

KASSELER WASSERBAU-MITTEILUNGEN
HEFT 17/2009

herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Andreas Weiß

**Beitrag unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren
und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft
zur Reduzierung des Hochwasserabflusses**

KASSELER WASSERBAU-MITTEILUNGEN
HEFT 17/2009

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel
D-34109 Kassel (Briefpost)
D-34125 Kassel (Lieferanschrift)
Telefon: (0561) 804 2749
Telefax: (0561) 8043952
E-Mail: wawi@uni-kassel.de

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Holger Wildhagen

Tag der mündlichen Prüfung

24. September 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2008
ISBN print: 978-3-89958-646-6
ISBN online: 978-3-89958-647-3
URN: urn:nbn:de:0002-6475

© 2009, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Druck und Verarbeitung: docupoint GmbH, Magdeburg
Printed in Germany

Vorwort

Hochwasserereignisse sind sowohl natürliche als auch anthropogen geprägte Phänomene und die dadurch verursachten Hochwasserschäden bedeuten vielfach eine Belastung für die Volkswirtschaft und insbesondere für die persönlich betroffene Bevölkerung. Ein modernes Hochwassermanagement setzt daher auf die drei Elemente des technischen Hochwasserschutzes, des Flächenmanagements und der Hochwasservorsorge. Ein viel-fach diskutierter Punkt ist hierbei der mögliche Beitrag der Landwirtschaft zur Verbesserung des Hochwasserschutzes, indem durch geänderte Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Wasserrückhalt in der Fläche gestärkt wird. Vielfach fehlen jedoch quantifizierende Angaben, so dass eher politisch motivierte Aussagen teilweise das Stimmungsbild zu Hochwasserschutzmaßnahmen prägen.

Ziel der von Herrn Dr. Weiß durchgeführten Untersuchungen war die Quantifizierung unterschiedlicher Bodenbearbeitungsformen und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft auf den Hochwasserabfluss für die Mittelgebirgsregion.

Als Untersuchungsgebiet wurde die Region Nordhessen gewählt. Neben der Methodik unterschiedlicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen werden die Faktoren und Prozessabläufe der Abflussbildung beschrieben. Schwerpunkt der Arbeit bilden die umfangreichen hydrologischen Simulationen für die unterschiedlich großen Einzugsgebiete des Jungfernaches (Mesoskala) sowie der Einzugsgebiete von Fulda und Diemel (Makroskala) mit einem breitem Variantenstudium unterschiedlicher Bewirtschaftungsformen und ihren Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss.

Herr Dr. Weiß verdeutlicht mit seinen Untersuchungen nicht nur eine wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Bodenbearbeitungsmethoden und Bewirtschaftungsformen auf den Hochwasserabfluss, sondern zeigt auch die relevanten Vor- und Nachteile für die Landwirtschaft bei den verschiedenen Bodenbearbeitungsmethoden und Bewirtschaftungsformen.

Herr Dr. Weiß liefert mit seiner Arbeit eine sehr gute Grundlage für die weitere Diskussion eines effizienten Hochwassermanagements.

Kassel, im Januar 2009

S. Theobald

Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Danksagung

Die vorgelegte Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel. Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

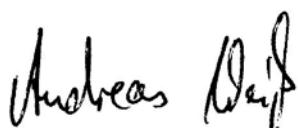
Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald und Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Tönsmann, die mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Promotion am Fachgebiet durchzuführen. Für die Anregungen während der Erstellung der Arbeit sowie die Gewährung der erforderlichen zeitlichen Freiräume bin ich sehr dankbar. Besonders gegen Ende der Promotion waren die konkreten Hinweise eine große Hilfe für den erfolgreichen Abschluss meiner Promotion. Darüber hinaus konnte ich durch die Tätigkeiten in Projekten und in der Lehre sowie der Teilnahme an Symposien wichtige Erfahrungen im Bereich des Ingenieurwesens sammeln.

Mein Dank gilt weiterhin dem Korreferenten Herrn Prof. Dr. Holger Wildhagen für die Durchsicht der Arbeit, die fachkundige Beratung und die Erstellung des Gutachtens sowie dem weiteren Mitglied der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban für die Ratschläge und die unkomplizierte Kommunikation während meiner Zeit im Fachbereich Bauingenieurwesen.

Für die gute und angenehme Zusammenarbeit am Fachgebiet bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen sowie den studentischen Hilfskräften. Vor allem die freundliche Arbeitsatmosphäre wird mir stets positiv in Erinnerung bleiben.

Für die unermüdliche Unterstützung und die Motivation möchte ich mich herzlichst bei meiner Lebensgefährtin Frau Karin Grupp bedanken. Diese Arbeit widme ich meiner Familie, insbesonders meinen Eltern, die mir in all den Jahren zur Erreichung meiner Ziele stets zur Seite standen.

Kassel, im Januar 2009



Andreas Weiß

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, den Einfluss der Landwirtschaft auf die Reduzierung des Hochwasserabflusses am Beispiel der Mittelgebirgsregion Nordhessen zu untersuchen.

Die Intensivierung der Landwirtschaft hat auf die Bodenmatrix eine Vielzahl an negativen Folgen. Daraus resultiert eine Änderung des Wasseraufnahmevermögens. Verstärkt kommt es zu Erosionsprozessen auf der Oberfläche und in Verbindung damit zu einem verstärkten Oberflächenabfluss.

Die relevanten physikalischen Prozesse aus Landwirtschaft und Hydrologie werden in der Arbeit aufgeführt. Neben der Methodik unterschiedlicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen werden die Faktoren und Prozessabläufe der Abflussbildung beschrieben. Durch das Aufzeigen der Verteilung von Anbauflächen und Landnutzungsentwicklungen erfolgt bereits ein erster qualitativer Hinweis über den Einflussbereich der Landwirtschaft auf hydrologische Fragestellungen.

Wirtschaftliche Faktoren werden bei einer monetären Betrachtung unterschiedlicher Bewirtschaftungsformen vorgestellt. Der Vergleich zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung bezieht sowohl volkswirtschaftliche als auch unternehmensspezifische Betrachtungen mit ein.

Es wird ein Überblick gängiger hydrologischer Modelle mit Darstellung der berücksichtigten Teilprozesse und der durch die Landnutzung beeinflussten Parameter gegeben. Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Fragestellungen aus modelltechnischer Sicht bei den anstehenden Untersuchungen zu berücksichtigen sind und nach welchen Kriterien die Modellauswahl erfolgte.

Für den Bereich der Mesoskala wurde mit dem Programmsystem NASIM für das ca. 320 Hektar große, nördlich von Kassel gelegene, Einzugsgebiet des Jungfernaches ein Flussgebietsmodell erstellt. Die durchgeführte Datenerhebung beinhaltet alle topografischen und bodenrelevanten Parameter sowie die Erfassung der maßgeblichen hydrologischen Kenngrößen im Rahmen eines Feldversuches.

In einem umfangreichen Variantenstudium wurde die Änderung des Oberflächenabflusses für unterschiedliche Bodenbearbeitungsmethoden und Bewirtschaftungsformen bestimmt. Die Änderungen der Parameter stützen sich auf Literaturwerte. Die relativen Betrachtungen erlauben trotz der zu treffenden Annahmen eine belastbare Aussage zum Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen der Landwirtschaft auf den Hochwasserabfluss.

Für die hydrologischen Untersuchungen auf der Ebene der Makroskala wurden die Einzugsgebiete der Fulda und Diemel gewählt. Die Modellierungen wurden mit dem Verfahren NAXOS durchgeführt. Als Entscheidungskriterium zur Auswahl der Flächen, für die eine geänderte Bodenbearbeitungsmethode bzw. Bewirtschaftungsform in Frage kommt, wurden die Informationen zum Bodenerosionsrisiko herangezogen. Aufgrund der Größe der modellierten Fläche von 8.705 km² wurden die zuvor detailliert beschriebenen unterschiedlichen Faktoren der Abflussbildung beim Variantenstudium lediglich durch eine Variation des CN-Wertes abgebildet. Dieses praktikable, ingenieurmäßige Vorgehen zeigt zum einen den Weg auf, wie mit großen Einzugsgebieten umzugehen ist, verdeutlicht aber auf der anderen Seite die Grenzen der hydrologischen Modellierung hinsichtlich der Berücksichtigung von Effekten der Mikro- und Mesoskala bei Untersuchungen auf der Makroskala.

Eine geänderte Bodenbearbeitung wirkt sich positiv auf den Bodenschutz sowie auf die Verbesserung der Retentionseigenschaften aus. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen des Hochwasserschutzes ist der Einfluss auf die Verformung der Hochwasserwelle jedoch gering. Auf Teilflächen können Änderungen der Bodenbearbeitung und –bewirtschaftung lokal stark abflussreduzierend wirken. Beispielhaft sei der Einfluss der Interzeption auf Hochwasserereignisse geringer Jährlichkeit genannt (Kartoffelvegetation: 14 % bei einem HQ₁). Für große Einzugsgebiete und Hochwasserereignisse hoher Jährlichkeit ist der Einfluss auf die Scheitelreduzierung kaum sichtbar (1 % bis 2 % bei einem HQ₁₀₀). Zu berücksichtigen ist zudem, dass das Wasseraufnahmevermögen der Böden jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Für Böden in den Wintermonaten ist die abflussreduzierende Wirkung fast völlig zu vernachlässigen. Für langanhaltende und großflächige Niederschläge in Verbindung mit hohem Bodenfeuchtegehalt ist der Einfluss der Landnutzung und Landbewirtschaftung ebenfalls marginal.

Abstract

The present research work investigates the impact of agriculture on the reduction of flood discharge by the example of the low mountain range in Northern Hesse.

The intensification of agriculture has a multitude of negative consequences on the soil matrix. This results in a change of the water absorbency. Erosion processes are rising and in connection therewith an increase in surface runoff is the consequence.

The required relevant physical processes from agriculture and hydrology are listed in the work. In addition to the methods of different farming systems the factors and processes of discharge formation are described. Showing the distribution of land use and land development is already a first qualitative indication about the impact of agriculture on hydrological issues.

Economic factors are presented in a monetary consideration of various forms of farming. The comparison between conventional and no-till tillage applies economic and firm-specific considerations.

The study gives an overview of current hydrological models, shows the regarded subprocesses and the parameters which are affected by the land use. It shows which issues must be taken into account from the technical application. Additionally it is important to know on which criteria the two models NASIM and NAXOS have to be selected to answer the hydrological questions.

For the field of mesoscale modelling the program Nasim was used for the river catchment of the Jungfernbach. The catchment is about 320 hectares big and located north of Kassel. For this catchment a rainfall-runoff-model is created. The data collection includes topographical parameters, parameters of the soil and the collection of relevant hydrological characteristics in the context of a field trial.

Different kinds of tillage methods and mutants of farming were simulated and the influence to the change of the surface runoff was calculated. The changes of the parameters are based on literature values. Despite the assumptions a statement on the impact of different measures of agriculture to floods can be made.

For the hydrological studies at the macroscale, the catchment area of the Fulda and Diezel was elected. The modelling was performed with the software NAXOS. As a criterion for the selection of the areas for which a changed tillage method or form of farming is possible the informations about soil erosion risks were used.

Because of the size of the modeled area of 8.705 km² the previously detailed described factors of the discharge formation were reduced to only one factor namely the CN-value. The variation of the CN-value considers the changes of the soil matrix through measures on the surface. This practical, engineering approach is one way to model large river basins but it also shows the borders of the hydrologic modelling. It is difficult to regard effects of the microscale and the mesoscale in investigations of the macroscale.

A modified tillage has positive effects on the soil and improves the retention properties. In comparison to other measures of flood protection the impact to the deformation of the flood wave is however small. On subareas changes in tillage and farming can reduce the discharge locally. One example is the impact of the interception to floods with low annuality (potato vegetation: 14 % for a HQ₁). For large river basins and flood events with high annuality the reduction of the height of the discharge is hardly visible (1 - 2 % for a HQ₁₀₀). It must be considered that the water absorption capacity of soils is subject to seasonal fluctuations. For soils in the winter months the effect to the discharge reduction is almost

negligible. For long-lasting and extensive rainfall events in conjunction with high soil moisture the influence of land use and land management is also marginal.

**Beitrag unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und
Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft zur
Reduzierung des Hochwasserabflusses**

- Inhaltsverzeichnis -

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVIII
Nomenklatur	XXI
Glossar	XXII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Inhalt.....	1
2 Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen – Stand der Technik und Forschung	4
2.1 Statistik der Landnutzung	5
2.2 Bewirtschaftungsformen	6
2.2.1 Konventionelle Landbewirtschaftung	6
2.2.2 Konservierende Landbewirtschaftung.....	6
2.2.3 Ökologischer Landbau	6
2.2.4 Extensive Weidewirtschaft	7
2.2.5 Extensiver Ackerbau	7
2.3 Bodenbearbeitungsverfahren.....	7
2.4 Probleme der Umsetzung	12
3 Prozessabläufe der Abflussbildung	15
3.1 Oberflächenabfluss	15
3.2 Interflow	16
3.3 Basisabfluss aus dem Grundwasser.....	17
3.4 Zusammenhang von Bodenerosion und Oberflächenabfluss	19
3.5 Einflüsse auf die Abflussbildung	28
3.5.1 Natürliche Faktoren.....	29
3.5.2 Anthropogene Faktoren	31
4 Finanzielle Betrachtung.....	55
4.1 Monetärer Nutzen durch Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen.....	55
4.2 Monetäre Einbußen durch geänderte Bewirtschaftungsmethoden.....	60
4.3 Förderprogramme	66
4.4 Cross Compliance.....	71
5 Hydrologische Modellierung	72
5.1 Hydrologische Modellierung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen.....	72
5.2 Eignung existierender hydrologischer Modelle	73
6 Hydrologische Modellierung in einem kleinen Einzugsgebiet am Beispiel des Jungfernaches	79
6.1 Beschreibung des Einzugsgebietes des Jungfernaches	79

6.1.1	Betrachtetes Untersuchungsgebiet Frankenhausen	80
6.1.2	Boden und Geologie	81
6.1.3	Landnutzung und Vegetation	83
6.2	Feldmessungen	83
6.2.1	Abflussmessungen.....	85
6.2.1.1	Venturi Messgerinne	85
6.2.1.2	Messung von Dränageschüttungen.....	89
6.2.2	Niederschlagsmessungen.....	90
6.2.3	Klimamessungen.....	90
6.3	Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM 3.3.1	91
6.3.1	Erstellung des NA-Modells.....	94
6.3.1.1	Topografie	95
6.3.1.2	Abgrenzung der Teilgebiete	96
6.3.1.3	Klimadaten	97
6.3.1.4	Landnutzung.....	98
6.3.1.5	Bodenarten	100
6.3.1.6	Zeitflächenfunktion	103
6.3.2	Kalibrierung	103
6.4	Hydrologische Wirkung von Maßnahmen	107
6.4.1	Ökologischer Landbau	110
6.4.2	Konservierende Bodenbearbeitung.....	112
6.4.3	Einfluss der Vegetation	114
6.4.3.1	Interzeption und Wurzeltiefe.....	114
6.4.3.2	Oberflächenrauheit.....	120
6.4.4	Feldspeicher	121
6.4.5	Dränagen	124
7	Hydrologische Modellierung in großen Einzugsgebieten am Beispiel von Fulda und Diemel.....	127
7.1	Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS.....	127
7.1.1	Eingangsdaten für das Flussgebietsmodell der Fulda und Diemel	127
7.1.2	Berechnungsalgorithmen	132
7.2	Landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel.....	134
7.2.1	Kriterium der Nutzungsänderung	134
7.2.2	Kosten der Umsetzung.....	143
7.3	Hydrologische Wirkung der Maßnahmen.....	144
7.3.1	Scheitelabflüsse der Teilflächen	144
7.3.2	Wellenverformung	161
7.3.3	Abflusslängsschnitte verschiedener Gewässer	166
8	Zusammenfassung und Ausblick	173
9	Schrifttum und Unterlagen	178

