breite Palette an wasserhaushaltlichen Parametern zu simulieren. Für die Auswertungen der Simulationsergebnisse und die anschliessende Verwendung in dem bereits erwähnten agrarökonomischen Modell des Agronomischen Institutes der ETH Zürich (SCHMID et al. 1997) waren nicht nur die Erosionsraten sowie die Daten zur Auswaschung von N und P relevant, sondern auch weitere wasser- und stoffhaushaltliche Parameter von Bedeutung. Im Folgenden sind die Outputvariablen aufgeführt, die als Summenwerte für das simulierte Jahr herausgelesen wurden (Tab. 3-11).

Tabelle 3-11: Outputvariablen des EPIC-Modells. Neben den mit einem X bezeichneten Variablen, die der in dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung dienen, wurden weitere Parameter berechnet, welche als Input-Größen für das agrarökonomische Modell des Institutes für Agronomie der ETH Zürich dienen.

Variable	Einheit	Ausgewertet	Beschreibung
USLE	(t ha ⁻¹)	X	Bodenverlust durch Wassererosion gemäss Modell USLE
YON	(kg ha ⁻¹)	X	Organischer N-Verlust durch Bodenabtrag
MNN	(kg ha ⁻¹)	-	Mineralisierter N
YP	(kg ha ⁻¹)	X	P-Verlust durch Bodenabtrag
YNO3	(kg ha ⁻¹)	X	NO ₃ -Verlust durch Oberflächenabfluss
SSFN	(kg ha ⁻¹)	X	Mineralischer N-Verlust im Interflow
PRKN	(kg ha ⁻¹)	X	Mineralischer N-Verlust im Sickerwasser
YAP	(g ha ⁻¹)	X	Löslicher P-Verlust im Oberflächenabfluss
YLD1	(t ha ⁻¹)	X	Ernteertrag
PLAB	(kg ha ⁻¹)	-	Labiler P im Profil
MNPAC	(g t ⁻¹)	-	Mineralische P-Konzentration im Aktivpool
MNPST	(g t ⁻¹)	-	Mineralische P-Konzentration im stabilen Pool
ORGP	(g t ⁻¹)	-	Organische P-Konzentration
NO3	(g t ⁻¹)	-	Nitratkonzentration
ORNAC	(g t ⁻¹)	-	Organische N-Konzentration im Aktivpool (verfügbar)
ORNST	(g t ⁻¹)	-	Organische N-Konzentration im stabilen Pool (gebunden)
RAIN	(mm)	X	Niederschlag
Q	(mm)	X	Oberflächenabfluss
PRK	(mm)	-	Sickerungsrate unterhalb der Wurzelzone
TNH3	(kg ha ⁻¹)	-	Ammonium-N-Gehalt im Bodenprofil
HMN	(kg ha ⁻¹)	-	N-Mineralisierung aus stationärem organischen Material
MNP	(kg ha ⁻¹)	-	Mineralisierter P
AVOL	(kg ha ⁻¹)	-	N-Verflüchtigung NH ₃ -N
UNO3	(kg ha ⁻¹)	-	N-Aufnahme durch Kultur
TNO3	(kg ha ⁻¹)	-	Totaler Nitratgehalt im Bodenprofil

Das detaillierte Vorgehen bei der Simulation und Kalibration des Modells

Um diese grosse Anzahl Simulationsläufe rationell rechnen zu können, wurden zunächst mit Hilfe des EPIC-eigenen Editors Batch-files geschrieben, in welchen automatisch 216 Simulationen in einem Durchlauf vorgenommen werden konnten.

Nach der Erstellung der Inputdatensätze für die einzelnen Feldfrüchte (Bodenprofil, Witterungs-, Düngungs- und Bearbeitungsvarianten) wurden verschieden grosse Bodenmächtigkeiten simuliert, um den Einfluss der Bodentiefe auf das Erosionsverhalten einzugrenzen.

So konnte in einem ersten Schritt die Beziehung zwischen Bodenmächtigkeit und Ertragskraft des Bodens abgeleitet werden. Die ersten Versuche dazu wurden bereits bei MAURER (1995) durchgeführt und zeigten einen Schwellenwert bezüglich der Bodenmächtigkeit, bei dem der Ertrag beträchtlich absinkt. Nach den Erfahrungen wurden anschliessend alle weiteren Simulationen mit einem einheitlichen, den tatsächlichen Gegebenheiten im Gelände entsprechenden Bodenprofil mit einer Mächtigkeit von 120 cm weiter berechnet.

Weiterhin wurde das Hauptaugenmerk auf die Erosionsraten sowie die Auswaschung von Nitrat und Stickstoff gelegt. Bevor die verschiedenen Düngungsvarianten sowie Poolstufen gerechnet werden konnten, musste das Modell für jede zu berechnende Feldfrucht individuell kalibriert werden. Dabei stand der Pflanzenertrag im Vordergrund. Im EPIC-File sowie in der *Crop Parameter-Datei* können für die verschiedenen Feldfrüchte einzelne Wachstumsfaktoren individuell angepasst werden. Im vorliegenden Fall wurden aufgrund von Literaturangaben sowie nach Rücksprache mit Pflanzenphysiologiespezialisten der ETH Zürich durch Projektpartner des Agrarökonomischen Institutes der ETH Zürich einzelne Wachstumsparameter so eingestellt, dass realistische Ernteerträge für die Normaldüngungsvarianten entstanden. Nach der Kalibrierung wurden sämtliche Varianten simuliert und die Outputfiles mit Hilfe eines eigens dafür entwickelten Softwareprogramms ausgelesen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierung anhand der Pflanzenwachstumsparameter wird an dieser Stelle verzichtet.

Nach der Simulation des Standortes im EZG des Baldeggersees wurde ein zweiter leicht abgeänderter (Boden-) Standort gerechnet. Nachdem das Modell kalibriert wurde, konnten nach Anpassung der Boden- und Wetterparameter die gleichen Varianten für das Länenbachtal simuliert und mit den im Feld gemachten langjährigen Kartierungen und Beobachtungen in Verbindung gebracht werden.

3.3 Visualisierung als partizipative Methode zur nachhaltigen Landschaftsplanung

Partizipativen Ansätzen kommt in der Praxis der heutigen Landschaftsplanung, mit ihren immer komplexer werdenden Nutzungsproblemen, eine immer grössere Bedeutung zu. Dadurch können zukünftige Gestaltungsmassnahmen im Raum schon in einer frühen Planungsphase von vielen Beteiligten mitgestaltet werden, meist verbunden mit grösserer Akzeptanz der umzusetzenden Massnahmen. Das führt auch dazu, dass die Kosten für manche Planungsmassnahmen gesenkt werden können, wenn frühzeitig die betroffenen Akteure mit einbezogen werden. Spätere langwierige Beschwerdeverfahren und Nachbesserungen in der Planung lassen sich damit minimieren.

Die Landschaftsvisualisierung ist eine Methode, wie zukünftige Planungsmassnahmen den beteiligten Akteuren in der Landschaft näher gebracht werden können (siehe u.a. MEIER, R. 2006). Sie leistet also einen Beitrag zur Vermittlung planerischer Massnahmen, macht sie für die Bevölkerung „greifbarer“ und somit verständlicher (BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2003:213). So belegen zahlreiche Studien, dass gerade durch 3D-Darstellungen Planungsvorhaben und deren Kommunikation auf einer für alle wesentlich verständlicheren Ebene stattfinden (BERRY et al. 1998; LANGE & BISHOP 2001; NOACK et al. 2002;

TRESS & TRESS 2003). Aus inhaltlicher Sicht können Visualisierungen von Planungsmassnahmen und möglicher Landschaftsszenarien dazu dienen, die von einer Gestaltungs- bzw. Baumassnahme ausgehenden Beeinträchtigungen zu erkennen und die Entwicklung von Ausgleichs- und Ersatzmassnahmen zu unterstützen. Die Bewertung der Planungsmassnahmen muss aber nach wie vor separat, d.h. mit entsprechender Methodik erfolgen und kann nicht durch die Visualisierung ersetzt werden. In der Architektur wird diese Methode bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Durch die rasante Weiterentwicklung von 3D-Visualisierungs-Tools in Kombination mit deren Anbindung an GIS-Systeme bestehen mittlerweile auch für den Bereich Landschaft entsprechende Möglichkeiten. Die Visualisierungstechniken lassen sich in statische 2D-, 2½D- und 3D-Darstellungen sowie in dynamische 4D-Darstellungen einteilen (LANGE 1999:29). Beispiele für solche Tools sind ARCSzene aus dem GIS-Bereich, WCS (World Construction Set) oder 3D-Nature.

In dieser Arbeit soll die 3D-Visualisierung in zwei Bereichen angewendet werden: Erstens sollen Teilergebnisse des Modells ESSEM dargestellt werden, um die Modellaussagen zu untermauern und deren Auswirkungen auf die Landschaft und den Stoffhaushalt deutlich zu machen. Zweitens sollen als Folge der Modellergebnisse und daraus abgeleiteten Schutzmassnahmen für die Erosionsminderung Zukunftsszenarien aufgezeigt werden, wie sich die Landschaft gestalten liesse und wie sich mögliche Schutzmassnahmen, z.B. Retentionsflächen, auf das Landschaftsbild auswirken.

3.3.1 Visualisierung von Teilergebnissen der Modellbildung

In einem ersten Schritt werden Teilergebnisse des Modells ESSEM 3D-visualisiert: Die berechneten Fliesspfade (siehe Kap. 3.2.1.3) stellen mögliche Erosionsrinnen dar, die auch durch die Feldkartierungen immer wieder bestätigt wurden (siehe Kap. 4.1.8). Das Ziel dieser Visualisierung besteht darin, den betroffenen Akteuren (v.a. den Landwirten) die Auswirkungen von extremen Erosionsereignissen und die Reichweiten der Erosionsrinnen bis hin zu den Übertrittstellen ins Gewässer deutlich zu machen. Es werden besonders gefährdete Teilgebiete aus dem ganzen Einzugsgebiet herausgehoben und grossmassstäblich 3D-visualisiert. Grundlage dafür bilden das digitale Höhenmodell DHM25 der SWISSTOPO, die berechneten Fliesspfade sowie die Landnutzung für die Oberflächenbedeckung.

Tabelle 3-12 zeigt Eingangsgrößen für die Detailvisualisierungen.

Tabelle 3-12: Amtliche digitale Daten und Teilergebnisse aus dem Modelle ESSEM, die als Grundlage für die 3D-Visualisierung verwendet wurden.

Daten	Datenformat
DHM25 SWISSTOPO	Punktdatei, TIN
Vector200 SWISSTOPO	Vektordaten
PK25 SWISSTOPO	Rasterdaten
Landnutzung	Vektordaten
Fliesspfade (ESSEM)	Vektordaten
Übertrittsstellen (ESSEM)	Vektordaten
Orthophoto	Rasterdaten

Die Grundlage für die Erstellung der dreidimensionalen Darstellung bildet die zweidimensionale Ausgangslage. Die vorliegenden Daten im shape-Format wurden mit einem Geoprocess (Standard-GIS-Funktion) auf die innerhalb der jeweiligen Grenzen der Teileinzugsgebiete liegenden Flächen zurechtgeschnitten. Die so vorliegenden Daten konnten dadurch getrennt für jedes Kleineinzugsgebiet verwendet werden. Dieser Punkt ist vor allem für die folgende dreidimensionale Visualisierung mit der Software *Visual Nature Studio* aus Leistungsgründen von Bedeutung.

Für die 3D-Visualisierung standen die Software *ARCScene* und *Visual Nature Studio* (VNS) in der Version 2.7 zur Verfügung. VNS ist eine Software, die fotorealistische Geländemodellierungen, Visualisierungen und Animationen ermöglicht. Es ist ein auf den Standard-GIS-Nutzer abgestimmtes Programm. Es kann eine Vielzahl an Formaten aus verschiedenen GIS-Anwendungen importiert und verwendet werden.

VNS arbeitet hauptsächlich mit dem World Geodetic System 1984. Das bedeutet, alle Projekte werden in diesem Koordinatensystem verarbeitet. Falls die Daten in einem anderen Koordinatensystem vorliegen, müssen sie umgerechnet werden, damit sie verarbeitet werden können. Das VNS liefert hierzu bereits eine Menge an vorgegeben Koordinatensystemen. Weiterhin hat man die Möglichkeit, eigene Koordinatensysteme zu definieren. Für die hier in der Schweizer Landesprojektion CH1903+ vorliegenden Daten musste im VNS ein eigenes Koordinatensystem definiert werden, mit dem alle weiteren Daten importiert werden konnten.

Die Grundbasis für jede dreidimensionale Visualisierung der Landschaft bildet das digitale Terrain-Modell (DTM), im vorliegenden Fall das DHM25 der SWISSTOPO. Nach dem Import der Vektordaten und der Umwandlung in sogenannte „control points“ konnte das DTM (als Oberflächenlayer) generiert werden. Um der Geländeoberfläche ein realistischeres Aussehen zu geben, wurden über das DTM Texturen gelegt. Dies sind zweidimensionale digitale Bilder, die allgemein auf Flächen aufgetragen werden, wie z.B. Landnutzung. Das Auftragen einer Textur nennt man „Texture Mapping“ (HEHL-LANGE 2001). Die ver-

wendeten Texturen waren von der Software in groben Zügen bereits vorgegeben und wurden angepasst.

Neben dem DTM flossen auch die weiteren vorliegenden Geodaten der Teileinzugsgebiete in das VNS ein. Sie bilden die Grundlage der realitätsnahen Visualisierung der Erosionspfade. Damit die 3D-Darstellung ohne grossen Zeitaufwand auch realitätsnah gerät, müssen die eingegebenen Geodaten einem möglichst genauen Abbild der Natur entsprechen.

3.3.2 Die Zukunft einer Landschaft

Die verschiedenen in dieser Arbeit verwendeten Erosionsmodelle liefern die Grundlage für Planung von Erosionsschutzmassnahmen und Eingriffe in die Landschaftsgestaltung. Das Modell ESSEM bildet hierbei die hauptsächlichste Datengrundlage.

Ausgehend von den Modellerkenntnissen über die Reichweiten von Erosionsprozessen und den Eintragspfaden von Feststoffen in das Gewässer soll im EZG des Länenbachs die Landschaft „renaturiert“ und in verschiedenen Szenarien neu gestaltet werden. Schwerpunkte dabei bilden die Planung von erosionsmindernden Massnahmen und die Anlage von Retentionsflächen. Ebenso spielen das Strassen- und Wegenetz als Leitstrukturen für Oberflächenprozesse eine entscheidende Rolle und fliessen in die Zukunftsszenarien mit ein.

In zwei Zeitschritten (Szenarien) soll die zukünftige Landschaft des Länenbachgebietes visualisiert werden. Dies wird aus Ressourcengründen (Das ganze Einzugsgebiet zu visualisieren erfordert eine sehr hohe Rechnerleistung und Rechenzeit) und auch zur besseren Veranschaulichung auf Teileinzugsgebiete beschränkt.

Szenario 1:

Ausgangslage: Es wird die bestehende Landschaft mit ihrer Nutzung, dem bestehenden Strassen- und Wegenetz 3D-visualisiert. Dabei werden auch gerechnete Fließspfade und langjährige Erosionskartierungen mit dargestellt.

Szenario 2:

Es werden erosionsmindernde Sofortmassnahmen dargestellt: Hecken, Nutzungsartenänderungen oder Retentionsflächen.

Methodisches Vorgehen

Neben der bereits in Kap. 3.3.1 beschriebenen Methodik werden jetzt zusätzliche Elemente in die Landschaft hineingesetzt. Die Grundlage dafür bilden wiederum 2-dimensionale GIS-Daten, die z.B. Ausdehnung einer Retentionsfläche oder die Line einer neuen Hecke angeben. Diese wurden im GIS digitalisiert und anschliessend 3D-visualisiert. Den einzelnen GIS-shape-files werden Objekte zugeteilt, z.B. Bäume oder Hecken. Dabei arbeitet das zuvor bereits beschriebene VNS mit so genannten „Ecotypes“ (vordefinierten Ökosystemen) und unterscheidet zwischen „Overstory“ und „Understory“ (Baumschicht und Krautschicht). Ebenfalls kann dem Untergrund ein Ground Overlay zugeordnet werden. Er stellt

z. B. das Gründland dar. Auch die Einstellung der Höhe und Dichte des Baumbewuchses ist möglich. Dies kann für jede einzelne Baumbestandesfläche separat mit Hilfe einer Zuweisung über Attribute definiert werden. Das gleiche Verfahren kommt bei der Zuordnung von Acker, Wiesen und Feldern zur Anwendung.

Die Visualisierung der Zukunftsszenarien des Länenbachtals aufgrund der Modellerkenntnisse und den daraus abgeleiteten landschaftsplanerischen Massnahmen wird in dieser Arbeit nicht bis ins Detail verfolgt. Es ist vielmehr ein Versuch, eine zukunftsweisende Methode in Ansätzen vorzustellen und damit aufzuzeigen, wie Folgerungen aus Modellierungsprozessen für die Landschaftsplanung umgesetzt werden können. Für detailliertere Informationen bezüglich Landschaftsvisualisierung und Szenariotechniken sei auf die Arbeit von MEIER, R. (2006) verwiesen, in der die 3D-Visualisierung als Grundlage für Partizipationsprozesse in Workshops mit betroffenen Bewirtschaftern eingesetzt wurde.

4 Ergebnisse

4.1 Daten der Messungen und Beobachtungen im Feld (Hydrologische Jahre 1997-1999)

Dargestellt werden die Ergebnisse der Messungen des Standardmessprogramms (*Niederschlag, Abfluss, Verdunstung, Wasserbilanz, Stoffausträge*) der Hydrologischen Jahre 1997-1999, ferner werden die Ergebnisse der Spezialmessprogramme (*Bodenfeuchte, Drainagestoffhaushalt*) für die untersuchten Zeiträume präsentiert. Sofern für die Kalibrierung und Validierung der eingesetzten Modelle relevant, werden weitere Felddaten aus dem Zeitraum 1987-1999 auszugsweise dargestellt. Für die Bilanzierungen werden ausschliesslich die Messungen des Länenbachtals gezeigt. Wie bereits eingangs erwähnt, wurde das Basismessprogramm im Riedmattbachtal im Jahre 1997 eingestellt. Lediglich die Landnutzungskartierungen wurden bis 2007 weitergeführt. Die dargestellten Zeitreihen sollen einen ersten Eindruck über die generelle wasser- und stoffhaushaltliche Situation im Einzugsgebiet des Länenbaches aufzeigen, das ein typisches Kleineinzugsgebiet des Baselbieter Tafeljura repräsentiert.

4.1.1 Niederschlag

Dargestellt sind die Niederschlagsmessungen an der Testparzelle T50 für die Hydrologischen Jahre 1997-1999. Die Niederschlagssummen wurden durch verschiedene Korrekturfaktoren geändert (SEVRUK 1985), die durch weitere Messungen an der Messstation T55 (EZG Länenbachtal) sowie mit einer elektronischen Niederschlagswippe in der Testparzelle T50 erhoben wurden.

Die Verteilung wies starke Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren auf. Besonders auffällig ist der Wert vom Februar 1999, welcher auf wenige Extremereignisse zurückgeht und mit starken Erosionserscheinungen im Einzugsgebiet des Länenbaches einherging (Abb. 4-1).

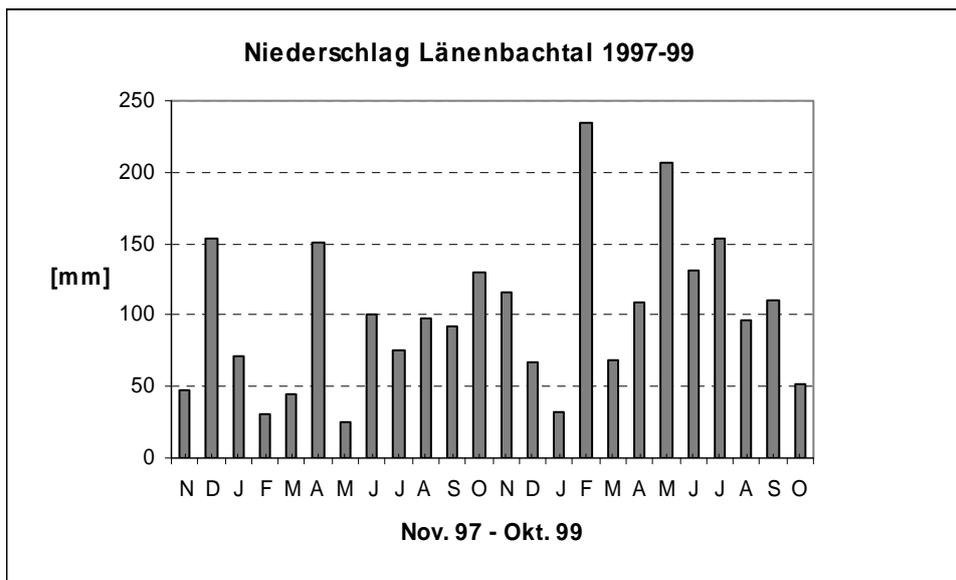


Abbildung 4-1: Niederschlag im Länenbachtal von November 1997 bis Oktober 1999, gemessen an den Niederschlagsmessstationen T50/T55 und ergänzt mit Daten der Niederschlagswippe an der Testparzelle T50.

4.1.2 Verdunstung

In Abbildung 4-2 sind die Monatssummen der potentiellen Evaporation (pET) bezogen auf das gesamte Einzugsgebiet des Länenbachtal dargestellt. Ermittelt wurden die Werte nach dem Verfahren von HAUDE (1955).

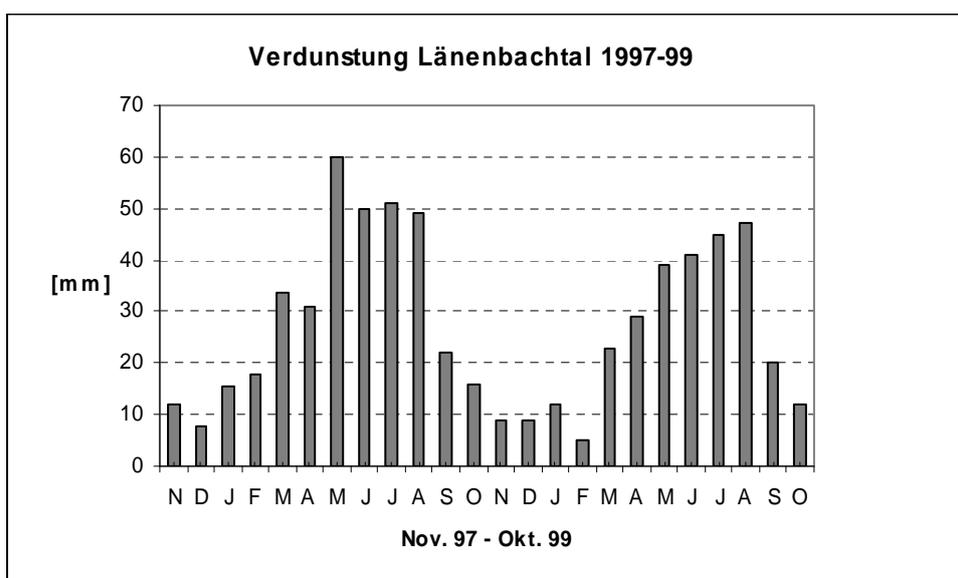


Abbildung 4-2: Monatliche Verdunstungssummen der Hydrologischen Jahre 1997-1999 ermittelt nach HAUDE (1955) mit den Werten der Messstation T50.

4.1.3 Gebietsabfluss

Der Gebietsabfluss des Länenbaches wurde anhand der mechanischen Pegelaufzeichnungen an der Pegelmesstelle P50 am Gebietsausfluss des Länenbaches ermittelt. Die vom mechanischen Pegelschreiber aufgezeichneten wöchentlichen Abflussganglinien wurden digitalisiert und mit dem anhand immer wieder durchgeführter Abflusseichungen ermittelten Abflusskoeffizienten (P/Q Beziehung) ausgewertet (Abb. 6-3).

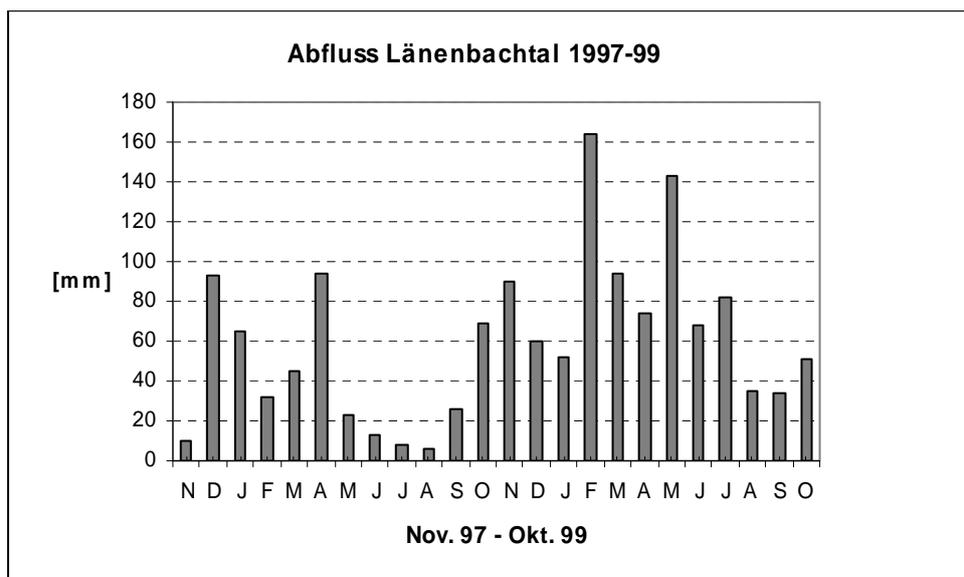


Abbildung 4-3: Monatliche Abflussmengen des Länenbachtals (Pegelmesstation P50) in den hydrologischen Jahren 1997-1999. Anhand der Pegelstände konnte über eine Pegelstands-Abfluss-Beziehung der Abfluss bestimmt werden und anschliessend eine Austragsbilanzierung der untersuchten Stoffe (siehe Kap. 4.1.7) vorgenommen werden.

Betrachtet man den Verlauf der Pegelstände der drei Jahre (Abb. 4-3 und Tab. 4-1), so fällt eine permanente Zunahme der Abflüsse auf. Gesamtabfluss 1997: 740'680 m³ (891 mm Jahresniederschlag, 280 mm Abfluss), 1998: 1'411'717 m³ (957 mm Jahresniederschlag, 532 mm Abfluss), 1999: 2'646'968 m³ (1'338 mm Jahresniederschlag, 999 mm Abfluss). Dabei verdoppelte sich der Jahresabfluss etwa von Jahr zu Jahr. Vor allem im regenreichen Jahr 1999 blieben die Pegelstände andauernd hoch; der sommerliche Rückgang des Abflusses konnte nur zwischen Ende August und im September registriert werden.

Tabelle 4-1: Abfluss des Länenbachs zwischen 1997 und 1999, differenziert nach Abflusskomponenten. Bemerkenswert ist die permanente Zunahme des Gesamtabflusses, wobei vor allem der Basisabfluss von Jahr zu Jahr einen prozentual höheren Anteil am Gesamtabfluss ausmacht.

Jahr	Gesamtabfluss [m ³]	Basisabfluss [m ³]	Basisabfluss [%]	Hochwasserabfluss [m ³]	Hochwasserabfluss [%]
1997	740'680	584'092	79	156'588	21
1998	1'411'717	1'146'963	81	264'754	19
1999	2'646'968	2'419'159	91	227'809	9

4.1.4 Drainagen

Ein wichtiger Aspekt der Feldkampagne 1997-1999 war die Untersuchung des Einflusses des grossen Drainrohres (DC) im Einzugsgebiet des Länenbaches (siehe Kap. 3.1.5). Da sich im Laufe der Arbeit immer deutlicher zeigte, dass die Drainagen den Stoffaustrag im Untersuchungsgebiet beträchtlich beeinflussen, wurde im Frühjahr 1999 am grössten Drainageeinlauf in den Länenbach eine *neue Abflussmessstation (D50)* eingerichtet. Sie besteht aus zwei synchron ziehenden Samplern, wobei der eine den Abfluss im Länenbach *vor* der Einleitung der Drainage beprobt und der andere *direkt an* die Drainage angeschlossen ist (Abb. 3-5). Initiiert wird die Probenahme beider Sampler durch den Sampler der Abflussmessstation P50. Dadurch stehen bei einem Hochwasserereignis gleichzeitig Proben von drei verschiedenen Orten (Bach *vor* Drainage, Drainage und Einzugsgebietsabfluss P50) zur Verfügung, deren stoffliche Zusammensetzung miteinander verglichen werden kann. Vergleiche der Stoffaustragsmuster und des zeitlichen Eintreffens von Spitzenkonzentrationen ermöglichen Rückschlüsse auf die Austragspfade und das Verhalten der untersuchten Stoffe im Landschaftsökosystem (ERNSTBERGER & SOKOLLEK 1984).

Anhand der Grafiken der Messungen am Drainagerohr DC (Abb. 4-4 und 4-5), das ca. ein Drittel des gesamten Einzugsgebietes entwässert (siehe Abb. 3-4), kann das Transportverhalten bei Hochwasserereignissen vom Oberlauf des Länenbaches und der Einfluss der Drainageleitungen auf den Stoffhaushalt abgeschätzt werden. Die Messanlage erwies sich als sehr störungsanfällig (Kabelverbindungen wurden oft mechanisch beschädigt). Daher konnten nur wenige Probenahmen an den Drainageleitungen erfolgen.

Dargestellt sind exemplarisch zwei verschiedene Extremereignisse aus den Jahren 1998/1999. Aus den Grafiken ist ersichtlich, dass je nach Ausgangsbodenfeuchte, Stärke der Niederschlagsereignisse und Jahreszeit das Stofflieferverhalten sehr unterschiedlich sein kann. Abb. 4-4 vom 15.10.1998 zeigt ein kleines bis mittleres Hochwasserereignis. Nach kurzem Anstieg kam es zu einem langsamen Auslaufen der Hochwasserwelle. Die Ganglinien des Schwebstoffgehaltes von Drainrohr und Bach verliefen ab ca. 9 Stunden nach Beginn der Probenahme nahezu parallel. Hier kann nicht auf ein erhöhtes Stofflieferverhalten der Drainrohre durch „innere Erosion“ geschlossen werden. Abb. 4-5 zeigt für den 29.10.1998 ein viel stärkeres Ereignis von ca. dreimal so langer Dauer und einer ex-

tremen Steigung zu Beginn der Hochwasserwelle. Das Drainagerohr DC lieferte einen wesentlich höheren Anteil an Schwebstoffmaterial zu Beginn und im Scheitel der Hochwasserwelle, während beim Auslaufen sich die Kurven von Drainrohr und Bach wieder angleichen. Die starke Reaktion der Drainrohrspende lässt auf ein hohes Mass an Eintrag von innerer Erosion und des von Strassen und Wegen abgeschwemmten Oberflächenmaterials in das Drainagesystem schliessen.