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Naturnahe, nur extensiv genutzte Aue (Jürging, 2004)	4
Abb. 2:	Naturfern, intensiv genutzter Standort (Jürging, 2004).....	4
Abb. 3:	Konventionelle Bodenbearbeitung (Trac Technik LBVG mbH, 2005).....	9
Abb. 4:	Direktsaatverfahren (Trac Technik LBVG mbH, 2005)	9
Abb. 5:	Konservierende Bodenbearbeitung (Trac Technik LBVG mbH, 2005)	10
Abb. 6:	Geräteeinsatz bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Brunotte et al., 2001)	11
Abb. 7:	Tipps und Ratschläge zur konservierenden Bodenbearbeitung (GKB, 2006)	13
Abb. 8:	Konflikte im Entscheidungsprozess zur Wahl der Bodenbearbeitung (GKB, 2006)	14
Abb. 9:	Abflussbildung im Hangmaßstab (Bronstert, 2005)	15
Abb. 10:	Schematische Darstellung des Abflussprozesses (Baumgartner et al., 1996)	16
Abb. 11:	Teilprozesse der Infiltration und des Interflow (Zuidema, 1985)	17
Abb. 12:	Schematischer Schnitt durch ein Flachlandeinzugsgebiet mit hoch anstehendem Grundwasserspiegel: oben während einer Trockenperiode; unten während einer Feuchtperiode (Krause et al., 2003).	18
Abb. 13:	Ursache eines massiven Hochwasserschadens (HNA, 14.06.2007).....	19
Abb. 14:	Bodenabtrag nach einem Starkniederschlagsereignis im hessischen Romrod im Mai 2005 (LLH, 2007)	19
Abb. 15:	Bodenerosion am Fuß des Eggegebirges bei Bad Lippspringe (World Habitat Society GmbH, 2006).....	21
Abb. 16:	Verbleib des Sedimentaustrages von Ackerflächen (Doleschel et al., 1991)	21
Abb. 17:	Erosionsgefährdete Flächen in Deutschland (BGR, 2004)	23
Abb. 18:	Regenerosivität in Deutschland, dargestellt in Form des R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (Disse, 2004)	24
Abb. 19:	Verfahren zur Bestimmung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit aufgrund des Bodenabtrags durch Wassererosion (LAP, 2005)	26
Abb. 20:	Jahresverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines erosiven Niederschlages (DVWK, 1999)	27
Abb. 21:	Abflusskanalisierung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Kreitmayr, J., 2004)	28
Abb. 22:	Faktoren für die Höhe des Oberflächenabflusses (DVWK, 1999)	29
Abb. 23:	Verschlämmlung und erosive Rinnenbildung eines konventionell bewirtschafteten Bodens nach einem Starkniederschlagsereignis am 28.09.2007 in der Gemarkung Ottrau (Foto: Weiß)	30
Abb. 24:	Unterscheidung von Porengrößen nach ihrem Äquivalentdurchmesser (Kölbl, 2006)	32
Abb. 25:	Schematisch dargestellte Fließwege in einem Boden mit Makroporen (Ackermann, 2004).....	33
Abb. 26:	Schematische Darstellung der Änderungen des Wasserinfiltrationsverlaufes bei Umstellung von konventioneller auf	

	dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung (Regensimulationsversuch, Beregnungsintensität 1,9 mm/min) (LfL, 2006)	34
Abb. 27:	Infiltrationsrate pro Minute bei Beregnungssimulationen am 13.05.2003 an den Standorten Lützschora (ökolog. Pflug) und Niederstriegis (konv. Mulch, konv. Pflug.), Frucht: Mais (0-3 % Bedeckung), Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)	35
Abb. 28:	Regenwurmbiomasse und Regenwurmabundanz nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung (Schmidt et al., 2001)	37
Abb. 29:	Gute Bodenstruktur mit Krümelgefüge und hohem Regenwurmbesatz bei optimalen Humusgehalten (Rogasik, 2004)	37
Abb. 30:	Verdichtete Bodenhorizonte ohne stabiles Porenstystem und geringer Regenwurmbesatz nach langjährig fehlender organischer Düngung (Rogasik, 2004)	38
Abb. 31:	Lagerungsdichteverteilung in der Umgebung eines Regenwurmgangs (Rogasik et al., 2005)	38
Abb. 32:	Definition von Kontinuität, Tortuosität und Vernetzungsgrad (Kölbl, 2006)	39
Abb. 33:	Makroporenstystem bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Rogasik et al., 2005)	39
Abb. 34:	Einfluss der Makroporen auf die Infiltration (Kölbl, 2006)	40
Abb. 35:	Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulationen bei unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren (Joschko et al., 1995)	41
Abb. 36:	Schadverdichtungsgefährdungsklassen für Böden (Frielinghaus et al., 2001)	42
Abb. 37:	Grundlegende Begriffe zur Bodenverdichtung (LAP, 2002 a)	43
Abb. 38:	Auswirkung einer Bodendeformation auf den Wasser- und Gashaushalt (Horn, 2001)	44
Abb. 39:	Oberflächenabfluss in Fahrspuren und Ackerrandfurchen (Prasuhn, 1991)	45
Abb. 40:	Maßnahmen gegen Bodenverdichtung (LUNG, 2004)	45
Abb. 41:	Winterroggen im konventionellen (links) und konservierenden (rechts) Anbau (Landwirtschaftlich, Gärtnerische Fakultät Berlin, 2006)	47
Abb. 42:	Naturnahe Feldspeicher im Wald (Foto: Röttcher, 10.03.2004)	49
Abb. 43:	Beispiel einer begrünten Abflussmulde (Auerswald, 2004)	49
Abb. 44:	Planungsskizze zur Anlage eines Kleinrückhaltes (Assmann et al., 1999)	50
Abb. 45:	Anlaufzeiten [h] der Hochwasserwellen in Abhängigkeit vom Dränflächenanteil [%] einzelner Versuchsflächen im Zeitraum 1971-1979 (Robinson et al., 1985)	51
Abb. 46:	Abflussreduzierung bei einem ca. 2-3 jährlichen Hochwasserereignis durch konservierende Bodenbearbeitung im Testgebiet Pließnitz (Sieker, 2002)	54
Abb. 47:	Geschätzte jährliche Kosten des Sedimentaustrages in Bayern (Doleschel et al., 1991)	55
Abb. 48:	Ertragsabhängigkeit mit und ohne Erosionsschutz in Abhängigkeit der Zeit (Doleschel et al., 1991)	56
Abb. 49:	Einsparungspotenzial durch eine Bodenbearbeitung mittels Direktsaat gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung (Tebrügge, F., 2000)	57
Abb. 50:	Vergleich der Kosten unterschiedlicher Bodenbearbeitungsmethoden (GKB, 2006)	58

Abb. 51:	Schäden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen nach dem Einstau des Hochwasserrückhaltebeckens Treysa-Ziegenhain (Foto: Peter Kugler, Mai 2002)	63
Abb. 52:	Charakteristische Raum- und Zeitskalen hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung (Niehoff, 2001)	72
Abb. 53:	Klassifizierung der hydrologischen Modelle	74
Abb. 54:	Lage der Domäne Frankenhausen (Müller, 2006).....	79
Abb. 55:	Lage und Einzugsgebiet des Jungfernaches.....	80
Abb. 56:	Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:25.000 Blatt 4522	81
Abb. 57:	Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:25.000 Blatt 4622	82
Abb. 58:	Messnetz im Untersuchungsgebiet	84
Abb. 59:	Venturi Messgerinne im Grund- und Längsschnitt (Volkart et al., 2001)	87
Abb. 60:	Venturi-Messgerinne im Rohrdurchlass unter der Bundesstraße 83 (Pegel P1) (Schlößer, 2007).....	87
Abb. 61:	Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Messstation P1	88
Abb. 62:	Pegelstation P2 und Niederschlagsmesser N1 ca. 60 m oberstrom der Grabenmündung in den Jungfernbach (Schlößer, 2007)	88
Abb. 63:	Pegelstation P3	89
Abb. 64:	Klimastation (K1) in Frankenhausen (Schlößer, 2007).....	91
Abb. 65:	Speicher- und Transportvorgänge in NASIM (Hydrotec, 2004)	93
Abb. 66:	Input-Daten aus thematischen Karten (Bornebusch, 2006).....	94
Abb. 67:	Schnittstellen und Datenübergabe in NASIM (Bornebusch, 2006)	95
Abb. 68:	Festgelegte Teilgebiete im Untersuchungsgebiet.....	96
Abb. 69:	Landnutzung im Untersuchungsgebiet	99
Abb. 70:	Lage der Bodenprofile im Untersuchungsgebiet	100
Abb. 71:	Bodenarten der Staatsdomäne Frankenhausen auf Grundlage der 50 m Rasterkartierung (Brandt et al., 2002)	101
Abb. 72:	Im Modell definierte Bodenarten im Untersuchungsgebiet	102
Abb. 73:	NASIM-Systemplan mit den zugehörigen Teilgebieten des Untersuchungsgebietes.....	103
Abb. 74:	Beobachtete und berechnete Abflüsse sowie dazugehörige Niederschlagsereignisse im Zeitraum zwischen dem 31.01.2007 und dem 18.03.2007	105
Abb. 75:	Beobachtete und berechnete Abflüsse sowie dazugehörige Niederschlagsereignisse im Zeitraum zwischen dem 20.05.2007 und dem 04.06.2007	106
Abb. 76:	Anpassung der maximalen Infiltration über den k_f -Wert	111
Abb. 77:	Mittlere Scheitelreduzierung [%] gegenüber dem Ausgangszustand bei Zunahme der maximalen Infiltrationsrate	113
Abb. 78:	Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei unterschiedlicher Vegetation im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat Mai)	116
Abb. 79:	Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei reiner Wiesenkultur im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat September)	118
Abb. 80:	Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei reinem Waldbestand im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat Mai)	119
Abb. 81:	Änderung der Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ bei reinem Waldbestand im Vergleich zum Ausgangszustand	120

Abb. 82:	Lage der Abflussmulden im Untersuchungsgebiet	122
Abb. 83:	Geänderte Geländehöhenpunkte im Untersuchungsgebiet.....	123
Abb. 84:	Vergleich der durch Pegel P3 aufgezeichneten Wasserstände mit den am Pegel P2 ermittelten Abflüssen exemplarisch für ein Niederschlagsereignis im Januar 2007	125
Abb. 85:	Vergleich der durch Pegel P3 aufgezeichneten Wasserstände mit den am Pegel P2 ermittelten Abflüssen exemplarisch für ein Niederschlagsereignis im Mai 2007.....	125
Abb. 86:	Pegel in den Einzugsgebieten von Fulda und Diemel (Meon et al., 2006)	129
Abb. 87:	Anteile der Bodengruppen in den Flussgebietsmodellen für Fulda und Diemel (Meon et al., 2006)	130
Abb. 88:	Ermittlung des CN-Wertes für eine beliebige Teilfläche (Meon et al., 2006)	131
Abb. 89:	Pegel Guntershausen (beobachtet: dünne Linie; berechnet: breite Linie) für die Ereignisse in 1995 (Meon et al., 2006)	133
Abb. 90:	Flächennutzung im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel (nach CORINE Land Cover)	134
Abb. 91:	Erosionsgefährdete Flächen im Einzugsgebiet der Fulda und Diemel (hessischer Teil) (Hlug, 2005)	137
Abb. 92:	Erosionsgefährdete Ackerflächen im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel (hessischer Teil)	138
Abb. 93:	Bewirtschaftung der Ackerflächen für die Abbildung im Flussgebietsmodell.....	140
Abb. 94:	HQ_2 Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand.....	145
Abb. 95:	HQ_{10} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand	146
Abb. 96:	HQ_{20} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand	147
Abb. 97:	HQ_{50} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand	148
Abb. 98:	HQ_{100} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand.....	149
Abb. 99:	HQ_{200} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand.....	150
Abb. 100:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_2 im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	151
Abb. 101:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_{10} im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	152
Abb. 102:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_{20} im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	153
Abb. 103:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_{50} im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	154
Abb. 104:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_{100} im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	155
Abb. 105:	Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ_{200} im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]	156
Abb. 106:	Lage der betrachteten Teilflächen	158
Abb. 107:	Hydrologische Wirkung des Szenarios Landwirtschaft an verschiedenen Teilflächenauslässen im Einzugsgebiet.....	160
Abb. 108:	Abflussganglinie eines HQ_{100} im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 429110000 (an der Fulda)	161

Abb. 109: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427990000 (an der Fulda)	162
Abb. 110: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427790000 (an der Fulda)	162
Abb. 111: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427513000 (an der Fulda)	163
Abb. 112: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 423639000 (an der Lüder).....	163
Abb. 113: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 428849000 (an der Gilsa).....	164
Abb. 114: Abflussganglinie eines HQ ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 425635000 (an der Aula).....	164
Abb. 115: Abflussganglinie verschiedener statistischer Hochwässer im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 448110000 (an der Esse)	165
Abb. 116: Abflussganglinie verschiedener statistischer Hochwässer im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 448120000 (Jungfernbach)	166
Abb. 117: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Fulda im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft	167
Abb. 118: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Fulda im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand	167
Abb. 119: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Eder im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft	168
Abb. 120: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Eder im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand	168
Abb. 121: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Diemel im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft.....	169
Abb. 122: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Diemel im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand	169
Abb. 123: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Schwalm im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft.....	170
Abb. 124: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Schwalm im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand	170
Abb. 125: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Haune im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft.....	171
Abb. 126: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Haune im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand	171

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Eckdaten der Land- und Forstwirtschaft (Statistisches Bundesamt, 2006)	5
Tab. 2:	Verteilung der Anbauflächen auf dem Ackerland in Prozent (Ackerland=100 %; Statistisches Bundesamt, 2006).....	5
Tab. 3:	Charakteristische Eigenschaften von Grundwasserleitern auf Abflusskomponenten (DVWK, 1999).....	18
Tab. 4:	Auslösung und Wirkung von Wind- und Wassererosion (Schack-Kirchner, 2005).....	20
Tab. 5:	Anteil der Erosion an den anthropogenen degradierten Bodenflächen (WBGU, 1993).....	22
Tab. 6:	Orientierungswerte für auftretende Wassererosion (BMELV, 2001)	28
Tab. 7:	Porendurchmesser und Durchlüftung in Ackerböden (Buchner, 2003)	32
Tab. 8:	Anzahl der Makroporen in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (Deutscher Bundestag, 2004)	33
Tab. 9:	Wasserversickerung auf Maisäckern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Umweltbundesamt, 2003)	35
Tab. 10:	Gesamtinfiltration und -oberflächenabfluss in Prozent bei Beregnungssimulationen am 13.05.2003 an den Standorten Lützschora („ökolog. Pflug“) und Niederstriegis („konv. Mulch“, „konv. Pflug“), Frucht: Mais, Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)	36
Tab. 11:	Bodenleben nach verschiedener Bodenbearbeitung in einer Getreidefruchtfolge mit jährlicher Strohdüngung im 5. Versuchsjahr (Umweltbundesamt, 2003)	40
Tab. 12:	Einfluss der Bodenbedeckung auf Abfluss und Bodenabtrag (LAP, 2002).....	46
Tab. 13:	Gesamtinfiltration und Bodenbedeckung bei Beregnungssimulationen auf ökologisch bewirtschafteten Parzellen in 2003 am Standort Lützschora; Frucht: Wintergerste, Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)	47
Tab. 14:	Einfluss des Rohrdränabstandes auf die Dränleistung (Wetjen, 1982)	52
Tab. 15:	Vergleich von konventioneller- und konservierender Bodenbearbeitung (Monsanto, 2006)	58
Tab. 16:	Mehrjährige Erträge verschiedener Kulturen im Systemversuch des Versuchsguts Merklingsen (Lütke Entrup et al., 2003)	59
Tab. 17:	Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAL) im Durchschnitt von zwei Fruchtfolgen bei differenzierter Bodenbearbeitung (Lütke Entrup et al., 2003)	59
Tab. 18:	Vorgesehene Bewirtschaftungsauflagen für landwirtschaftliche Flächen in Retentionräumen (Schätzl et al., 2003)	61
Tab. 19:	Entwicklung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Retentionräumen (Schätzl et al., 2003)	62
Tab. 20:	Wirtschaftliche Nachteile für die Landwirtschaft auf der Retentionsfläche bei Neustadt/Donau (Schätzl et al., 2003)	62
Tab. 21:	Richtwerte zur Ermittlung von Aufwuchsschäden an Idw. Kulturen, inkl. Stroh und Blattanfall; Marktfrüchte im Wirtschaftsjahr 2004/2005 (RP Kassel, 2004)	64

Tab. 22:	Richtwerte zur Ermittlung von Aufwuchsschäden an landwirtschaftlichen Kulturen; Futterpflanzen, Grünland und Gründüngung im Wirtschaftsjahr 2004/2005 (RP Kassel, 2004)	65
Tab. 23:	Förderhöhen im Hessischen Kulturlandsschaftsprogramm (HMULV, 2007)	68
Tab. 24:	Modelltyp, Einsatzbereiche, Diskretisierungsgrad und Einzugsgebietsgrößen verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)	76
Tab. 25:	Berücksichtigte Teilprozesse verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)	77
Tab. 26:	Berücksichtigte, durch die Landnutzung beeinflusste Parameter des Abflussgeschehens verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)	78
Tab. 27:	Untersuchte Gewässereinzugsgebiete	78
Tab. 28:	Landnutzung in den Jahren 2005, 2006 und 2007 auf der Domäne Frankenhäusen	83
Tab. 29:	Untergliederung des hydrologischen Kreislaufs in NASIM (Hydrotec, 2004)	92
Tab. 30:	Haude-Faktoren zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration von niedrigem Gras (DVWK, 1996)	97
Tab. 31:	Bestandskoeffizienten k_c zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration (Gödeke, 2007)	98
Tab. 32:	Auffällige Niederschlagsereignisse aus dem Jahr 2007	104
Tab. 33:	Gütebeurteilung der Modellierung nach dem Kriterium von Nash (Hydrotec, 2004)	107
Tab. 34:	Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld Calden (Spalte 30, Zeile 50) für die Zeitspanne Januar bis Dezember (DWD, 2000)	108
Tab. 35:	Bzgl. der hydrologischen Wirkung untersuchte Maßnahmen der Landwirtschaft	110
Tab. 36:	Kenndaten der Bodenarten im Modell (Ausgangszustand)	110
Tab. 37:	Kenndaten der Bodenarten (ökologischer Landbau)	111
Tab. 38:	Scheitelabflüsse der statistischen Hochwasserereignisse bei konventioneller Bodenbearbeitung (Ausgangszustand) sowie ökologischem Landbau und zugehörige Scheiteländerungen [%]	112
Tab. 39:	Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption im Ausgangszustand	114
Tab. 40:	Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption der verschiedenen Vegetations- und Nutzungsszenarien	115
Tab. 41:	Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption der verschiedenen Vegetations- und Nutzungsszenarien (Fortsetzung)	116
Tab. 42:	Für den Monat September berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption im Ausgangszustand	117
Tab. 43:	Für den Monat September berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption im Szenario Wiese	117
Tab. 44:	Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzelgröße und Interzeption bei einem reinen Waldbestand	118
Tab. 45:	Scheitelabflüsse der statistischen Hochwasserereignisse bei konventioneller Bodenbearbeitung (Ausgangszustand) sowie nach	

Erhöhung der Oberflächenrauheit und zugehörige Scheiteländerungen [%]	121
Tab. 46: Scheitelabflüsse der statistischen Hochwasserereignisse ohne und mit Abflussmulden im untersuchten Gebiet sowie die zugehörigen Scheiteländerungen [%]	124
Tab. 47: Änderung der Landnutzung auf den untersuchten Flächen.....	139
Tab. 48: Bodengruppen nach SCS und Typisierung (Maniak, 1997)	142
Tab. 49: Landnutzungs- und bodengruppenabhängige Curve Numbers (CN-Werte, Maniak, 1997) im Ist-Zustand.....	143
Tab. 50: Landnutzungs- und bodengruppenabhängige Curve Numbers (CN-Werte, Maniak, 1997) im Szenario Landwirtschaft.....	143
Tab. 51: Maximale Scheitelreduzierungen und –erhöhungen auf Teilflächen im Szenario Landwirtschaft [%].....	157
Tab. 52: Angeschlossene Gesamtfläche und im Szenario Landwirtschaft umgewandelter Flächenanteil für die jeweils betrachtete Teilfläche	159
Tab. 53: Anteilige Bewirtschaftung der jeweils angeschlossenen Gesamtfläche für die betrachteten Teilflächen	159
Tab. 54: Anteil der konservierend bearbeiteten bzw. in Grünland umgewandelten Flächen im Einzugsgebiet verschiedener Gewässer.....	172

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Erläuterung
A	[t/ha·a]	langjährig zu erwartender mittlerer Bodenabtrag
A_{eo}	[km ²]	Einzugsgebietsgröße
C	[/]	Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
D	[h]	Niederschlagsdauer
ETP_{Haude}	[mm/d]	potenzielle Evapotranspiration nach Haude
F	[mm/hPa·d]	Haude-Faktor
$h_n(T_n, D)$	[mm]	Niederschlagshöhe
I	[-]	Gefälle
I_E	[-]	Energieliniengefälle
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Rauheitsbeiwert nach Manning-Strickler
K	[t·h/ha·N]	Bodenerodierbarkeitsfaktor
L	[/]	Faktor zur Berücksichtigung der erosionswirksamen Hanglänge
l	[m]	Hanglänge
P	[/]	Faktor zur Berücksichtigung von Erosionsschutzmaßnahmen
Q	[m ³ /s]	Abfluss in einer Gewässerstrecke
R	[N/h·a]	Regenerositätsfaktor
S	[/]	Hangneigungsfaktor
S_r	[%]	Scheitelreduzierung
T_{14}	[°C]	Lufttemperatur um 14 ³⁰ Uhr
T_n	[a]	Wiederholungszeitspanne eines Hochwasserereignisses oder Niederschlags
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
ΔQ	[m ³ /s]	Änderung des Abflusses
Δt	[min]	Zeitschrittweite eines Rechenintervalls
$u_j(D)$	[min]	Parameter der Gumbelverteilung
$w_j(D)$	[min]	Parameter der Gumbelverteilung

Glossar

100 jährlicher Abfluss (HQ_{100}): Abfluss, der im Mittel alle 100 Jahre erreicht und überschritten wird.

Abflussbereich: Spektrum der Abflusswerte die an einem Gewässer auftreten können.

Abflussfülle: Wasservolumen einer Hochwasserganglinie über einen gewählten Abfluss (DIN 4049).

Abflusskonzentration: Gesamtheit der Vorgänge, die den zeitlichen Verlauf des Abflusses in einem Gewässer festlegen.

Abflusskurve: Kurve, die die Abhängigkeit des Abflusses vom Wasserstand in einem Querschnitt eines Fließgewässers darstellt.

Abflusspegel: Messstelle für den Wasserstand und den Abfluss.

Abflussscheitel: Spitze einer Welle oder einer Ganglinie.

Ackerflächen: Für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen genutzte Flächen und stillgelegte Flächen oder in gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand erhaltene, aus der landwirtschaftlichen Erzeugung genommene Flächen sowie ggf. bestimmte mehrjährige Kulturen. Auch eingesätes oder natürliches Grünland zählt als Ackerland, wenn es im Rahmen einer Fruchtfolge weniger als fünf Jahre als solches genutzt wurde. Nicht zur Ackerfläche zählen Dauergrünland und Dauerkulturen (inklusive Hopfen).

ATKIS: Abkürzung für „Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem“. Enthält in einem digitalen Landschaftsmodell die wesentlichen topografischen Objekte (z.B. Siedlungsflächen verschiedener Nutzung, Bauwerke, Straßen, usw.)

Ausuferung: Übertreten von Wasser über die seitliche Begrenzung des Gewässerbettes in die Vorländer.

Basisabfluss: Teil des Abflusses, der nicht unmittelbar vom Niederschlag abhängig ist.

Bemessungshochwasser: Das Hochwasser, welches als Grundlage zur Bemessung von Hochwasserschutzeinrichtungen bzw. für die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten herangezogen wird (z. B. HQ_{100}).

Bemessungsniederschlag: Für ein bestimmtes Abflussgebiet angenommene Niederschlagshöhe und –verteilung, die zur Bestimmung des Bemessungshochwassers dient.

Bordvoller Abfluss: Abfluss bei Vollfüllung des Gewässerbettes aber ohne Ausuferung in die Vorländer.

CN-Wert: siehe SCS-Verfahren.

Dauergrünland: Flächen, die durch Einsaat oder auf natürliche Weise (Selbstaussaat) zum Anbau von Gras oder anderen Grünfutterpflanzen genutzt werden und mindestens 5 Jahre lang nicht Bestandteil der Fruchtfolge des Betriebes sind (5-Jahres-Regelung). Hierzu zählt auch der ununterbrochene Anbau von Klee, Kleegras, Luzerne, Gras und Klee-Luzerne-Gemischen bzw. das Wechselgrünland.

Dauerkulturen: Nicht in die Fruchtfolge einbezogene Kulturen außer Dauergrünland, die für die Dauer von mindestens fünf Jahren auf den Flächen verbleiben und wiederkehrende Erträge liefern, einschließlich Baumschulen und Niederwald mit Kurzumtrieb,

mit Ausnahme der mehrjährigen landwirtschaftlichen Kulturen und Reb- und Baumschulen solcher mehrjährigen landwirtschaftlichen Kulturen.

Digitales Höhenmodell: Das digitale Geländemodell beschreibt die Form und Höhe der Geländeoberfläche. Daten liegen meist in Rasterform vor.

Effektiver Niederschlag: Teil des Niederschlages, der als Direktabfluss wirksam wird.

Eindimensionales, stationäres Strömungsmodell: Eindimensionales Modell der Strömung, bei der die Geschwindigkeit im gesamten Strömungsfeld keinen zeitlichen Änderungen unterliegt (DIN 4044).

Einzugsgebiet: Nach DIN 4045 in Horizontalprojektion gemessenes Gebiet, aus dem Wasser oder Abwasser einem bestimmten Ort zufließt. Das Einzugsgebiet des Grundwassers kann sich vom oberirdischen Einzugsgebiet unterscheiden. In den meisten Niederschlag-Abflussmodellen wird, soweit das Grundwasser überhaupt berücksichtigt wird, angenommen, dass das unterirdische Einzugsgebiet dem oberirdischen entspricht. Die Gewässereinzugsgebietsgröße wird an der Mündung des betrachteten Gewässers bestimmt. In der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) wird folgende Einstufung der Einzugsgebietsgrößen vorgenommen:

Einzugsgebiet	Größe
klein	10 -- 100 km ²
mittelgroß	100 -- 1.000 km ²
groß	1.000 -- 10.000 km ²
sehr groß	> 10.000 km ²

Feldkapazität: Ist die Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft zurückhalten kann.

FGM: Flussgebietsmodell.

Fließgefälle: Wasserspiegeldifferenz zwischen zwei Querschnitten dividiert durch den Abstand der Querschnitte.

Fließstrecke/-weg: Weg, dem ein Flüssigkeitsteilchen in einer Flüssigkeit bei gleichförmiger Strömung folgt.

Fließzeit: Zeit, die während der Passage eines Wasserteilchens von einem gegebenen Punkt zu einem anderen stromabwärts gelegenen Punkt vergeht.

Fruchtfolge: Unter Fruchtfolge versteht man das geplante Nacheinander verschiedener Kulturen auf einer Ackerfläche oder einem Gemüsebeet.

Fülle: Volumen einer Hochwasserwelle in m³.

Ganglinie: Grafische Darstellung der zeitlichen Änderung hydrologischer Daten (z. B. Abfluss, Geschwindigkeit).

Georeferenzierung: Festlegung des Raumbezuges.

Gesamtporenvolumen (GPV): Das Gesamtporenvolumen umfasst alle Hohlräume eines Bodens, die mit Wasser oder Luft gefüllt sein können.

Hochwasser ist eine die normale Höhe übersteigende Wasserführung eines fließenden oder stehenden oberirdischen Gewässers infolge von Niederschlägen, Schneeschmelze oder Sturm.

Hochwasserperiode: Zeitraum, in dem verstkt Hochwässer auftreten können.

Hochwasserrckhalte: Sammelbegriff für Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken, Klein- und Kleinstrckhalte, Retentionsräume, Polder u.. die dem Rückhalt von Hochwasser dienen. Hochwasserrckhalte müssen im Gegensatz zu Hochwasserrückhaltebecken nicht durch Dmme oder Deiche begrenzt werden. Sie können gesteuert oder ungesteuert sein.

Hochwasserrückhaltebecken: Nach DIN 4048 T1, Stauanlage deren Staubecken ganz oder teilweise dem vorrbergehenden Rückhalt von Hochwasser dient. Nach DIN 19700 T12 werden kleine, mittlere und große Hochwasserrückhaltebecken unterschieden.

	Stauhe	Stauraum
Kleine Becken	bis 5,0 m	bis 100.000 m
Mittlere Becken	bis 15,0 m	bis 1.000.000 m
Große Becken	über 15,0 m	über 1.000.000 m

Hochwasserschutzkonzept: Ergebnis einer systematischen Untersuchung zum Hochwasserschutz, aufbauend auf einer Bestandsaufnahme, in der eine optimierte Lösung aus den drei Strategien „Natlicher Wasserrückhalt“, „Technischer Hochwasserschutz“ und „Weitergehende Hochwasservorsorge“ für eine Kommune, eine Region oder ein Einzugsgebiet erarbeitet wurde.

Hochwasserschutzmaßnahmen: Bezeichnet die Summe aller Maßnahmen zur Vermindeung von Schäden durch Hochwasser. Zu den Hochwasserschutzmaßnahmen zählen administrative (Flächenvorsorge, gesetzliche Festlegungen, Förderung des Rückhaltes in der Fläche), bauliche (Gewässer- und Auenrenaturierung, Rückhalte, lokale Maßnahmen, Bauvorsorge) und organisatorische (Verhaltensvorsorge, Information, Hochwasseraktionsplne) Maßnahmen.

Hochwasserwelle: Zunahme der Wasserführung bis zu einem bestimmten Scheitel, bedingt durch Niederschlag, Schneeschmelze, Dammbruch oder Wasserabgabe aus einem Speicher und anschließende Abnahme der Wasserführung.

Hydraulische Rauheit: Fließendes Wasser wird durch Reibung, z. B. an der Gewässersohle oder Uferböschung gebremst, d.h. die hydraulische Rauheit ist ein Maß für die Stärke der Reibung.

Instationär: Zeitliche Änderung, z. B. des Abflusses.

Klimastation: Messstation an der Klimaparameter, wie Lufttemperatur und –feuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung etc. gemessen werden.

Kritische Niederschlagsdauer: Niederschlagsdauer, bei der ein kritisches Wert erreicht wird, d.h. bei dem ein bestimmter Prozess beginnt oder endet.

Mittelgebirge: Bergland mit einer relativen Höhe von bis zu 1.000 m . NN und meist abgerundeten Bergrücken.

Niederschlag: Nach DIN 4049, Teil 3, Wasser der Atmosphäre, das nach Kondensation oder Sublimation von Wasserdampf in der Lufthülle ausgeschieden wurde und sich in Folge der Schwerkraft entweder zur Erdoberfläche bewegt (fallender Niederschlag) oder zur Erdoberfläche gelangt ist (gefallener Niederschlag). Der effektive oder auch abflusswirksame Niederschlag ist der Anteil des Gesamtniederschlages, der innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes an einem Betrachtungsquerschnitt am Gewässer abgeflossen ist.

Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell): Mathematisches Modell zur Abbildung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses. Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Modellansätzen, mit denen dieser Prozess mehr oder weniger detailliert, mit empirischen oder physikalisch basierten Zusammenhängen beschrieben wird. Modelle bilden stets nur einen Teil der Wirklichkeit auf der Grundlage der eingegebenen Zusammenhänge und Parameter ab. Daher ist eine detaillierte Prüfung (Kalibrierung) erforderlich, ob das Modell die Wirklichkeit für die gewählte Fragestellung hinreichend genau abbildet. Ein für eine Fragestellung kalibriertes Modell kann für eine andere Fragestellung vollkommen untauglich sein. Niederschlag-Abfluss-Modelle sind für den planenden Ingenieur ein Instrument zur Ermittlung von Bemessungsgrößen (Abflüsse) und zur Überprüfung der Auswirkung von baulichen Maßnahmen.

Niederschlagsgebiet: Nach DIN 4049, Teil 3, von einem bestimmten Niederschlagsereignis betroffenes Gebiet in der Horizontalprojektion.

Nutzbare Feldkapazität (nFK): Ist der Wasseranteil der Feldkapazität, der Pflanzen nutzbar zur Verfügung steht.

Pegelmessstelle: Messstelle mit der der Wasserstand in einem Gewässer erfasst wird. In Verbindung mit einer rechnerisch und durch Messung von Geschwindigkeitsprofilen ermittelten Wasserstands-Abfluss-Beziehung lässt sich der jeweilige Abfluss bestimmen. Der Abfluss lässt sich an natürlichen Gewässern mit vertretbarem Aufwand nicht direkt messen, gemessen werden kann hingegen der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit. Der Abfluss wird daher nicht als „gemessener“ sondern als „beobachteter“ oder „ermittelter Abfluss“ bezeichnet, während „berechneter“ Abfluss Berechnungsergebnisse eines Niederschlag-Abfluss-Modells bezeichnet.

Permanenter Welkepunkt (PWP): Der permanente Welkepunkt stellt die Grenze dar, bei dessen Erreichen Pflanzen in der Regel irreversibel zu welken beginnen. Der PWP ist die Grenze zum Totwasseranteil in einem Boden.

Regression: Statistische Methode zur Untersuchung wechselseitiger Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen zwei oder mehreren messbaren Veränderlichen. Die verbreitetste Form der Regressionsanalyse ist die lineare Regression.

Rückstau: Beeinflussung des Oberwasserstandes durch den Unterwasserstand.

Scheitelabfluss: Maximaler Momentanabfluss einer gewählten Ganglinie.

Scheitelreduzierung: Reduzierung des Scheitelabflusses ΔQ nach Umsetzung einer Maßnahme in Prozent des ursprünglichen Scheitelabflusses Q . $S_r = (\Delta Q/Q)^*100 [\%]$.

SCS-Verfahren: Verfahren des Soil Conservation Service zur Ermittlung des abflusswirksamen (effektiven) Niederschlags. Das in den USA entwickelte empirische Verfahren beruht auf der Auswertung einer großen Zahl kleiner Einzugsgebiete. Im Verfahren wird ein CN-Wert (Curve Number) in Abhängigkeit von Bodenart, Bodennutzung, Vorregen und Jahreszeit ermittelt. Für den Boden werden vier Bodentypen unterschieden. In Deutschland ist das SCS-Verfahren in verschiedenen Weiterentwicklungen und Adaptionen Teil vieler Niederschlag-Abfluss-Modelle. Im Gegensatz zum SCS-Verfahren wird in neueren Modellen der abflusswirksame Niederschlag häufig mit einem Ansatz zum Bodenwasserhaushalt auf Basis physikalischer Kenngrößen ermittelt.

Sohlgefälle: Neigung oder Gradient einer Sohle in Bezug auf eine Horizontale.

Terrassen sind von Menschen angelegte, lineare Strukturen in der Agrarlandschaft, die dazu bestimmt sind, die Hangneigung von Nutzflächen zu verringern. Das zuständi-

ge Amt für Landwirtschaft und Forsten kann im Einvernehmen mit der Unteren Naturschutzbehörde die Beseitigung einer Terrasse genehmigen, soweit der Beseitigung keine Gründe des Erosionsschutzes entgegenstehen.

Totwasseranteil: Entspricht dem Wasseranteil, der mit höherer Spannung gehalten wird, als die Pflanzenwurzeln üblicherweise entwickeln können. Damit steht er der Vegetation nicht zur Verfügung.

Translation: Prozess der zeitlichen Verschiebung der Wasserteilchen.