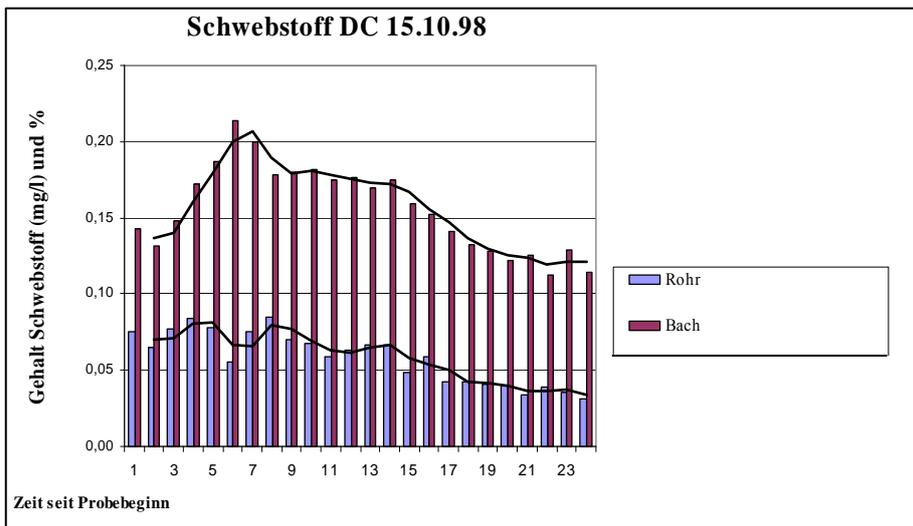


Abbildung 4-4: Vergleich der Schwebstofffrachten von Drainrohr DC und Länenbach an der Messtelle P50 am 15.10.1998. Die Ganglinien weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Der Anteil des Drainrohres DC an der Gesamtschwebstofffracht ist während der gesamten Hochwasserwelle nahezu gleich.

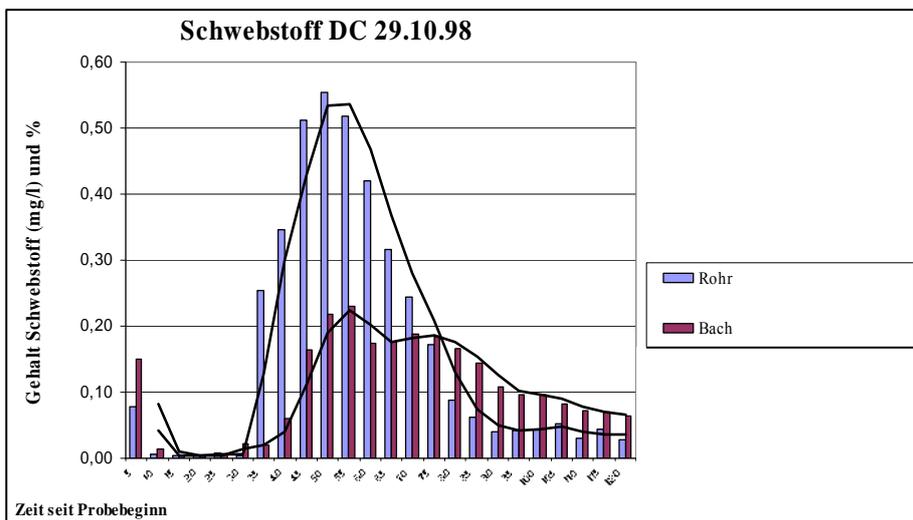


Abbildung 4-5: Vergleich der Schwebstofffrachten von Drainrohr DC und Länenbach an der Messtelle P50 am 29.10.1998. Der Anteil der Schwebstofffracht durch das Drainrohr ist im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle sehr viel höher als im Bach. Im Auslauf der Hochwasserwelle nimmt dann der Anteil durch die Drainage wieder stark ab und liegt unter dem des Baches.

4.1.5 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchteverhältnisse haben einen grossen Einfluss auf das Abtragsverhalten von Ackerschlägen. Auch für das in dieser Arbeit eingesetzte Erosionsmodell E2D spielt der Anfangsfeuchtegehalt im Modellierungsprozess eine grosse Rolle. Die Ausgangsbodenfeuchte gilt als besonders sensibler Modellparameter. Vor allem der Zusammenhang zwischen feuchten Bodenanfangsverhältnissen und Beanspruchung der Aggregate beim Tropfenaufrall spielte eine grosse Rolle. Dargestellt sind in Abb. 4-6 die mit Hilfe der TDR-Methode (s. Kap. 3.1.6) gemessenen Bodenfeuchteverhältnisse an der Testparzelle T50. Aufgrund der sehr starken Anfälligkeit des Messgerätes konnte nur über eine sehr kurze Zeitspanne störungsfrei gemessen werden. Dennoch zeigt dieser Zeitraum eine repräsentative Feuchteverteilung im Boden. Vor allem der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Vordringen der Durchfeuchtungsfront wird sehr gut wiedergegeben. Die Daten konnten zur Kalibrierung des Erosionsmodells E2D für den Eingabeparameter *Anfangsbodenfeuchte* verwendet werden.

In der Grafik wird deutlich die Reaktionszeit der Durchfeuchtungsfront auf den Boden sichtbar. Nach einem Niederschlagsereignis reagierten die obersten zwei bis drei Sonden sehr stark auf den infiltrierenden Niederschlag.

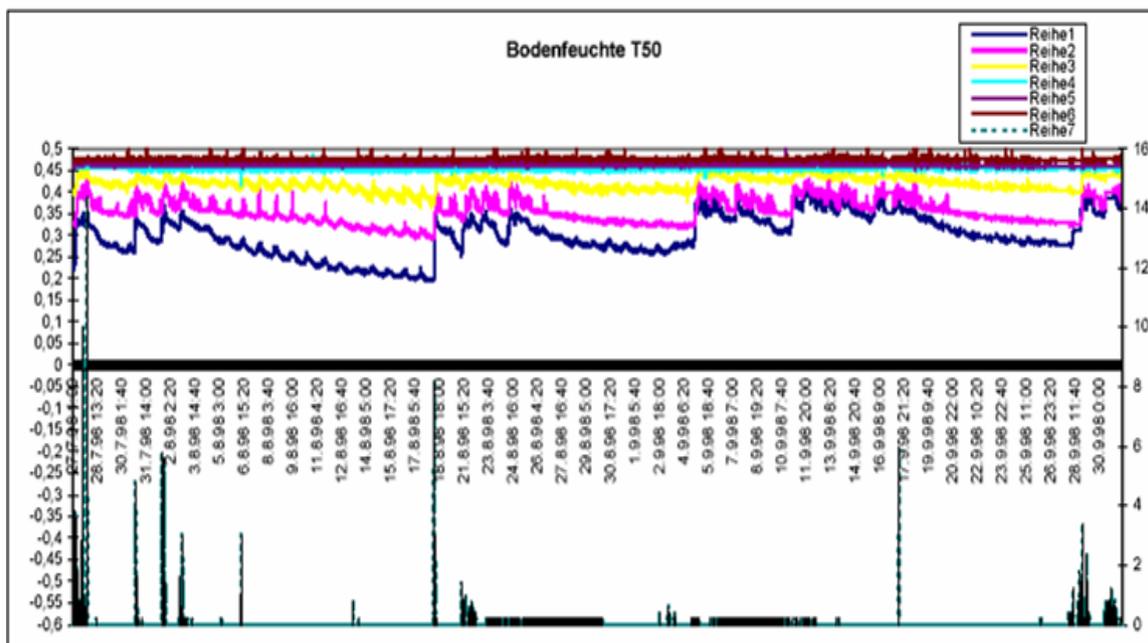


Abbildung 4-6: Bodenfeuchtenverhältnisse an der Testparzelle T50. Zeitraum 28.07.1998 - 30.09.1998. Im oberen Bereich der Grafik sind die Feuchtenganglinien der Sonden in unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Auf der unteren Achse ist der Niederschlag zu sehen. Tiefen der Messsonden: Reihe 1: 2,5 cm, Reihe 2: 5 cm, Reihe 3: 10 cm, Reihe 4: 20 cm, Reihe 5: 50 cm, Reihe 6: 100 cm, Reihe 7: Niederschlag.

4.1.6 Wasserbilanz in den hydrologischen Jahren 1997-1999

Nach OKE (1978) wird die Wasserbilanz für lange Zeiträume wie folgt beschrieben:
 Niederschlag - Verdunstung - Abfluss - ΔS (Änderung des Bodenwassergehaltes) = 0.

Der Sättigungsgrad des Bodenwasserspeichers lässt sich für das gesamte Untersuchungsgebiet nur schwer quantifizieren, so dass die hier gezeigte Bilanz (Abb. 4-7) auf die Darstellung von ΔS verzichtet. Dies geschieht in der Annahme, dass auf lange Zeiträume keine Speicheränderung stattfindet.

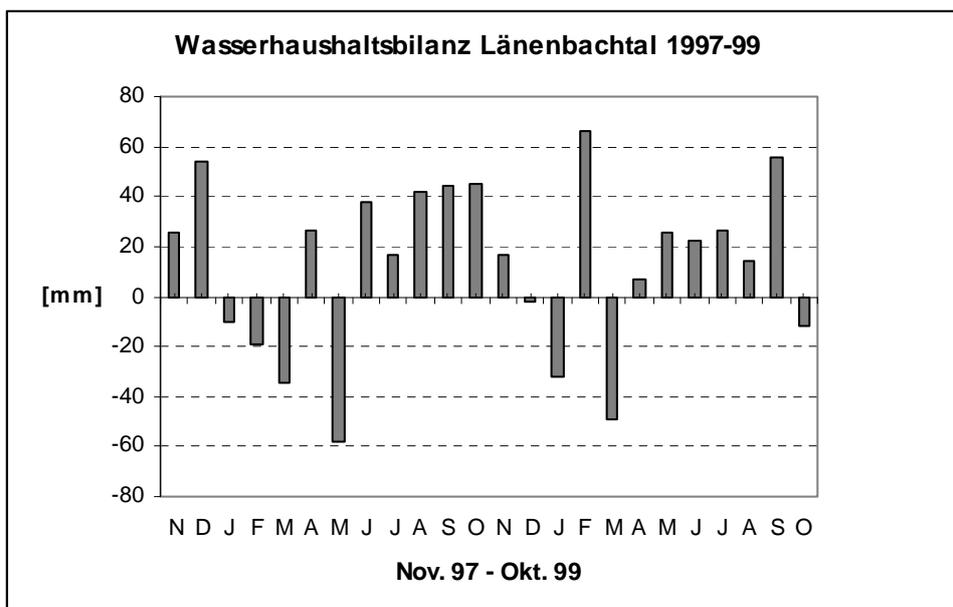


Abbildung 4-7: Monatliche Wasserhaushaltsbilanz für das Länenbachtal 1997-1999.

4.1.7 Ergebnisse stoffhaushaltlicher Messungen in den Jahren 1997-1999

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der stoffhaushaltlichen Messungen aus den Jahren 1997-1999 dargestellt. Die Ergebnisse sind zum Teil das Resultat langjähriger Messkampagnen, die von mehreren Doktoranden betreut wurden. Die Ergebnisse entstanden in enger Zusammenarbeit mit C. SEIBERTH, der im gleichen Zeitraum für die Erfassung der Felddaten und die Auswertung der Feldkampagnen mitverantwortlich war.

Das zuvor bereits beschriebene Messprogramm lieferte neben der Schwebstofffracht die für das Erosionsverhalten des Gebietes charakteristischen DOC- und POC-Frachten sowie PO_4 - und NO_3 -Frachten (Abb. 4-8 und Tab. 4-2). Nebst der Beprobung der Hochwasserwellen erfolgte bei der Abflussmessstation D50 seit Ende Sommer 1999 eine kontinuierliche Untersuchung des Basisabflusses.

Die Darstellung und der Vergleich von Messwerten in Form von Jahresfrachtbilanzen, die Separation von verschiedenen Abflusskomponenten und die Zuordnung der Frachten zu den jeweiligen Abflusskomponenten ermöglicht es, den Stoffhaushalt auf Gebietsebene

(d.h. in chorischer Dimension) besser zu verstehen. Dabei spielen Feststoffbilanzen eine bedeutende Rolle, weil der Stoffaustrag und die Umlagerung grosser Stoffmengen grösstenteils in partikulärer Form stattfinden.

Wie vorliegendes Beispiel zeigt, reicht die Erfassung der Feststoffausträge und -umlagerungen jedoch nicht aus, um sich über den Stoffhaushalt eines Einzugsgebietes Klarheit zu verschaffen, da auch die gelösten Stofffraktionen erhebliche Beiträge zum Stoffaustrag leisten. Vielmals ermöglicht erst der *Vergleich* der verschiedenen Messreihen (Basisabfluss-, Drainageabfluss- und Hochwasserfrachten, Konzentrationsganglinien im Gerinne und in der Drainage, Verhalten der gelösten Stoffe, flächendeckende Erosionsschadenskartierung, Erfassung der Veränderung von chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften, Niederschlagssummen und -intensitäten etc.) eine sinnvolle und schlüssige Interpretation der einzelnen Messreihen im Hinblick auf den Gesamtstoffhaushalt des Einzugsgebietes.

Vergleiche der Frachtberechnungen geben Aufschluss darüber, auf welchen Stoffpfaden die untersuchten Stoffe bevorzugt ausgetragen werden. *So wurden Schwebstoffe zu über 95 % durch Hochwasserereignisse ausgetragen*, ebenso auch der POC zum überwiegenden Teil (>70 %). Der Austrag (und somit Verlust auf Einzugsgebietsebene) dieser Stoffe wurde demnach primär durch den Oberflächenabfluss und den Direktabfluss in den Vorfluter beeinflusst. Ganz anders ist dies beim DOC: Da der Hauptaustrag über den Basisabfluss ($\approx 60\%$) erfolgt, ist anzunehmen, dass vor allem der Grundabfluss Austräge bewirkte und der oberflächliche Direktabfluss während Hochwasserereignissen nur eine untergeordnete Rolle spielte.

Stofffrachten, Basisabfluss, Hochwasserabfluss

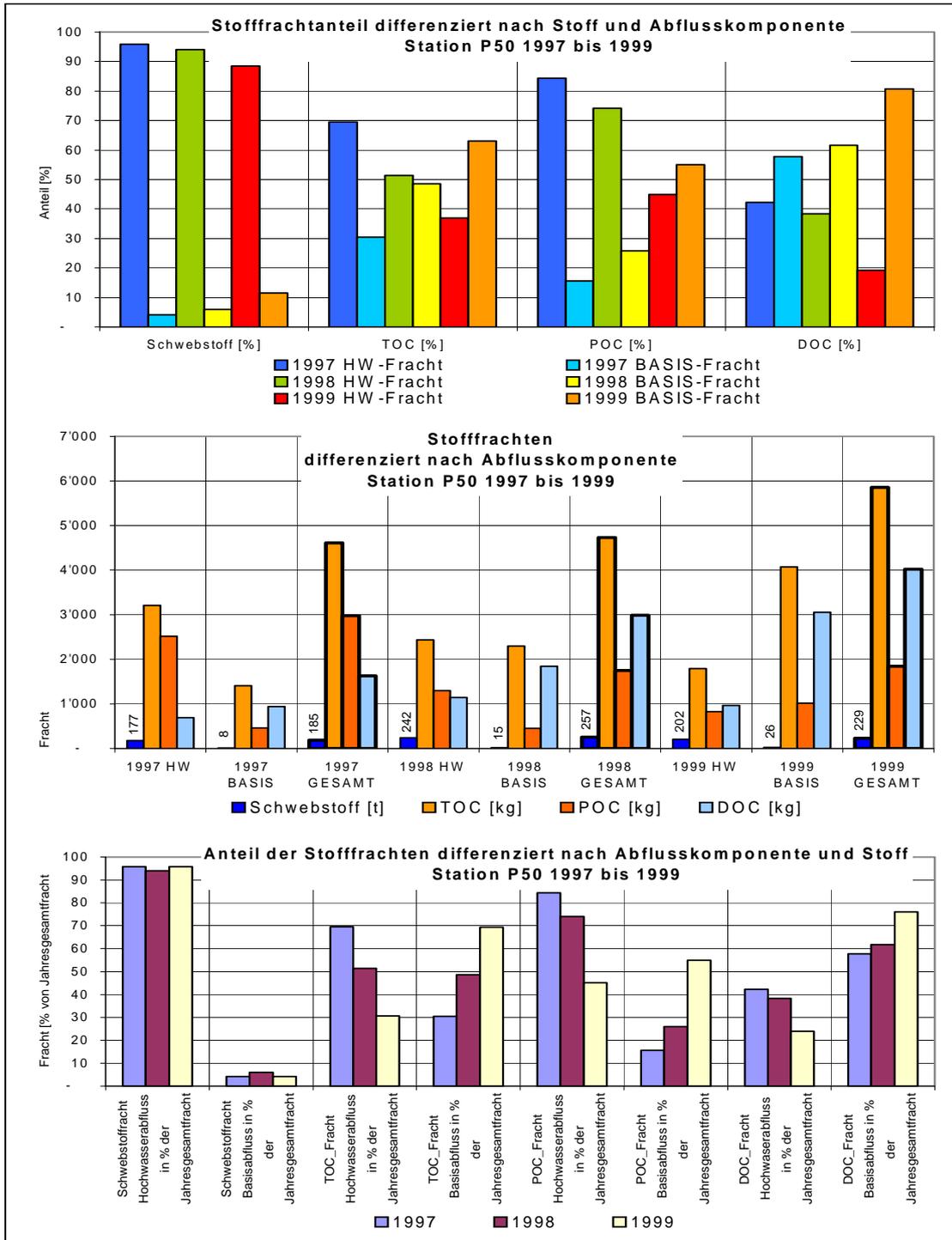


Abbildung 4-8: Jahresfrachtvergleich der verschiedenen Fraktionen des organischen Kohlenstoffes (DOC und POC): Über den Basisabfluss werden grosse Stofffrachten in gelöster Form ausgetragen. In abflussreichen Jahren, bei welchen der erhöhte Gesamtabfluss vor allem durch permanent hohen Basisabfluss verursacht wird (z.B. 1999), kann die Fracht der gelösten Komponenten via Basisabfluss den Austrag der partikulären Komponenten gesamthaft sogar deutlich übersteigen.

Tabelle 4-2: Verschiedene stoffhaushaltliche Parameter der Hochwasserereignisse aus dem Jahr 1999. Die Frachtberechnung der einzelnen Hochwasserereignisse ermöglicht eine Verlustrechnung auf Einzugsgebietsebene. Deutlich zu sehen ist das "Low Frequency-High Magnitude"-Verhalten der Stoffausträge (s. Schwebstofffracht HW#2 und HW#7).

	Schwebstoff Fracht [kg]	DOC- Fracht [kg]	POC- Fracht [kg]	TOC- Fracht [kg]	PO4 tot.- Fracht [kg]	PO4 part.- Fracht [kg]	PO4 gel.- Fracht [kg]	PO4 ortho.- Fracht [kg]	NO3 Fracht [kg]
HW#1 14.01.99	734.01	33.67	3.73	37.26	3.33	1.18	2.15	2.06	123.14
HW#2 04.02.99	91'507.46	105.23	33.30	138.16	21.51	11.15	10.35	11.26	387.26
HW#3 18.02.99	761.30	38.42	2.30	40.37	3.76	1.59	2.17	2.30	182.25
HW#4 15.04.99	204.07	-	-	-	-	-	-	-	-
HW#5 22.04.99	641.58	-	-	-	-	-	-	-	-
HW#6 06.05.99	931.89	42.40	7.83	47.96	2.99	0.59	2.40	2.27	155.98
HW#7 20.05.99	87'047.17	136.81	204.86	341.67	28.79	9.71	19.08	17.54	-
HW#8 10.06.99	3'804.27	114.71	72.61	187.32	12.23	3.52	8.71	7.85	-
HW#9 16.06.99	582.28	-	-	-	-	-	-	-	-
HW#10 23.06.99	5'016.12	114.12	85.37	194.10	11.90	3.67	8.23	7.16	107.68
HW#11 15.07.99	3'660.62	78.66	79.97	158.63	10.23	2.74	7.49	8.18	-
HW#12 15.07.99	3'660.62	78.66	79.97	158.63	10.23	2.74	7.49	8.18	-
HW#13 12.08.99	521.11	3.36	24.61	27.97	0.33	0.17	0.16	0.16	-
HW#14 30.09.99	1'089.79	-	-	-	-	-	-	-	-
HW#15 07.10.00	631.30	50.31	34.36	84.67	4.84	0.84	4.00	3.39	206.18
HW#16 28.10.99	591.56	26.98	54.15	81.13	3.47	1.80	1.67	2.30	-
HW#17 04.11.99	553.30	41.34	38.06	79.40	5.80	2.51	3.29	3.35	-
HW#18 0.12.99	2'677.45	110.54	125.22	235.76	-	-	-	-	-

Multifunktionssonde

Im Jahr 2000 wurde exemplarisch eine Multifunktionssonde (YSI6000 XL) an der Pegelmessstelle P50 (Länenbach) eingesetzt. Diese lieferte neben Abflusswerten und Trübung als Mass für den Schwebstoffgehalt auch Temperatur, Leitfähigkeits- und pH-Werte. Die Messungen von Nitrat und Ammonium über den Verlauf von Hochwasserwellen lassen Rückschlüsse auf das Stoffaustragsverhaltens des Einzugsgebiets zu. In Abbildung 4-9 ist die Messkampagne vom 10.04.2000 bis 17.04.2000 dargestellt.

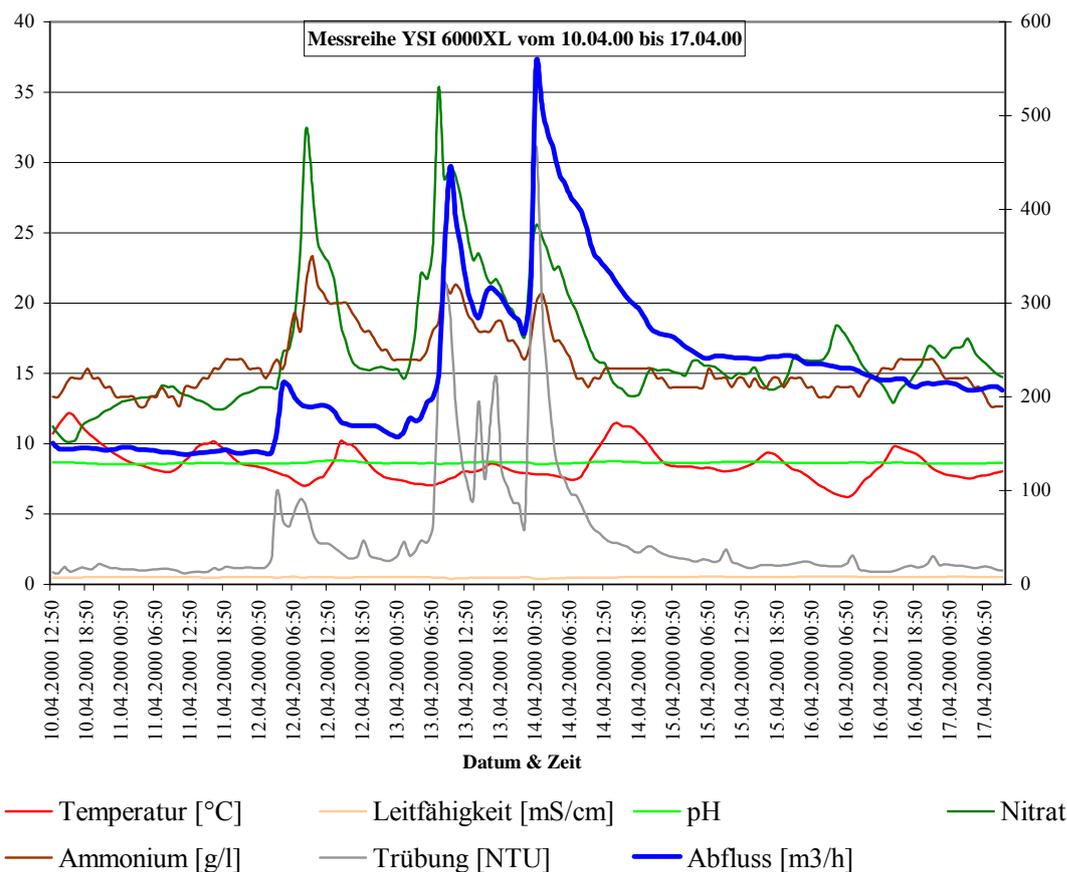


Abbildung 4-9: Exemplarische Darstellung eines einwöchigen Ausschnitts aus der Messreihe der multifunktionalen Messsonde YSI 6000XL.

Abbildung 4-9 zeigt in der dargestellten Woche dreimal eine deutliche Pegelerhöhung (Hochwasser). Die Konzentrationsganglinien von Nitrat, Ammonium und der Trübung (Parameter für die Schwebstoffkonzentration) liefen synchron mit der Pegelstandslinie, ein Indiz für den erhöhten Stoffaustrag während der Hochwasserwellen. Bedeutend ist, dass die einzelnen Konzentrationsganglinien deutliche Unterschiede in der Amplitude ihrer Reaktion auf eine Abflusserhöhung zeigten (erste, zweite und dritte Nitratspitze zeigten eine jeweils geringere Amplitude, die erste, zweite und dritte Pegelstandsänderung jedoch eine zunehmende Amplitude). Dies erlaubt Rückschlüsse auf das Verhalten der Stoffflüsse und die Abflusskomponenten, die eine Konzentrationserhöhung generieren.

Als Beispiel diene die erste Hochwasserspitze: Die Nitratkonzentration reagierte stark, die Trübung war schwach. Dies deutet einerseits darauf hin, dass der Gerinneabfluss stark vom Zwischenabfluss und Grundwasserzufluss beeinflusst wird (Nitrat als gelöste Komponente aus dem Boden), andererseits nur ein geringer Eintritt von Oberflächenabfluss in den Vorfluter erfolgt (Trübung zeigte schwache Reaktion, d.h. geringen Austrag partikulärer Stoffe, welche über den Oberflächenabfluss in den Vorfluter eingetragen werden). Im Vergleich dazu die dritte Hochwasserspitze: Die Nitratganglinie reagierte eher schwach, die Trübung ist jedoch stark. Dies erlaubt folgende Interpretation des Geschehens: Der Zwischen- und Grundwasserabfluss leistet einen maximalen Beitrag an den Abfluss ("abgesättigte" Verhältnisse im Einzugsgebiet, gleichmässige Nitratfracht durch Abflusskomponenten in den Vorfluter). Die Konzentration wurde jedoch durch den Eintritt von Oberflächenabfluss in den Vorfluter niedriger (Verdünnungseffekt). Die erhöhten Trübungswerte sind ein Indiz für den Eintritt von sedimentbeladenem Oberflächenabfluss (Bodenerosion) und für die Remobilisation von Zwischensedimentationen in den Drainagesystemen und im Gerinnebett.

4.1.8 Erosionsschadenskartierungen

An dieser Stelle soll noch einmal auf die Langfristigkeit der Basler Bodenerosionsforschung hingewiesen werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden nicht nur die kartierten Schadensereignisse aus den Jahren 1997-1999 dargestellt sondern auch die bis dahin durchgeführten Kartierungen, die bis 1987 zurückgehen.

Das Summenbild der kartierten Erosionsereignisse führt schliesslich zu einer GIS-Karte, welche einen Vergleich mit den später im Kapitel dargestellten Modellergebnissen erst erlaubt. Die in den Jahren 1997-1999 kartierten Ereignisse wurden in enger Zusammenarbeit mit den anderen im Untersuchungsgebiet Länenbachtal tätigen Doktoranden dokumentiert und ausgewertet.

4.1.8.1 Anzahl und Verteilung der Erosionsereignisse

Insgesamt wurden in den Jahren 1987 bis 1999 im EZG Länenbach 27 ereignisbezogenen Schadenskartierungen durchgeführt (von vier Hauptbearbeitenden, V. PRASUHN, D. DRÄYER, C. SEIBERTH und S. MEIER; Abb. 4-10). Davon erfolgten je fünf im Februar und April, vier im Dezember, drei im September. Pro Jahr fanden maximal sechs (Riedmatt: 7) Kartierungen statt (Abb. 4-11). Abbildung 4-12 zeigt den Ausschnitt einer Schadenskartierung.

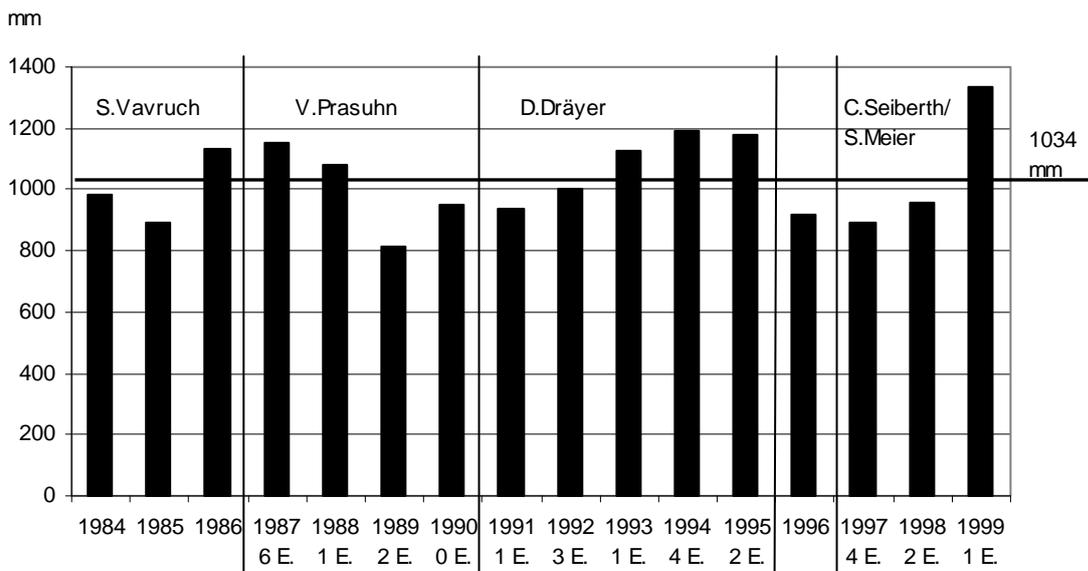


Abbildung 4-10: Höhe des Jahresniederschlages im EZG Länenbach im Untersuchungszeitraum 1987-1999. Der 15-jährige Jahresmittelwert beträgt 1034 mm für T50 (1984-1999). „E“ gibt die Anzahl der kartierten Erosionsereignisse an.