Überschwemmte Flächen: Flächen die durch wasserrechtliche Regelungen besonderen Nutzungseinschränkungen unterliegen. Geregelt sind vor allem die Errichtung oder Erweiterung baulicher Anlagen, das Aufbringen und Ablagern wassergefährdender Stoffe auf den Boden, die Umwandlung von Grün- in Ackerland und das Anlegen, Erweitern oder Beseitigen von Baum- und Strauchpflanzungen, soweit dies nicht dem Ausbau oder der Unterhaltung des Gewässers, der Erhaltung oder Wiederherstellung einer natürlichen Auenlandschaft, der Verjüngung des Pflanzbestandes oder der Gefahrenabwehr dient.

Überschwemmung: Ist die Ansammlung erheblicher Wassermengen auf Geländeoberflächen als unmittelbare Folge von Hochwasser, Niederschlägen oder Schneeschmelze.

Überschwemmungsgebiete: Als Überschwemmungsgebiete gelten in Hessen durch Rechtsverordnung festgestellte Gebiete (§ 69 Abs. 1 Hessisches Wassergesetz HWG), als Arbeitskarten der Wasserwirtschaftsverwaltung dargestellte und veröffentlichte Gebiete für die Dauer von fünf Jahren ab Veröffentlichung (§ 69 Abs. 1 HWG) und Gebiete zwischen Ufern und Deichen sowie die Beckenräume von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken (§ 69 Abs. 2 HWG). Sie werden in Hessen in der Regel so abgegrenzt, dass ein Hochwassereignis, mit dem statistisch einmal in einhundert Jahren zu rechnen ist, zugrunde gelegt wird (§ 69 Abs. 1 HWG).

Übrige Überschwemmungsbereiche: In der Raumplanung Flächen, die über die vorhandenen Überschwemmungsbereiche (hier HQ₁₀₀) hinausgehen, deren gleichmäßiger Einstau im Hochwasserfall nicht durch Deiche, Bahndämme, technische Schutzeinrichtungen, natürliche Geländeformationen u. a. beeinträchtigt wird.

Vorbeugender Hochwasserschutz: siehe Hochwasserschutzmaßnahmen.

Vorland: Gelände außerhalb des Gewässerbettes; in der Regel durch Deich, Dünen oder Hochufer begrenzt

Wiederkehrzeit: Mittlerer Zeitraum, innerhalb dessen ein bestimmtes Ereignis erreicht oder überschritten wird.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der moderne Hochwasserschutz basiert auf dem klassischen 3-Säulen-Modell und berücksichtigt technische Maßnahmen, den vorbeugenden Hochwasserschutz und Maßnahmen der weitergehenden Hochwasservorsorge.

Unter technischem Hochwasserschutz wird im klassischen Sinne der Bau von Deichen, Dämmen und Hochwasserrückhaltebecken verstanden. Die weitergehende Hochwasservorsorge beinhaltet die Verbesserung des Hochwasserwarndienstes, der Bauvorsorge und der Risikovorsorge. Der vorbeugende Hochwasserschutz fordert die Sicherung und Wiederherstellung von Retentionsräumen bzw. allgemein den Wasserrückhalt in der Fläche.

Nicht nur im 5-Punkte-Programm der Bundesregierung (BMU, 2002) zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes, sondern auch in weiteren Leitfäden (LAWA, 1995, ...) wird darauf hingewiesen, dass der Wasserrückhalt in der Fläche gefördert werden sollte. Als Möglichkeit der dezentralen Hochwasserrückhaltung wird diesbezüglich die Verbesserung der Versickerungsfähigkeit des Bodens genannt. Maßnahmen auf Flächen mit landwirtschaftlicher Nutzung stehen dabei im besonderen Fokus.

Die Forderungen zielen im Allgemeinen darauf, künftig verstärkt den vorbeugenden Hochwasserschutz und Maßnahmen der weitergehenden Hochwasservorsorge zu betrachten. Dies kann damit begründet werden, dass klassische, technische Hochwasserschutzmaßnahmen oftmals schwierig mit einem umweltverträglichen Hochwasserschutz zu vereinbaren sind. Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes, wie beispielsweise der Wasserrückhalt in der Fläche, sind hingegen besser vereinbar mit den Zielen der Wasserrahmenrichtlinie.

Die Relevanz der Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen begründet sich mit dem hohen Flächenanteil von 53 % (Statistisches Bundesamt, 2006) gegenüber anderen Nutzungarten (Waldböden 29,8 %; Verkehrsflächen 4,9 %;...) im Bundesgebiet.

Die in den letzten Jahrzehnten zunehmende Intensivierung der Landwirtschaft wird mitverantwortlich gemacht für die Häufung und Verstärkung der Hochwasserereignisse. Bodenverdichtungen durch verstärkten Maschineneinsatz, Dränagesysteme sowie die Beseitigung von wasserretentionsfördernden Strukturen, wie beispielsweise Gehölz- und Wiesenstreifen, sind ursächlich für die Verschlämzung der Bodenoberfläche, sinkendes Infiltrations- und Speichervermögen sowie die Oberflächenabflussbeschleunigung. Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen der Zunahme der Erosionsproblematik und dem verstärkten Oberflächenabfluss auf landwirtschaftlichen Nutzflächen.

In diesem Kontext stellt sich die Frage, welchen Beitrag unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft zur Reduzierung des Hochwasserabflusses leisten können. Können Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen den Wasserrückhalt dermaßen steigern, dass im Gerinne Effekte hinsichtlich der Verformung einer Hochwasserwelle und Reduzierung der Abflussscheitel sichtbar werden und was bedeutet dies für den vorbeugenden Hochwasserschutz?

1.2 Zielsetzung und Inhalt

Basierend auf Untersuchungen der Vergangenheit wird empfohlen, landwirtschaftliche Nutzflächen aktiv in Hochwasserschutzkonzepte einzubeziehen. Zur Realisierung in der Praxis werden Maßnahmen der Landwirtschaft zum Wasserrückhalt derzeit noch stark subventioniert.

Die vorliegende Untersuchung behandelt die folgenden Kernfragen:

- Welche Abflussprozesse finden auf der Fläche statt?
- Welche Aussagen liefern die bisherigen Untersuchungen bzgl. des Wasserrückhaltes in der Fläche und bzgl. des Rückhaltes im Gerinne?
- Wie können unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft im Modell abgebildet werden?
- Mit welchem Modellierungsaufwand können Aussagen getroffen werden?
- Wie groß ist der Effekt für den Hochwasserschutz am Beispiel unterschiedlicher Einzugsgebiete?

In Kapitel 2 werden zunächst die grundlegenden Begriffe der Landwirtschaft, die Bewirtschaftungsformen und Bodenbearbeitungsverfahren definiert. Die maschinelle Einwirkung auf die Bodenmatrix sowie die betriebswirtschaftliche Sichtweise werden beschrieben und die Verteilung der Anbauflächen und die Landnutzungsentwicklung aufgezeigt.

Kapitel 3 beinhaltet die grundlegenden Prozessabläufe der Abflussbildung auf der Fläche und im Gerinne. In einer Literaturrecherche werden natürliche und anthropogene Faktoren, die das Oberflächenabflussverhalten auf landwirtschaftlichen Nutzflächen beeinflussen, untersucht. Unterschieden werden dabei Faktoren, die durch die Landwirtschaft direkt beeinflusst werden können. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf dem Einfluss von Maßnahmen auf die Bodenerosion, die in direkter Verbindung mit dem Oberflächenabfluss zu sehen ist.

In Kapitel 4 wird erläutert wie eine Änderung der Bewirtschaftung und Nutzung erreicht werden kann. Neben rechtlichen Vorgaben spielen dabei finanzielle Aspekte eine gewichtige Rolle. Die verschiedenen Fördermöglichkeiten sollen darüber Auskunft geben. Letztendlich sind die Kosten ein maßgeblicher Entscheidungsparameter für die spätere Realisierung der Maßnahmen. Mögliche Einschränkungen einer Flächenumnutzung bzw. einer geänderten Bewirtschaftung werden beschrieben und dienen als zusätzliches Entscheidungskriterium.

Kapitel 5 zeigt auf, welche Fragestellungen aus modelltechnischer Sicht im Rahmen der Untersuchungen bestehen. Aus der Vielzahl der existierenden hydrologischen Modelle werden die Modelle NASIM und NAXOS im Hinblick auf die Anwendbarkeit geprüft. Die Einsatzgrenzen der Modelle und die Berücksichtigung der wesentlichen abzubildenden Einflussgrößen des Abflussgeschehens werden erläutert. Dabei wird auf die in Kapitel 3 genannten Faktoren Bezug genommen.

In Kapitel 6 werden Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in einem Modell der Mesoskala untersucht. Die hierfür notwendigen Detail-Untersuchungen werden auf Teilflächen der von der Universität Kassel gepachteten ca. 320 Hektar umfassenden Staatsdomäne Frankenhausen im Einzugsgebiet des Jungfernaches durchgeführt. Dort liegen hoch aufgelöste Daten bzgl. Bodenuntersuchungen auf verschiedenen Schlagparzellen vor. Zusätzlich werden mittels geeigneter Messtechnik hydrologische Daten erfasst und ausgewertet. Auf Grundlage der vorliegenden Daten, örtlichen Erhebungen und der Simulation in einem kalibrierten Niederschlag-Abfluss-Modell wird die Änderung des Oberflächenabflusses bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsmethoden und Bewirtschaftungsformen bestimmt. Es werden die Einflüsse der Vegetation in Form von Interzeption und Wurzeltiefe sowie bzgl. der Oberflächenrauheiten, die Einflüsse der Infiltration und k_f -Werte sowie die Wirkung von Dränagesystemen und Feldspeichern untersucht. Dabei

werden Modellparameter variiert und die Wirkungen auf den Scheitelabfluss im Gerinne verglichen.

In Kapitel 7 werden Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in einem Modell der Makroskala untersucht. An Hand vorliegender Flächendaten wird abgeschätzt, welche Flächen im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel für eine Aktivierung des Bodenspeichers in Frage kommen und wie groß die Wirkungen auf den Scheitelabfluss im Gerinne sind, wenn man von einer großflächigen Umsetzung der Maßnahmen ausgeht. Als Entscheidungskriterium wird das Bodenerosionsrisiko gewählt, welches für das Bundesland Hessen flächendeckend zur Verfügung steht. Damit können die Flächen erfasst werden, für die Landnutzungs- oder Bewirtschaftungsänderungen in Frage kommen und für die eine zukünftige Änderung der Nutzung anzustreben ist. Die hydrologische Effektivität wird großflächig für die Einzugsgebiete der Fulda und Diemel abgeschätzt. Dafür wird im Gegensatz zur Modellierung in Kapitel 6 lediglich ein Parameter in Form des CN-Wertes der Einzelflächen geändert. Die CN-Werte berücksichtigen dabei alle Einflüsse der Bodenbearbeitung auf die Bodenmatrix in gebündelter Form. Um die ökonomische Effizienz der Maßnahmen beurteilen zu können, werden die für die Umsetzung entstehenden Kosten abgeschätzt.

2 Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen – Stand der Technik und Forschung

Schon immer diente die Landwirtschaft der Bereitstellung von Nahrungsmitteln. Im Laufe der Jahrhunderte erhöhten sich die Produktvielfalt und die Erträge. Begleitet wurde dies durch grundlegende strukturelle Wandlungen und eine geänderte Flächeninanspruchnahme. Die geschichtliche Entwicklung von Flussbau, Hochwasserschutz, Bodenkultur und Energiegewinnung führte an vielen Fließgewässerstrecken vor allem zu ausgedehnten Agrarstandorten, unterbrochen nur von Verkehrsachsen, Industrie- und Siedlungsgebieten. Letztlich wurde durch all diese Maßnahmen die Fließgewässer- und Auendynamik mehr oder weniger stark reduziert. Unter diesen eher statischen Rahmenbedingungen haben sich viele Flusslandschaften weit von ihrem ursprünglichen Zustand (Abb. 1) entfernt (Abb. 2).

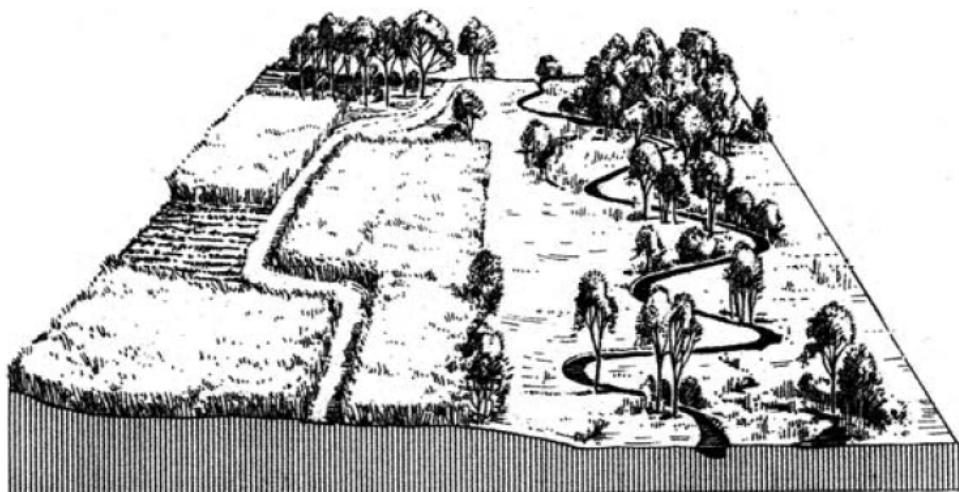


Abb. 1: Naturnahe, nur extensiv genutzte Aue (Jürging, 2004)

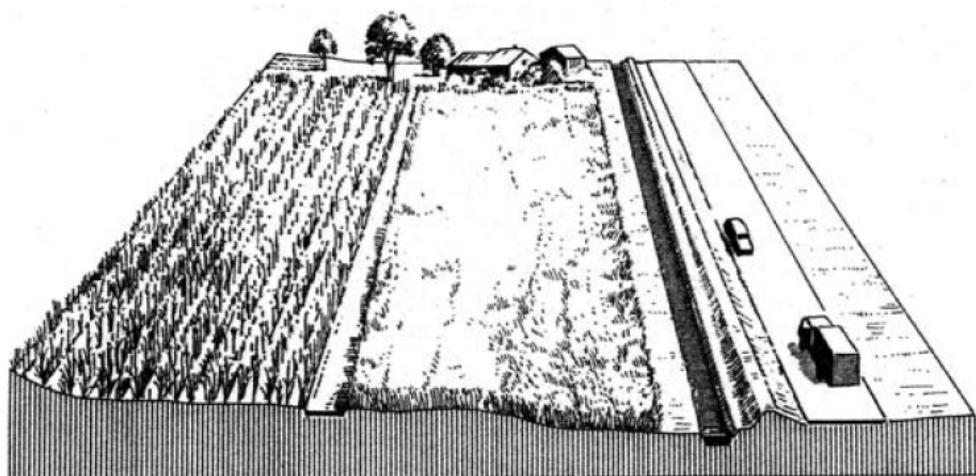


Abb. 2: Naturfern, intensiv genutzter Standort (Jürging, 2004)

2.1 Statistik der Landnutzung

Die Landwirtschaft dient nicht nur der Produktion von Nahrungsmitteln, sondern gewährleistet durch die Flächenbewirtschaftung, dass die Besiedlungsstruktur ländlicher Gebiete und die über Jahrhunderte gewachsene Kulturlandschaft erhalten bleibt.

Landwirtschaftlich genutzte Fläche	17,0 Mill. Hektar = 48 % der Fläche Deutschlands
Landwirtschaftliche Betriebe	395500
Bruttowertschöpfung in der Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	21,8 Mrd. EUR = 1,1 % der gesamten Bruttowertschöpfung
Mit betrieblichen Arbeiten Beschäftigte in der Landwirtschaft	1,3 Mill.

Tab. 1: Eckdaten der Land- und Forstwirtschaft (Statistisches Bundesamt, 2006)

2005 lieferte die aktuelle bundesweite Flächenerhebung die folgenden Daten. Die Bodenfläche der Bundesrepublik Deutschland beträgt 357.050 km². Der Anteil der Landwirtschaftsfläche ist mit 48 % am größten. In acht Ländern wird mindestens die Hälfte der Bodenfläche landwirtschaftlich genutzt. Den höchsten Wert hat Schleswig-Holstein mit 71 %. Neben den drei Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin haben Hessen und Rheinland-Pfalz mit jeweils knapp 43 % den geringsten Anteil.

Die Waldfläche beträgt etwa 30 % der Gesamtfläche Deutschlands. Das waldreichste Land ist Rheinland-Pfalz mit gut 41 %, gefolgt von Hessen mit 40 %. Den geringsten Anteil an Waldfläche besitzt Schleswig-Holstein mit lediglich 10 %.

Die Siedlungs- und Verkehrsflächen umfassen nahezu 46.000 km², das entspricht etwa 13 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland.

70 % der landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen, das entspricht einem Anteil von fast 12 Millionen Hektar, werden ackerbaulich genutzt. Des Weiteren werden 5 Millionen Hektar Dauergrünland (29 %) und rund 100.000 Hektar Rebland (1 %) bewirtschaftet. Bei einem Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen in den vergangenen vier Jahren um 67.900 Hektar oder 0,4 % ist der Anteil des Ackerlandes gegenüber dem Dauergrünland leicht gestiegen. Der Rebflächenanteil ist leicht gesunken. Die Verteilung der Pflanzenarten auf den ackerbaulich genutzten Flächen zeigt die folgende Tabelle (Tab. 2).

Fruchtart	1999	2001	2003	2005
Weizen	22,0	24,5	25,1	26,7
Wintergerste	11,6	12,5	11,2	11,4
Sommergerste	7,1	5,4	6,4	5,1
Hafer	2,3	2,0	2,2	1,8
Roggen	6,3	7,1	4,5	4,6
übrige Getreidearten	6,8	8,2	8,5	8,1
Getreide zusammen	56,1	59,6	57,8	57,6
Kartoffeln	2,6	2,4	2,4	2,3
übrige Hackfrüchte	4,3	3,9	3,9	3,7
Hackfrüchte zusammen	6,9	6,3	6,3	6,0
Grünmais/Silomais	10,2	9,6	9,9	10,6
übrige Futterpflanzen	4,3	3,8	3,5	4,5
Futterpflanzen zusammen	14,5	13,4	13,4	15,2
Sonstige Ackerfläche	22,5	20,7	22,5	21,2

Tab. 2: Verteilung der Anbauflächen auf dem Ackerland in Prozent (Ackerland=100 %; Statistisches Bundesamt, 2006)

2.2 Bewirtschaftungsformen

Die Landwirtschaft ist der flächenmäßig größte Landnutzer. Seit längerem erforschen Untersuchungen den Bezug zwischen der Erhöhung der Intensität von Hochwasserereignissen in Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach dem Einfluss landwirtschaftlicher Produktionstechniken auf die Infiltration von Böden. Bewirtschaftungsformen geben Auskunft über den Geräteeinsatz, mit welcher Art und Intensität Böden bearbeitet werden und welche Düngerarten eingesetzt werden dürfen. Die ständige Intensivierung führte in den letzten Jahrzehnten zu den gegenwärtigen Problemen der Landbewirtschaftung:

- Ökonomie,
- biotische Verarmung,
- Erosion und Abfluss,
- Bodenverdichtung,
- Belastung von Nachbarkompartimenten mit Agrochemikalien.

Um dem entgegenzuwirken entstanden die unterschiedlichen Formen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung.

2.2.1 Konventionelle Landbewirtschaftung

Die konventionelle Bewirtschaftung ist nach wie vor die verbreitetste Form der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsstrategie. Sie setzt im Ackerbau üblicherweise chemische Pflanzenschutzmittel und neben Wirtschaftsdüngern (z.B. Gülle) auch Kunstdünger ein. Die genutzten Maschinen helfen durch eine Komplettwendung der obersten Bodenschicht den Unkrautdruck zu hemmen, sorgen gleichzeitig aber auch für eine steigende Verdichtung des Untergrundes und die Reduzierung der Infiltrationsleistung. Im Rahmen der konventionellen Bewirtschaftung kommt üblicherweise eine dreigliedrige Fruchtfolge zur Anwendung (Beispiel: zweimal Getreide, gefolgt von einer Winterzwischenfrucht und Zuckerrüben).

2.2.2 Konservierende Landbewirtschaftung

Die Bewirtschaftungsform steht für reduzierte Bodenbearbeitung, Minimalbodenbearbeitung, pfluglose Bodenbearbeitung, nicht wendende Bodenbearbeitung usw.. Ziel der konservierenden Bodenbearbeitung ist es, die Rentabilität der Produktion zu steigern, die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und die Umwelt zu schützen. Im allgemeinen wird der Boden bei konservierender Landbewirtschaftung durch eine Mulchsaat gegen die erosionsauslösende Wirkung massiver Niederschläge geschützt. Die Stabilität der Bodenaggregate, der organische Substanzgehalt des Bodens und die Bodenfruchtbarkeit nimmt zu. Die Verdichtung der Bodenmatrix durch schwere Radlast wird reduziert. Zudem verbessert sich die Infiltration und damit die Grundwasserneubildung durch Vermeidung der Oberflächenverschlammung.

2.2.3 Ökologischer Landbau

Gegenüber dem konventionellen Landbau gibt es verschiedene alternative Landbaumethoden die auf mineralische Düngemittel und chemische Pflanzenschutzmittel verzichten. Das massenhafte Auftreten von Unkräutern soll durch eine gezielte Fruchtfolge, die sorgfältige Bodenbearbeitung und die mechanische Beikrautregulierung (Striegel, Hacke und Bürste) verhindert werden. Von den verschiedenen alternativen Landbaumethoden sind in

der Bundesrepublik Deutschland besonders die biologisch-dynamische Wirtschaftsweise, der organisch-biologische Landbau, der ökologische Landbau und der naturnahe Anbau bekannt geworden (WLV, 2006). Eine EU-Verordnung regelt die Grundregeln für den ökologischen Landbau und die Tierhaltung. Die Bodenbearbeitung ist im ökologischen Landbau ein zentrales ackerbauliches Steuerinstrument. Dabei soll die Einarbeitung von organischen Düngern, die Bekämpfung von Wurzelunkräutern, die Lockerung der gesetzten bzw. verdichteten Krume, die Bereitung eines optimalen Saatbetts, die Stabilisierung des Oberbodens gegen Schadveränderungen wie Erosion und Verdichtung sowie die Mobilisierung von Nährstoffen erreicht werden. 2005 gab es in Deutschland 13.700 ökologisch wirtschaftende Betriebe, das sind 3,5 % aller landwirtschaftlichen Betriebe. Dies entspricht einem Zuwachs von mehr als 4.100 Betrieben (+43,1 %) gegenüber der Landwirtschaftszählung 1999. Diese Betriebe bewirtschafteten rund 784.000 Hektar, d. h. der Umfang an ökologisch genutzter landwirtschaftlicher Fläche stieg um ca. 294.900 Hektar gegenüber 1999. Der Flächenzuwachs in Öko-Betrieben zwischen 1999 und 2005 betrifft alle Hauptnutzungsarten. In besonderem Maße haben die Dauergrünlandflächen im Öko-Landbau von 229.100 auf 399.800 Hektar (+ 74,5 %) zugenommen. Auch die Ackerfläche wuchs um 48,4 % auf 375.100 Hektar. Die Dauerkulturen wiesen im ökologischen Landbau eine stetige Steigerung von 7.000 Hektar (1999) auf 8.900 Hektar (2005) auf.

2.2.4 Extensive Weidewirtschaft

Extensive Weidewirtschaft ist durch die Nutzung großer bis sehr großer Flächen gekennzeichnet und stellt weltweit eine der verbreitetsten Formen der Viehhaltung dar, nicht zuletzt deshalb, da auch niederschlagsarme, für den Anbau von Kulturpflanzen nicht geeignete Gegenden so genutzt werden können. Typische Beispiele für extensive Viehhaltung finden sich in vielen Nomadenkulturen. Aber auch moderne Industriegesellschaften betreiben extensive Weidewirtschaft, wenn die dafür benötigten Flächen zur Verfügung stehen.

2.2.5 Extensiver Ackerbau

Extensiver Ackerbau zeichnet sich durch eine geringe Einbringung von Düngemitteln und Pestiziden aus. Er ist die älteste Form des Ackerbaus. Felder werden bewirtschaftet, so lange sie ertragreich sind. Danach werden sie entweder komplett aufgegeben (Wandefeldbau) oder als Brache regeneriert. In Mitteleuropa war der extensive Ackerbau bis zur Entwicklung synthetischer Dünger in der Mitte des 19. Jahrhunderts vorherrschend. Neben einer erheblichen Steigerung der Produktivität führte diese Form der Landwirtschaft jedoch auch zu zahlreichen Problemen (Bodenauslaugung, Anfälligkeit für Krankheiten, Bodenbelastung durch Pestizide, Überdüngung etc.).

Von den genannten Bewirtschaftungsformen sind die konventionelle und die konservierende Bewirtschaftung sowie der ökologische Landbau die verbreitetsten Methoden.

2.3 Bodenbearbeitungsverfahren

Charakteristisch für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen ist nicht nur ob, welche und wieviele Dünge- und Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden, sondern vor allem mit welchen Geräten die Nutzflächen bearbeitet werden und welche Folgen dies für die Bodenmatrix mit sich bringt.

Die heute verfügbaren Bodenbearbeitungsgeräte ermöglichen je nach Standort, pflanzenbaulichen und ökologischen Erfordernissen den Einsatz verschiedener Verfahren der Bodenbearbeitung.

Unterschieden wird in:

- konventionelle Verfahren: regelmäßiger Pflugeinsatz bei der Bodenbearbeitung (Stoppel-, Grund-Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung),
- konservierende Bodenbearbeitung: Pflugverzicht; Einsatz von lockernden und/oder mischenden Geräten; Durchführung von Mulchsaat,
- Direktsaatverfahren: Verzicht auf jegliche Bodenbearbeitung; erfordert allerdings praktisch immer eine vorherige Herbizidbehandlung.

Sowohl bei der konventionellen als auch bei der konservierenden Bodenbearbeitung werden zur Ersparnis von Zeit und Kosten oftmals mehrere Geräte in einem Arbeitsgang eingesetzt. Eine Bodenbearbeitung mit dem Einsatz gekoppelter Geräte wird als "reduzierte Bodenbearbeitung" bezeichnet.

Die stärkste Verbreitung hat nach wie vor das "konventionelle Bearbeitungsverfahren". Die "konservierende Bodenbearbeitung" gewinnt regional zunehmend hauptsächlich auf erosionsgefährdeten Flächen an Bedeutung. "Direktsaatverfahren" werden bislang in sehr geringem Umfang eingesetzt.

Der Einsatz der jeweiligen Maschinen ist abhängig von zahlreichen Faktoren. Dies sind vor allem Eigenschaften der anstehenden Böden, Vernässungsgrad und vor allem die gewählte Bewirtschaftungsform. Die konventionelle Bearbeitungsform mit einer wendenden Bodenbearbeitung hinterlässt oft für längere Zeit einen unbedeckten Boden, fördert den Humusabbau und produziert zusätzlich Kohlendioxid. Historisch gesehen können 20 – 30 Jahre intensive Bodenbearbeitung zu Verlusten von bis zu 50 % an Bodenkohlenstoff (Humus) führen (ABS, 2006). Bodenverdichtungen, Wind- und Wassererosionen, Verschlämungen und Humusschwund sind die Folge von intensiver Bodenbearbeitung ohne begleitende Bodenverbesserungsmaßnahmen (wie z.B. Zwischenfruchtanbau). Ein Pflugverzicht ist beispielsweise eher möglich, je schwerer und trockener der Boden ist. Mitentscheidend bei der pfluglosen Bodenbearbeitung ist neben der richtigen Standortauswahl auch die Flächenvorbereitung. Zudem muss die Anbautechnik (Stickstoffdüngung, Saatmenge, Saatzeit) und die Sortenwahl darauf abgestimmt werden. Günstige Vorbedingungen sind neben trockenen Böden eine gleichmäßige Strohverteilung, keine problematische Vorfrucht mit zu viel Pflanzenresten oder Durchwuchs, flache Stoppelbearbeitung sowie ein geringer Besatz an Unkräutern, Ungräsern und Ausfallgetreide. Ein längerfristiger Pflugverzicht hat Vorteile auf stark erosionsgefährdeten, hängigen Böden, auf kalkreichen Lehm- und Tonböden mit quellbaren Tonmineralien, bei einer intakten Wasser- und Luftführung und auf zur Verschlämzung neigenden Böden bei weniger als 500 mm Niederschlag (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2007).

Der Pflug ist das wichtigste Gerät der konventionellen Landbewirtschaftung. Er dient zum Aufbrechen, Wenden, Lockern, Krümeln und Mischen des Bodens. Mit der Schar schneidet der Pflug einen rechteckigen Erdbalken aus dem Boden, dabei entsteht eine Furche. Durch die Vorwärtsbewegung wird der Boden gebrochen, gewendet und schließlich seitlich abgekippt (Abb. 3). Der herkömmliche Pflug lockert den Boden bis in eine Tiefe von etwa 30 cm. Unter dieser gelockerten Schicht entsteht im Laufe der Jahre ein stark verdichteter Horizont, die sogenannte Pflugsohle. Auf dieser kann sich Niederschlagswasser stauen.



Abb. 3: Konventionelle Bodenbearbeitung (Trac Technik LBVG mbH, 2005)

Diese intensive Bodenbearbeitung und die zunehmenden Achslasten der Maschinen und Fahrzeuge schwächen die Bodenstruktur. Die Bodenpartikel halten der mechanischen Belastung auf Dauer nicht stand. Feinerdeteilchen verstopfen die Grobporen des Bodens und verringern die Infiltration.

Eine mögliche Lösung besteht darin, ganz auf eine Bodenbearbeitung zu verzichten. Dieses Verfahren wird als Direktsaat bezeichnet (Abb. 4). Bodenlebewesen werden weniger dezimiert. Regenwurmgänge und abgestorbene Wurzelgänge sorgen für eine bessere Durchlüftung und Entwässerung. Die Bodenbedeckung verhindert die Erosion und die Tragfähigkeit des Bodens ist erhöht. Nachteilig ist, dass die Umstellung auf Direktsaattechnik viel Zeit benötigt, nur mit einer angepassten Technik gearbeitet werden kann (geeignete Schare) und ein Herbizideinsatz nötig ist. Die Direktsaat ist auf leichten bis mittelschweren Standorten etabliert, nicht hingegen auf schweren Böden mit sehr hohen Tongehalten.



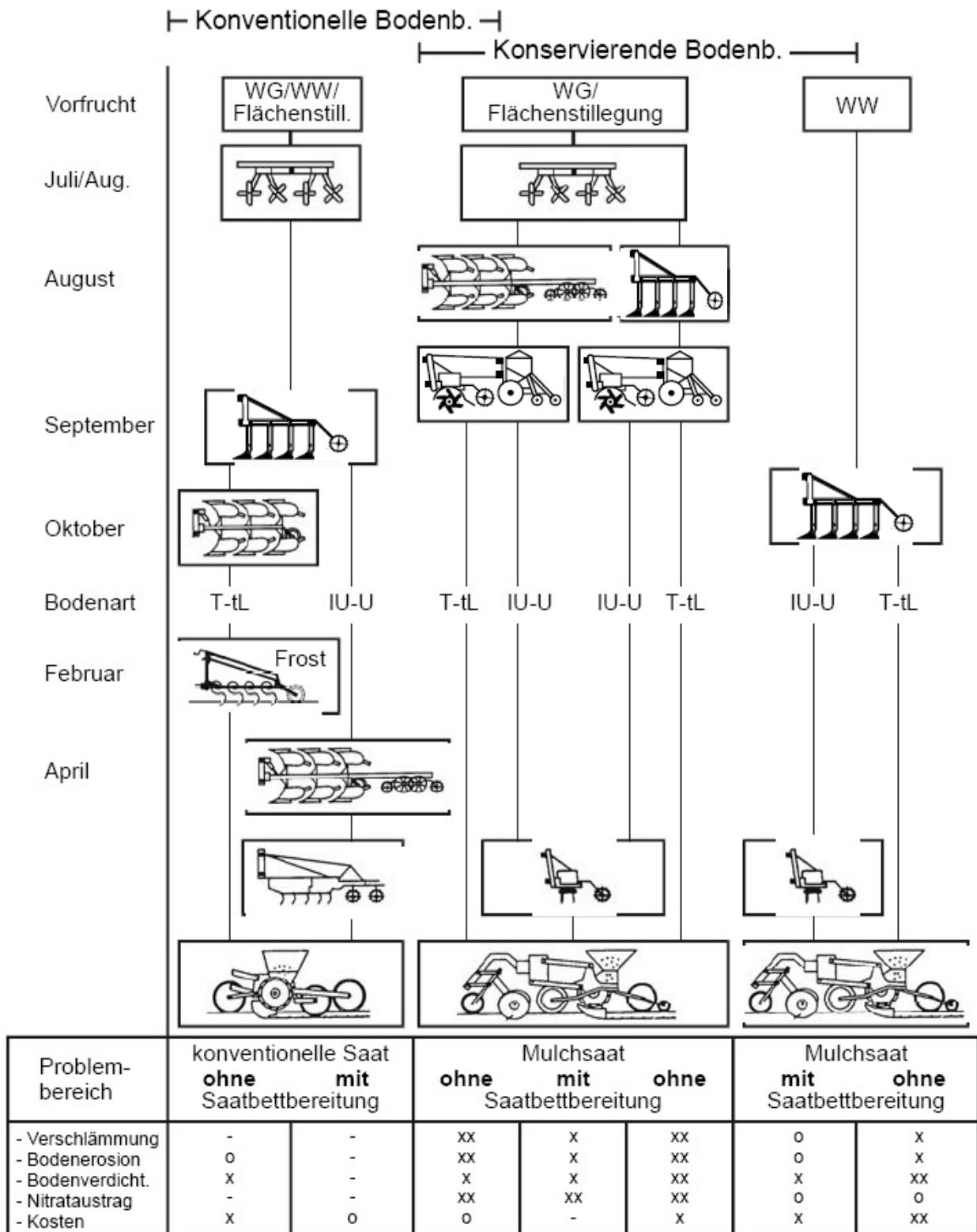
Abb. 4: Direktsaatverfahren (Trac Technik LBVG mbH, 2005)

Zwischen der konventionellen Bodenbearbeitung und der konsequent durchgeführten Direktsaat gibt es eine Menge von Zwischenstufen in Richtung reduzierter oder konservierender Bodenbearbeitung. Je weniger bearbeitet wird, umso mehr organische Substanz reichert sich im Boden an und verbessert damit nachhaltig die Produktivität. Eine Bewirtschaftung, die einen hohen Anteil an Pflanzenrückständen hinterlässt, liefert einen wichtigen Beitrag für den Aufbau einer gesunden Bodenstruktur. Auf den Pflug wird bei konservierender Bodenbearbeitung mehrjährig verzichtet. Im Gegensatz zur Pflugbearbeitung verbleiben deutlich mehr Ernterückstände (30 % oder mehr) an der Oberfläche bzw. werden sehr flach in oberflächennahe Bodenschichten eingearbeitet. In der Regel kommen dabei scheiben- oder grubberartige Werkzeuge zum Einsatz (Abb. 5). Die konservierende Landbewirtschaftung beinhaltet die Direktsaat (keine Bearbeitung), die Mulchsaat, eine reduzierte Bearbeitung (Minimumsbearbeitung), keine oder nur eine oberflächennahe Einarbeitung von Ernterückständen sowie die Berücksichtigung von Zwischenfrüchten oder Deckfrüchten in Dauerkulturen (GKB, 2006). Eine Verringerung der Bodenerosionen von 90 % bei Direktsaat und immerhin über 60 % bei nichtwendender Bodenbearbeitung hat eine erhebliche Bedeutung auf den Nährstoff- und Pestizidaustrag von landwirtschaftlichen Flächen in Richtung Oberflächenwasser und Grundwasser (ABS, 2006). Die Auswirkungen bei pflugloser Bodenbearbeitung sind somit weitreichend.