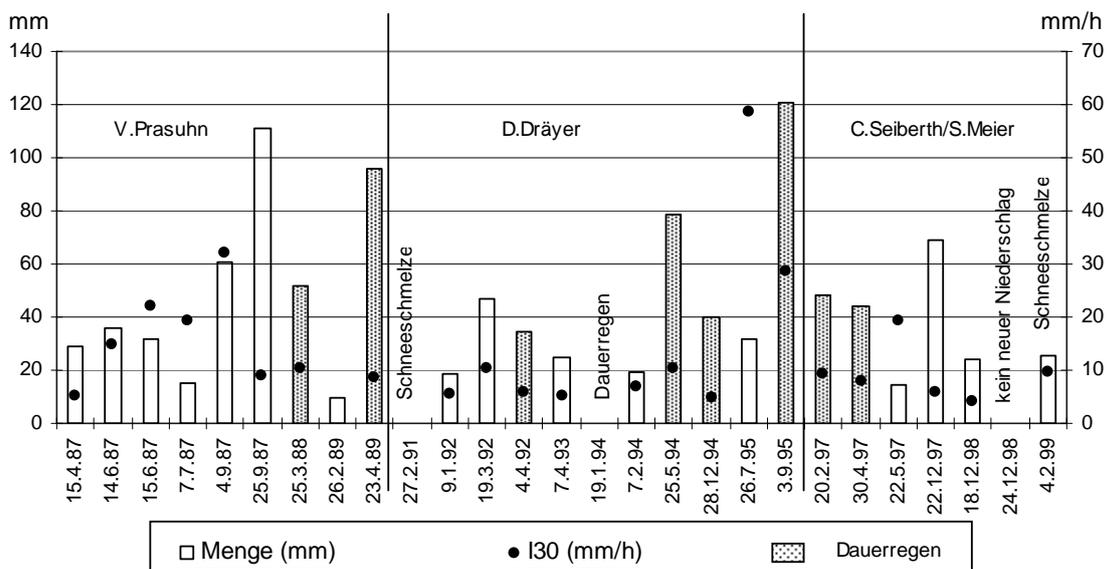


Abbildung 4-11: Menge und maximale 30-Minuten-Intensität des letzten erosiven Niederschlagsereignisses vor der Erosionsschadenskartierung im EZG Länenbach (1987-1999).

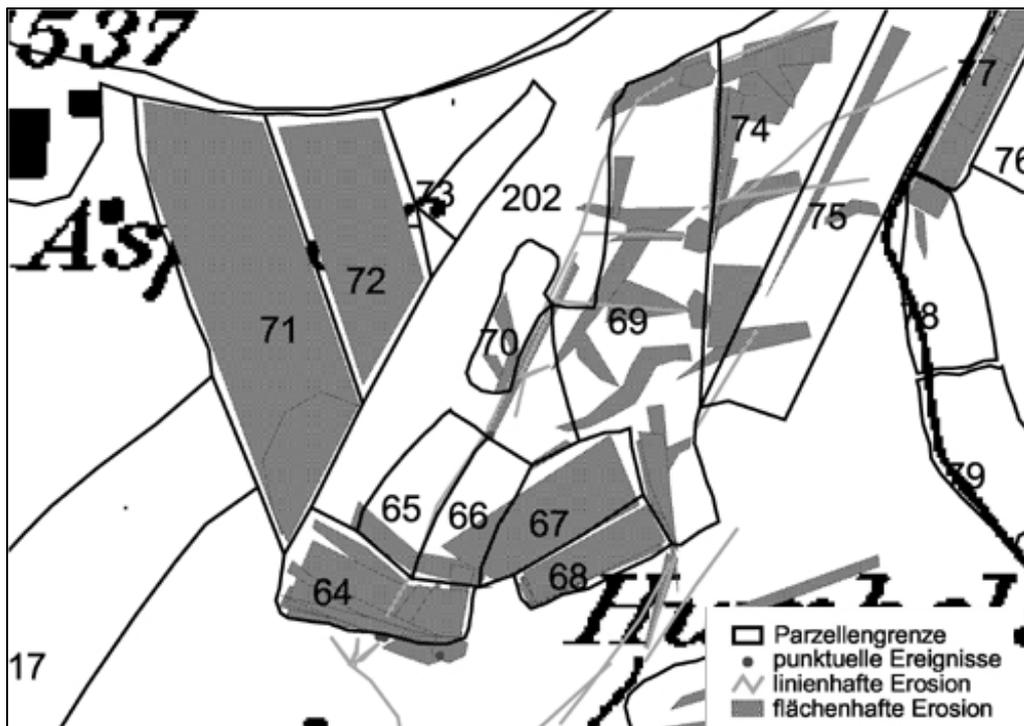


Abbildung 4-12: Ausschnitt der Schadenskartierung im EZG Länenbach vom Erosionsereignis am 23.03.1988 (52 mm Niederschlag; $I_{30} = 10.2$ mm/h). Die Kartierung (unveröffentlichte Daten von PRASUHN) erfolgte am 25.03.1988 nach ROHR et al. (1990). Die Parzellen 71 und 72 sind stark von flächenhafter Erosion betroffen (Abtragsmenge abgeschätzt aus Feldmessungen).

Das Erosionsausmass, repräsentiert durch die Menge des Erosionsgutes („Bodenabtrag“), wies in den verschiedenen Jahren für Sommer- und Winterhalbjahr eine grosse Variabilität auf. In den zwölf untersuchten Jahren traten im EZG Länenbach sechs Ereignisse mit einem kartierbarem Bodenabtrag > 20 m³ auf. Zusammen trugen sie zu 81 % des Gesamtbodenabtrags in diesem Zeitraum bei. Erosionsreiche Jahre waren 1994 (drei Ereignisse mit einem Bodenabtrag > 20 m³), 1987, 1997 und 1999 mit je einem solchen Ereignis (Abb. 4-13). Die Jahre 1989 bis 1993 waren erosionsarm mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsjahressummen. Zeitweilige Beobachtungslücken – wie 1990/1991, 1996 (nicht kartiert) und 1999 bedingt durch einen Bearbeiterwechsel – konnten nicht ausgeschlossen werden.

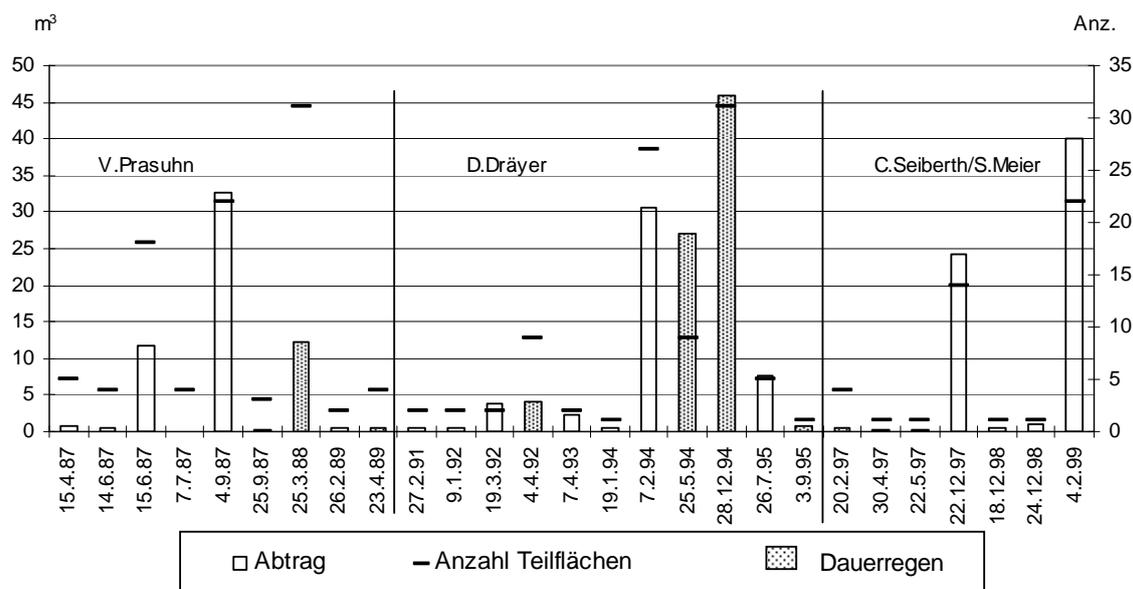


Abbildung 4-13: Bodenabtrag und Anzahl der Erosionsformen aller kartierten Erosionsereignisse im EZG Länenbach im Zeitraum 1987-1999.

4.1.8.2 Art, Entstehungsursachen und Verteilung der Erosionsformen

Mit 77 % dominierten die linearen Erosionsformen (rill erosion) im Länenbach als Ergebnis des konzentrierten Oberflächenabflusses in Rillen (Abb. 4-14). Die tonreichen Böden und das wölbungsreiche, stark strukturierte Kleinrelief im EZG begünstigen lineare Erosionsprozesse. Dagegen trat sichtbare flächenhafte Erosion (interrill erosion) – 6 % der kartierten Erosionsformen – selten auf. Sie konnte an gestreckten Hängen mittels Feldkästen nicht oder in unbedeutendem Ausmass nachgewiesen werden (SEILER 1983; PRASUHN 1991). Ausgeprägte Verschlammungserscheinungen wie auf Lössböden treten bei den tonigen Böden mit guter Aggregatstabilität nicht auf. Die Infiltrationskapazität der Böden ist aufgrund von Trockenrissen, Regenwurmrohren, Wurzelgängen und anderen nichtkapillaren Poren hoch. Erst bei gesättigtem Boden kommt es zu Oberflächenabfluss, der aber oft an lokale, kleinräumig wechselnde Relief- und Substratbedingungen gebunden ist (z.B. Hangwasseraustritte) und die linearen Formen verursacht. Flächenhaft-lineare Formen entstehen, wenn sich die lineare Erosion zu flächenhaften Mustern verdichtet, zum Beispiel als Netzwerk von Rillen.



Abbildung 4-14: Rillenerosion im Länenbachtal. (Aufnahme: Januar 1999)

Die meisten Erosionsformen sind auf Hangwasseraustritte und konzentrierten Oberflächenabfluss in eine Mulde bzw. Tiefenlinie (oft zusammenhängend) zurückzuführen. An zweiter Stelle tritt Erosion durch Fremdwasserzufluss auf, das heisst durch Wasser von nicht erosivem Oberflächenabfluss höher gelegener Flächen wie Strassen, Feldwegen, Grünlandbereichen. Dieser Fremdwasserzufluss verursachte aber im Untersuchungszeitraum die grösste Menge des Bodenabtrags ($\varnothing 1.3 \text{ m}^3$ je Erosionsform, in der Regel Rillenerosion). Erosion durch Hangwasseraustritte und konzentrierten Oberflächenabfluss in einer Mulde bzw. Tiefenlinie führte durchschnittlich zu 0.7 m^3 Bodenabtrag je Erosionsform (EZG Länenbach).

46% der Parzellen im Länenbachtal waren während der zwölf Beobachtungsjahre von der Erosion betroffen. Die Anzahl der betroffenen Flächen pro Ereignis und Jahr war sehr unterschiedlich. Deutlich zeichneten sich aber Lokalitäten ab, auf denen sichtbare Erosion immer wieder auftrat (Abb. 4-15). Im EZG Länenbach wurden auf 13 Parzellen bzw. Grünlandflächen bei 18% aller Ereignissen (= 5mal) Erosionsformen kartiert. Sechs Schläge (63, 64, 69, 97, 98, 102) waren bei über einem Viertel aller Ereignisse (≥ 7 mal), drei Schläge (63, 98, 102) sogar bei über einem Drittel aller Ereignisse (≥ 9 mal) von der Erosion betroffen.

Bodenabtrag zwischen 1987 und 1999 im EZG Länenbach mit vielen Erosionsformen pro Ereignis (46 m^3 von 31 Parzellen) fand am 28.12.1994 nach Dauerregen statt (s. Abb. 4-13). Auf den Parzellen 99 und 98 wurden zum Beispiel 13.6 m^3 Boden durch zwei lineare Erosionsformen abgetragen – das sind 12.6 t je ha der betroffenen Parzellen. Bei einem Ereignis am 07.02.1994 wurden hier bereits 10.7 m^3 (9.9 t ha^{-1}) Boden erodiert. Das heisst, dass im abtragsreichsten Jahr 1994 allein auf diesen beiden Parzellen 22.5 t ha^{-1} abgetragen wurden.

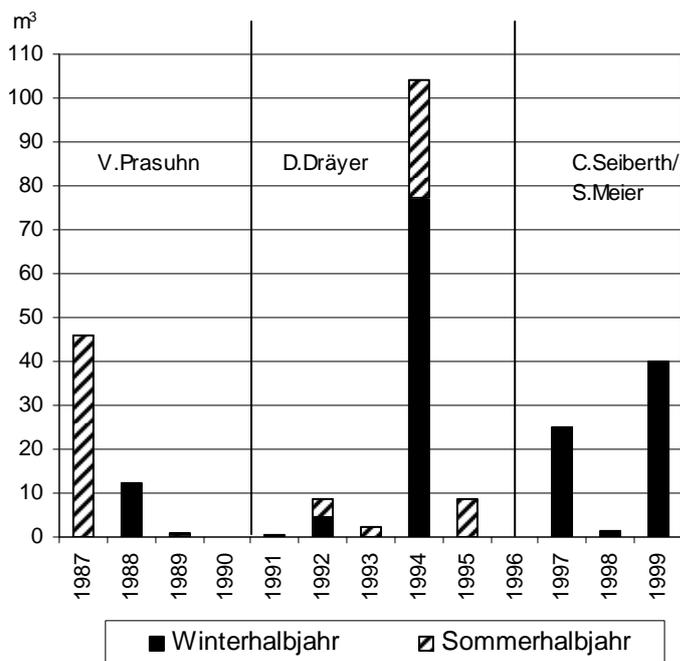


Abbildung 4-16: Jährliche kartierte Bodenabtragsmengen im EZG Länenbach (1987-1999).

4.1.8.4 Akkumulation und Off-Site-Schäden, Übertritte

Insgesamt verursachten im EZG Länenbach 41 % der kartierten Erosionsformen Off-Site-Schäden. Das heisst, die Akkumulation des erodierten Bodenmaterials erfolgte ausserhalb der Parzelle, auf der die Erosion ausgelöst wurde. In rund einem Viertel der Fälle waren davon benachbarte Parzellen betroffen. 11-25 % der kartierten Erosionsformen (je nach Bearbeiter) endeten am Bach (80 %) oder an einer Dole (Dränagekanal-Einlaufschacht; 20 %; siehe Kap. 4.1.5), so dass dort ein Übertritt von Bodenmaterial in den Vorfluter möglich war (s. Abb. 4-15).

4.1.8.5 Erosion und Landnutzung im EZG Länenbach

Von den zwischen 1987 und 1999 kartierten Erosionsformen lagen 28 % auf Maisfeldern, gefolgt von 22 % auf Wintergetreideflächen und 19 % auf Schwarzbrache. Vom kartierten Gesamtbodenabtrag entfielen 34 % auf Schwarzbrachen, 26 % auf Mais- und 15 % auf Wintergetreideflächen. Die hohen Bodenabtragsbeträge von Mais- und Bracheflächen erklären sich aus dem überdurchschnittlich hohen Anteil an abtragsrelevanten flächenhaft-

linearen Erosionsformen bei diesen Kulturen (Abb. 4-17). Kartierbare flächenhafte Erosion trat insbesondere bei einem Ereignis auf Stoppelfeldern auf.

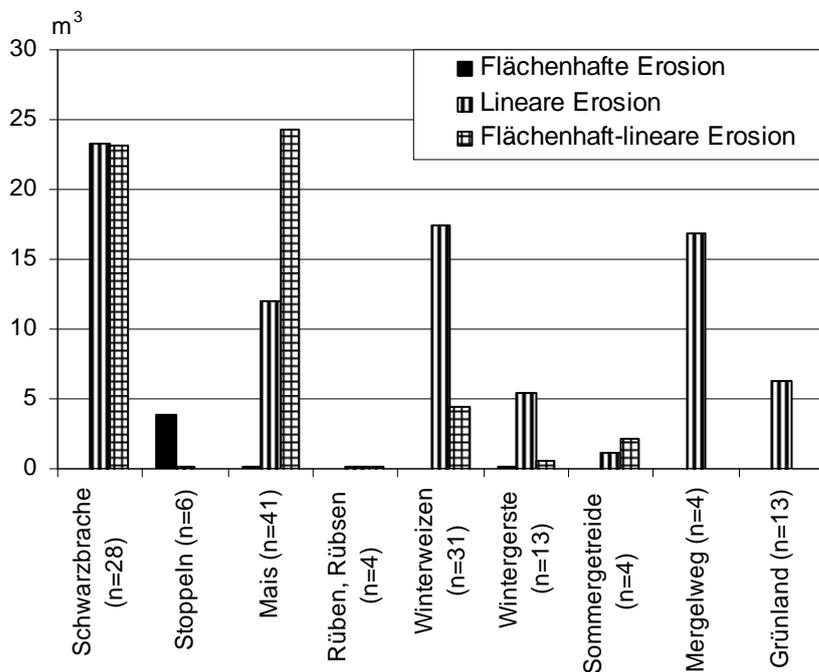


Abbildung 4-17: Bodenabtrag nach Hauptnutzungsarten im EZG Länenbach zwischen 1987 und 1999 (kartierte Erosionsformen mit Angabe der Nutzungsart: n=144).

Erosion auf Maisflächen fand besonders von Mai bis Juli statt, wo die Maispflanzen dem Boden noch wenig Schutz vor Erosion boten (4 flächenhafte, 13 flächenhaft-lineare und 24 lineare Erosionsformen). Erosion auf Winterweizen fand von Dezember bis Juni mit jeweils geringeren Bodenabträgen ($< 2 \text{ m}^3$) von ein bis sechs Teilflächen pro Ereignis statt. Die linearen Erosionsformen dominierten deutlich. Erosion auf Schwarzbrache und Stoppelfeldern trat von Februar bis April (vor der Maisaussaat) überwiegend durch lineare Formen auf. Nach der Ernte von Wintergetreide (Ende Juli/Anfang August) und nach der Bodenbearbeitung für die Wintergetreide-Aussaat ist die Gefahr der Erosion deutlich höher, insbesondere wenn sommerliche Starkniederschläge auftreten, was zwei Ereignisse belegen:

- 26.07.1995 Abtrag von 6 m^3 durch eine flächenhaft-lineare Erosionsform auf Schwarzbrache.
- 04.09.1987 Abtrag von über 30 m^3 durch acht lineare und vier flächenhaft-lineare Erosionsformen.

4.2 Ergebnisse der Erosionsmodellierungen

4.2.1 Ein einfaches GIS-gestütztes Modell zur Bestimmung der beitragenden Flächen in chorischer Dimension im Einzugsgebiet Länenbachtal

Die in Kap. 3.2.1 beschriebene Methodik bildet die Ausgangsbasis für die im Folgenden dargestellten einzelnen Zwischenergebnisse der Modellbildung. An dieser Stelle sei nochmals auf Abbildung 3-14 (Ablaufschema) verwiesen, welche die einzelnen Ausgangsdaten und Zwischenprodukte für das *einfache empirisch-statistische Bodenerosionsmodell (ES-SEM)* sowie die Modellierungsprozesse darstellt. Endergebnis des Modells sind klassifizierte Übertrittsstellen, welche mit den Erosionsschadenskartierungen verglichen werden können und als Entscheidungshilfe für erosionsmindernde Massnahmen dienen können.

Es stehen also nicht Abtragsraten oder on-site Schäden im Vordergrund des Modells, sondern neuralgische Übertrittsstellen, an denen durch Renaturierungsmassnahmen gezielt der Übertritt von Bodenmaterial und die damit verbundene Schadstoffbelastung der Gewässer verhindert werden soll.

Diese Massnahmen wirken natürlich nur im Zusammenspiel mit Nutzungsänderungen und Massnahmen, die das Erosionsrisiko generell senken. Sie haben deshalb lediglich ergänzende Funktion bzw. dienen der Planungspraxis als Entscheidungshilfe bei der Gesamtenaturierung von kleinen landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebieten im Rahmen einer neuen Landwirtschaftspolitik und im Zusammenhang mit der Durchführung von ökologischen Ausgleichsmassnahmen.

4.2.1.1 Kleinststeinzugsgebiete (Subbasins) im Länenbachtal

Der erste Schritt der detaillierten Reliefanalyse zeigt die aufgrund der geomorphologischen Verhältnisse ausgeschiedenen Kleinststeinzugsgebiete (Subbasins), innerhalb derer sich die Oberflächenprozesse (Splash-Abtrag und Oberflächenabfluss) abspielen (Abb. 4-18). Den einzelnen späteren Übertrittsstellen in den Vorfluter lassen sich somit Kleinststeinzugsgebiete zuordnen. Diese „Subbasins“ werden anschliessend klassiert und somit einer Gefährdungsbeurteilung unterzogen (Hangneigung, Bodeneigenschaften, Anzahl Kleinstrukturen, Wegenetz; Abb. 4-19).

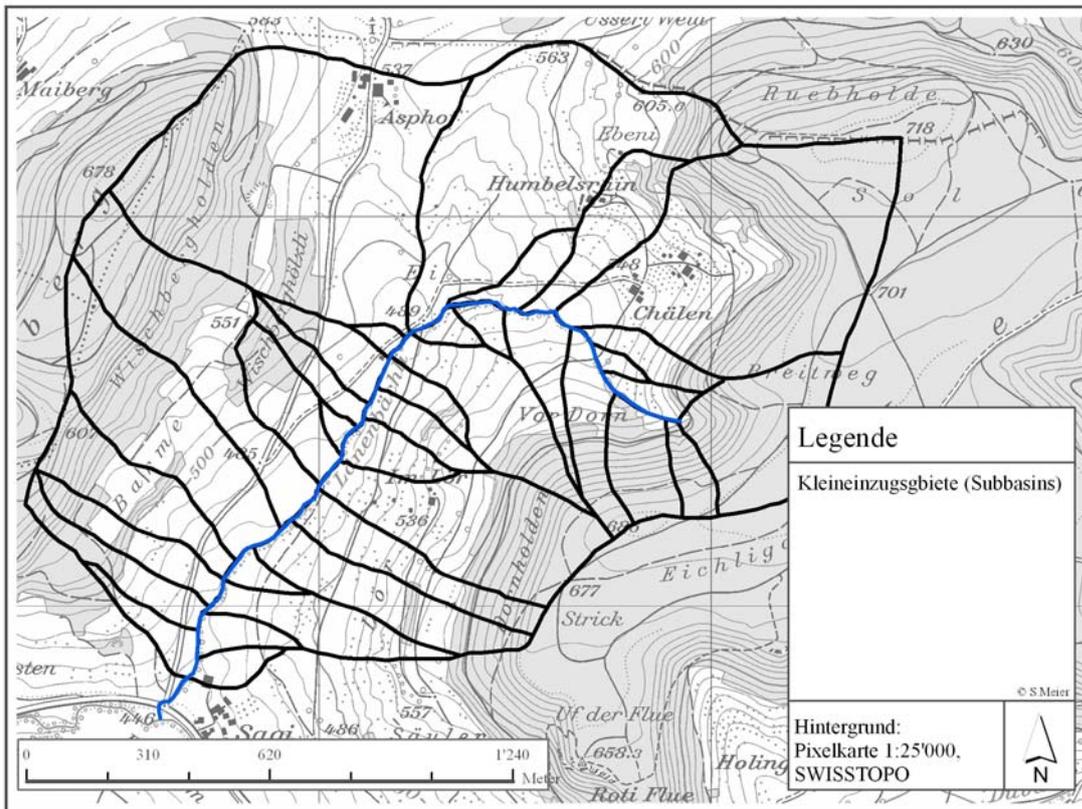


Abbildung 4-18: Aufgrund der detaillierten Reliefanalyse ausgeschiedene Kleineinzugsgebiete. Die grosse Anzahl der Klein- und Kleinstzugsgebiete spiegelt die kleinräumigen geomorphologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet sehr gut wieder.

Die Kleineinzugsgebiete wurden anschliessend mit dem von DRÄYER (1996) entwickelten GVEM BS - unter Berücksichtigung der langjährigen Fruchtfolgen im Einzugsgebiet ausgehend von der langjährigen Landnutzungskartierung - überlagert. So konnte den Klein- und Kleinstzugsgebieten ein Erosionsrisiko zugeordnet werden (Abb. 4-19).

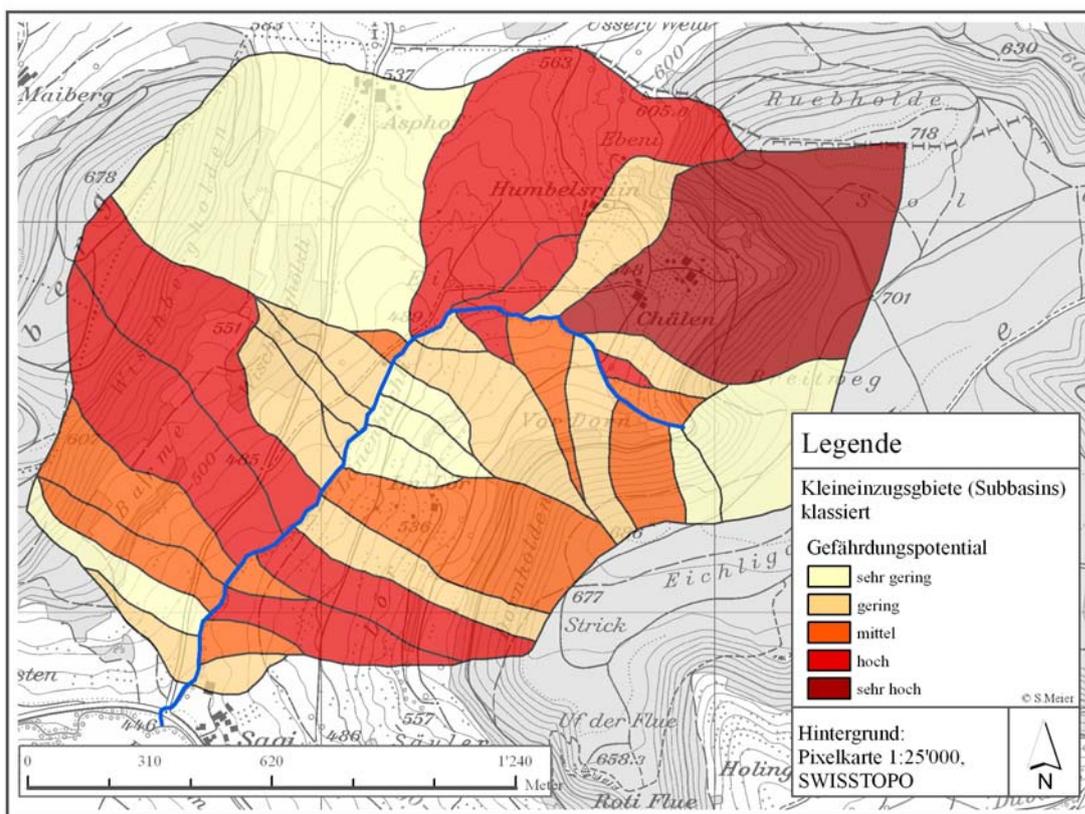


Abbildung 4-19: Klassierte Kleineinzugsgebiete, dargestellt nach ihrem Gefährdungspotential. Dafür wurde das GIS-basierte Bodenerosionsmodell GVEM BS (DRÄYER 1996) mit den Kleineinzugsgebieten überlagert und Flächen unterschiedlichen Gefährdungspotentials neu klassiert sowie anschliessend mit anderen Faktoren, u.a der Grösse des Kleineinzugsgebiets, verrechnet. Die klassierten Kleineinzugsgebiete können nun zur Klassierung der Übertrittsstellen herangezogen werden.

4.2.1.2 Präferentielle Fliesspfade des Oberflächenabfluss

Die in Kap. 3.2.1 beschriebene Reliefanalyse ergibt die detaillierten Fliesspfade des Oberflächenabflusses und zeigt somit die Transportpfade für oberflächlich gelöstes Bodenmaterial auf. Durch das Einbinden des Strassen- und Wegenetzes in das digitale Höhenmodell konnte die tatsächliche Situation im Gelände sehr realitätsnah wiedergegeben werden (Abb. 4-20 und 4-21). Vor allem die Erfahrung aus vielen Jahren Erosionsschadenskartierung belegt den grossen Einfluss der „künstlichen Fliesspfade“ (Strassen und Wege) für das Erosionsmaterial.

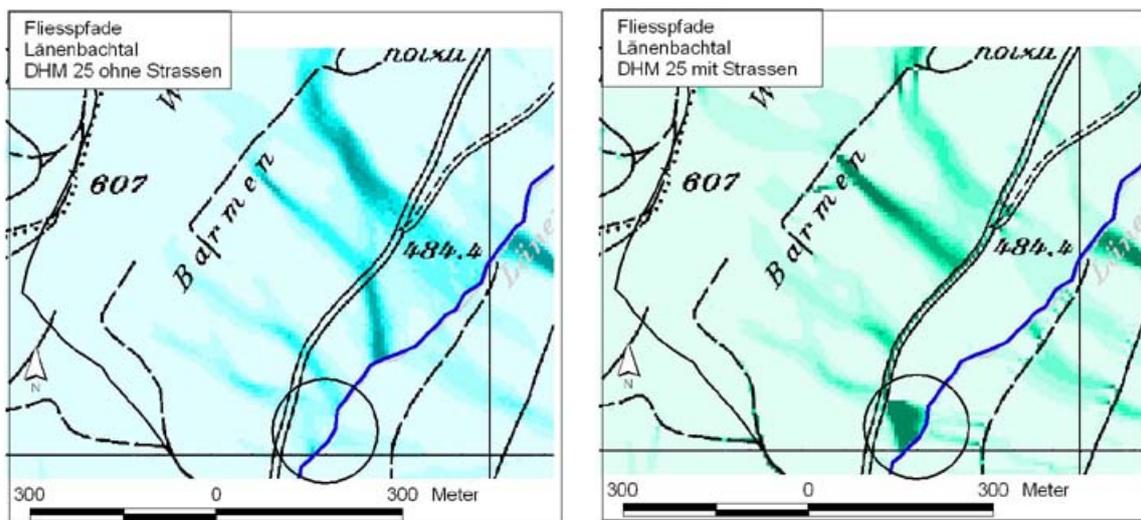


Abbildung 4-20: Ausschnitt aus dem Länenbachtal. Dargestellt sind die Fließpfade und das Strassen- und Wegenetz. Die linke Abbildung zeigt das Ergebnis der Reliefanalyse ohne Strassen. In der rechten Abbildung hingegen kommt der Einfluss des Strassennetzes bei der Berechnung der Fließpfade deutlich zum Ausdruck. Die Übertrittsstellen in das Oberflächengewässer verändern sich drastisch (siehe markierter Ausschnitt).



Abbildung 4-21: Übertrittsstelle von Abb. 4-20 in der Realität. Das Bild zeigt den Blick auf den Fahrweg und das oberhalb des Weges liegende Ackerland.

4.2.1.3 Identifikation von Übertrittsstellen

Die Identifikation der Übertrittsstellen erfolgte durch eine einfache Überlagerungsfunktion im GIS: Die Berührungspunkte, an denen die zuvor berechneten Fließpfade für Oberflä-

chenabfluss und Sedimenttransport in den Vorfluter heranreichen, wurden identifiziert und mit einem Radius von 5 m als Übertrittsstellen herausgefiltert. Dadurch konnten die in Abbildung 4-22 dargestellten Übertrittsstellen - vorerst noch unklassiert - ausgeschieden werden.