Abb. 5: Konservierende Bodenbearbeitung (Trac Technik LBVG mbH, 2005)

Es existieren weitere Bodenbearbeitungsverfahren, die jedoch den aufgeführten drei zugeordnet werden können und ähnliche Methoden beinhalten (rationelle Bodenbearbeitung, Minimalbodenbearbeitung, etc.). Abb. 6 zeigt eine Zusammenstellung unterschiedlicher Bodenbearbeitungsgeräte in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsmethodik.



xx = sehr gut x = gut o = befriedigend - = unbefriedigend

T = Ton tl = toniger Lehm IU = lehmiger Schluff U = Schluff

Abb. 6: Geräteneinsatz bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Bru-
notte et al., 2001)

2.4 Probleme der Umsetzung

Trotz der vielen Vorteile sind bei der Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung folgende Punkte zu berücksichtigen:

- unter Umständen besteht ein erhöhter Liquiditätsbedarf durch Investition in neue Maschinen,
- die Beseitigung von Bodenstrukturschäden auf instabilen Böden wie z. B. Sandböden ist nötig ,
- ein sauberer Start erfordert die Bekämpfung von Rhizomunkräutern,
- eine Kontrolle des Auftretens von tierischen Schädlingen (Schnecken, Mäusen) ist durchzuführen,
- Ährenfusariosen führen beim Weizen zu Mindererträgen und unter Umständen zu einer Mykotoxinbelastung des Erntegutes,
- tendenziell treten Ungräser bei der konservierenden Bodenbearbeitung stärker auf, besonders bei Direktsaat,
- eine Flächenvernässung als Folge des verstärkten Rückhaltes kann die Befahrbarkeit behindern,
- folgt Wintergerste pfluglos nach Winterweizen wird Durchwuchsweizen oft zum Problem,
- bei pflugloser Schlagbestellung können insbesondere in getreidereichen Fruchtfolgen Trespen zum Problem werden,
- der Fruchfolgewechsel muss besonders berücksichtigt werden,
- konservierende Bodenbearbeitung ist grundsätzlich auf allen Böden möglich, weniger geeignet sind jedoch staunässebeeinflusste Böden,
- ungünstig sind Felder in schlechtem Strukturzustand wie z. B. durch Erntefahrzeuge verdichtete Böden,
- unter feuchten Bedingungen sollte mit reduzierten Radlasten bearbeitet werden,
- aufgrund des Vorhandenseins von Ernterückständen an der Oberfläche kann es bei der Strohrotte zu vorübergehendem Stickstoffmangel kommen,
- es besteht die Gefahr der Pflanzenfäule durch zu lange Nässeperioden und temporären Überstau.

Abb. 7 gibt Ratschläge für die grundlegenden Voraussetzungen und die optimale Umsetzung der konservierenden Bodenbearbeitung.

Letztendlich sollte die Entscheidung zur Änderung der Bewirtschaftungsmethodik mittels eines Ablaufdiagramms getroffen werden (Abb. 8).

<h3>Bodentyp</h3> <p>Beginnen Sie mit den gut geeigneten Böden und gehen Sie mit wachsender Erfahrung zu den weniger gut geeigneten Böden über.</p> <p>Gut geeignete Böden</p> <p>Strukturstabile Böden: Ton, lehmiger Ton, lehmiger schluffiger Ton, Schlufflehm, Kalkverwitterungsböden</p> <p>Weniger gut geeignete Böden</p> <p>Strukturinstabile Böden: Sand- und schluffreiche oder stark kieshaltige Böden mit geringem Humusgehalt, staunässebeeinflusste Standorte</p>	<h3>Kulturarten</h3> <p>Bei der konservierenden Bodenbearbeitung kann jede Kulturart angebaut werden.</p> <p>Günstige Bedingungen</p> <p>Geringe Ernterückstände, optimale Erntebedingungen, krümeliger Boden: Wintergetreide nach Raps oder Leguminosen Wintergetreide nach Hackfrüchten Mulchsaaten von Mais und Zuckerrüben</p> <p>Schwierige Bedingungen</p> <p>Viele, ungleichmäßig verteilte Ernterückstände, schlecht eingearbeitetes Stroh, feuchter verdichteter Boden: Getreide nach Getreide, Raps nach Getreide</p>
<h3>Tipps zur Bodenbearbeitung</h3> <p>„Von oben nach unten, so flach wie möglich, so tief wie nötig arbeiten“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ziel ist ein feinkrümeliger Boden bei 1 bis 2 Durchgängen • Tiefe des 1. Durchgangs so flach wie möglich, ggf. des 2. Durchgangs von ca. 10 cm <p>Geeignete Bearbeitungsgeräte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mittelschwere/schwere Böden: schwere Scheibeneggen, Spatenrollegen, Flügelschargrubber • Leichte/mittelschwere Böden: Schwergrubber, Scheibeneggen, Spatenrollegen • Alle Geräte in Kombination mit geeigneten Nachbearbeitungsgeräten <p>Zur Beachtung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ein feinkrümeliges, abgesetztes Saatbett ist entscheidend • Die Bodenbeschaffenheit verbessert sich im Lauf von 4–5 Jahren und ermöglicht ein leichteres Bearbeiten und Befahren 	<h3>Tipps zur Aussaat</h3> <p>Aussaat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwenden Sie eine Sämaschine, die mit großen Mengen von Ernterückständen fertig wird • Achten Sie auf gleichmäßige Tiefenführung der Säaggregate • Bearbeiten Sie das Saatbett nicht übermäßig, überlassen Sie die Bearbeitung der Sämaschine • Achten Sie auf guten Bodenschluss <p>Zinken oder Scheibe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zinkenschere sind bei großen Strohmengen und Steinen flexibler als Scheibenschere. Scheibenschere schneiden optimal bei trockenem festen Boden <p>Zugkraftbedarf</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leichte/mittlere Böden 30 – 40 PS/m Arbeitsbreite • Mittlere/schwere Böden 35 – 45 PS/m Arbeitsbreite • Verwitterungs-/Tonböden 40 – 50 PS/m Arbeitsbreite

Abb. 7: Tipps und Ratschläge zur konservierenden Bodenbearbeitung (GKB, 2006)

Bodenbearbeitung – Entscheidungsprozess

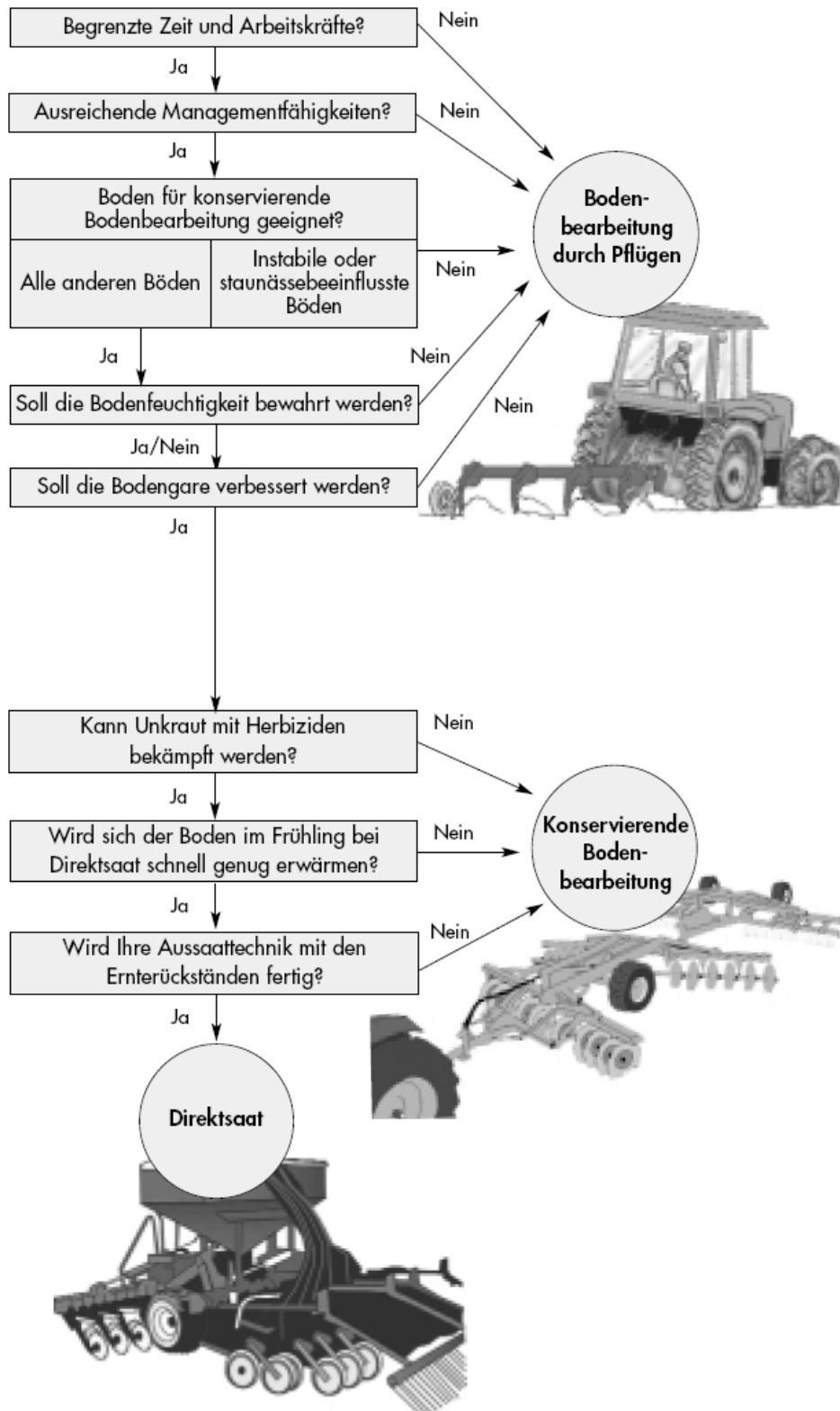


Abb. 8: Konflikte im Entscheidungsprozess zur Wahl der Bodenbearbeitung (GKB, 2006)

3 Prozessabläufe der Abflussbildung

Im nachfolgenden Kapitel werden die grundlegenden Prozessabläufe der Abflussbildung beschrieben. Es werden natürliche und anthropogene Faktoren genannt, die den Wasser- rückhalt in der Fläche beeinflussen. Die Möglichkeiten der Landwirtschaft, auf Faktoren einzuwirken, werden aufgezeigt und die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zusammengetragen. Der Prozess der Bodenerosion wird dabei als Indikator für einen verstärkten Oberflächenabfluss beschrieben und die Bodenerosionsgefahr als Entscheidungskriterium für die Umsetzung von Maßnahmen und die Modellierung in Kapitel 7 diskutiert.

3.1 Oberflächenabfluss

Der Abfluss im Fließgewässer kann in Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss unterschieden werden. Die jeweils dominierende Abflusskomponente ist abhängig von der jeweiligen Gebietscharakteristik und den Eigenschaften der Niederschlagsereignisse.

Die Bildung von Oberflächenabfluss hängt maßgeblich vom Energieimpuls des Niederschlags ab, der aus der Niederschlagsmenge und -intensität abgeleitet werden kann. Der auf die Pflanzendecke gefallene Niederschlag wird von dieser aufgefangen und zurückgehalten (Interzeption) oder erreicht als durchtropfender Niederschlag oder Bestandsniederschlag den Boden.

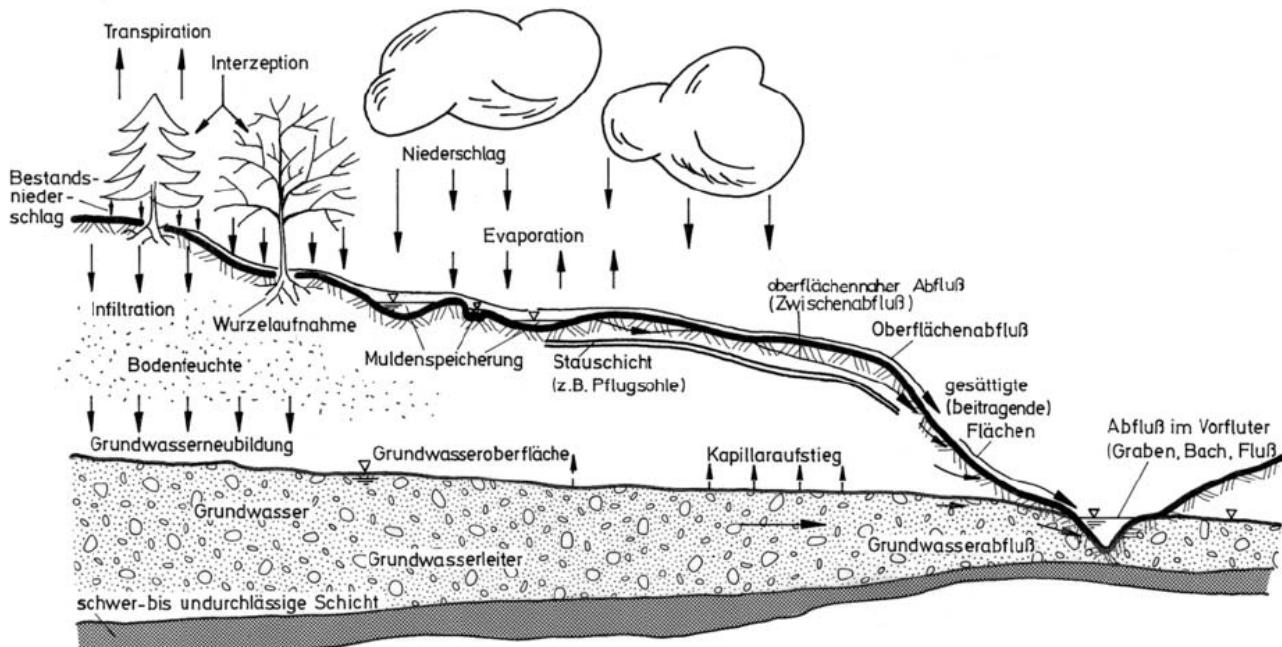


Abb. 9: Abflussbildung im Hangmaßstab (Bronstert, 2005)

Bei der Abflussbildung wird der Anteil des Niederschlags, der den Erdboden erreicht, entweder über die Oberfläche in die nächstgelegenen Fließgewässer transportiert oder zur Versickerung im Boden und der wasserungesättigten Zone gebracht. Die Aufnahme- und Wasserleitfähigkeit des Untergrundes hängt von den jeweiligen Wasserverhältnissen und den Eigenschaften der geologischen Schichten ab. Ist die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationsrate oder die obere Bodenzone schon wassergesättigt, kommt es zum Oberflächenabfluss. Dieser Abflussmechanismus wird als Horton'scher Oberflächenabfluss oder Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss bezeichnet.