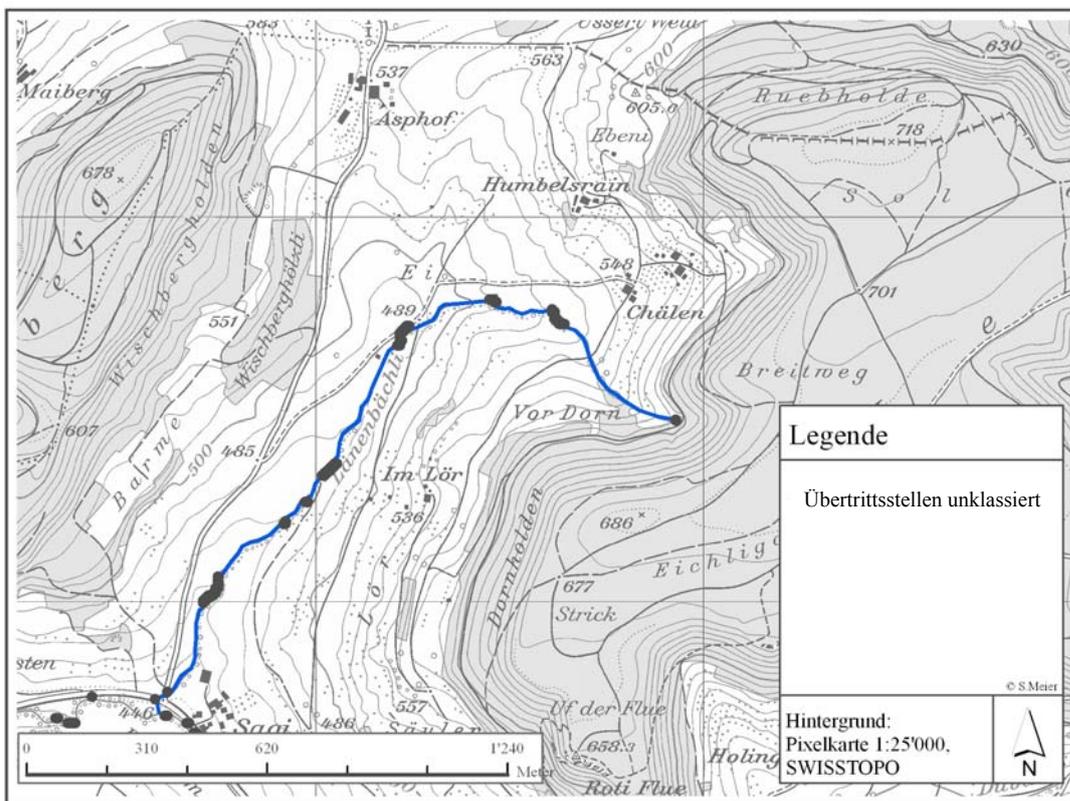


Abbildung 4-22: Übertrittsstellen in den Länenbach (Hintergrund PK25, SWISSTOPO). Durch eine einfache Überlagerung von Fließpfaden und dem Verlauf des Länenbachs konnten die Übertrittsstellen identifiziert werden.

4.2.1.4. Klassierte Übertrittsstellen

Abbildung 4-23 zeigt die klassierten Übertrittsstellen nach dem letzten Modellschritt. Nach der Überlagerung von Übertrittsstellen, präferentiellen Fließpfaden und Gefährdungspotential der Kleineinzugsgebiete zeigen die Übertrittsstellen ein unterschiedlich hohes Gefährdungspotential für den Übertritt von Feststoffmaterial in den Vorfluter. Die Gefährdung der Übertrittsstellen ist also abhängig vom Gefährdungspotential der klassierten Kleineinzugsgebiete (Abb. 4-19).

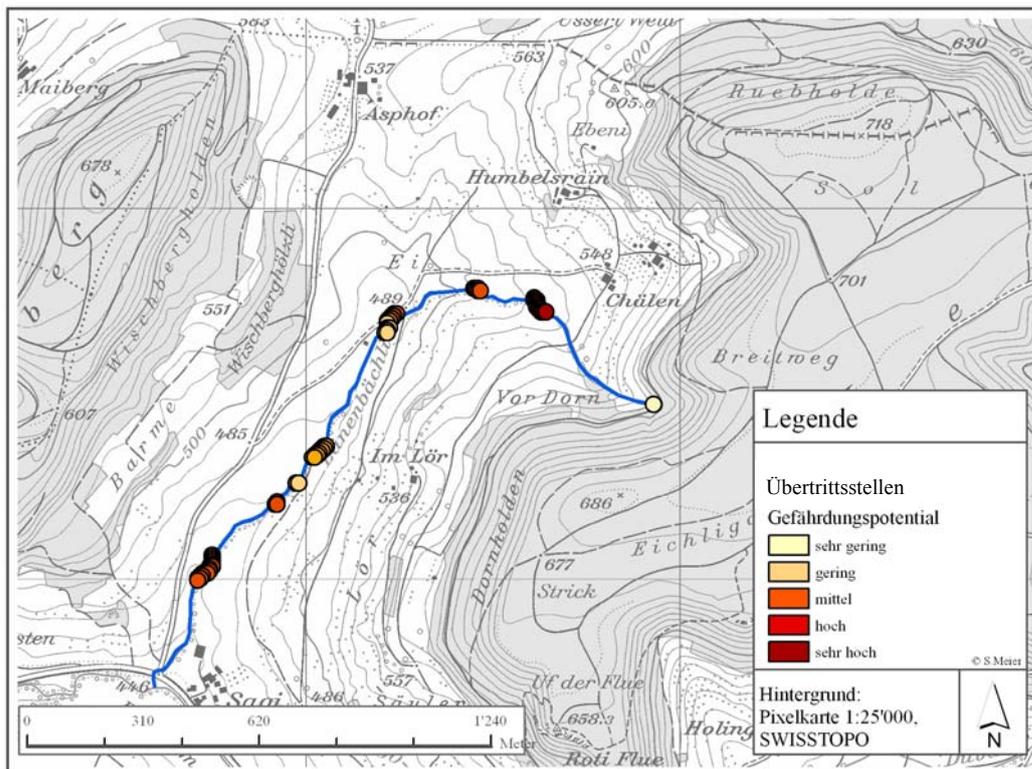


Abbildung 4-23: Klassierte Übertrittsstellen in den Länenbach. Den unklassierten Übertrittsstellen wurden die Gefährdungspotentiale der Kleineinzugsgebiete, in denen sie liegen, zugeordnet. Durch die hohe Dichte der Übertrittsstellen in manchen Bachabschnitten kann hier von ganzen Gefährdungsabschnitten gesprochen werden. Die überwiegende Mehrheit der Übertrittsstellen liegt in den Gefährdungsstufen mittel, hoch oder sehr hoch.

4.2.1.5 Schadenskarten und Modellsimulation

In einem letzten Schritt kann nun das Ergebnis des Modells ESSEM, nämlich die klassierten Übertrittsstellen, mit den langjährigen Felddatenerhebungen der Erosionsereignisse verglichen werden (Abb. 4-24). Erst dieser Schritt lässt eine Aussage über die Modellgüte zu und es können anschliessend Aussagen über die Dringlichkeit von erosionsmindernden Massnahmen in den Kleineinzugsgebieten und von Retentions- bzw. Renaturierungsmassnahmen an den Übertrittsstellen selber gemacht werden. Auch in diesem Vergleich zeigt sich einmal mehr die Wichtigkeit langjähriger Felddatenerhebungen: Ohne die Erosionsschadenskartierungen und Erfassung der Übertrittsstellen bei Erosionsereignissen und die digitale Erfassung in einem Geographischen Informationssystem wäre die Modellgüte in diesem Fall kaum zu prüfen gewesen.

Abbildung 4-24 zeigt eine Überlagerung der langjährigen Erosionskartierungen mit den klassierten Übertrittsstellen im Ausschnitt *Humbelsrain* des Untersuchungsgebiets. Besonders die vom Modell als hoch und sehr hoch gefährdeten Übertrittsstellen liegen direkt in den linienhaften Erosionsformen und binden die flächig-erosionsgefährdeten Parzellen an den Vorfluter an. Damit bestätigen sie die Anbindung der bereits als kritisch eingestuft

Ackerparzellen, durch welche langfristig immer wieder Erosionsmaterial in den Vorfluter gelangte.

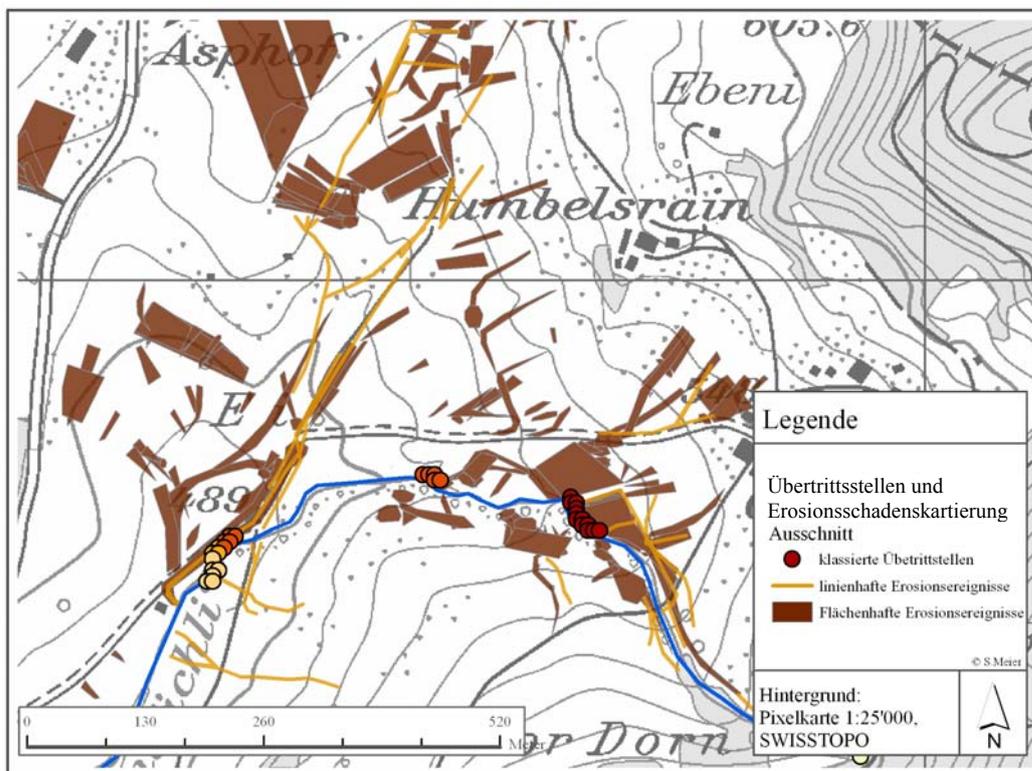


Abbildung 4-24: Ergebnis der Schadenskartierung im Vergleich mit den klassierten Übertrittsstellen. Die vom Modell ermittelten und bewerteten Übertrittsstellen liegen genau an den gefährdeten Ackerschlägen, von welchen immer wieder Erosionsmaterial in den Vorfluter gelangt. Somit werden die Modellergebnisse durch die langjährigen Felddatenerhebungen bestätigt.

4.2.2 Erosionssimulation von Starkniederschlagsereignissen im Einzugsgebiet Riedmattbachtal

4.2.2.1 Simulationsergebnisse und Vergleich mit Feldmessungen

Im folgenden Kapitel sind auszugsweise die Modellergebnisse der Simulationen mit E2D und E3D dargestellt. Zunächst wurden mit E2D Modellläufe durchgeführt, um den modellspezifischen Korrekturfaktor zu ermitteln und um eine Anhaltsgrösse für die Kalibration des Modells auf die Bodenverhältnisse im Riedmattbachtal zu gewinnen.

Anschliessend wurden verschiedene Ereignisse mit E3D simuliert und mit den im Feld gemessenen Werten verglichen. Im Verlauf der Arbeit mit dem Modell wurde der ursprünglich geplante Anwendungsbereich für das Modell verworfen. Es war geplant, nach der Simulation für gemessene Abtragsereignisse verschiedene Landnutzungsszenarien mit E3D zu simulieren, um die Eignung des Modells als Vorhersageinstrument für die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das Abtragsverhalten zu überprüfen. Bei einzelnen Simulationsläufen zeigte sich ein sehr hoher Aufwand für die Validierung des Modells

und eine extreme hohe Variabilität der Ergebnisse in Abhängigkeit von angenommener Ausgangsbodenfeuchte und modellspezifischem Korrekturfaktor, so dass die ursprüngliche Fragestellung verworfen wurde. Neuere Versionen von E3D, die eine bessere Schnittstelle zu Geographischen Informationssystemen und damit einen geringeren Aufwand mit sich bringen, standen dem Autor nicht zur Verfügung. Somit wird hier lediglich die Frage beantwortet, ob das Modell generell geeignet ist, in chorischer Dimension als Planungsinstrument für die kleinparzellierten schweizerischen Agrarverhältnisse zu dienen.

Das Modell E2D

Tabelle 4-3 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung von E2D anhand verschiedener gemessener Abtragsereignisse. Zuvor waren Modellläufe mit den von PRASUHN durchgeführten Regensimulationen vorausgegangen, um die Grössenordnungen des modellspezifischen Korrekturfaktors einschätzen zu können. Der Vergleich der einzelnen Modellläufe zeigt, dass der modellspezifische Korrekturfaktor stark abhängig ist von der Grösse der Erosionsereignisse und den Ausgangsbedingungen vor dem Ereignis, besonders der Ausgangsbodenfeuchte. Das Ereignis vom 23.07.1988 belegt, dass eine Erhöhung der Ausgangsbodenfeuchte um 2 % von 39 % auf 41 % die vom Modell berechnete Abtragsmenge von 0.07 auf 0.39 t/ha erhöht. Der simulierte Abfluss erhöht sich von 21 auf 140 Liter. Die Streuung der Korrekturwerte ist extrem hoch. Abbildung 4-25 zeigt die Abweichungen der simulierten Ereignisse von den im Feld gemessenen Werten des Abflusses bei einem Standardkorrecturfaktor (K-Wert) von 1 und einem Erosionswiderstand von 0.003.

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Simulation mit E2D für die Testparzelle T30 im Riedmattbachtal. Die fünf simulierten Ereignisse geben Aufschluss über den Einfluss der Modellparameter Erosionswiderstand (EW) und K-Wert. Diese beiden Parameter können für die Kalibrierung des Modells herangezogen werden. Die simulierten Ergebnisse können mit den auf der Testparzelle gemessenen Abtrags- und Abflusswerten verglichen werden. Die einzelnen Simulationen wurden mit unterschiedlichen Bodenparameterdateien durchgeführt (Filename Boden). Die grau unterlegten Zellen geben den EW- und K-Wert wieder, der - gemessen an den Feldwerten - zum bestmöglichen Simulationsergebnis führt. Da die simulierten Ereignisse eine sehr grosse Bandbreite aufweisen (gemessener Abtrag zwischen 0,1 t/ha bis 60 t/ha), ergibt sich auch für die Parametereinstellungen ein grosses Spektrum.

Datum	Filename Boden	EW	BF (%)	K-Wert	Rauigkeit	Ld	Org-c	Abtrag gemessen kg	Abtrag gemessen t/ha	Abfluss gemessen l	Abtrag simuliert kg	Abtrag simuliert t/ha	Abfluss simuliert l
23.07.88	T3001_01	0,003000	40	1	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,46	0,23	85,00
23.07.88	T3001_01	0,003000	38	1	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,00	0,00	0,00
23.07.88	T3001_02	0,003000	39	1	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,14	0,07	21,00
23.07.88	T3001_03	0,003000	41	1	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,77	0,39	140,00
23.07.88	T3001_04	0,003000	40	1,2	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,35	0,18	63,00
23.07.88	T3001_05	0,003000	40	1,5	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,22	0,11	33,00
23.07.88	T3001_06	0,003000	40	1,3	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,30	0,15	53,00
23.07.88	T3001_07	0,003000	40	1,35	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,28	0,14	48,00
23.07.1988	T3001_08	0,001000	40	1,35	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	0,84	0,42	48,00
23.07.1988	T3001_09	0,000100	40	1,35	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	7,90	3,95	48,00
23.07.1988	T3001_10	0,000075	40	1,35	0,021	1260	2,5	10,499	5,25	48,28	10,26	5,13	48,00
29.07.1988	T3002_01	0,003000	38	1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,00	0,00	0,00
29.07.1988	T3002_02	0,003000	40	1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,36	0,18	57,00
29.07.1988	T3002_03	0,003000	39	1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,19	0,10	32,00
29.07.1988	T3002_04	0,003000	40	1,5	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,23	0,12	39,00
29.07.1988	T3002_05	0,003000	40	2	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,14	0,07	22,00
29.07.1988	T3002_06	0,003000	40	2,1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,12	0,06	19,00
29.07.1988	T3002_07	0,000500	40	2,1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	0,73	0,37	19,00
29.07.1988	T3002_08	0,000050	40	2,1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	6,50	3,25	19,00
29.07.1988	T3002_09	0,000200	40	2,1	0,021	1260	2,5	2,137	1,07	17,58	1,85	0,92	19,00
01.07.1989	T3003_01	0,003000	40	1	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	2,27	1,13	296,00
01.07.1989	T3003_02	0,003000	45	1	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	7,68	3,84	952,00
01.07.1989	T3003_03	0,003000	37	1	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	0,10	0,05	11,00
01.07.1989	T3003_04	0,003000	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	2,65	1,32	338,00
01.07.1989	T3003_05	0,001500	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	5,37	2,68	338,00
01.07.1989	T3003_06	0,000500	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	16,11	8,05	338,00
01.07.1989	T3003_07	0,000100	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	80,55	40,22	338,00
01.07.1989	T3003_08	0,000050	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	161,09	80,05	338,00
01.07.1989	T3003_09	0,000080	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	100,60	50,30	338,00
01.07.1989	T3003_10	0,000070	40	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	115,00	57,00	338,00
01.07.1989	T3003_11	0,000070	43	0,8	0,021	1260	2,5	122,146	61,07	332	288,00	144,00	786,00
24.07.1989	T3004_01	0,003000	38	1	0,021	1260	2,5	0,196	0,098	6,016	0,00	0,00	0,00
24.07.1989	T3004_02	0,003000	40	0,2	0,021	1260	2,5	0,196	0,098	6,016	0,03	0,02	11,00
24.07.1989	T3004_03	0,003000	40	0,22	0,021	1260	2,5	0,196	0,098	6,016	0,02	0,01	6,00
24.07.1989	T3004_04	0,001000	40	0,22	0,021	1260	2,5	0,196	0,098	6,016	0,16	0,08	6,00
24.07.1989	T3004_05	0,001000	39	0,22	0,021	1260	2,5	0,196	0,098	6,016	0,00	0,00	0,00
31.07.1989	T3005_01	0,003000	38	1	0,021	1260	2,5	0,209	0,1045	2,9	0,00	0,00	0,00
31.07.1989	T3005_02	0,003000	40	0,9	0,021	1260	2,5	0,209	0,1045	2,9	0,00	0,00	10,00
31.07.1989	T3005_03	0,003000	40	0,11	0,021	1260	2,5	0,209	0,1045	2,9	0,00	0,00	3,00
31.07.1989	T3005_04	0,000200	40	0,11	0,021	1260	2,5	0,209	0,1045	2,9	0,19	0,10	3,00

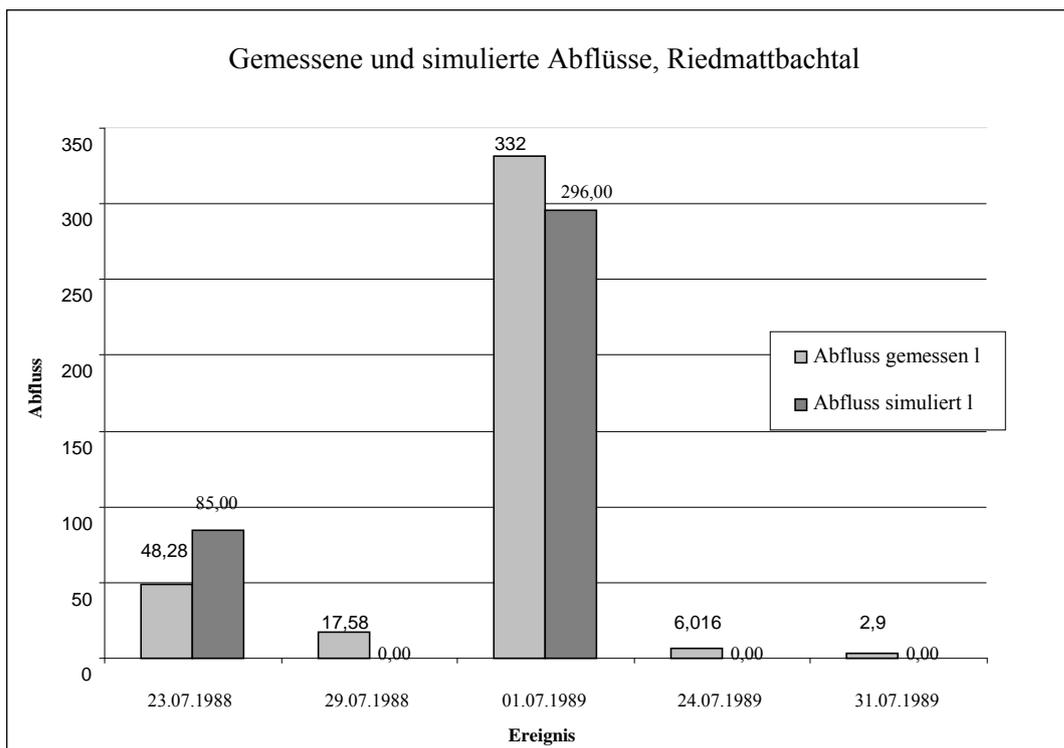


Abbildung 4-25: Vergleich von gemessenen und mit E2D simulierten Abflusswerten im Einzugsgebiet des Riedmattbachtals. Bei kleinen Ereignissen kann mit den Standardwerten für den modellspezifischen Korrekturfaktor (K-Wert) kein Abfluss simuliert werden. Beim mittleren Ereignis vom 23.07.1988 und beim grossen Ereignis vom 01.07.1989 nähern sich die Simulationen den gemessenen Werten deutlich an.

Der Vergleich der gemessenen mit den simulierten Werten zeigt eine grosse Abweichung vor allem bei sehr kleinen Ereignissen. Hier scheint das Modell nicht geeignet zu sein und der Kalibrierungsbedarf ist sehr hoch. Für die grösseren Ereignisse liefert das Modell bei den Standardeinstellungen des K-Wertes 1 relativ gute Ergebnisse, deren Abweichung zwischen 10 und 40 Prozent liegen. Bei allen Simulationen wurde von einer Ausgangsbodensättigung von 40 Prozent ausgegangen. Das Modell scheint bei extremen Ereignissen bessere Ergebnisse zu erzielen als bei weniger wirksamen kleinen Ereignissen.

Im Vergleich der gemessenen mit den simulierten Abtragsmengen zeigt sich eine noch grössere Diskrepanz zwischen gemessenen und simulierten Werten. Bei den beiden grossen Ereignissen vom 23.07.1988 und 01.07.1989 weicht der gemessene vom simulierten Abtrag bei den Standardwerten für den Korrekturfaktor (K-Wert) und den Bodenfaktor (EW-Wert) extrem ab. Das Modell unterschätzt jeweils die Abtragsmengen um ein Vielfaches. Für eine annähernd korrekte Abtragsberechnung müssen also der K-Wert und der EW-Wert korrigiert werden.

4.2.2.2 Extremniederschlagsereignis mit Erosion 3D

An dieser Stelle werden exemplarisch die Simulationen der Extremniederschlagsereignisse vom 15.06.1987 und 30.07.1987 mit einer Gesamtniederschlagsmenge von 52 mm bzw. 22 mm dargestellt. Tabelle 4-4 zeigt die Ergebnisse der Simulationsläufe in Beziehung zu den tatsächlich im Feld gemessenen Werten.

Tabelle 4-4: Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für die Niederschlagsereignisse vom 15.06.1987 und 30.07.1987 an der Pegelmessstelle P 30.

15.05.1987	Gemessene Werte	Simulierte Werte	Fehler	Korrekturfaktor	Ausgangsbodenfeuchte
Abfluss in % vom Niederschlag	1.82	2.21	17.6 %	0.4	40 %
Sediment in t/ha	0.09	0.157	42.6 %	0.4	40 %
30.07.1987	Gemessene Werte	Simulierte Werte	Fehler	Korrekturfaktor	Ausgangsbodenfeuchte
Abfluss in % vom Niederschlag	6.2	3.8	63.1 %	0.25	44 %
Sediment in t/ha	0.11	0.06	83.3 %	0.25	44 %
Abfluss in % vom Niederschlag	6.2	6.3	1.5 %	0.1	44 %
Sediment in t/ha	0.1	0.13	15.3 %	0.1	44 %

Nach der Kalibrierung, durch das Anpassen der Infiltrationsrate des Bodens, konnte das Abflussverhalten beim Ereignis vom 15.05.1987 mit einer hohen Übereinstimmung nachvollzogen werden (Abb. 4-26). Allerdings ergibt sich bei der Nettoerosion eine erheblich grössere Abweichung, da hier die Kalibrierung vor allem des bodenbedingten Erosionswiderstandes sehr viel schwieriger ist. Das Ereignis vom 30.07. zeigt eine höhere Abweichung von simulierten und gemessenen Werten bei einem Korrekturfaktor von 0.25. Verändert man den Korrekturfaktor bis auf 0.1, so bewegen sich die simulierten Werte auf die gemessenen Werte zu. Mit einer Abweichung von 1.5 % beim Abfluss und 15 % beim Abtrag kann von einer hohen Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Werten gesprochen werden. Die Variabilität der simulierten Werte ist sehr stark abhängig von den modellspezifischen Korrekturfaktoren und der Ausgangsbodenfeuchte.

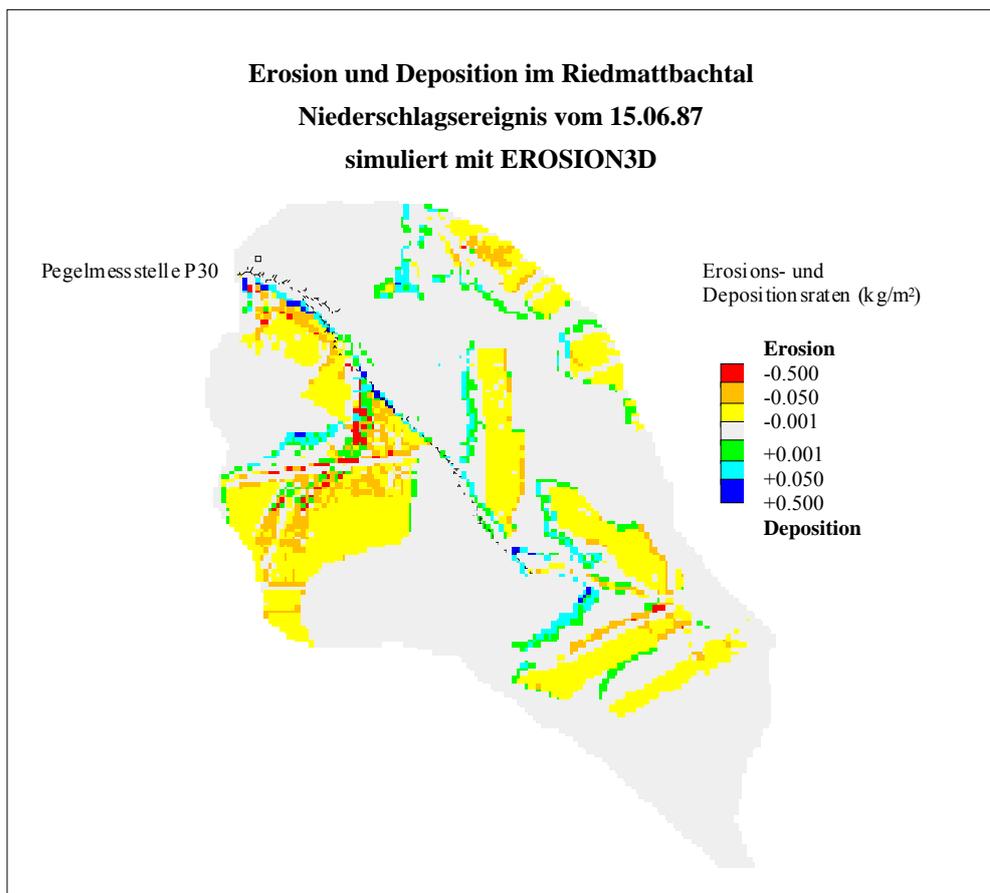


Abbildung 4-26: Starkniederschlagsereignis vom 15.06.1987, simuliert mit E3D. Das Schadensbild zeigt eine relativ hohe Übereinstimmung mit den Feldkartierungen auf den Ackerschlägen. Das Schadensbild kann als Grafikfile in E3D dargestellt werden und erlaubt so einen Vergleich mit den im GIS erfassten Feldkartierungen der Erosionsereignisse. Dargestellt sind die netto Abtragsmengen in kg/m².

4.2.3 Langfristsimulation von Erosion und Auswaschung auf Schlagebene unter verschiedenen Nutzungs- und Bearbeitungsvarianten mit EPIC

An dieser Stelle sei noch einmal kurz auf das Ziel der Langfristsimulationen eingegangen: In einem interdisziplinären Projekt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrarwirtschaft der ETH Zürich sollten im Hinblick auf eine neue Agrarpolitik die Auswirkungen verschiedener Landwirtschaftsgesetze auf die Boden- und Gewässergüte in einem Modell simuliert werden.

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse flossen in ein agrarökonomisches Modell ein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienten sie zur Überprüfung des Einflusses verschiedener Düngungs- und Bearbeitungsvarianten auf das Erosions- und Auswaschungsverhalten der verschiedenen, im Einzugsgebiet des Länenbachtals hauptsächlich angebaute Feldfrüchte. Die grosse Anzahl der Simulationsläufe soll die langfristigen Auswirkungen von Düngungsvarianten, unterschiedlichen Kulturen, Startpools von N- und P-Gehalten im Boden und unterschiedlicher Witterung auf das Erosionsverhalten aufzeigen. Zunächst sind

die Ergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet Baldeggersee dargestellt und anschliessend die Ergebnisse des Untersuchungsgebietes Länenbachtal im Tafeljura.

Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den Ergebnissen um eine Einzelhangsimulation mit standardisierter Hanglänge und Hangneigung handelt. Die Ergebnisse dienen als weitere Grundlage zur Beurteilung des langfristigen Erosionsverhaltens. Zwei Aussagen sollen daraus abgeleitet werden.

1. Welche Massnahmen können langfristig das Erosionsrisiko und das Auswaschungsrisiko von N und P in die Oberflächengewässer verhindern?
2. Ist das Modell geeignet, um diese Aussagen treffen zu können? Kann es als sinnvolle Ergänzung zum empirisch-statistischen Modell ESSEM dienen, um Erosions- und letztlich Gewässerschutzmassnahmen treffen zu können? Können die im Modell ESSEM als besonders kritisch ausgeschiedenen Einzelhänge langfristig mit Hilfe von EPIC auf ihr Erosionsverhalten untersucht werden?

Wie im Kapitel 3.2.3 dargestellt, wurde eine grosse Variationsbreite von verschiedenen Feldfrüchten, Düngungsvarianten, Ausgangspools von P und N im Boden und unterschiedliche Wettersituationen simuliert. Der Grossteil der Outputparameter war im bereits oben erwähnten interdisziplinären Projekt mit dem Institut für Agrarökonomie der ETH Zürich relevant und wurde vom Projektpartner ausgewertet.

In dieser Arbeit wurden folgende Daten graphisch aufbereitet, um die in den Hypothesen gestellten Fragen zu beantworten:

1. Erosionsabtrag in Beziehung zum Fruchtertrag in Abhängigkeit der Witterungssituation. Sowohl als Minimalbodenbearbeitung als auch als Standardbodenbearbeitung bei Gerste, Weizen und Mais und nur Standardbodenbearbeitung bei Kunstwiese, Hafer und Kartoffeln. Dadurch lässt sich der Witterungseinfluss auf die durchschnittlichen Abtragsraten abschätzen.

2. Erosionsabtrag in Abhängigkeit des Düngungsinputs in stark erosiven Jahren in Verbindung mit der Nitratauswaschung und dem Fruchtertrag, jeweils für alle simulierten Früchte. Dadurch kann der Einfluss von Düngergaben auf das Erosionsverhalten und die damit verbundene Nitratauswaschung mit den Folgen für Grund- und Oberflächengewässer abgeschätzt werden.

4.2.3.1 Das Einzugsgebiet Länenbachtal

Die einzelnen Grafiken (Abb. 4-27 bis 4-39) zeigen die verschiedenen simulierten Feldfrüchte. Es lassen sich Aussagen über das Risiko einzelner Anbauvarianten für Erosionseffekte machen.

Ganz generell untermauern die Ergebnisse die bereits bekannten Gefährdungspotentiale der unterschiedlichen Feldfrüchte. Durch die Kombination von Abtragsraten mit dem Er-

trag und den dafür eingesetzten Düngergaben lassen sich Nutzen und Risiko in Beziehung setzen und geben so Entscheidungshilfen für den Düngemiteleinsatz und das damit verbundene Risiko der Stoffauswaschung und die Beziehung von Ertragssteigerung und Erosionsraten bezogen auf unterschiedliche Witterungssituationen. Im Folgenden werden die simulierten Feldfrüchte einzeln dargestellt.

Gerste

Die Gerste zeigt in der Variante der Minimalbodenbearbeitung (Abb. 4-27) einen deutlichen Anstieg des Erosionsrisikos in Abhängigkeit von der Witterung mit Unterschieden zwischen einem wenig erosiven und einem normal erosiven Jahr. Der Unterschied von einem normal erosiven zu einem stark erosiven Jahr ist hingegen nur sehr gering. Ebenso ist eine Ertragssteigerung durch vermehrte Feuchtigkeit nur mehr sehr klein.

In Abbildung 4-28 sind das Abtragsverhalten und die Auswaschung von Nitrat in Abhängigkeit verschiedener Düngergaben für ein stark erosives Jahr dargestellt. Durch eine Steigerung der Düngergaben und den damit verbundenen schnelleren Wuchs kann das Erosionsrisiko bis zur Normdüngungsvariante leicht gesenkt werden. Eine Ertragssteigerung ist ab Normdüngung durch zusätzliche Düngegaben nur noch in sehr geringem Umfang erreichbar. Das Erosionsrisiko bleibt stabil. Dafür kommt es mit zunehmenden Düngergaben zu einem starken Anstieg der Nitratauswaschung.

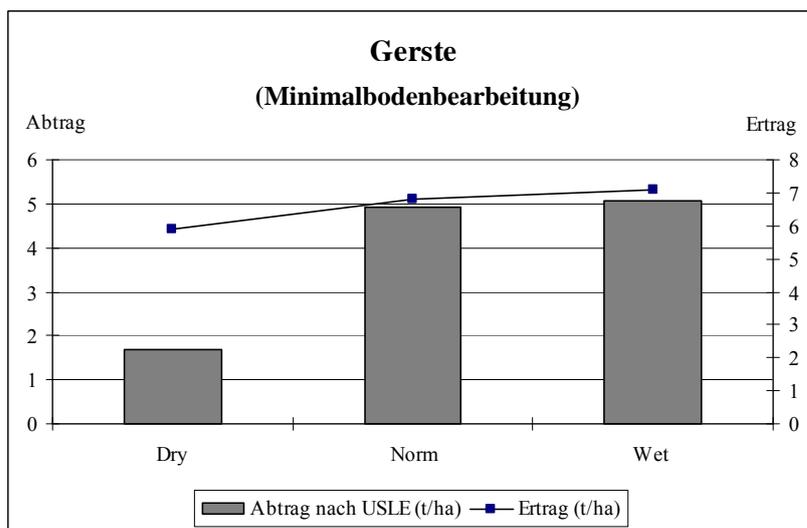


Abbildung 4-27: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Fruchtertrag von Gerste im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein erheblicher Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem eher trockenen und einem normalen Jahr, während der Unterschied von normalen Witterungsbedingungen zu einem überdurchschnittlich feuchten Jahr nur sehr gering ist und weniger als 1 t/ha ausmacht. Auch der Fruchtertrag wird durch ein eher feuchtes Jahr kaum gesteigert.

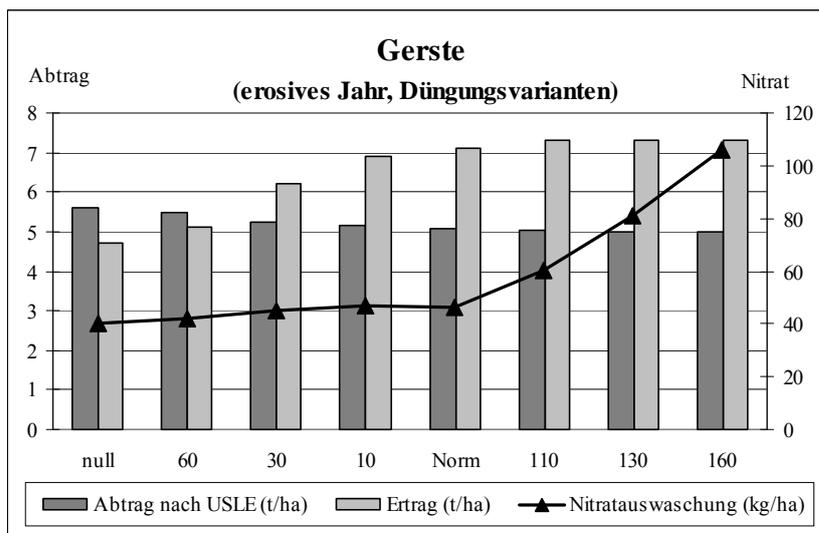


Abbildung 4-28: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag von Gerste während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben sowie damit verbundenen Nitrat auswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

Mais

Beim Mais zeigt sich in Abbildung 4-29 ein sehr charakteristischer Anstieg der Erosionsanfälligkeit vom trockenen bis zum nassen Jahr. Im Gegensatz zur Gerste ist beim Mais der Unterschied vom normal erosiven zum stark erosiven Jahr eklatant und steigt von durchschnittlich 23 t/ha auf über 35 t/ha an. Der Ertrag nimmt im Gegensatz dazu extrem ab. Die zerstörerische Wirkung der Erosion im Maisfeld und die damit einhergehende Verminderung des Wachstums und somit auch des Ertrages werden hier sehr deutlich. Insofern bestätigt das Modell die seit Jahren bekannten Erosionsprobleme bei Maisansaat.

Die in Abbildung 4-30 dargestellte Abhängigkeit von Düngergaben, Ertrag und Nitrat auswaschung in einem erosiven Jahr zeigen beim Mais deutlich, dass Düngergaben über der Normdüngung praktisch nur eine kleine und ab 10 % über der Normdüngung keine Ertragssteigerung mehr zur Folge haben. Stattdessen kommt es zu massiver Nitrat auswaschung, die von unter 20 kg/ha auf über 140 kg/ha hochschnellt.

In Abbildung 4-31 ist der Maisanbau mit Zwischenfruchtanbau dargestellt. Der Einfluss der Zwischenfrucht wird sehr deutlich beim Abtragsverhalten: Der Abtrag nimmt um durchschnittlich 10 t/ha ab und auch die Ertragswerte weisen einen leicht höheren Ertrag aus. Der Einfluss auf die Nitrat auswaschung ist eher gering. Bis zur Normdüngungsvariante ist die Nitrat auswaschung leicht niedriger als ohne Zwischenfrucht, während höhere Düngergaben beim Zwischenfruchtanbau sogar zu leicht höherem Nitratverlust führen.

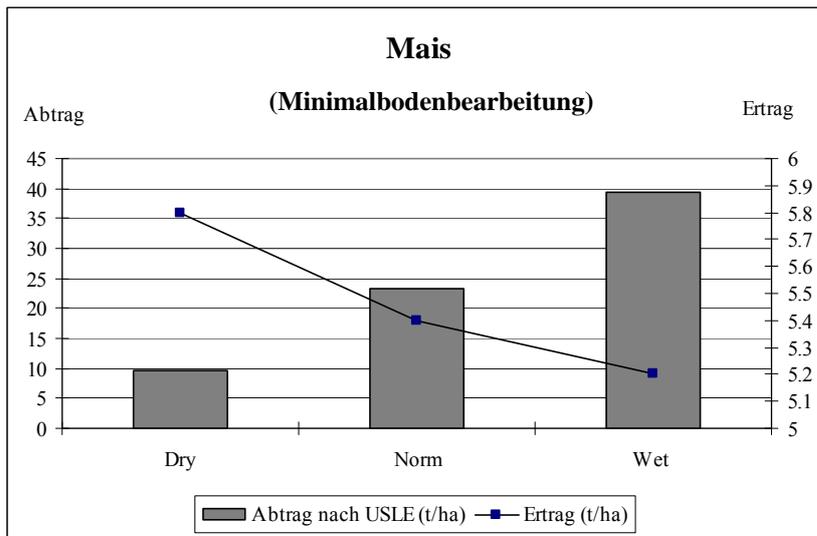


Abbildung 4-29: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Fruchtertrag von Mais im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem normalen und einem eher wenig erosiven Jahr. Ein nochmaliger sprunghafter Anstieg zeigt sich zwischen einem normalen und einem überdurchschnittlich feuchten Jahr.

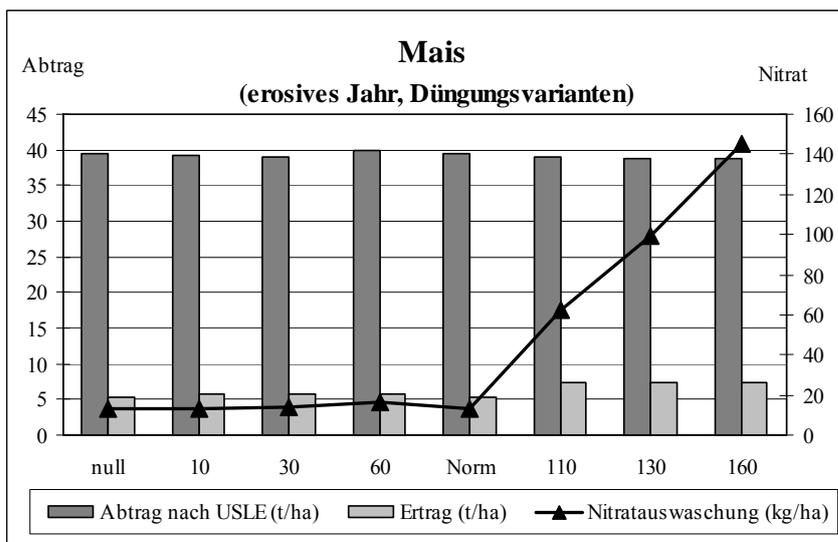


Abbildung 4-30: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben sowie der damit verbundenen Nitratauswaschung bei Mais im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

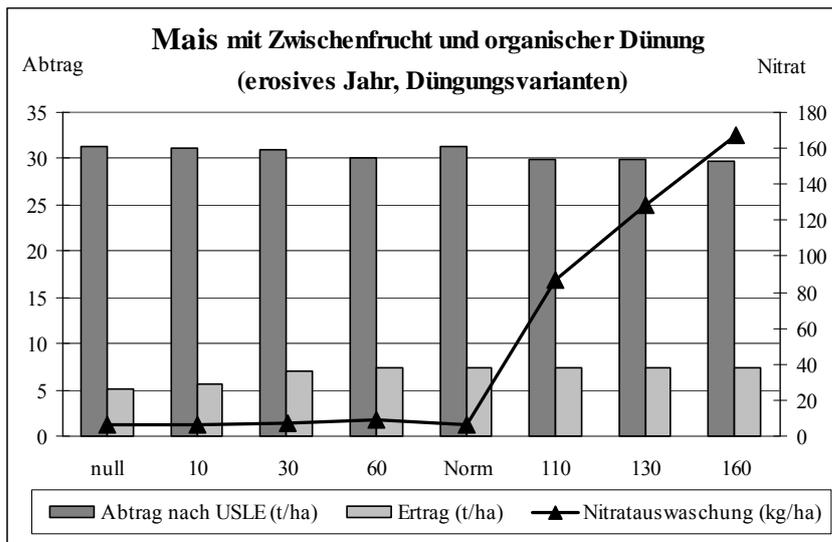


Abbildung 4-31: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag von Mais während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben sowie der damit verbundenen Nitratauswaschung mit Zwischenfrucht im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

Weizen

Weizen weist im Vergleich der Abtragswerte von wenig bis stark erosivem Jahr in etwa die gleichen Werte auf wie Gerste. Der Ertrag geht im erosiven Jahr im Vergleich mit dem normalen Jahr leicht zurück (Abb. 4-32). In Abbildung 4-33 zeigt sich ein leichter Rückgang des Erosionsverhaltens mit zunehmender Düngergabe. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass ein etwas schnelleres Wachstum durch zusätzlichen Dünger gefördert werden kann und somit der Bodenbedeckungsgrad höher ist, was sich wiederum günstig auf das Erosionsverhalten auswirkt. Allerdings führen auch hier die höheren Düngergaben zu einem deutlichen Anstieg der Nitratauswaschung von 50 kg/ha bei Normdüngung auf 120 kg/ha bei 60 % über Normdüngung.

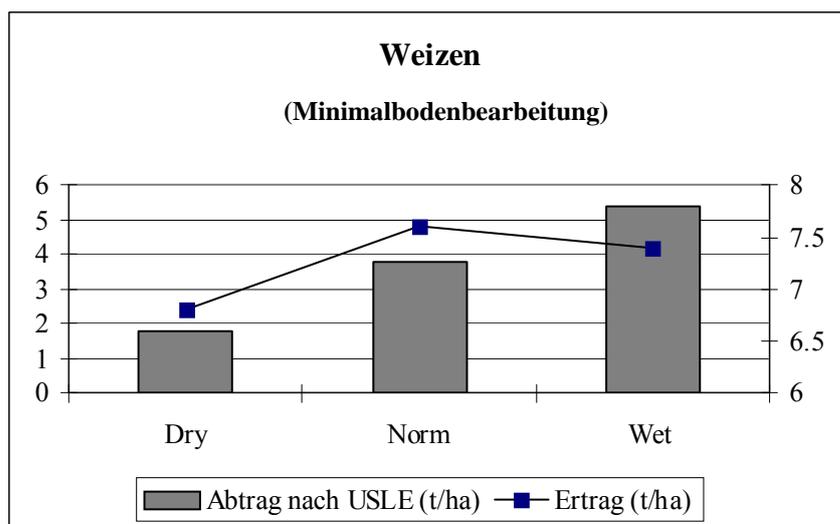


Abbildung 4-32: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr und entsprechendem Fruchtertrag von Weizen im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem normalen und einem eher wenig erosiven Jahr. Ein nochmaliger kleiner Anstieg zeigt sich zwischen einem normalen und einem überdurchschnittlich feuchtem Jahr.

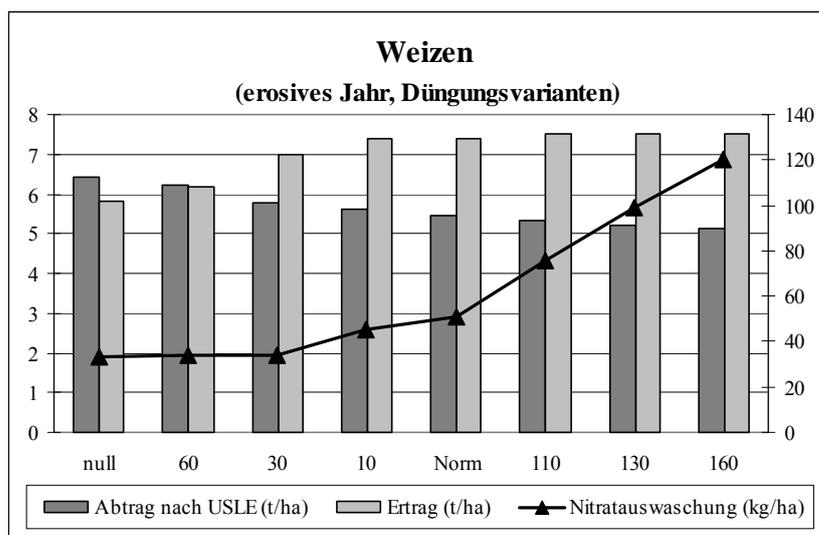


Abbildung 4-33: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag von Weizen während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben und die damit verbundene Nitratauswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

Hafer

Der Hafer weist ein etwas anderes Abtragsverhalten als die Getreidesorten Gerste und Weizen auf (Abb. 4-34). Einem sprunghaften Anstieg der Abtragsrate vom wenig erosivem zum normalem Jahr folgte eine leichte Abnahme des Bodenabtrags beim erosivem Jahr. Gleichzeitig führt die bessere Wasserversorgung im stark erosiven Jahr zu einem schnelle-

ren Wachstum, was sich in einem leicht erhöhten Ertrag auswirkt. Erhöhte Düngergaben können in einem erosiven Jahr den Bodenabtrag vermindern, allerdings führt auch beim Hafer die zusätzliche Düngergabe zu einer Erhöhung der Nitratauswaschung (Abb. 4-35).

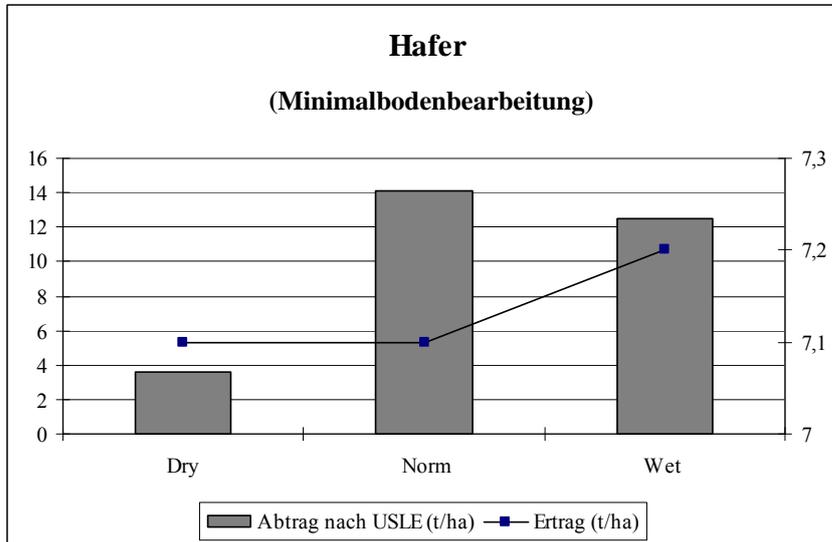


Abbildung 4-34: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Fruchtertrag von Hafer im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein sprunghafter Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem normalen und einem eher wenig erosiven Jahr. Im Gegensatz zu den anderen im Modell simulierten Getreidesorten kommt es beim Hafer in einem eher erosiven Jahr zu einem leichten Rückgang des Bodenabtrages.

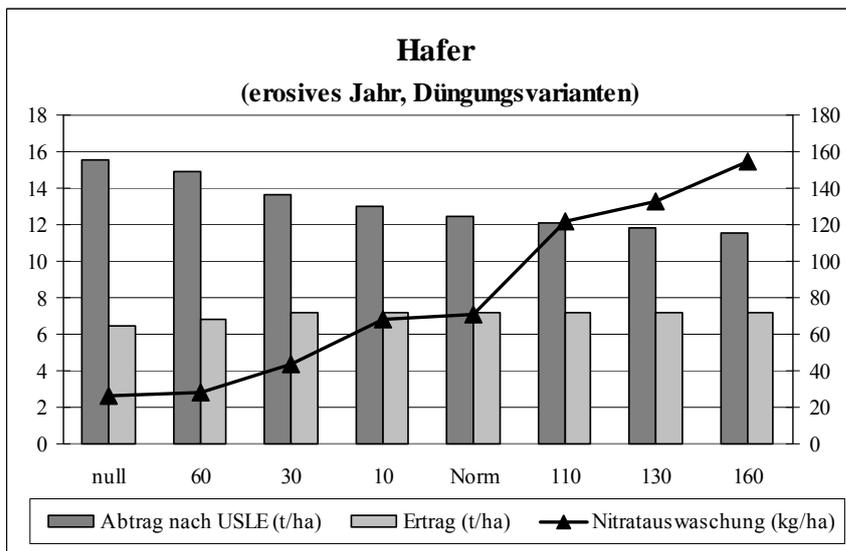


Abbildung 4-35: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag von Hafer während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit verschiedener Düngergaben sowie der damit verbundenen Nitratauswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

Kunstwiese

Abbildung 4-36 zeigt den Verlauf des Abtragsverhaltens bei Kunstwiese. Allgemein sind die Abtragsraten im Vergleich mit den Getreidesorten und Mais sehr niedrig. Das wenig erosive Jahr weist fast keinen Bodenabtrag auf. Zu einem sprunghaften Anstieg kommt es bei einem normal erosiven Jahr. Der Abtrag bleibt dann konstant und erhöht sich nicht im stark erosiven Jahr. Der Ertrag bleibt in etwa über alle drei Erosionsstufen gleich.

Die Düngung hat keinen Einfluss auf das Abtragsverhalten, während der Ertrag durch Düngegaben von 10 t/ha bis auf 15 t/ha gesteigert werden kann. Auch bei der Kunstwiese führen erhöhte Düngungsgaben zu einer stark ansteigenden Nitratauswaschung von 30 kg/ha bis auf 120 kg/ha (Abb. 4-37).

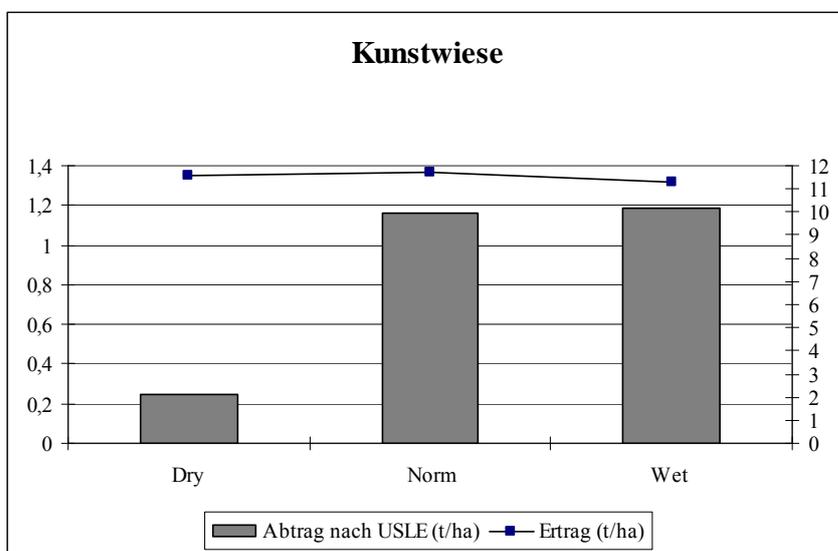


Abbildung 4-36: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Ertrag von Kunstwiese im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein sprunghafter prozentualer Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem normalen und einem eher wenig erosiven Jahr, der aber in absoluten Zahlen nur sehr gering ist. Das Abtragsverhalten bleibt zwischen dem normalen und dem erosiven Jahr nahezu konstant.

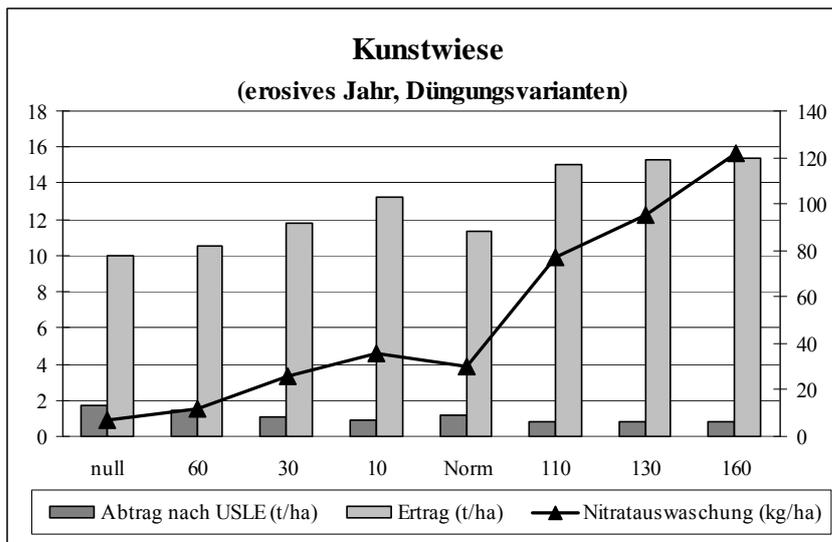


Abbildung 4-37: Bodenabtrag durch Wassererosion und Ertrag einer Kunstwiese während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit verschiedener Düngergaben sowie der damit verbundenen Nitrat auswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

Kartoffel

Die Kartoffel zeigt in Abbildung 4-38 einen nur minimalen Unterschied im Abtragsverhalten vom nicht erosivem zum normalen Jahr. Der deutliche Anstieg von 12 t/ha auf 24 t/ha Bodenabtrag bedeutet eine Verdoppelung vom normalen zum erosiven Jahr. Die Kartoffel erweist sich also auch als stark erosionsanfällig im Hinblick auf erosive Wetter- und Witterungsbedingungen. Der Ertrag bleibt nahezu konstant über alle drei Witterungsvarianten. Dasselbe Bild zeigt sich beim Ertrag in Abbildung 4-39: Zusätzliche Düngergaben bringen keine Ertragsvermehrung. Ein leichter Rückgang kann beim Abtragsverhalten beobachtet werden, allerdings auch hier wie bei praktisch allen Feldfrüchten mit dem Nachteil einer erhöhten Nitrat auswaschung, die von unter 50 kg/ha bis auf über 200 kg/ha hochschnellt.

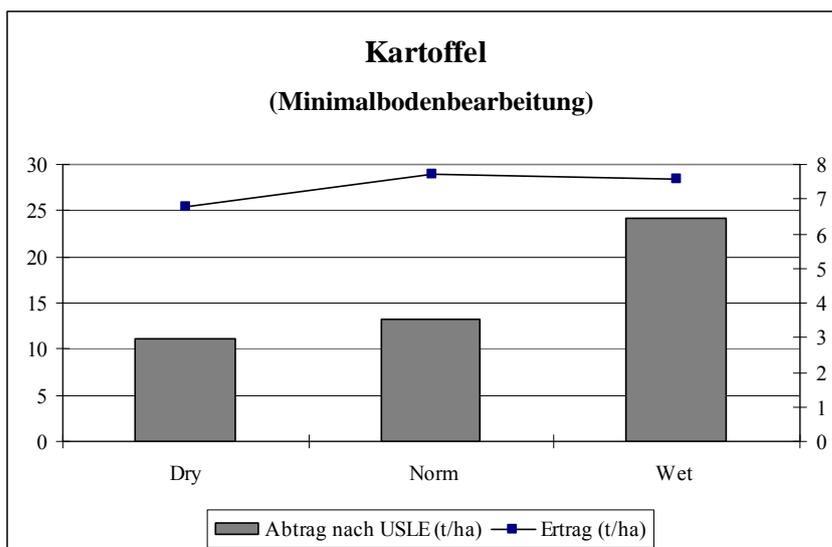


Abbildung 4-38: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Fruchtertrag von Kartoffeln im Einzugsgebiet des Länenbachtals. Es besteht ein sprunghafter Anstieg des Erosionsverhaltens zwischen einem normalen und einem stark erosiven Jahr.

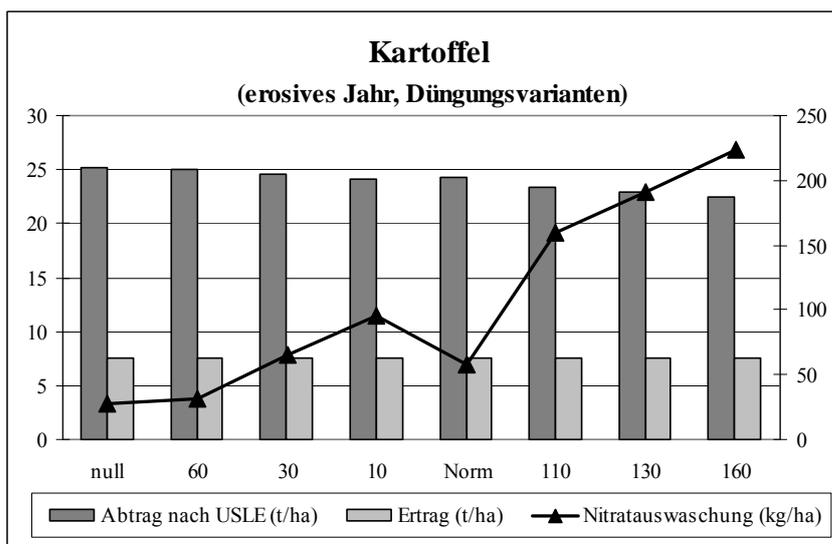


Abbildung 4-39: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag bei Kartoffeln während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben sowie der damit verbundenen Nitratauswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals.

4.2.3.2 Das Einzugsgebiet Baldeggersee

Das Einzugsgebiet des Baldeggersees diente in einer ersten Phase zur Anpassung des Modells EPIC an schweizerische Agrarverhältnisse und ermöglichte die Entwicklung der verschiedenen Auswertetools und Modelleingabeparameterfiles. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes mit der ETH Zürich (s. Kap. 3.2.3) ausgewertet und publiziert (SCHMID et al. 1997. In der vorliegenden Arbeit ist lediglich ein

Vergleich der Ergebnisse von Mais mit den Ergebnissen aus dem Länenbachtal dargestellt, um den Einfluss der unterschiedlichen Bodenparameter zu verdeutlichen.