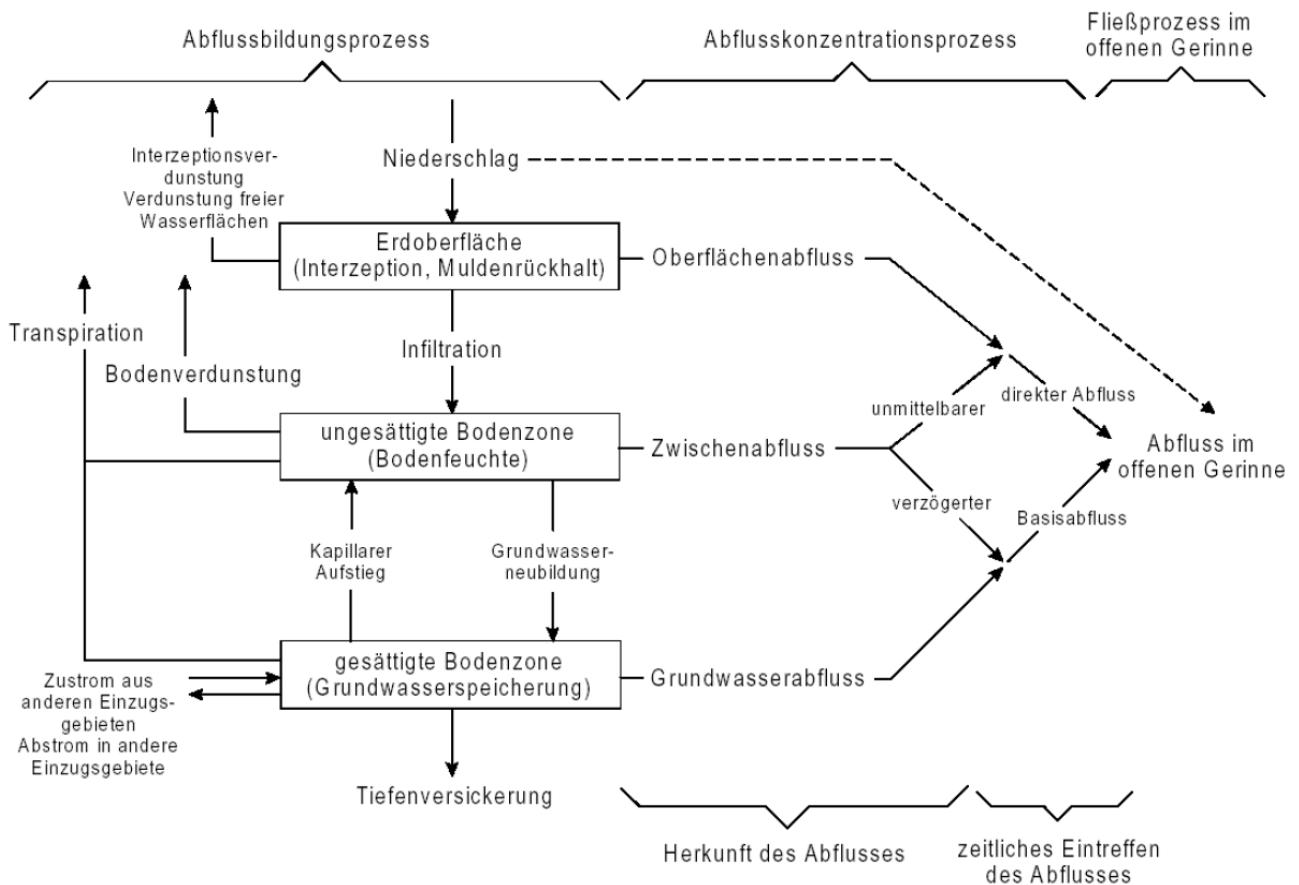


Abb. 10: Schematische Darstellung des Abflussprozesses (Baumgartner et al., 1996)

Die maßgeblichen Teilprozesse der Abflussbildung und der Entstehungsprozess des Gerinneabflusses werden aus Abb. 10 ersichtlich.

Zusätzlich hervorzuheben ist der Zustand des gefrorenen Bodens in den Wintermonaten in denen die hydraulische Leitfähigkeit stark reduziert und demzufolge der Landoberflächenabfluss deutlich erhöht ist.

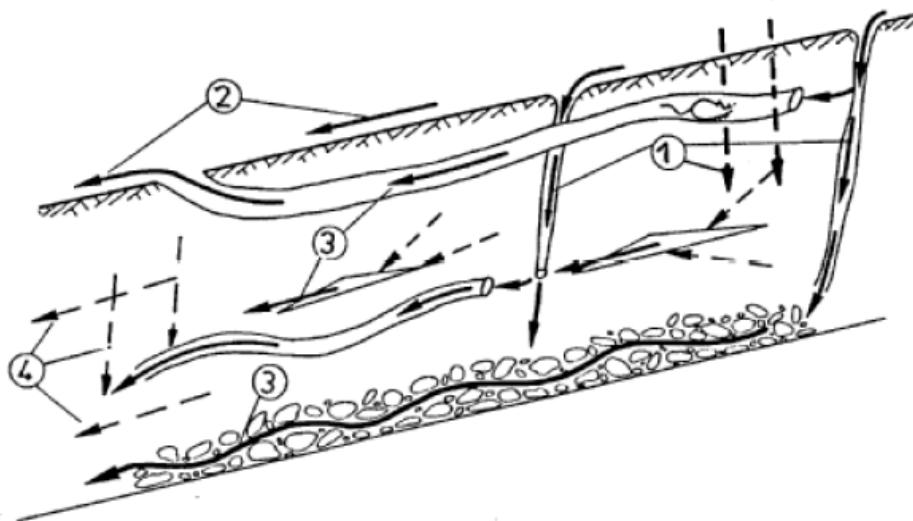
3.2 Interflow

Bei Starkniederschlägen kann das Infiltrationswasser auch in die Grobporen einfließen und dort ein vertikales schnelles Zufließen zum Grundwasser und/oder in hangparalleler Richtung zum Vorfluter bewirken (Abb. 11).

Unter dem Interflow (Zwischenabfluss/hypodermischer Abfluss) wird der Abfluss verstanden,

- der hinsichtlich seiner Genese als Schichtenabfluss aufgefasst werden kann, der zwischen Bodenoberfläche und Grundwasser gebildet wird, und/oder
- der hinsichtlich seiner zeitlichen Dynamik zwischen dem sehr schnell reagierenden Landoberflächenabfluss und dem meist tragen Basisabfluss steht.

Bei entsprechenden Gefälleverhältnissen kann der Zwischenabfluss einen großen Teil des infiltrierenden Wassers ableiten, welches relativ schnell wieder in die Vorflut gelangt. Mit abnehmender Hangneigung nimmt die Zwischenabflussbildung ab und die wesentlich langsamer verlaufende Auffüllung der Bodenwasservorräte und Versickerung ins Grundwasser gewinnt an Bedeutung.



1) Infiltration in Mikro- und Makroporen; 2) Oberflächenabfluss (mit Return Flow); 3) schneller lateraler unterirdischer Abfluss (Abfluss im Makroporensystem und in präferenziellen oder diffusen nichtkapillaren Fließwegen); 4) Mikroporendurchfluss

Abb. 11: Teilprozesse der Infiltration und des Interflow (Zuidema, 1985)

Die Summe aus Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss wird häufig als Direktabfluss bezeichnet. Damit wird deutlich, dass Direktabfluss in zeitlich direktem Zusammenhang mit einem Niederschlagsereignis steht.

Generell fördern hohe Infiltrationsraten die unterirdischen Abflusskomponenten. Sie können somit auch den Interflow begünstigen. Verminderungen der Infiltrationsleistung der Böden durch landwirtschaftliche Nutzungen, wie beispielsweise intensiver Ackerbau, können das Auftreten des natürlichen Interflows mindern.

Typisch für zahlreiche Einzugsgebiete in Mittelgebirgen mit verstärktem Zwischenabflussanteil am Gesamtabfluss ist, dass die gefallenen Niederschläge zunächst kaum abflusswirksam sind. Sie füllen den Interzeptions- und Bodenspeicher. Mit der im Niederschlagsverlauf zunehmenden Füllung des Bodenspeichers werden auch zunehmend die Niederschläge von anderen Einzugsgebietsteilen abflusswirksam. Die Entstehung von Zwischenabfluss wird durch die Ausbildung eines nachlaufenden Scheitels in der Abflussganglinie erkennbar (Bronstert, 2005).

3.3 Basisabfluss aus dem Grundwasser

Als Grundwasser bezeichnet man das Wasser im Untergrund, das die Hohlräume der Erdkruste vollständig ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch die Wirkung der Schwerkraft bestimmt wird. Bei Fortsetzung der Infiltration gelangt das unterirdisch fließende Wasser aus den oberen Bodenhorizonten durch die ungesättigte Zone ins Grundwasser. Dort sorgt es für die Grundwasserneubildung und gelangt mit dem Grundwasserfluss mit erheblicher Verzögerung wieder in die oberirdischen Gewässer. Ein geringer Teil kann auch in tiefere Schichten versickern.

Eine schnelle Reaktion des Grundwasserabflusses nach Niederschlagsereignissen ist durch den hydraulischen Prozess der Vergrößerung der Druckhöhe der Speicher, die aus Systemen miteinander kommunizierender Kluft- und Porenräumen bestehen, zu erklären (Schöniger, 1990). Das durch Makroporen dem Grundwasser schnell zusickernde Niederschlagswasser führt damit zu einer verstärkten Exfiltration des Wassers aus der gesättigten Zone in das Gewässer (Abb. 12).

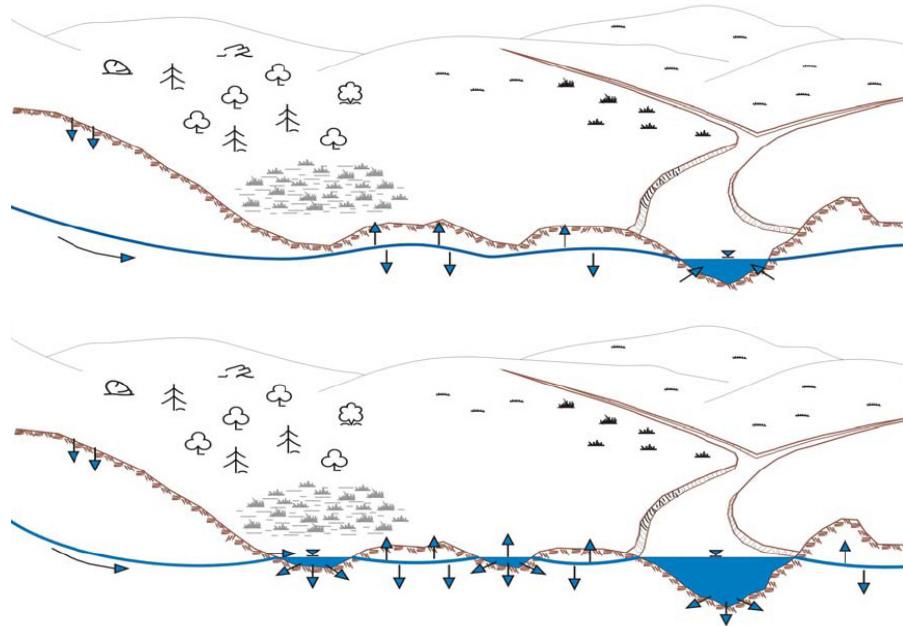


Abb. 12: Schematischer Schnitt durch ein Flachlandeinzugsgebiet mit hoch anstehendem Grundwasserspiegel: oben während einer Trockenperiode; unten während einer Feuchtperiode (Krause et al., 2003).

Der Grundwasserabfluss wird maßgeblich über die hydraulischen Verhältnisse des durchflossenen Untergrundes beeinflusst, wobei nach der Größe der Hohlräume zwischen Karst-, Kluft- und Porengrundwasser unterschieden wird. Im Mittelgebirge entstammt der Grundwasserabfluss überwiegend dem Kluftsystem des anstehenden Festgestein.

Ein grundwasserbürtiger Abfluss tritt infolge der Grundwasserneubildung aufgrund von gefallenem, in grundwasserführende Schichten versickertem Niederschlag auf. Die zeitliche Verzögerung ist derart, dass keine direkte Kopplung an die durchlaufende Hochwasserwelle zu erkennen ist. Die Grundwasserneubildung ist stärker als der Interflow von der Infiltration des Niederschlags in tiefere Bodenschichten abhängig.

Die nachfolgende Tab. 3 zeigt, welchen Einfluss die verschiedenen Grundwasserleiter beispielsweise auf die Abflusskomponente des Zwischenabflusses ausüben.

Grundwasserleiter	Hohlräume	mittlere Fließgeschwindigkeit	Speichervermögen	Reaktionszeit des Basisabflusses	Wahrscheinlichkeit für Zwischenabfluss
Porengrundwasserleiter	Porenraum	niedrig	hoch	lang	gering
Kluftgrundwasserleiter	Klüfte und Spalten	abhängig von Art und Flächenanteil der Klüfte	niedrig	mittel	abhängig von Deckschichtmächtigkeit und Neigung
Karstgrundwasserleiter	Karstspalten und -höhlen	hoch	gering	kurz	gering

Tab. 3: Charakteristische Eigenschaften von Grundwasserleitern auf Abflusskomponenten (DVWK, 1999)

3.4 Zusammenhang von Bodenerosion und Oberflächenabfluss

In regelmäßigen Abständen sind eintretende Hochwasserereignisse gekoppelt an erosive Flächenprozesse (Abb. 13), d.h. es besteht ein direkter Zusammenhang von Oberflächenabfluss und Erosionsprozess auf der Fläche (Abb. 14).

Schlammawine: Vorne rein, hinten raus

MICHELSBERG/LINSINGEN.
Es war kurz nach 20 Uhr, als am Dienstagabend in Michelsberg und Linsingen die Feuerwehren ausrückten. Ein Unwetter war niedergegangen und überflutete Keller, Garagen und Wohnhäuser.
Zu groß waren die Wassermassen, dass sie von den Kanälen hätten aufgenommen werden können. Zunächst rückte die Wehr nach Linsingen aus, danach nach Todenhauen, Leimsfeld, Spieskappel und Frielendorf, sagt Wehrführer Heiko Steinbrecher.



Hier drang Wasser ein: Linsingens Ortsvorsteher Friedhelm Alf am Fenster, durch das sich die braune Brühe durchdrückte. Foto: Grede

Bei Erika Dunkel in der Michelsberger Straße kam eine Schlammawine durch den Hintereingang, wälzte sich durch Haus und Garage. Die braune Brühe ergoss sich in das tiefer gelegene Haus von Ortsvorsteher Friedhelm Alf. Der Gastank im Garten hob sich und legte sich auf die Seite. Feuerwehrleute sicherten ihn. Auf seinem Hof stapeln sich am Tag danach Haushaltsgegenstände und Teppichboden. Alles verschlammt und unbrauchbar. Die 140 Quadratmeter große, behindertengerecht gebaute Wohnung ist zerstört.
Die Schlammawine war von einem Maisfeld in das Dorf geschwippt, war durch Fenster in Häuser eingedrungen. „Vor dem Wasser gab es kein Entkommen“, sagte der 46-jährige Ortsvorsteher. (ras/zsy)

Abb. 13: Ursache eines massiven Hochwasserschadens (HNA, 14.06.2007)



Abb. 14: Bodenabtrag nach einem Starkniederschlagsereignis im hessischen Romrod im Mai 2005 (LLH, 2007)

Durch die Erosion von Bodenteilchen wird die Oberflächenrauigkeit der Fläche verändert und der Anteil des Niederschlages, der zum Abfluss kommt, beeinflusst.

Der Erosionsprozess besteht aus drei Phasen:

- Bodenteilchen müssen mobilisiert werden,
- Bodenteilchen müssen transportiert werden,
- Bodenteilchen sedimentieren.

Unterschieden werden die Erosionsformen in:

- | | |
|---|----------------------|
| a) flächenhafte Erosion | < 2 cm tief |
| b) lineare Formen | Rillen < 2 cm tief |
| | Rinnen < 15 cm tief |
| | Gräben > 45 cm tief |
| c) Massenversatz | Rutschen in Schollen |
| d) Oberflächenabfluss ohne Erosion (z.B. auf Grünland). | |

Die negativen Auswirkungen durch Bodenerosion und Oberflächenabfluss sind vielfältig. Nicht direkt sichtbare Schäden sind z. B.:

- der Verlust an durchwurzelbarer Bodensubstanz und damit ein verminderter Wasserspeicher-, Filter- und Puffervermögen,
- die Beeinträchtigung der ökologischen Funktionsfähigkeit geschädigter Böden,
- die Verarmung des Bodens an Humus und Pflanzennährstoffen,
- die Minderung der Erträge und der Ertragsfähigkeit,
- die Akkumulation von Schadstoffen durch Konzentration von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln im Ablagerungsbereich.

Sichtbare Schäden sind vor allem:

- die Verletzung, Entwurzelung, Überdeckung und Vernichtung von Kulturpflanzen,
- das erschwerete Befahren der Äcker durch tiefe Erosionsrinnen,
- das Wegspülen von Saatgut, Schäden durch Düngemittel und Pflanzenschutzmittel bei einer Ablagerung an unerwünschter Stelle,
- der Kümmerwuchs aufgrund des fehlenden Gasaustausches (LAP, 2002).

Die externen Effekte der Bodenerosion sind darüber hinaus vielfältig.

Beeinträchtigung der Wasserqualität:

- Aufwand für die Aufbereitung des Oberflächenwassers,
- ein hoher Gehalt an Schwebstoffen führt zu erhöhtem Verschleiß bei Turbinen in Wasserkraftanlagen,
- Beeinträchtigung des Erholungsnutzens von Gewässern.

Ablagerung von Sedimenten:

- größere Hochwassergefahr, durch den Anstieg des Wasserspiegels,
- Reduzierung der Wasserspeicherkapazität in Stauseen,
- Verlandung von Seen.

Ökologische Auswirkungen auf die Meere:

- Meere sind Gewässer ohne Abfluss und damit eine Auffangstation für Belastungen aller Art,
- eine Regeneration erfolgt langsamer als in Fließgewässern (Doleschel et al., 1991).

Wichtigste Verursacher der Erosion sind Wind und Wasser. Die grundsätzlichen Unterschiede der Auslösung zeigt Tab. 4.

	Wind	Wasser
bevorzugte Substrate	Feinsande	Schluffe
Richtung	wechselnd	abwärts
Topografie	eben	Hanglagen
Bodenfeuchte	niedrig	hoch
Geschwindigkeiten	größer	geringer
Erosionsformen	Flächen	Linien und Flächen
Sedimentation	stark sortierend	schwach sortierend
Mobilisierung	"particle impact"	"splash"

Tab. 4: Auslösung und Wirkung von Wind- und Wassererosion (Schack-Kirchner, 2005)

Der Bodenabtrag durch Bodenerosion kann grundsätzlich als eine Funktion von Erosivität des Regens bzw. des Windes und der Erodierbarkeit des Bodens angesehen werden:

$$\text{Abtrag [t/ha]} = f(\text{Erosivität} \cdot \text{Erodierbarkeit})$$

Gl. 1

Bestimmte landwirtschaftliche Bewirtschaftungs- und Bodenbearbeitungsmethoden verstärken den Bodenabtrag, z.B. die Bearbeitung in der Falllinie auf starken Hanglagen (Abb. 15) oder der Anbau erosionsfördernder Kulturarten wie Mais und Zuckerrübe.