Der Vergleich der Modellergebnisse von Mais in den beiden Einzugsgebieten zeigt zunächst beim Bodenabtrag bei allen drei simulierten Wettersituationen keine nennenswerten Unterschiede (Abb. 4-40). Einzig der Ertrag weist klare Unterschiede auf: Das EZG Baldeggensee weist aufgrund seiner Bodeneigenschaften klar höhere Erträge für Mais aus. Die Situation bei den Düngungsvarianten zeigt einen erheblichen Unterschied zwischen beiden Standorten, bei der Nitratauswaschung (Abb. 4-41). Während im EZG Länenbachtal ein sprunghafter Anstieg der Nitratauswaschung ab 10 % über Normdüngung stattfindet, kommt es im Baldeggenseegebiet zu einem kontinuierlichen Ansteigen der Auswaschung von der untersten Düngungsstufe an. Zudem sind die Auswaschungsmengen beim Baldeggenseegebiet erheblich höher und liegen im Maximum bei 250 kg/ha, während das Länenbacheinzugsgebiet lediglich 140 kg/ha Nitratverlust im Maximum aufweist.

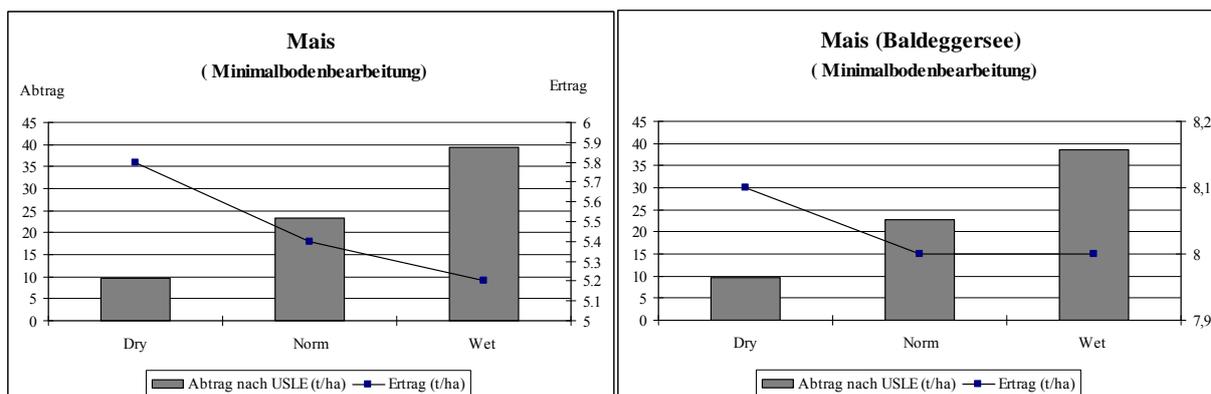


Abbildung 4-40: Bodenabtrag durch Wassererosion für ein durchschnittlich trockenes, normales und feuchtes Jahr bei entsprechendem Fruchtertrag von Mais im Einzugsgebiet des Länenbachtals (links) und des Baldeggenseeeinzugsgebietes (rechts). Der Vergleich der beiden mit EPIC simulierten Einzugsgebiete zeigt keine grossen Unterschiede beim Abtragsverhalten.

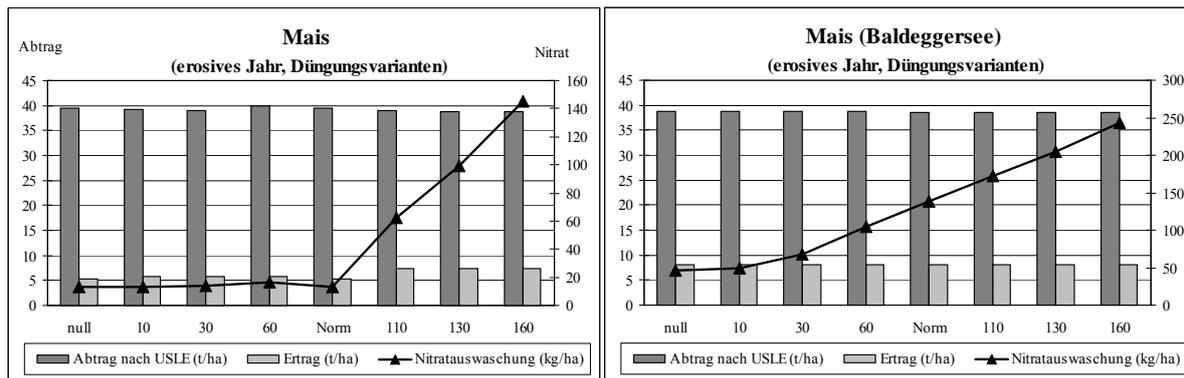


Abbildung 4-41: Bodenabtrag durch Wassererosion und Fruchtertrag von Mais während eines überdurchschnittlich feuchten Jahres in Abhängigkeit von verschiedenen Düngergaben sowie die damit verbundene Nitratauswaschung im Einzugsgebiet des Länenbachtals (links) und Baldeggereeseinzugsgebiet (rechts).

4.2.4 Visualisierung als Partizipationsinstrument

4.2.4.1 Visualisierung von Erosionsereignissen und berechneten Fließpfaden

Mit Hilfe der 3D-Visualisierungssoftware *3D-Nature Studio* wurde zunächst das Länenbachtal ohne Erosionsereignisse dargestellt. Die Landnutzung entspricht einer mittleren langjährigen Landnutzung, wie sie durch die langjährigen Kartierungen im Einzugsgebiet belegt wurde.

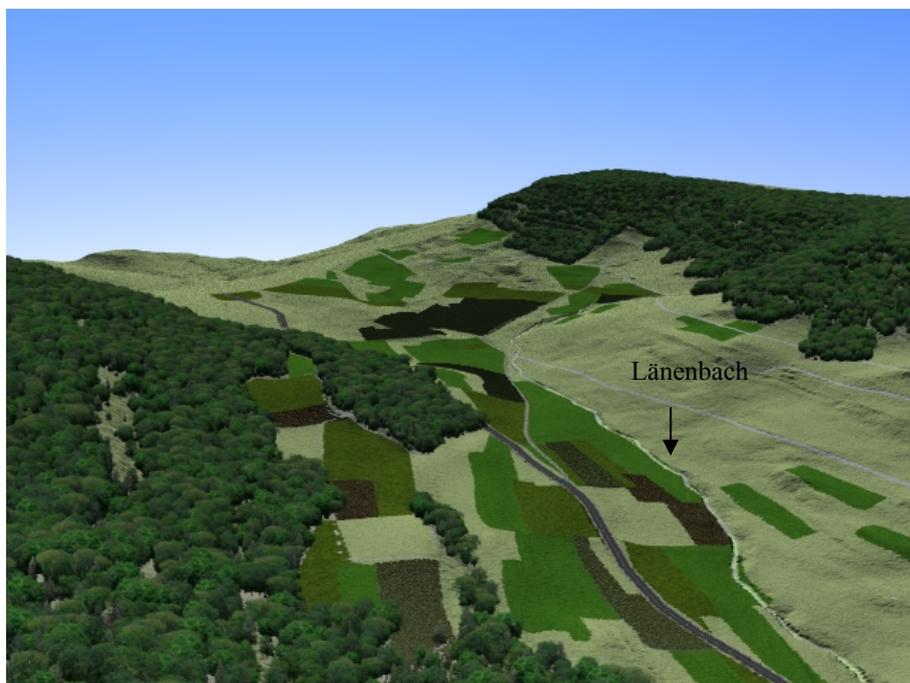


Abbildung 4-42: Das Länenbachtal in einer 3D-Darstellung mit Texturen. Blick nach Nordwesten. In der Tiefenlinie ist der Länenbach zu sehen. Es wurde eine durchschnittliche typische Frühsommervegetation visualisiert.

Durch die 3D-Software lässt sich jeder beliebige Blickwinkel und Zoomfaktor für das Einzugsgebiet darstellen. Abb. 4-43 zeigt nun einen Ausschnitt aus dem mittleren Teil des Einzugsgebietes mit Blick nach Nordwesten. Sehr gut zu erkennen sind die durch die Reliefanalyse (siehe Kap. 3.2.1) berechneten Fließpfade des Oberflächenabflusses. Immer wieder reichen die Fließpfade bis in das Bachbett. Die potentiellen Übertrittsstellen können also sehr deutlich dargestellt werden. Eine weitere Visualisierung (Abb. 4-44) zeigt die langjährige real im Feld gemessenen Erosionsrinnen in ihrer Summe. Auf diese Weise kann das Ausmass der tatsächlichen im Gebiete über die Jahre immer wieder vorkommenden Erosionsschäden sichtbar gemacht werden.

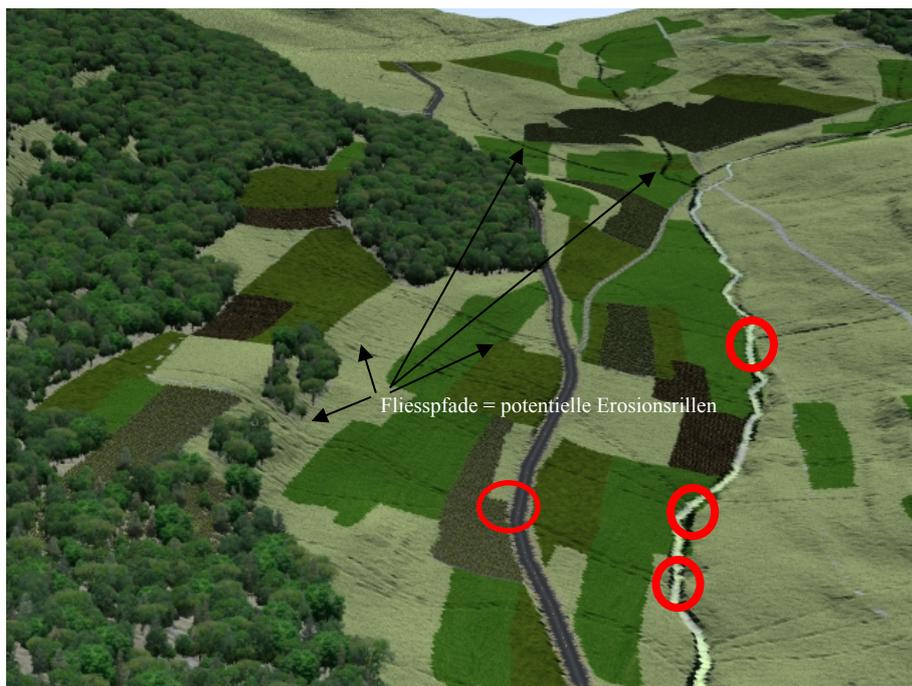


Abbildung 4-43: Das Länenbachtal in 3D-Visualisierung. Die durch die Reliefanalyse berechneten Fließpfade wurden hier als Tiefenlinien im Relief dargestellt. Die potentiellen Übertrittsstellen in den Länenbach sind sehr gut sichtbar. Auch die Übertritte auf das Strassen- und Wegenetz können auf diese Weise sehr gut sichtbar gemacht werden.

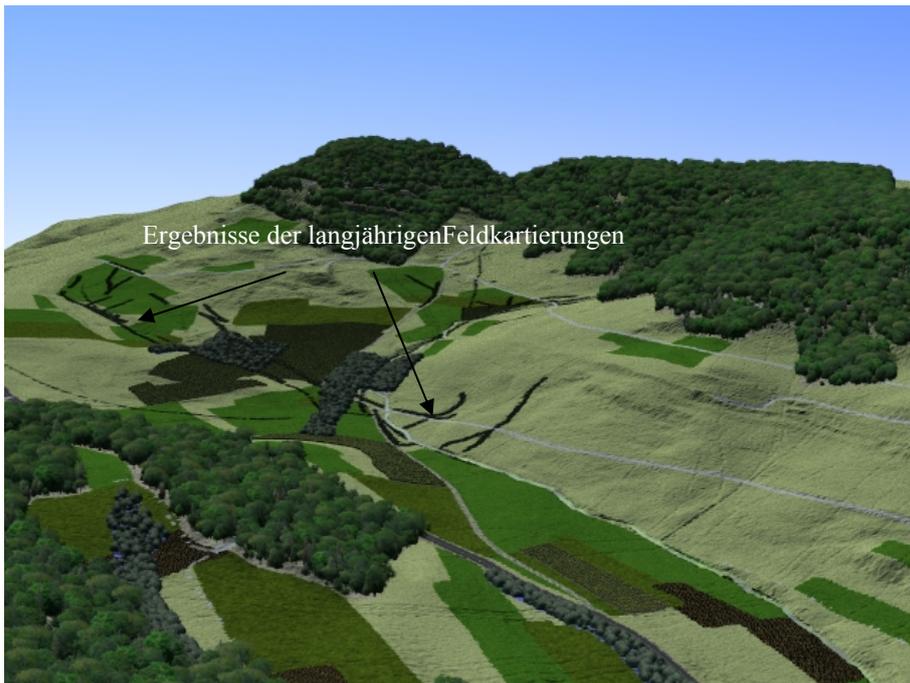


Abbildung 4-44: Das Länenbachtal in 3D-Visualisierung. In diesem Bild wurden die aus den langjährigen Feldkartierungen resultierenden linienhaften Erosionsformen sichtbar gemacht. Damit gewinnt man einen guten Überblick über die tatsächliche Lage der Erosionsrillen im Gebiet.

4.2.4.2 Visualisierung von Planungsvarianten für eine nachhaltige Landnutzung

Ausgehend von den Ergebnissen der Reliefanalyse und des ESSEM-Modells sowie den Felderhebungen wurden kritische Abtrags- und Übertrittsstellen mit Retentionselementen versehen, z.B. Hecken und Hochstaudenfluren, einschliesslich der Übertritte von Feststoffmaterial auf das Strassen- und Wegenetz. All dies wurde anschliessend in 3D visualisiert. Ziel dieser Massnahmen ist eine maximale Reduktion von Feststoffeintrag in den Vorfluter. So gesehen stellt das Visualisierungsergebnis eine landschaftsplanerische Massnahme dar, die mit kleinen gezielten Eingriffen auskommt, ohne auf eine grundlegende Nutzungsänderung abzielen.

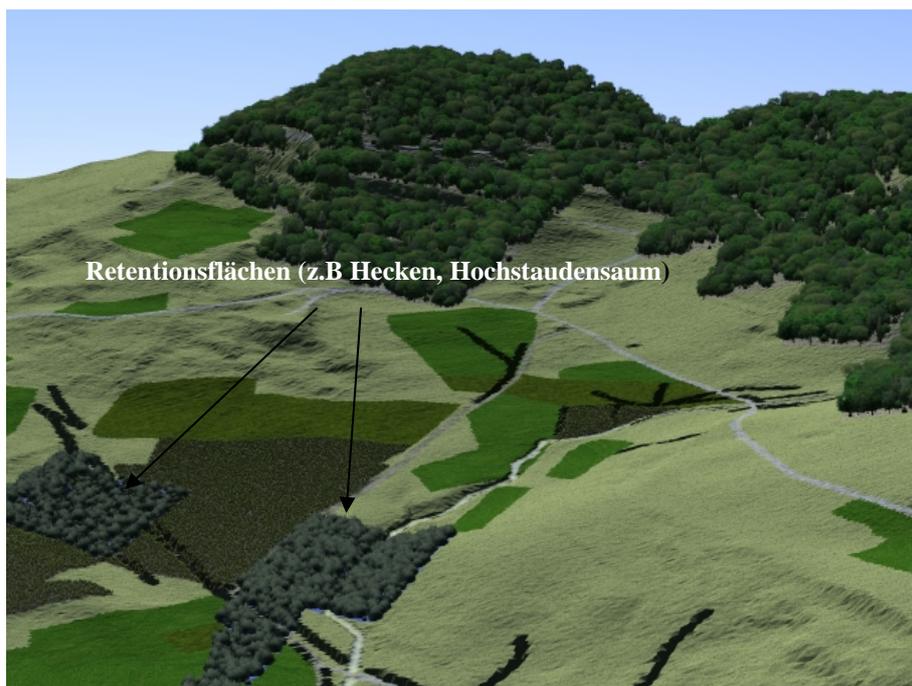


Abbildung 4-45: Ausschnitt des Länenbachtal in 3D-Visualisierung: Erosionsschutzmassnahmen und Renaturierungsflächen. Es wurden sowohl auf den Ackerflächen selber als auch um den Länenbach Retentionsflächen simuliert die zum einen den Weitertransport von Erosionsmaterial auf den Ackerschlügen (on-site Schäden) eindämmen und die zum anderen verhindern, dass Abtragsmaterial in den Vorfluter gelangt (off-site Schäden). Zur Veranschaulichung der Zweckmässigkeit der Vorschläge wurden hier die im Feld gemessenen Erosionslinien dargestellt.

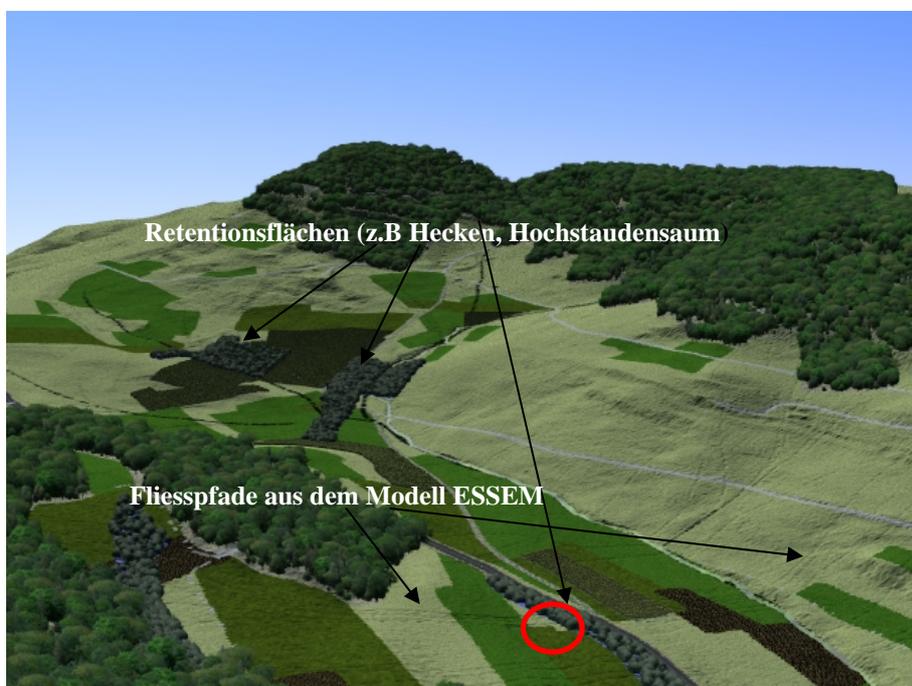


Abbildung 4-46: Ausschnitt des Länenbachtal in 3D-Visualisierung: Erosionsschutzmassnahmen und Renaturierungsflächen. Die Abbildung zeigt im Vergleich mit Abb. 4-45 einen grösseren Ausschnitt und einen Retentionssaum entlang der Strasse. Hier wurden die potentiellen Fließspfade des ESSEM-Modells eingesetzt.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Arbeitshypothesen

Hypothese 1:

Durch Anwenden eines ereignisbezogenen Einzugsgebietsmodells für Extremereignisse der letzten 15 Jahre in einem langjährigen Untersuchungsgebiet (Riedmattbachtal, 1.1 km²) im Schweizerischen Tafeljura lässt sich der Einfluss eines Nutzungswandels realitätsnah simulieren.

Der Einsatz von E3D eignet sich für die Anwendung von Extremereignissen im Einzugsgebiet des Riedmattbachtals. Die für die Anpassung des Modells zuerst verwendete 2D-Variante zeigte, dass eine zufrieden stellende Anwendung des Modells nur bei sehr klaren Rahmenbedingungen (Anfangsbodenfeuchte, Niederschlagsintensität) möglich ist. Eine Anwendung auf Einzugsgebietsebene erfolgte für wenige gemessene Extremereignisse. Diese dienten als Grundlage für die Kalibrierung des Modells. Die Anwendung zur Simulation des Nutzungswandels konnte aus den in Kap. 4.2.2.2 erwähnten Gründen nicht erfolgen. Insofern kann die Hypothese 1 nicht mit Sicherheit verifiziert werden. Aufgrund der Erfahrungen mit dem Modell in anderen Projekten des Geographischen Institutes und den in dieser Arbeit durchgeführten wenigen Simulationen lässt sich jedoch immerhin vermuten, dass die Vorhersage des Einflusses des Nutzungswandel auf das Erosionsverhalten durch das Model wiedergegeben werden kann.

Hypothese 2:

Die Ausgangsbedingungen (Anfangsbodenfeuchte, Bodenaggregatzustand, Bodenbedeckung) bei extremen Abtragsereignissen spielen eine entscheidende Rolle für die Anwendung von physikalisch-mathematischen Modellen. Im vorliegenden Fall des Modells E3D wird die Ausgangsbodenfeuchte als entscheidender Faktor für die Kalibrierung vermutet.

Die Hypothese 2 kann mit Ja beantwortet werden. Die Anfangsbodenfeuchte spielt im Modell eine entscheidende Rolle. Dies zeigte sich in der Kalibrierung des Modellparameters in Kap. 4.2.2.1. Selbst kleine Unterschiede bei den Werten der Ausgangsbodenfeuchte von 1-2 % wirken sich extrem auf die simulierten Abflüsse und Abtragsbeträge aus. Somit kann die Anfangsbodenfeuchte als entscheidender Faktor für die Modellanwendung angesehen werden. Da diese aber oft nur sehr schwer abzuschätzen ist, müssen Modellergebnisse immer kritisch hinterfragt werden.

Hypothese 3:

Es lässt sich mit GIS-Techniken (digitale Reliefanalyse, gewichtete Overlayfunktionen) ein einfaches Modell erstellen, welches das Gebietsverhalten von Extremniederschlagsereignissen in kleinen Einzugsgebieten (chorischen Dimension) in Abhängigkeit von deren naturräumlichen Ausstattung gut widerspiegelt.

Die heute als Standardtechniken in den meisten Geographischen Informationssystemen zur Verfügung stehenden Funktionen reichen aus, um in einem einfachen, gewichteten empirisch-statistischen Modell das Gebietsverhalten für Extremniederschlagsereignisse zu berechnen. Der Einfluss des Strassen- und Wegenetzes kann durch dessen Einbindung in das Modell klar gezeigt werden (s. Kap. 4.2.1.2).

Hypothese 4:

Der Vergleich der mit GIS-Techniken modellierten Fliesspfade, Übertrittsstellen und des Schadensbildes auf den Ackerschlägen zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den langjährigen Erosionsschadenskartierungen im Gelände.

Der Vergleich der mit dem Modell ESSEM modellierten Übertrittsstellen deckt sich sehr gut mit dem Schadensbild, welches aus langjähriger Feldkartierungen generiert wurde (Abb. 4-24). Weiterhin besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen den modellierten Fliesspfaden und den real existierenden linearen Erosionsformen im Feld. Selbst die Klassierung der modellierten Übertrittsstellen mit den im Feld gemachten Aufnahmen zeigt eine hohe Übereinstimmung (Abb. 4-24).

Hypothese 5:

Durch den Einsatz amtlicher digitaler Datensätze kann der Einsatz des Modells in der Praxis erleichtert werden.

Der Einsatz amtlicher digitaler Daten ist die Voraussetzung für eine praktikable, schnell durchzuführende und wirtschaftliche Anwendung eines einfachen GIS-Modells. Durch die Verwendung des offiziellen Vector25 (Swisstopo)-Datensatzes lässt sich der für das Erosionsverhalten wichtige, weil regelnde Einfluss des Strassen- und Wegenetzes sehr gut abbilden (Abb. 4-20). Zudem stellt das digitale Höhenmodell DHM25 im gewählten Untersuchungsmaßstab 1:5'000 bis 1:25'000 eine geeignete Datengrundlage mit genügend hoher Auflösung dafür dar, die Fliesspfade und die damit verbundenen Übertrittsstellen zu extrahieren.

Hypothese 6:

Ein Vergleich der unterschiedlichen Modellansätze belegt für die einfachen GIS-gestützten Modellansätze eine höhere Praxistauglichkeit.

Die Hypothese kann aus arbeitsökonomischer Perspektive und aus Sicht der Ressourcen mit Ja beantwortet werden. Durch die Verwendung von amtlichen Datensätzen und das Zurückgreifen auf Standard-GIS-Funktionen entfällt ein aufwändiges Erheben der Eingangsparameter wie es für die mathematisch-physikalischen Modelle nötig ist. GIS-Systeme stehen heute auch der Planungspraxis in grossem Umfang zur Verfügung. Sie erlauben mit einem einfachen Modellansatz in wesentlich kürzerer Zeit als bisher effektivere erosionsmindernde und für die kulturlandschaftliche Umgestaltung eines Anbaugebietes relevante Massnahmen abzuleiten.

Hypothese 7:

Das einfache GIS-gestützte Modell ESSEM stellt ein praxistaugliches Instrument für eine erosionsmindernde und damit nachhaltige Bodennutzung dar.

Das Modell ESSEM eignet sich wegen der Überprüfung durch in langjährigen Messungen gewonnenen Felddaten, als einfaches Vorhersagemodell für die Planungspraxis. Die Verfügbarkeit von amtlichen Daten, die einfachen Überlagerungstechniken und die Standard-GIS-Funktionen, die Verwendung finden, sprechen für seine Einsatzfähigkeit. Gerade für ein schnelles Abschätzen von Übertrittstellen bei Gewässerrenaturierungen und Extensivierungen im Landwirtschaftsgebiet stellt das Modell kurzfristig eine sichere Planungsgrundlage bereit.

Hypothese 8:

Die Vielfalt praktischer Fragestellungen in Landschaftsplanung, Gewässer- und Bodenschutz erfordert, wegen der verschiedenen problembedingten Dimensionen von Ansatz und Methode, ein breites Modellangebot.

In der Praxis werden im Umgang mit Bodenerosion und Gewässerverschmutzung verschiedene Ansätze verfolgt. Geht es um die Verhinderung von Bodenabtrag auf der Parzelle selber (on site-Schäden), so eignen sich Modelle wie E3D oder auch das von D. DRÄYER entwickelte GVEM BS für die Abschätzung des Abtrags unter speziellen Ausgangsbedingungen oder auf langjährigen Fruchtfolgeflächen. Für die Abschätzung langjähriger Bodenverluste unter verschiedenen Feldfrüchten eignet sich vor allem das Modell EPIC (wie es in dieser Arbeit angewendet wurde). Geht es um die landeskulturelle Gesamtplanung eines landwirtschaftlichen Einzugsgebiets, kommt eher ein Modell wie das in der vorliegenden Arbeit entwickelte ESSEM in Frage, z.B. um Renaturierungsmassnahmen zu planen

oder um die neuralgischen Übertrittstellen der Stoffe in das Gewässer zu erfassen. Somit kann die Hypothese aus wissenschaftlicher Sicht angenommen werden.

Hypothese 9:

Die Visualisierungen von Zukunftsszenarien des Landschaftsbildes und der Landschaftsfunktionen unter Berücksichtigung der durch das ESSEM-Modell gelieferten Ergebnisse fördern den partizipativen Prozess der Landschaftsplanung.

Diese Hypothese lässt sich zum Teil verifizieren. In erster Linie eignen sich 3D-Visualisierungen, um modellierte Erosionsereignisse und auch Planungsvarianten anschaulich darzustellen. Diese Methode ergänzt somit die reine 2D-Kartographie sehr gut. Für die Beurteilung als Partizipationsinstrument bedürfte es konkreter landschaftsplanerischer Massnahmen, die mit Hilfe der 3D-Visualisierung bei den beteiligten Akteuren in der Landschaft einen partizipativen Prozess unterstützen würden. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Basel, die vom Autor initiiert wurde (MEIER, R. 2006), konnte ein solcher Partizipationsprozess für eine Pachtlandarrondierung mit genau der gleichen 3D-Visualisierung durchgeführt werden. Die Ergebnisse deuteten auf einen stark positiven Einfluss von 3D-Landschaftsbildern auf den Partizipationsprozess hin. Eine solche konkrete Umsetzung wurde in der hier vorliegenden Arbeit nicht angegangen weil sie den Rahmen des Projektes gesprengt hätte. Es lässt sich jedoch vermuten, dass die Methode in einem partizipativen Prozess positive Effekte für das Verständnis für jene Planungsvarianten bewirkt, die das Abtragsverhalten positiv beeinflussen sollen.

5.2 Vergleich der verschiedenen Modellansätze

Erosion ist weltweit die grösste Ursache für die Gefährdung der Böden. Der Abtrag lässt sich, wie gezeigt, im Feld direkt messen, wobei aber die Messung oft langwierig und durch Extremereignisse geprägt ist. Da Bodenerosion viele Aspekte aufweist, wurden viele, aber sehr unterschiedlich gebaute Modelle entwickelt. Die in dieser Arbeit angewendeten Modelle spiegeln diese verschiedenen Aspekte und Sichtweisen wieder. Nach wie vor ist die USLE (STUMPF & AUERSWALD 2006) das gebräuchlichste Modell. Die grosse Zahl ihrer Verwendung darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass sie über zahlreiche Schwächen im Ansatz, aber auch in der Anwendung verfügt.

Die im letzten Jahrzehnt entwickelten Modelle, die in unterschiedlichen Skalen und Naturräumen getestet wurden, haben als Hauptziel meist eine Vorhersagbarkeit von Bodenerosion bei Extremereignissen. Dabei wurden die Schwerpunkte des Interesses entweder auf Feststoffabtrag oder daran gebundene oder gelöste Nährstoffe gelegt. Das Problem der Gewässereutrophierung stand also im Vordergrund. Wobei die diffusen Einträge von Phosphor als eine der Hauptquellen für die Eutrophierung der Gewässer in den Vordergrund rückte. Gerade das partikulär gebundene Phosphat stellt dabei die Hauptkomponente für die Belastung der Gewässersysteme dar (HALBFASS & GRUNDEWALD 2006).

Die in der vorliegenden Arbeit behandelten Modellansätze verfolgen unterschiedliche Ziele. Sie können, was Ihre Aussagequalitäten bezogen auf einen bestimmten Prozess oder in einer bestimmten Dimension betrifft, somit nicht miteinander verglichen werden. Der Vergleich erfolgt vielmehr auf der Ebene der unterschiedlichen Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit.

Die in dieser Arbeit verwendeten drei Modellansätze beziehen sich auf unterschiedliche Anwendungsskalen und auch auf unterschiedliche zeitliche Dimensionen. Während es beim Modell E2/3D darum geht, in der chorischen Dimension eine möglichst genaue Vorhersagbarkeit von Bodenerosion nach Menge und Lokalität *in kleinen bis mittleren Einzugesgebieten* zu erzielen, geht es beim Modell EPIC um eine langfristige Vorhersagbarkeit *auf Einzelhängen* unter bestimmten Fruchtfolgen und Düngegaben und eine hohe Anzahl an verschiedensten stoffhaushaltlichen Parametern. Das dritte in dieser Arbeit eingesetzte Modell hingegen hebt weniger stark auf das Schadensbild oder die Quantifizierung von einzelnen stoffhaushaltlichen Parametern ab, sondern zielt auf die *Reichweiten der Erosionsprozesse* und damit auf die für die Gewässereutrophierung neuralgischen Eintragspfade bzw. Übertrittstellen. Dabei wird von einem bereits am Geographischen Institut Basel (DRÄYER 1996) entwickelten Ansatz ausgegangen, der die Identifizierung von signifikanten potentiellen Herkunftsflächen für die Sedimenteinträge zum Ziel hatte.

5.2.1 Skalenproblematik

Abbildung 5-1 zeigt die gegenseitige Zuordnung der in dieser Arbeit eingesetzten Modelle und vergleicht sie mit anderen häufig eingesetzten Erosionsmodellen. Die Modelle wurden nach ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung eingeordnet. - Ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Wahl eines Modells spielt die Anwendbarkeit in der Planungspraxis und die gewünschte Modellgenauigkeit. Wünscht man eine exakte Prozessbeschreibung, wie sie z.B. mit physikalischen Erosionsmodellen - etwa E3D - möglich ist, erfordert dies einen hohen Parametrisierungsaufwand und bedingt für die Anwendung in der Planungspraxis eine intensive Einarbeitung. Das einfache, aus einem Komponentengleichungssystem bestehende Modell ESSEM hingegen versucht, jene Lücke, die sich zwischen einer extremen Generalisierung einerseits und der Einbindung von Prozessen (die durch einfache Standard-Reliefanalysetools abgeleitet werden können) andererseits zu schliessen.

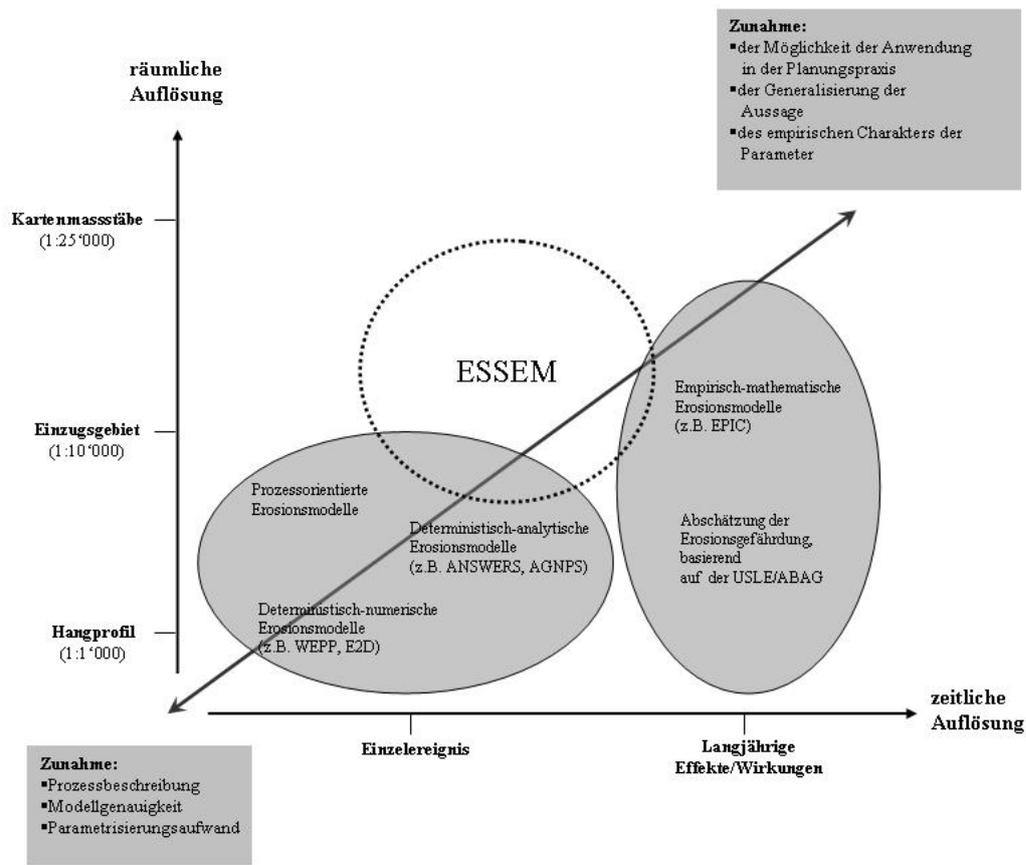


Abbildung 5-1: Verschiedene Modellansätze und ihre zeitliche und räumlichen Auflösung. Das Modell ESSEM versucht, die Lücke zwischen Modellgenauigkeit und hohem Parametrisierungsaufwand einerseits und generalisierendem Planungstool mit hohem Anwendungsbezug andererseits zu schliessen.

5.2.2 Einfluss ausgewählter Parameter auf die Modellergebnisse

Strassen- und Wegenetz

Neben vielen Faktoren kommt im Stoffhaushalt der Landschaft den linearen Raumstrukturen (Strassen, Wege, Uferrandstreifen etc.) eine entscheidende Rolle für den Transport und die Verlagerung von gelösten und partikulär gebundenen Stoffen zu (HALBFASS & GRUNDEWALD 2006). Dieser Einfluss des Wegenetzes zeigt sich sehr deutlich beim Modell ESSEM. Bisher wurde der Einfluss der Wege in der Agrarlandschaft kaum beachtet (JOHANNES 1999). Einige Untersuchungen zur Bedeutung landwirtschaftlicher Wege für den Gewässerschutz wurden in Deutschland in den 80er Jahren angestellt. Zum Beispiel zeigen Untersuchungen von JOHANNES (1999), dass beim Abtrag von den Wegen sich je nach Wegetyp, Regendauer und Niederschlagsintensität Unterschiede zeigen. Auch bei der Forschung der FBB konnte der Einfluss des Wegenetzes auf die Lenkung des abgelösten Bodenmaterials eindeutig festgestellt und in zahlreichen Erosionskartierungen nach Extremniederschlagsereignissen nachgewiesen werden.

Landnutzungsänderungen

Seit einigen Jahren werden auf Basis von GIS-gestützten Modellierungen die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den landschaftlichen Wasser- und Stoffhaushalt abgeschätzt (VOLK et al. 2001). Eine dieser angewendeten Modelle ist nach wie vor die USLE bzw. die ABAG. Und auch hier zeigte sich, dass die unterschiedliche Gewichtung einzelner Eingabeparameter einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann, so dass VOLK et al. (2001) empfehlen, einzelne Faktoren an naturräumlich unterschiedlichen Bedingungen der landschaftlich verschieden gestalteten Teilräume Europas anzupassen. Die Modellergebnisse von E3D spiegeln die hohen Einflüsse von Landnutzungsänderungen wieder.

Düngerinputs

Die im Modell EPIC eingesetzten Düngerinputs zeigen klar, dass durch erhöhte Düngergaben unter bestimmten Bodenbedingungen und bei einigen Feldfrüchten eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit erreicht werden kann, was sich in höheren Erträgen widerspiegelt. Diese Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit geht jedoch zu Lasten erhöhter Auswaschung von Nährstoffen und damit wiederum der Erhöhung der Gewässerverschmutzung (s. Kap. 4.2.3). Die Modellergebnisse unterstreichen damit die These, dass ein Optimum an Erträgen zugleich eine Belastung für Boden und Gewässer bedeutet. Das Modell liefert demnach eine Entscheidungsgrundlage für den Düngereinsatz bei nachhaltiger und gewässerschonender Bewirtschaftung. Die Nachteile erhöhter Bodenfruchtbarkeit liegen auf der Hand. Gesteigerte Bodenfruchtbarkeit bedeutet hohe Nitratausträge in Grundwasser und Oberflächengewässer und letztlich Eutrophierung der Meere, und zugleich Phosphatabschwemmung über Erosion in die Gewässer. Gerade bei den Feldfrüchten mit kurzen Vegetationszeiten, wie z.B. bei Mais und bei Kartoffeln, stellt die Wassererosion den Haupt

austragspfad für Phosphat dar. Über 40 % der Gesamtphosphatgehalte der Vorfluter stammen aus der Landwirtschaft (SCHEFFER 2003).

5.3 Eignung der Modelle als Planungsinstrument in der Praxis

5.3.1 Praxistauglichkeit

Das Modell EPIC zählt zu jenen Erosionsmodellen, die neben den Abtragsraten auch eine Vielzahl von stoffhaushaltlichen und wasserhaushaltlichen Parametern berechnen. Inzwischen existiert eine ganze Reihe ähnlicher Modelle, um diffuse Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer abzuschätzen. Vergleicht man die Modelle miteinander, so zeigt sich, dass es noch erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren gibt, insbesondere bezüglich der erforderlichen Eingabeparameter und vor allem im Hinblick auf die Praxistauglichkeit. In einer Arbeit von ROBRECHT et al. (2007) werden verschiedene Modelle auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht.

EPIC erweist sich als praktikables Modell für die Abschätzung des Einflusses von unterschiedlichen Düngergaben auf die Bodenerosion und vor allem den N-Verlust. Somit lassen sich durch den Einsatz von EPIC Ergebnisse erzielen, die zu Düngeempfehlungen führen, die ansonsten durch messbasierte Verfahren im Feld erbracht werden müssten. Mittlerweile sind einige solcher Modellansätze zur Optimierung einer effizienteren N-Düngung im Einsatz (z.B. das N-Modell HERMES; KERSEBAUM et al. 2007).

Das Modell E3D wird in z.B. in Sachsen flächendeckend als Vorhersageinstrument auf Einzugsgebietsebene eingesetzt. Dies bedingt allerdings einen hohen Schulungsaufwand und eine Vertrautheit der beauftragten Planungsbüros mit den spezifischen Modellparametern, was die Eignung für die Praxis bereits wieder einschränken kann.

Wie in der Diskussion der Arbeitshypothesen (Kap. 5.1) angedeutet wurde, eignen sich die in dieser Arbeit vorgeführten Modelle für unterschiedliche Skalen und für unterschiedliche Anwendungsfälle. Aus Sicht eines Planungsbüros, welches mit der Abschätzung des Erosionsrisikos in einem landwirtschaftlichen Einzugsgebiet betraut wird und Schutz- und Renaturierungsmassnahmen vorschlagen muss, kann nur ein einfaches GIS-gestütztes Abschätzungsverfahren, welches die Fliesspfade und Übertrittstellen darstellt, eingesetzt werden. Dies sind Erfahrungen, die der Autor selber in einem Planungsbüro, gemacht hat. Für die Umsetzung und vor allem für die Akzeptanz der vorgeschlagenen Massnahmen (Erosionsschutz, Extensivierung, Renaturierung) kommen nur jene Modelle in Frage, die in anschaulichen Karten Risiken aufzeigen können. Dies spricht ebenfalls für den Einsatz eines einfachen Ansatzes, wie er mit dem Modell ESSEM erarbeitet wurde.

5.3.2 Planungskarten und Visualisierung als Anwendungs- und Umsetzungsinstrument

Planungskarten müssen, wenn sie eine Akzeptanz bei den Akteuren in der Landschaft, vor allem bei den Landwirten, erzielen wollen, eine grosse Anschaulichkeit und einen hohen Generalisierungsgrad aufweisen. Dabei muss unbedingt berücksichtigt werden, dass die re-

alitätsgetreue 3D-Visualisierung von Landschaften hohe Anforderungen an die Rechnerleistungen stellt. Die in dieser Arbeit eingesetzte Software NATURE-Studio ist zum einen kostspielig in der Anschaffung und zum anderen bedarf es einer beträchtlichen Einarbeitungszeit um mit der Software die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse zu erzielen.

Grundvoraussetzung für eine gute Qualität ist nach wie vor ein hochaufgelöstes präzises Höhenmodell, das in einem entsprechenden d.h. von der Software geforderten Format vorliegen muss. Allein die Einbindung des Höhenmodells in die Softwarearchitektur erfordert einen hohen zeitlich und personellen Einsatz. Demzufolge kann die Landschaftsvisualisierung nur von Experten ausgeführt werden, die neben der Softwarekompetenz auch über ein grosses Verständnis für landschaftsrelevante Fragestellungen verfügen. Aus Praxissicht ist deshalb zu empfehlen, diese Arbeiten nicht vom Planer oder Erosionsmodellierer selber, sondern in Zusammenarbeit mit externen Experten (z.B. 3D-Experten) durchführen zu lassen. Dabei muss eine Kosten-Nutzen-Abwägung für den zu erwartenden Aufwand bei einem Visualisierungsvorhaben im Vordergrund stehen. Bei der Berücksichtigung dieser Faktoren reichen demzufolge in den meisten Fällen auch zweidimensionale landschaftsökologische Planungskarten aus.

5.3.3 Erosionsschutz als Landschaftsschutz

Erosionsschutz im weitesten Sinne ist als Landschaftsschutz zu verstehen, da Erosion einen erheblichen Einfluss auf den Landschaftshaushalt, damit auch auf die Landschaftsstruktur und somit auch auf das Landschaftsbild ausüben kann, wie es mit den in dieser Arbeit gezeigten Modellen und Feldaufnahmen gezeigt wurde.

So können beispielsweise über die Landnutzung die Abflussbildung und somit auch das Erosionsrisiko und der Stoffeintrag in die Vorfluter reduziert werden.

Nach AUERSWALD & SCHRÖDER (2001) sind dies vor allem:

- Fruchtfolgen und Anbautechniken, die einen ganzjährig hohen Bedeckungsgrad aufweisen.
- Anlagen von Grasstreifen in Tiefenlinien mit ganzjährig hohem Infiltrationsvermögen ohne Verschlämmung und bei gleichzeitiger Vermeidung bodenverdichtender Massnahmen.
- Diversifizierte Landnutzung, bei der sich die im Jahresverlauf wechselnden Abflussdispositionen verschiedener Kulturen gegenseitig kompensieren.

Durch eine nicht standortgerechte Bodennutzung und die damit verbundenen Probleme der Bodenerosion und der Gewässerverschmutzung gewinnen die Aspekte des Natur- und Umweltschutzes immer mehr an Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit der in dieser Arbeit angewendeten Modelle soll deshalb auch im Sinne einer Sensibilisierung für dieses Umweltproblem wahrgenommen werden. Die Problematik der Reichweiten von Erosionsprozessen mit den damit verbundenen Gewässerbelastungen soll verdeutlichen, dass sie in landwirtschaftlichen Entwicklungsprogrammen Berücksichtigung finden muss. Für den praktischen Erfolg ist es wichtig, dass die flächenbezogenen Agrarumweltmassnahmen auf wenige wirksame, zugleich leicht administrierbare Massnahmen beschränkt werden:

- Umwandlung von Acker in extensives Grünland
- Gewässerschonende Brachebewirtschaftung
- Gewässerschonender Biolandbau
- Zwischenfruchtanbau
- Umweltschonende Düngemassnahmen.
- Schaffung von Retentionsflächen in Gewässernähe, um Übertritte von gelösten und partikulär gebundenen Nährstoffen zu verhindern.

Solche Massnahmenpakete wurden z.B. in Niedersachsen im Rahmen der EU-Agrarpolitik verankert. Bereits in der Periode 2000-2006 wurden im Rahmen der EU-Verordnung über die Förderung der Entwicklung des ländlichen Raumes ausgewählte Wasserschutzmassnahmen in die EU-kofinanzierte Förderung aufgenommen (NOLTE & OSTERBURG 2006).

In diesem Sinne leisten das in dieser Arbeit vorgestellte Modell ESSEM, aber auch die Landschaftsvisualisierung, einen Beitrag, die zuvor genannten Massnahmen zu planen und vor allem mit den Akteuren in der Landschaft auf partizipative Weise umzusetzen.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Hauptkenntnisse der Arbeit

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Arbeit noch einmal zusammenfassend dargestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Modellen. Sofern die Felddaten die Modellaussagen untermauern oder zu deren Verständnis beitragen, werden sie ebenfalls erwähnt.

Folgende Hauptkenntnisse sind hervorzuheben:

(1) Die eingesetzten Modelle

- Die drei eingesetzten Modelle (E2/3D, EPIC und ESSEM) sind in unterschiedlichen Skalen einsetzbar. Alle drei Modelle tragen zum Verständnis der Prozesse der Bodenerosion und des Stoffhaushaltes in unterschiedlicher Weise bei.
- Das ereignisbezogenen *physikalisch-deterministische Modell E3D* eignet sich zur Vorhersage von Erosionsschadensbildern dann, wenn die Ausgangsbedingungen für die zu simulierenden Niederschlagsereignisse klar definiert werden können. Besonders die Ausgangsbodenfeuchte und die Landnutzungsverhältnisse spielen dabei eine entscheidende Rolle. Beim Einsatz des Modells bedarf es eines hohen Parametrisierungsaufwandes. Das Modell ist aber mit einer GIS-Schnittstelle versehen, so dass die Daten flächendeckend in einem GIS aufbereitet werden können. Der Einsatz der 3D-Variante des Modells auf Einzugsgebietsebene setzt - nach Meinung des Autors - eine Kalibrierung des Modells auf Einzelhangebene mit der 2D-Variante voraus. Insofern ist das Modell nur dann für den Einsatz in der Planungspraxis tauglich, wenn bereits grosse Datenmengen vorliegen und langjährige Messreihen eine Kalibrierung des Modells zulassen.
- Das *Modell EPIC* - als Einzelhangmodell - ist besonders geeignet, um unterschiedliche Düngungs- und Anbauvarianten und deren Einfluss auf das Erosions- und Stoffaustragsverhalten unter Normbedingungen (klare Niederschlagsdefinitionen) zu testen. Erhöhte Düngergaben führen zwar zu einer erhöhten Bodenfruchtbarkeit, gehen aber zu Lasten einer erhöhten Auswaschung von Nährstoffen. Dies zeigt sich, - und zwar in ganz unterschiedlichem Ausmass - generell bei allen simulierten Feldfrüchten. Dies führt zu hohen Nitratausträgen in Grundwasser und Oberflächengewässer und somit letztlich zur Eutrophierung der Seen und Meere und über die erhöhten Erosionsraten zu Phosphatabschwemmungen in die Gewässer (SCHEFFER 2003). Diese Erkenntnis gilt generell für die beiden EZG Baldeggersee und Länenbachtal. Die leicht abweichenden Bodeneigenschaften belegen keinen signifikanten Unterschied. Das Modell ist daher eher für den Einsatz in der landwirtschaftliche Beratung geeignet als für die allgemeine Landschaftsplanung. Es ist fokussiert auf Einzelhänge und lässt keine Aussagen über ganze Einzugsgebiete oder über Reichweiten von Erosionsprozessen zu. Der Parametrisierungsaufwand ist erheblich und auch bei der Handhabung des Modells bedarf es einiger Anpassungen an die jeweiligen konkreten agrarökologischen und landbautechnischen Verhältnisse. Nur durch eigene Zusatzprogramme, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurden,

sind eine grosse Anzahl von Düngungs-, Fruchtfolge- und Bearbeitungsvarianten einigermassen sinnvoll und praktisch zu handhaben. Insofern muss man EPIC als eine Spezialmodell bezeichnen. Es sollte nur für Fragestellungen auf Einzelhängen oder - wie geschehen - als Input für agrarökonomische Fragestellungen eingesetzt werden.

- Das in dieser Arbeit selber entwickelte *Modell ESSEM* stellt eine Weiterentwicklung des von DRÄYER (1996) entwickelten Basler Erosionsmodells dar. Das Modell ermöglicht, mit einfachen GIS-Überlagerungen - basierend zum grossen Teil auf amtlichen Daten - die Reichweiten der Erosionsprozesse zu charakterisieren und die Übertrittstellen von Oberflächenmaterial in die Vorfluter zu lokalisieren. Das Modell ist somit praxistauglich und unterstützt die Gesamtplanung in einem landwirtschaftlichen Einzugsgebiet bei der Renaturierung oder der Verbesserung der Flurstruktur, so dass Übertrittstellen in ihrer Zahl minimiert oder sie gar verhindert werden können. Die Ergebnisse lassen sich leicht in einem GIS mit den langjährigen Felddatenkartierungen der Erosionsereignisse vergleichen. Sie zeigen eine hohe Übereinstimmung. Da das Modell leicht eine kartographische Aufarbeitung der Ergebnisse ermöglicht, kann es auch als Grundlage für partizipative Planungsprozesse eingesetzt werden.
- Die Methode der *Landschaftsvisualisierung* ist eine relativ junge Methodik. Visualisierungen sind schon lange aus der Architekturbranche bekannt, wo zukünftige Bauvorhaben den Entscheidungsträgern präsentiert werden sollen. In den letzten zehn Jahren setzt sich diese Methode auch im Bereich der Landschaftsforschung durch (u.a. GIGER et al. (2001) und LANGE (1999)). In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Visualisierung von Prozessen in der Landschaft - wie z.B. den der Bodenerosion - durchaus realitätsnah möglich ist. Dies trägt einerseits zu einem besseren Überblick über ein Einzugsgebiet bei, zum anderen zeigt es die Reichweiten solcher Prozesse in der Landschaft auf. Durch die Visualisierung von Planungsalternativen kann der Einfluss von Erosionsschutzmassnahmen den verantwortlichen Akteuren in der Landschaft nahe gebracht werden. Die Landschaftsvisualisierung, - insbesondere auch die von Prozessen in der Landschaft - kann somit als nützliche Ergänzung zu herkömmlichen landschaftsökologischen Ergebnis- und Planungskarten betrachtet werden. Dabei muss immer eine Kosten-Nutzen-Analyse des Aufwandes für eine solche Visualisierung durchgeführt werden, da es umfangreichen Expertenwissens bedarf um seriöse Visualisierungsergebnisse zu erzielen.

(2) Felddatenerhebungen

- *Drainagen*: Die Erkenntnisse aus den Messungen der Hochwasserwellen an den Drainagen und vor allem die Variabilität bei unterschiedlicher Niederschlagsintensität deckt sich mit Erkenntnissen, wie sie KAHLE & LENNARTZ (2005) bei Untersuchungen von Dränflächen in Nordostdeutschland herausfanden. Der Einfluss der Drainagen auf den Gebietsstoffhaushalt und somit auch auf die Beurteilung von eingesetzten Modellen ist zu berücksichtigen.

- *Abflussverhältnisse:* Es zeigt sich eine eindeutige Verlagerung der grössten Abflussmengen vom Sommer in den Winter und eine entsprechende Zunahme von winterlichen Hochwasserereignissen und sommerlichen Niedrigwasserereignissen. Diese Erkenntnisse stammen u.a. auch aus einer umfangreichen ETH-Studie aus dem Jahr 2003. (GRUPPE KLIMA UND HYDROLOGIE DER FALLSTUDIE THUR, ETH ZÜRICH, 2003).
- *Bodenfeuchte:* Bodenfeuchte erweist sich in den verschiedenen Erosionsmodellen oftmals als entscheidender Inputparameter (u.a. bei EROSION3D). Die in dieser Arbeit eingesetzte TDR-Bodenfeuchtemessstation lieferte über mehrere Monate ein detailliertes Bild vom Infiltrationsverhalten des Niederschlages an der Erosionstestparzelle T50 im Länenbachtal. Die dargestellten Niederschlagsereignisse zeigten dass die Durchfeuchtungsfront und die Tiefe des Eindringens in den Boden stark von der Ausgangsbodenfeuchte abhängen. Das bedeutet dass der Ausgangsbodenfeuchte für Modellanwendungen grosse Bedeutung zukommt. Allerdings ist die Ausgangsbodenfeuchte oft nicht ohne einen hohen messtechnischen Aufwand zu erheben.
- *POC/DOC/TOC:* Das Verhalten der prozentualen POC- (partikulärer organischer Kohlenstoff) und DOC-Anteile (gelöster organischer Kohlenstoff) am totalen organischen Kohlenstoffaustrag (TOC-Austrag) der Hochwasserwellen zeigt eine klare Übereinstimmung zwischen permanent hohem POC-Anteil und stattgefundenen Bodenerosion im Einzugsgebiet (SEIBERTH et al. 1997). Die differenzierte Erfassung des Austrags von organischem Kohlenstoff ermöglicht demnach Aussagen über effektiv stattfindende Erosion im Einzugsgebiet. Aussagen über die daran beteiligten Sedimentquellen sind jedoch nicht möglich.

6.2 Schlussfolgerungen für die Modellbildung in der Landschaftsökologie

Modellentwicklungen sind eine Sache, die Füllung und Arbeit mit Daten für ein Modell sind eine andere. Voraussetzung dafür sind langjährige Felddatenerfassungen. Sowohl Neuentwicklungen, wie das in dieser Arbeit beschriebene Modelle ESSEM, als auch Anwendungen von bereits bestehenden Modellen benötigen für den ausgewählten Untersuchungsraum dort erhobene Daten.

Aus diesem Grund war es in der vorliegenden Arbeit unerlässlich, auch im Sinne der Kontinuität der Felddatenerfassung in den langjährigen Forschungsprojekten des Geographischen Institutes der Universität Basel, bestehenden Messprogramme weiterzuführen und einzelne, aber ganz gezielte Messkampagnen zur Erhebung von Modellinputparametern und zur Unterstützung von Modellaussagen durchzuführen.

Generelle Aussagen über die Eignung von Modellen für die Abschätzung von Gewässerbelastungen durch Erosion finden sich u.a. in der Arbeit von ROBRECHT et al. (2007; Tab. 6-1). Die Arbeit untersuchte 15 verschiedene Modelle zur Abschätzung von Nährstoffeinträgen in Gewässer und kommt dabei zu dem Erkenntnis, dass eine Diskrepanz zwischen den An-

forderungen an Modelle von Seiten der Wissenschaft und den Anforderungen der Praxis besteht. Die gleiche Erkenntnis lässt sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ableiten. Im Hinblick auf einen Modelleinsatz in der Praxis spricht dies für einen einfachen Ansatz – und zwar in der chorischen Dimension. Diesen Erwartungen bzw. Anforderungen versucht das Modell ESSEM zu entsprechen.

Tabelle 6-1: Anforderungen von Wissenschaft und Praxis an Modelle (nach ROBRECHT et al. 2007, verändert). Für die Modellbildung in der Landschaftsökologie ergibt sich eine Diskrepanz zwischen beiden Erwartungshaltungen. Der entscheidende Schritt hin zu einer wirklichen Verbesserung der Situation der Gewässerbelastung führt nur über den Einbezug von jenen Modellansätzen, die es den Akteuren in der Landschaft ermöglichen, sich anhand von visuell gut aufbereiteten Ergebnissen selbst ein Bild zu machen.

Wissenschaft	Praxis
Präzise formulierte Prozesse	Problemadäquate Formulierung der Prozesse
Komplexität	Komplexität reflektiert Datenverfügbarkeit
Wiedergabe der räumlichen Variabilität	Wiedergabe der verfügbaren räumlichen Daten
Wissenschaftlich innovativ	Wissenschaftlich abgesichert
Prozessorientiert	Ergebnisorientiert
So komplex wie nötig	So einfach wie möglich
Oft keine Benutzerführung	Gute Benutzerführung
<i>In dieser Arbeit verwendete Modelle:</i>	<i>In dieser Arbeit verwendetes Modell:</i>
EPIC, EROSION2D/3D	ESSEM

Die Modellierung von Stoffflüssen in mesoskaligen Einzugsgebieten bedeutet einen Spagat zwischen grossmassstäblichen „exakten“ Modellen und kleinmassstäblichen „unsicheren“ Ansätzen. Als äusserst problematisch bei Untersuchungen in der chorischen Dimension sind vor allem zwei Aspekte wesentlich:

Erstens besteht nie vollständige Gewissheit darüber, ob alle relevanten Prozesse im Einzugsgebiet erfasst wurden. Da nicht gleichzeitig überall alle Stoffumlagerungsprozesse im Feld erfasst werden können, müssen gewisse integral erfasste Verhaltensweisen der Stoffdynamik interpretiert werden. Dabei kann es mangels genauer Kenntnis aller beteiligten Prozesse zu Fehlinterpretationen kommen. Erschwerend kommt hinzu, dass Stoffflüsse einerseits eine grosse zeitliche und räumliche Dynamik aufweisen und andererseits durch den wirtschaftenden Menschen die Stoffflüsse kurzfristig massiv beeinflusst werden können. Wird z.B. die Kapazität einer Jauchegrube überschritten, gelangt unverdünnte Jauche über das Kanalisations- oder Drainagensystem direkt und in hoher Konzentration in das Gerinne. Im Gebietsabfluss wird lediglich die Zunahme der Ammoniumkonzentration registriert. Fehlt nun eine direkte Beprobung des beschriebenen Austragspfades, so wird es in einem solchen Fall schwierig sein, eine sinnvolle Erklärung für die gemessenen Werte im Gebietsabfluss zu finden: Fehlinterpretationen sind die Folge. Bezüglich dieser diffusen Quellen aus Erosion, Abschwemmung und Austrag durch Hang-, Stau- und Dränwasser

sucht z.B. der Gesetzgeber die potentiellen Austragsmengen aus Böden durch Beschränkung der maximal zulässigen Zufuhr von Nährstoffen zu begrenzen (DEUNERT & LENNARTZ 2004).

Zweitens hat jedes Ereignis seine landschaftshaushaltliche und landschaftsstrukturelle Vorgeschichte. So können gleiche Inputgrößen (z.B. Niederschlag in derselben Menge und Intensität) je nach Vorgeschichte extrem unterschiedliche Reaktionen auslösen. Ein kleiner Niederschlag kann massive Stoffausträge verursachen, wenn

- er auf abgesättigte Böden fällt,
- oberflächlich abfließt,
- einen direkten Weg zum Gerinne findet und
- leicht remobilisierbare Zwischenakkumulationen vorhergegangener Ereignisse im Fließpfad vorhanden sind, welche nun gelöst und mitgetragen werden.

Andererseits können grosse und intensive Niederschlagsereignisse aber auch nur geringe Stoffumlagerungen verursachen, wenn bei ihrem Eintritt die Speicherkapazität der Böden noch nicht ausgeschöpft war. Demnach spielt der Landschaftszustand *vor* einem Regenerereignis oftmals eine entscheidendere Rolle in Bezug auf die kausative Stoffdynamik als die Eigenschaften des Regenereignisses an sich. Vor diesem Hintergrund, ist es nicht erstaunlich, dass die vorgenommenen Modellsimulationen für grosse Zeitabschnitte (z.B. Jahresfrachtberechnungen) und Extremereignisse (grösstenteils abgesättigte Verhältnisse und somit konstante Stoffflüsse im Boden, konstante Infiltrationsraten etc.) recht brauchbare Ergebnisse erzielten, jedoch Einzelereignisse kaum relevant nachvollzogen werden konnten.

Nur die vergleichende Betrachtung langjähriger Messreihen und die Erfassung einer Vielzahl von Einzelereignissen und Parametern ermöglicht es, die Stoffdynamik auf Einzugsgebietsebene gesamthaft zu verstehen und ein prognostisches Instrumentarium anzubieten. Die vorliegenden Forschungsergebnisse sind daher als Beitrag zu einem vollumfänglichen Verständnis der Stoffdynamik ganzer Einzugsgebiete und Ökosysteme in ihrer insgesamt allerdings nur schwer erfassbaren Vielfältigkeit und Dynamik zu verstehen.

6.3 Perspektiven und Ausblick

An dieser Stelle sollen - ausgehend von den erzielten Erkenntnissen - einige wenige Anregungen für Massnahmen und zukünftige Stossrichtungen für die Forschung, aber auch die Planungspraxis gegeben werden.

Einmal sollte man sich mit der Kenntnis der Grösse der einzelnen Eintragspfade für Nährstoffeinträge beschäftigen. Diese stellt die Voraussetzung für die Ableitung von Massnahmen zur Reduzierung der Stoffeinträge in Gewässer dar (vergl. MEISSNER 2003). Die genaue Kenntnis der Mengen an Übertrittsmaterial ist schliesslich die Voraussetzung für die Planung von Retentionsflächen und von Renaturierungen an Gewässern.

Es wird weiter vorgeschlagen, Landentwicklungsprogramme auf regionaler Basis anzustreben, die im Rahmen von gezielten Natur- und Umweltschutzmassnahmen einen Beitrag zur Verminderung der diffusen Stoffeinträge aus landwirtschaftlichen Einzugesgebieten leisten können. Dazu wiederum kann die in dieser Arbeit diskutierte Landschaftsvisualisierung als brauchbare Grundlage dienen. Ein Beispiel für solche Programme wäre das durch den europäischen Landwirtschaftsfond finanzierte Programm ELER (NOLTE & OSTERBURG 2006) in Niedersachsen.

Ein weiterer Aspekt, der berücksichtigt werden sollte, ist die Gesamtbewertung der urbanen Fliessgewässer, die von Gewässereutrophierung durch Bodenerosion betroffen sind. Es sollte in Zukunft nicht durch eine separative Betrachtung allein der betroffenen Gewässerabschnitte (z.B. der Übertrittsstellen) erfolgen, sondern eine Gesamtbeurteilung und Planung der Gewässer für eine nachhaltige Gewässerentwicklungsplanung durchgeführt werden. Hierzu bedarf es neuer Bewertungsansätze und genereller Leitbilder. Dies zeigt z.B. der Ansatz von MIETHANER et al. (2008).

Eine Massnahme könnten gezielte Reliefumgestaltungen sein. Durch das Anlegen von kleinen Mulden im Gelände lassen sich - besonders bei unbegrüntem Boden - kurzfristig Zwischenspeicher schaffen, die im Falle von Extremniederschlagsereignissen als Zwischenspeicher eine Retentionsleistung erbringen und somit zur Verminderung von Nährstoffeintrag in den Vorfluter beitragen (siehe NAHRWOLD & HORN 2004). Dafür könnte durch gezielte Freilandversuche (Erosionsmessungen) die Wirksamkeit von Reliefumgestaltungen getestet werden. Anschliessend könnten diese Erkenntnisse Eingang finden in eine Weiterentwicklung des Modells ESSEM. Geländegestaltungsexperimente zum Zwecke des Bodenschutzes führte aus der FBB bereits HERWEG (1988) durch.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation steht in einer Reihe mit einer Vielzahl von Arbeiten zum Thema Bodenerosion und Stoffhaushaltsforschung, wie sie in der Forschungsgruppe Bodenerosion und Landschaftsökologie unter Prof. Dr. Dr. h.c. H. Leser seit 1975 betrieben wurde.

Sie knüpft an die Arbeiten von SEILER (1983), STAUSS (1983), SCHAUB (1989), PRASUHN (1991), VAVRUCH (1988) und DRÄYER (1996) sowie anderen an und führt viele der traditionellen Felddatenerhebungen fort, die seit (1984) in den Einzugsgebieten durchgeführt wurden.

Die Arbeit besteht zum Einen aus klassischen Feldmesskampagnen mit der Fortführung des Basismessprogramms (Abfluss, Niederschlag, Schwebstoffmessungen, Erosionstestparzellen), ergänzt durch spezielle Messkampagnen wie DOC/TOC-Analysen, Drainagebeprobungen und Bodenfeuchtemessungen. Zum Anderen beschäftigt sich die Arbeit mit verschiedenen Modellansätzen zur Bodenerosion in unterschiedlichen Skalen, wobei diverse Fragestellungen mit den eingesetzten Modellen angegangen wurden. Das *Modell EPIC* wurde eingesetzt, um auf Einzelhängen eine Vielzahl unterschiedlicher Fruchtfolgen, Düngungsvarianten und Witterungsbedingungen und deren Einfluss auf Erosion und Stoffhaushalt zu simulieren. Der Einsatz des Modells erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Agrarökonomischen Institut der ETH Zürich. Um das Modell in der schweizerischen Agrarlandschaft einsetzen zu können, waren einige Anpassungen an die hiesigen Umweltbedingungen nötig. Als zweites Modell wurde *EROSION2D/3D* auf Einzelhang- bzw. Einzugsgebietsebene eingesetzt, um den langjährigen Nutzungswandel im Einzugsgebiet des Riedmattbaches im Schweizerischen Tafeljura zu simulieren. Schliesslich wurde ein eigener statistisch-empirischer Ansatz gewählt. Das *Modell ESSEM* basiert auf langjährigen Felddatenerhebungen und stellt eine Kombination von Reliefanalyse und GIS-Überlagerungen dar. Das Modell hat zum Ziel, die Reichweiten der Erosionsprozesse besser zu simulieren und die Übertrittstellen von Oberflächenmaterial in den Vorfluter zu klassifizieren, um auf diese Weise gezielt Schutzmassnahmen planen zu können. Es baut auf einem bereits am Geographischen Institut der Universität Basel entwickelten Bodenerosionsmodell auf, das auf der Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) basiert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich bewusst auch mit dem Aspekt der Praxistauglichkeit der verschiedenen Modellansätze. Dazu wurde auch die immer mehr zum Einsatz kommende Methode der 3D-Landschaftsvisualisierung eingesetzt. Dafür wurden die aus dem Modell ESSEM stammenden Fliesspfade und Übertrittsstellen in 3D-Darstellung visualisiert. Ziel war es zu prüfen, inwieweit solche realitätsgetreuen Landschaftsdarstellungen als Planungsinstrumente brauchbar sind.

Die Felddatenerhebungen und deren Analysen stützen zum einen die für die Modellsimulation gemachten Annahmen, fliessen aber auch zum Teil direkt als Eingangsparameter in die Modelle ein und haben als weiteres Ziel die Fortführung der langen Messreihen zur Erosion am Geographischen Institut der Universität Basel.

Ein besonderes Augenmerk galt u.a der stofflichen Wirkung von Drainagen und ihren Einfluss auf den Gebietsstoffhaushalt. Der Einfluss unterschiedlicher Hochwassereignisse auf das Stofflieferverhalten von Drainagerohren konnte gezeigt werden. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der detaillierten Auswertung der langjährigen Erosionsschadenskartierungen. Sie bilden die Grundlage für die Überprüfung des Modells ESSEM. Dabei zeigte sich eine hohe Übereinstimmung von langjährigen Feldkartierungen und Modellergebnissen: Die vom Modell berechneten Fliesspfade und Übertrittsstelle stimmen weitgehend mit den tatsächlich im Feld erhobenen Werten überein.

Die Ergebnisse des Einzugsgebietsmodells EROSION3D zeigen eine hohe Abhängigkeit von der Ausgangsbodenfeuchte und einem modellspezifischen Korrekturfaktor. Das Modell kann als Vorhersageinstrument für den Nutzungswandel dann eingesetzt werden, wenn ein hoher Parametrisierungsaufwand betrieben werden kann und eine Kalibrierung an der 2D-Variante mit langjährigen Felddaten möglich ist.

Das Modell EPIC erwies sich als gut geeignet für die Simulation von sehr vielen unterschiedlichen Fruchtfolgen-, Düngungs- und Bearbeitungsvarianten. Der Vorteil im Modell liegt in der hohen Anzahl an stoffhaushaltlichen Ausgabeparametern und den wenigen Systemressourcen, die benötigt werden. Eine hohe Simulationsanzahl und deren Auswertung ist aber nur durch die Programmierung eigener Zusatzsoftware möglich gewesen. Die Modellergebnisse eignen sich als Eingangsdaten für ein agrarökonomisches Modell, wie es an der ETH Zürich entwickelt wurde.

Die Anwendung der einzelnen Erosionsmodelle stand immer unter der Fragestellung der Verwendbarkeit für die Planungspraxis. Als Hauptkenntnisse lassen sich daher herausstreichen: Die Anwendbarkeit der Modelle muss in unterschiedlichen Dimensionen und für unterschiedliche Fragestellungen möglich sein. Der Parametrisierungsaufwand für EPIC und EROSION3D darf nicht unterschätzt werden. Es müssen Anpassungen an die kleinparzellierte schweizerische Agrarlandschaft vorgenommen werden, da die Modelle in anderen Agrarlandschaften entwickelt wurden und trotz physikalisch basierter Algorithmen nicht ohne eine Kalibrierung an langjährigen Felddaten auskommen.

Das einfache statistisch-empirische GIS-Modell ESSEM lehnt sich am zweistufigen Basler Bodenerosionsmodell an und basiert auf der Verwendung von amtlich zur Verfügung stehenden Daten, sowie vorhandenen Reliefanalysetools und GIS-Algorithmen, wie sie heute in jedem Planungsbüro zum Einsatz kommen. Es kann als praxistauglich angesehen werden, wenn es darum geht, Planungskarten für den Agrarlandschaftswandel zu erstellen. Hier bietet es durch seine anschaulichen Ergebnisse - eventuell ergänzt um 3D-Visualisierungen - genügend genaue Planungskarten, um dem Prozess der Bodenerosion und den damit verbundenen Stoffumlagerungen in der Landschaft vorzubeugen.

8 Literaturverzeichnis

AMMON, K. (2000): Die Nitrat und Phosphatdynamik in Vorfluter und Drainage eines Einzugsgebietes im Schweizer Tafeljura (Länenbachtal, Kt-BL). - Lizentiatsarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, als Manuskript vervielfältigt.

ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (³1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. - Hannover, 331 S.

AUERSWALD, K. & SCHRÖDER, R. (2001): Simulation von verschlammungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. - In: Wasser & Boden, 53/10, 17-20.

BEASLEY, DB., HUGGINS, LF. & Monke, E.J. (1980): ANSWERS: a model for watershed planning. - In: Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 23, 939-944.

BERRY, J. (1998): Visualize realistic landscapes. 3D-modeling helps users envision natural resources. - In: GIS World 11/98, 42-47.

BIDER, M. (1978): Nordöstlicher Jura und Juranordfuss. - In: Klimatologie der Schweiz Band 2, Regionale Klimabeschreibung 1. Teil, Beih. z. Ann. Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt, 115-178.

BLUMER, K., BUGMANN, M., DÄLLENBACH, S., HALLER, H. & HUBER, M. (1993): Wasserbilanz für einen Kartenausschnitt (Blatt 7335 Geisenfeld). - Geographisches Institut der Universität Basel (Manuskript)

BORK, H. & SCHRÖDER, A. (1996): Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. - In: BLUME, H.P., FELIX-HENNINGSSEN, P. & FISCHER, W.R. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg/Lech.

BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und Bodenwasserdynamik von Hängen. - In: Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH), 46, Karlsruhe, 192 S.

BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.) (2003): Erarbeitung von Ausgleichs- und Ersatzmassnahmen für Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes: Ergebnisse aus dem F+E Vorhaben 899 82 130 des Bundesamtes für Naturschutz. Bonn.

DEUNERT, F., LENNARTZ, B. (2004): Entwicklung der Fliessgewässergüte in einem ländlichen Einzugsgebiet Schleswig-Holsteins. - In: Wasserwirtschaft, 3/2004, 25-29.

- DIPNER, M. (1986): Differenzen des Nährstoffhaushaltes und seine Beziehungen zu Boden, Wasserhaushalt und Niederschlagsinput im Bodenerosionsgebiet Jura I (Basler Tafeljura bei Anwil). - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, 130 S.
- DRÄYER, D. (1995): Bestimmung der Bodenerosionsgefährdung unter Verwendung amtlicher GIS-Daten. - In: Petermanns Geographische Mitteilungen, 139, 201-214.
- DRÄYER, D., FRÖHLICH, J., HUBER, M. & SCHAUB, D. (1995): GIS-gestützte Bodenerosionsmodellierung in der NW-Schweiz. - In: Bull. Bodenkdl. Ges. Schweiz, 19, 105-108.
- DRÄYER, D. (1996): GIS-gestützte Bodenerosionsmodellierung im Nordwestschweizer Tafeljura. Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 22, Basel, 234 S.
- DVWK (Hrsg.) (1986): Schwebstoffmessungen. - DVWK-Regeln 125, 46 S.
- ERNSTBERGER, H. & SOKOLLEK, V. (1984): Über Wirkungen von Dränen auf den Gebietswasserhaushalt. - In: Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 40, Göttingen, 63-68.
- FAC (= EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR AGRIKULTUR CHEMIE UND UMWELT-HYGIENE) (1989): Methoden für Bodenuntersuchungen. Schriftenreihe der FAC, 5, 267 S.
- FARRENKOPF, D. (1987): Das Relief als steuernder Parameter der Abflussdynamik - Ein Beitrag zur fluvialen Prozessforschung. - In: Z. Geomorph., 66, Berlin, 73-82.
- FRÖHLICH, J., DRÄYER, D. & HUBER, M. (1994): GIS-Methoden in der landschaftsökologischen Raumbewertung mit einem Beispiel zur Bestimmung der Bodenerosionsgefährdung. - In: Die Erde, 125, 1-13.
- GIGER, B., EGGER, K., MUHAR, A. (2001): Integrierte 3D-Visualisierungs-Systeme für Landschaftsplanung: Konzepte und Marktrealität. - In: CORP, Institut für Freiraumplanung und Landschaftspflege, Universität für Bodenkultur, Wien, 231-235.
- GOETZ, R.U. (1997): Diversification in agricultural production - A dynamic model of optimal cropping to manage soil erosion. - In: Amer. J. Agr. Econ., 79/2, 341-356.
- GRUNWALD, S. (1998): AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model). - In: Wiener Mitteilg. Wasser - Abwasser - Gewässer, Experiences with Soil Erosion Models 151: 77-88
- GRUPPE KLIMA UND HYDROLOGIE DER FALLSTUDIE THUR, ETH ZÜRICH, (2003): Der Einfluss veränderter Klimabedingungen und veränderter Landnutzung auf die Thur - In: Fallstudie Thur, Perspektiven einer Flusslandschaft, Bericht, Zürich.

- HALBFASS, S. & GRUNEWALD K. (2006): Abschätzung potentieller Herkunftsflächen von erosionsbedingten Stoffeinträgen in Oberflächengewässer im mittleren Massstab. - In: Wasserwirtschaft, 12/2006, 24-28.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise - In: Mitt. Dt. Wetterdienstes, 2.
- HEEB, J. (1991): Haushaltsbeziehungen im Landschaftsökosystem topischer Dimension in einer Elementarlandschaft des Schweizerischen Mittellandes. Modellvorstellungen eines Landschaftsökosystems. - Physiographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 14, Basel, 198 S.
- HEHL-LANGE, S. (2001): GIS-gestützte Habitatmodellierung und 3D-Visualisierung räumlich-funktionaler Beziehungen in der Landschaft. ORL-Bericht 108, Zürich.
- HENSEL, H. & BORK, H.-R. (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. - In: Landschaftsökologisches Messen und Auswerten 2/2/3, Braunschweig, 107-136.
- HERWEG, K. (1988): Bodenerosion und Bodenkonservierung in der Toscana, Italien - Physiographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 9, Basel. 175 S.
- HOSANG, J. (1995): Wasser und Stoffhaushalt von Lössböden im niederen Sundgau (Region Basel). Messung und Modellierung. - Physiographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 19, Basel. 131 S.
- HUBER, M. (1994): The digital Geo-Ecological Map. Concepts, GIS-Methods and case studies. - Physiographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 20, Basel . 144 S.
- JACOBSEN, K. (2001): New Developments in Digital Elevation Modelling. - In: Geoinformatics, Juni 2001, 18-21.
- JENNE, T. (1987): Der Zusammenhang „Wasserhaushalt-Bodenerosion“ im Geoökosystem, dargestellt am Beispiel eines Kleineinzugsgebietes im Oberbaselbieter Tafeljura bei Anwil (Bodenerosionstestlandschaft Jura I), im hydrologischen Jahr 1986. - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, 206 S.
- JOHANNES, B. (1999): Oberflächenabfluss und Materialabtrag von ländlichen Fahrwegen bei künstlichem Starkregen. - In: Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 40, 53-58.
- KAHLE, P. & LENNARTZ, B. (2005): Untersuchungen von Stoffaustrag aus landwirtschaftlich genutzten Dränflächen in Nordostdeutschland. - In: Wasserwirtschaft 9/2005, 23-27.

KANTON BASEL-LANDSCHAFT (Hrsg.) (1992): Erläuterungen zur Risikokarte für Sicker- und Abschwemmverluste von Pflanzennährstoffen, Basel-Landschaft, Zürich.

KERSEBAUM, K., NIEDRE, R., KÖSTER, W. (2007): Neue Chancen für eine effizientere N-Düngung. - In: Wasserwirtschaft, 1-2/2007, 58-63.

KEUSCH, (2000): Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen am Beispiel der Erosion im Gebiet des Baldeggersees. - Dissertation ETH Zürich Nr. 83171, 272 S.

KNISEL, W.G. (1980): CREAMS - A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. - In: Conservation Research Report 26 (USDA), Washington.

KOCH, R. (2007): Uferzonen von Fließgewässern in Kleineinzugsgebieten der Region Basel, - Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 39, Basel.

LANE, L.J & NEARING, M.A. (1989): USDA - water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. NSERL Report 2 (USDA-ARS National Soil Erosion Laboratory), West Lafayette, Indiana (USA).

LANGE, E. (1999): Realität und computergestützte visuelle Simulation. ORL-Bericht 106, Zürich.

LANGE, E., SCHROTH, O. & U. WISSEN (2003): Interaktive Landschaftsentwicklung. Potenziale von Computervisualisierungen in partizipativen Planungsprozessen zur Lenkung der Landschaftsentwicklung am Beispiel der UNESCO Biosphäre Entlebuch (Schweiz). - In: Disp 155/03, 29-37.

LANGE, E. & BISHOP, I. (2001): Our Visual Landscape: Analysis, Modelling, Visualization and Protection. Special Issue. - In: Landscape and Urban Planning 54/01, 1-3.

LESER, H. (1986): Bodenerosion - Erforschung eines geoökologischen Prozesses. - In: Hallesches Jahrbuch f. Geowissenschaften, Bd.11, 1-17.

LESER, H. (1997): Landschaftsökologie. Ansatz, Modelle, Methodik, Anwendung - UTB 521, 4. Auflage, Stuttgart 1997, 1 - 644.

LESER, H. (1991): Landschaftsökologie. - UTB, Stuttgart, 647 S.

LESER, H., MEIER-ZIELINSKI, S., PRASUHN, V. & SEIBERTH, C. (2002): Soil erosion catchment areas of Northwestern Switzerland. Methodological conclusions from a 25-year research program. - In: Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. 46, 35 - 60.

LESER, H., HAAS, H.-D., MOSIMANN, T. PAESLER, R. & MEIER, ST. (2005): DIERCKE Wörterbuch der Allgemeinen Geographie. - Braunschweig, München, 1119 S.

MARKS, R., MULLER, M.J., LESER, H. & KLINK, H.-J. (Eds.)(1992): Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BALVL). - Forschungen zur deutschen Landeskunde, vol. 229, second ed. Trier.

MAURER, B. (1995): Modellierung des langjährigen Rückganges der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenerosion. - Oberlehrerarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, als Manuskript vervielfältigt.

MEIER, R. (2006): Visualisierung von Landschaftsentwicklungen zur Unterstützung partizipativer Landschaftsplanung im Kanton Aargau. - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, als Manuskript vervielfältigt.

MEIER, S. & ROLLI, S. (1997): GIS-Anwendungen für Bodenerosion und Erosionsschutz. - In: Geo Agenda, Mitteilungsblatt des Verbandes Geographie Schweiz, 4/97, 30-31.

MEIER S. & ROLLI S. (1998): Modelling of Contributing Areas with MesoScale Effects in Landscape Ecology. - In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer: Experiences with Soil Erosion Models, Wien, 151, 303-310.

MEIER, S. (1996): Abschätzung der Auswaschungsgefährdung unter Verwendung von GIS-Methoden. - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, als Manuskript vervielfältigt.

MEIER-ZIERLINSKI, S. (1997): Bestimmung der Auswaschungsgefährdung unter Verwendung von GIS-Methoden. - In: Regio Basiliensis, Basler Zeitschrift für Geographie, 38/3, 217-228.

MEISSNER, R. (2003): Diffuse Stoffeinträge in die Gewässer. - In: Wasserwirtschaft, 9, 30-36

MITASOVA, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M. & IVERSON, R. (1996): Modelling topographic potential erosion and deposition using GIS. - In: Int. J. Geographical Information Systems, 1996, 10(5), 629-641.

MIETHANER, S., KÖNIG, F. & LEHMAN, B. (2008): Ein neuer Bewertungsansatz für urbane Fließgewässer. - In: Wasserwirtschaft, 5/2008, 21-26.

MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., RICKSON, R.J. (1992): EUROSEM: Documentation manual (Silsoe College). Silsoe, UK.

MOSER, H.-R. (1984): Die Niederschlagsverteilung und -struktur bei verschiedenen Wetterlagen in der Region Basel. -In: Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie 4, Basel. 269 S.

MOSIMANN, T. (1980): Boden, Wasser und Mikroklima in den Geosystemen der Löss-Sand-Mergel-Hochfläche des Bruderholzgebietes (Raum Basel). - Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 3, Basel. 267 S.

MOSIMANN, T. (1987): Bodenkarte des Kantons Baselland 1: 150'000, Basel.

MOSIMANN, T. & RÜTTIMANN, M. (1995): Bodenerosion selber abschätzen - Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ed. Volkswirtschafts- und Sanitätsdirektion des Kantons Basel-Landschaft, Liestal, 1-16.

MOSIMANN, T. & RÜTTIMANN, M. (1996): Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit. - Grundlagen zum Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Liestal, 40 S.

MOSIMANN, T. (2003): Erosionsgefährdung und Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung, Monitoring 1982-2002: Publikation des Amt für Umweltschutz und Energie Kanton Basel-Landschaft, Liestal, 32 S.

NAHRWOLD, F. & HORN, R. (2004): Reliefmodellierung als oberflächliche Bodenbearbeitung zur Erosionsminderung und Stabilisierung geneigter Hangflächen. - In: Wasser und Abfall, 7-8/2004, 24-27.

NOACK, T., NEBIKER, S. & R. OBERLI (2002): Webbasierte 3D-Landschaftsvisualisierung. Technische Spielerei oder Kommunikationsinstrument in einem anspruchsvollen Planungsprozess. - In: Corp 2002, Tagungsband 2, Wien, 241-243.

NOLTE, L. & OSTERBURG, B. (2006): Beiträge ländlicher Entwicklungsprogramme zur Reduzierung diffuser Gewässerbelastungen aus der Landwirtschaft am Beispiel Niedersachsen. - In: Wasser und Abfall, 7-8/2006, 16-22.

OGERMANN, P., MEIER, S. & LESER, H. (2003): Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. - In: Landnutzung und Landentwicklung 44, 151-160, Berlin.

OKE, T.R. (1978): Boundary layer climates. - Methuen & Co., London, 363 S.

- PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura (Raum Anwil, BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. - *Physiogeographica*, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 16, Basel. 372 S.
- PRASUHN, V. & BRAUN, M. (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. - Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrikultur und Umwelthygiene, 17, Liebefeld-Bern, 113 S.
- REBER, S. (1995): Niederschlagschemie im Reklip-Teilraum südlicher Oberrhein. - In: *Stratus 2*, Verlag Wepf & Co, Basel, 86 S.
- REHM, F. (1995): Die Wirksamkeit von Uferstreifen zur Verminderung diffuser Stoffeinträge in Fließgewässer tonreicher Gebiete im Baselbieter Tafeljura. - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel.
- RICHTER, G. (1979): Bodenerosion in Reblagen des Moselgebietes. Ergebnisse quantitativer Untersuchungen 1974-1977. Forschungsstelle Bodenerosion d. Univ. Trier, Mertesdorf, 3, Trier.
- ROBRECHT, D., LEHMANN, R., SCHÖN, K. & KAUL, U. (2007): Vergleich von Modellen und Verfahren zur Abschätzung von Nährstoffeinträgen in Gewässer. - In: *Wasserwirtschaft*, 11/2007, 22-26.
- ROHR, W., MOSIMANN, T. & BONO, R. (1990): Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen. - In: *Materialien zur Physiogeographie* 14, 5-39.
- ROTH, K. (1989): Stofftransport im wasserungesättigten Untergrund natürlicher, heterogener Böden unter Feldbedingungen. - Diss. ETH Zürich Nr. 8907, Zürich, 155 S.
- ROTH, K., FLÜHLER, H. & ATTINGER, W. (1998): TDR - Eine Methode zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes. - In: *Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz*, Nr. 13.
- ROTH, K., SCHGULIN, R., FLÜHLER, H. & ATTINGER, W. (1990): Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach. - In: *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10.
- SCHAUB, D. VAVRUCH, S., DIPNER, M. JENNE, T. (1987): Erodibilitätskarten dreier Agrargebiete der Nordwestschweiz. - In: *Regio Basiliensis*, 28, 115- 122.

SCHAUB, D. (1989): Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheintals (Möhliner Feld - Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft. - In: Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie 13, Basel. 228 S.

SCHAUB, D. & PRASUHN, V. (1993): The Role of Test Plot Measurements in a Long-Term Soil Erosion Research Project in Switzerland. - In: WICHEREK S.: Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environmental and Hills. - Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam - London - New York, 111-123.

SCHAUB, D. & PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsmodelle. - In: Berichte und Forschungen des Geographischen Institutes Freiburg/CH, 3, 47-59.

SCHNEFFER, B. (2003): Bodenfruchtbarkeit und Gewässerschutz. - In: Wasserwirtschaft, 12/2003, 28-32.

SCHMID, H.J., KEUSCH, A., GOETZ, R., SCHAUB, D. & LEHMANN, B. (1997): Management der Verschmutzung aus diffusen Quellen - Eine empirische Analyse anhand von Phosphorabträgen von landwirtschaftlich genutzten Flächen in einem Binnensee. - In: 38. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues Freising. Proceedings, 1-9.

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

SCHMIDT, J. (1992): Anwendung des EROSION2D Modells zur Untersuchung des Einflusses von Flurbereinigungsmassnahmen auf den Bodenabtrag am Beispiel des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen. - Freiberg, 85 S.

SCHMIDT, J. (1988): Wasserhaushalt und Feststofftransport an geneigten, landwirtschaftlich bearbeiteten Nutzflächen. - Diss. FU Berlin.

SCHMIDT, R.G. (1979): Probleme der Erfassung und Quantifizierung von Ausmass und Prozessen der aktuellen Bodenerosion (Abspülung) auf Ackerflächen. Methoden und ihre Anwendung in der Rheinschlinge zwischen Rheinfeldern und Basel. - In: Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie 1, Basel. 240 S.

SCHWERTMANN, U., AUERSWALD, K. & BERNARD, M. (1983): Erfahrungen mit Methoden zur Abschätzung des Bodenabtrags durch Wasser. - In: Geomethodica Vol. 8, Basel, 97-116.

- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Ulmer Verlag, Stuttgart, 2. Aufl., 64 S.
- SEIBERTH, C. (2001): Relation Between Soil Erosion and Sediment Yield in Catchment Scale. - In: Stott D.E., Mohtar R. H. & Steinhardt G.C. (eds.): Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting; May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 725-731.
- SEIBERTH, C., SCHAUB, D. & C. WÜTHRICH (1997): Gelöster und partikulärer Kohlenstoff als Indikator des Erosionsgeschehens im Oberbaselbieter Tafeljura. - In: Regio Basiliensis Basler Zeitschrift für Geographie 38. Jahrgang Heft 3, 205–217.
- SEILER, W. (1983): Bodenwasser und Nährstoffhaushalt unter Einfluss der rezenten Bodenerosion am Beispiel zweier Einzugsgebiete im Basler Tafeljura bei Rothenfluh und Anwil. - Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 5, Basel. 510 S.
- SEVRUK, B. (1985): Systematische Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. - In: SEVRUK, B. (Hrsg.): Der Niederschlag in der Schweiz. Beitr. z. Geol. d. Schweiz - Hydrologie 31, 65-75.
- SHARPLEY, A.N. & WILLIAMS, J.R. (1990): EPIC - Erosion productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. - In: U.S. Departement of Agriculture, Technical Bulletin, No. 1768.
- SMITH, R.E. (1988): OPUS - an advanced simulation model for non-point source pollution transport at field scale. Draft. USDA-ARS, Ft. Collins, CO.
- SCHUDEL, P. (1990): Vermeiden von Schäden durch Erosion und Verdichtung des Bodens. - Kant. Amt f. Umweltschutz (Hrsg), Luzern, 18.
- STAUSS, T. (1983): Bodenerosion, Wasser- und Nährstoffhaushalt in der Bodenerosionstestlandschaft Jura I im Hydrologischen Jahr 1982. - Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel.
- STUMPF, F. & AUERSWALD, K. (2006): Hochaufgelöste Erosionsprognosekarten von Bayern. - In: Wasserwirtschaft 7-8/2006, 70-74.
- TRESS, B. & TRESS, G. (2003): Scenario visualisation for participatory landscape planning. - In: Landscape and Urban Planning 64/03, 161-178.

VAVRUCH, S. (1988): Bodenerosion und ihre Wechselbeziehungen zu Wasser, Relief, Boden und Landwirtschaft in zwei Einzugsgebieten des Basler Tafeljura (Hemmiken, Rothenthal). - *Physiogeographica*, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 10, Basel. 338 S.

VOLK, M., STEINHARDT, U., GRÄNITZ, S. & PETRY, D. (2001): Probleme und Möglichkeiten der mesoskaligen Abschätzung des Bodenabtrages mit einer Variante der ABAG. - In: *Wasser & Boden*, 53/12, 24-30.

WEISE, R. (1990): Zu einigen Aspekten der wasserbedingten Bodenerosion auf industriemässig bewirtschafteten Obstplantagen glazialer Gebiete bei Potsdam. - In: *Arch. Gartenbau*, 38, 1, Berlin, 21-35.

WILLIAMS, J.R. & SHARPLEY, A.N. (1990): EPIC - Erosion Productivity Impact Calculator. 2nd User Manual. Temple, 127 S.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978): Predicting Rainfall-Erosion Losses. - A Guide to Conservation Planning. - In: U.S. Dept of Agriculture, *Agric. Handbook* 537.

WÜTHRICH, C. (2001) (Hrsg.): Geoökologischer Laborkurs, Handbuch zum Kurs, Version 2001. Geographisches Institut der Universität Basel, Abteilung Physiogeographie, Manuskript.

WÜTHRICH, M. (1998): In situ measurements and remote sensing of soil moisture using time domain reflectometry, thermal infrared and active microwaves. - Dissertation, Institut für Meteorologie, Universität Basel, 5, Basel.