Abb. 15: Bodenerosion am Fuß des Eggegebirges bei Bad Lippspringe (World Habitat Society GmbH, 2006)

Abb. 16 zeigt den Weg des erodierten Bodenmaterials und gibt an, welcher Anteil in die Gewässer weiter transportiert wird.

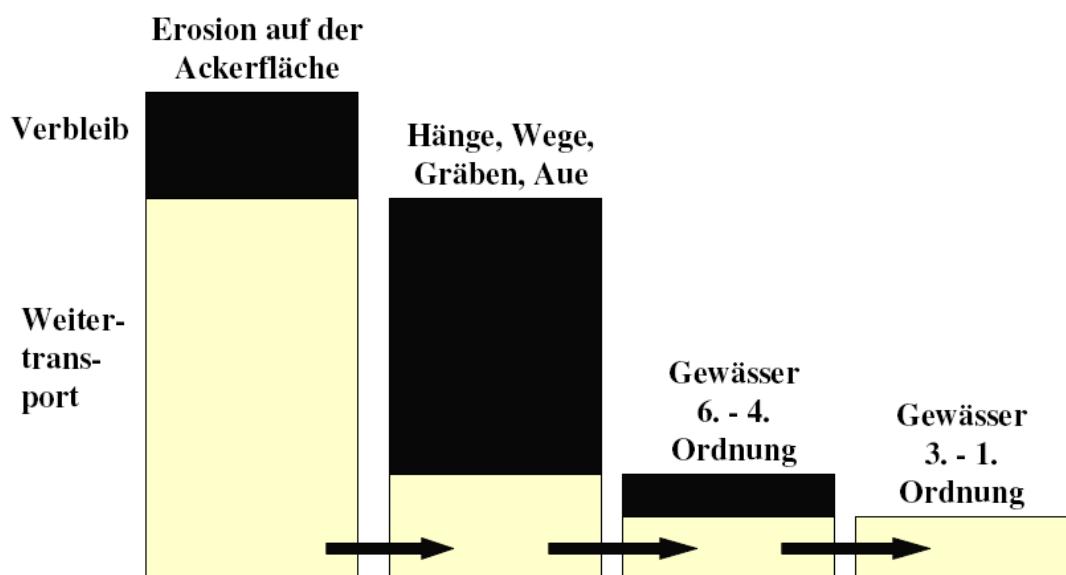


Abb. 16: Verbleib des Sedimentaustrages von Ackerflächen (Doleschel et al., 1991)

In Extremfällen können jährlich mehr als 80 t/ha Boden erodieren, bei durchschnittlich dichtem Boden geht dabei jährlich 5 mm Boden verloren. Für eine Neubildung benötigt die Natur Zeiträume von ca. 250 bis 500 Jahren (Schack-Kirchner, 2005). Der jährliche Bodenabtrag auf Offenland bewegt sich in Mitteleuropa zwischen 1,5 und 15 t/ha, was einem Bodenverlust von 0,1 bis 1 mm entspricht (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 2004).

In Deutschland gehört die Bodenerosion zu den zentralen Problembereichen. Hier beläuft sich die mittlere Bodenerosionsrate im Jahr auf etwa acht bis zehn Tonnen pro Hektar und übertrifft damit die durchschnittliche jährliche Bodenneubildungsrate von etwa 2 Tonnen pro Hektar um das Fünffache (Graßl, 1997). Die Problematik der Wassererosion wird aus Tab. 5 ersichtlich. Dabei liegt der Anteil der durch Wassererosion gefährdeten Flächen auf allen Kontinenten über den von Winderosion betroffenen.

	Wassererosion in %	Winderosion in %	Summe insgesamt in %
weltweit	56	28	84
Afrika	46	38	84
Asien	58	30	88
Nordamerika	67	25	92
Ozeanien	81	16	97
Europa	52	19	71
Südamerika	51	17	68

Tab. 5: Anteil der Erosion an den anthropogenen degradierten Bodenflächen (WBGU, 1993)

Als wesentliche Ursache der von Wassererosion betroffenen Flächen wurden in der Vergangenheit vor allem die Entwaldung und Überweidung genannt. Rund vier Millionen Tonnen Boden werden mittlerweile von landwirtschaftlichen Flächen durch Regenereignisse weggespült. Der zunehmende Maschineneinsatz mit der daraus resultierenden Bodenverdichtung kann als Hauptursache angeführt werden.

Flächendeckende Daten zur Menge der Abträge oder Risikoabschätzungen liegen in Form von Bodenerosionskarten bundesweit vor (Abb. 17). Auf Landesebene werden diese Karten in regelmäßigen Abständen aktualisiert.

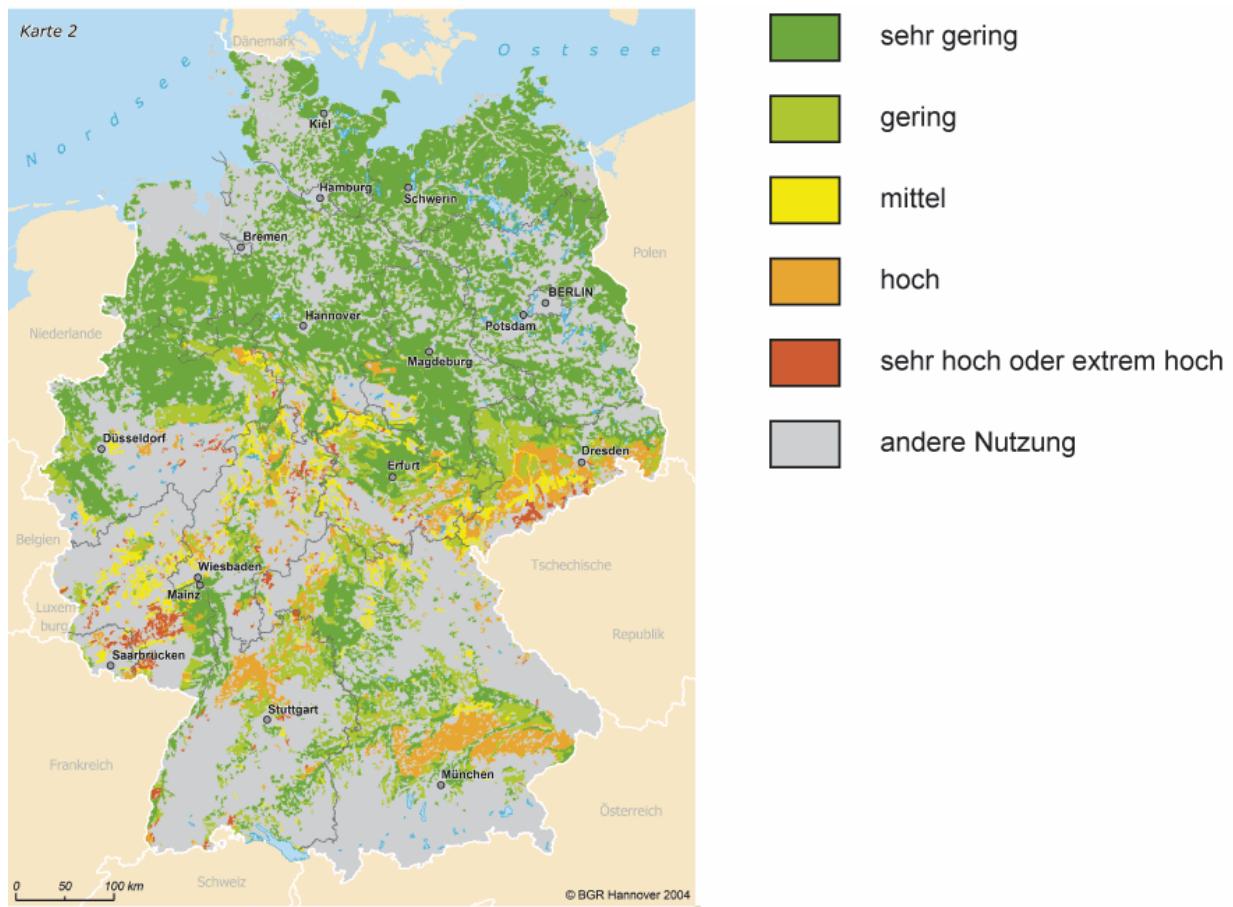


Abb. 17: Erosionsgefährdete Flächen in Deutschland (BGR, 2004)

Die Quantifizierung der Bodenerosion durch Wasser kann mit zahlreichen Ansätzen ermittelt werden. Die gängigste Methodik für eine großräumige Abschätzung der Erosionsgefährdung ist die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) nach (Schwertmann et al. 1987). Als Ergebnis erhält man einen langfristig mittleren jährlichen Bodenabtrag auf ackerbaulich genutzten Einzelflächen in (t/ha·a). Weitere Ansätze nach ABAG sind das empirische USLE-Modell oder das stärker physikalisch ausgerichtete CREAMS-Modell.

Die Allgemeine Bodenabtragsgleichung lautet:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot P \cdot C \quad \text{Gl. 2}$$

Dabei bedeuten:

- A: Bodenabtrag in t/ha·a
- R: Regenfaktor (Regenmenge und deren kinetische Energie)
- K: Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L, S: Topografiefaktoren
- P: Erosionsschutzfaktor
- C: Bodenbedeckungs- und –bearbeitungsfaktor.

Bodenerosion durch Wasser wird stets durch einen Niederschlag ausgelöst. Nicht jeder Niederschlag führt zu einem Erosionsereignis, sondern muss bestimmte energetische Eigenschaften aufweisen, um ein solches Ereignis auszulösen. Der Regen- und Oberflächenabflussfaktor R (Abb. 18) beinhaltet Informationen zur Regenenergie und Niederschlagsmenge, die ein einzelner Regen erreichen muss, um einen Bodenabtrag auslösen

zu können. Er ist ein Maß für die gebietsspezifische Erosionskraft (Erosivität) der Niederschläge und wird aus der kinetischen Energie und der Niederschlagsintensität aller erosionswirksamen Einzelregen während eines Jahres berechnet. Ein Regen ist dann erosiv, wenn er pro Niederschlag mindestens 10 mm abregnet. Regnet es weniger als 10 mm pro Ereignis, so muss die maximale 30-Minuten-Intensität (I_{30}) des Niederschlags mehr als 10 mm/h aufweisen, damit der Niederschlag noch als erosiv eingestuft wird (Terrestris, 2006). Für die Berechnung der Regenerosivität aus Monatswerten des Niederschlags existieren verschiedene Regressionsgleichungen. In diesem Zusammenhang wird auf die Literatur UBA (2002) verwiesen.

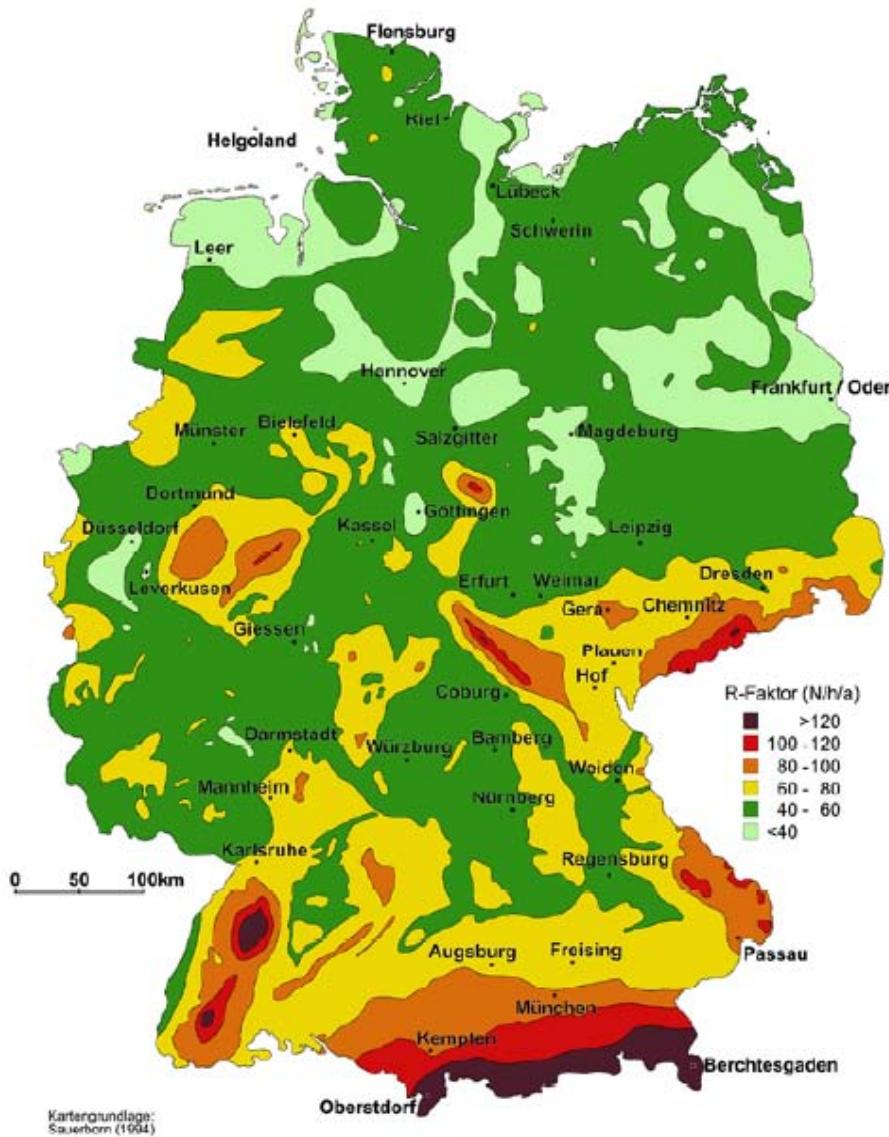


Abb. 18: Regenerosivität in Deutschland, dargestellt in Form des R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (Disse, 2004)

Böden sind unterschiedlich anfällig in Hinblick auf die Erosion. Vor allem die Körnung und der Humusgehalt beeinflussen die Erodierbarkeit. Der Bodenerodierbarkeitsfaktor K beschreibt die jeweilige Erosionsgefährdung eines Bodens. Böden mit einem hohen Anteil an Schluff und Feinstsand sowie humusarme Böden sind besonders erosionsanfällig. Böden mit hohem K-Faktor sind etwa die schlufffreichen Bodentypen aus Löss sowie schluff- und

feinsandreiche Braunerden aus Sandstein. Diese Böden verschlämmen bei Niederschlägen sehr schnell und das Wasser fließt oberflächlich ab.

Diese Bodeneigenschaften gelten nur als charakteristisch für die Erodierbarkeit des Bodens, wenn sie sich langfristig nur geringfügig ändern. Die kurzfristig sich ändernden Bodeneigenschaften werden hingegen mit dem C-Faktor berücksichtigt.

Der Faktor zur Berücksichtigung der erosionswirksamen Hanglänge L gibt das Verhältnis des Abtrags eines Hanges im Verhältnis zu einem Standardhang mit 22 m Länge und 9 % Hangneigung an. Ein Erosionshang wird als der Teil eines Gesamthanges bezeichnet, der dort beginnt, wo der Oberflächenabfluss einsetzt und dort endet, wo der Oberflächenabfluss, z.B. durch eine Kleinstruktur, abgeleitet wird. Je länger der Erosionshang ist, desto höher sind die durch das abfließende Wasser ausgelösten Bodenabträge. Die Berechnung der Hanglänge erfordert neben der Hangneigung auch genaue Kenntnisse über die Größe und Beschaffenheit der betrachteten Flurstücke. Informationen dazu liefern die Bodentypkartierungen oder Amtlich Topografisch-Kartografische Informationssysteme (ATKIS) der Bundesländer.

Der Hangneigungsfaktor S berücksichtigt den Einfluss des Geländegefälles. Je steiler ein Hang ist, umso früher beginnt, bei erosiven Niederschlägen, der Oberflächenabfluss und umso größer ist die Energie des schnell abfließenden Wassers.

Der Erosionsschutzfaktor P gibt das Verhältnis des Bodenabtrages bei Anwendung von Schutzmaßnahmen wie Konturbearbeitung und Streifennutzung zu dem bei konventionellem Anbau an. Unter Konturnutzung versteht man die Anlage von Saatstreifen, d.h. die Bodenbearbeitung quer zum Hang, parallel zu den Höhenlinien. Diese Form der Nutzung führt zu einer Reduktion des Bodenabtrags, da das Wasser eines Niederschlags parallel zu den Höhenlinien abgeleitet wird. Als Streifennutzung bezeichnet man die Einsaat von 1-2 Meter breiten Querstreifen einer sehr dichten Kultur im Abstand von 20-40 m möglichst hanglinienparallel in eine Reihenkultur. Diese Form der Nutzung führt zu einer Verkürzung der erosiven Hanglängen und zu einer Unterbrechung des Abflusses.

Der Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C charakterisiert den Einfluss verschiedener Kulturen und Bearbeitungstechniken auf den Bodenabtrag. Der Anbau von Kulturpflanzen beispielsweise schützt den Acker vor den aufprallenden Regentropfen.

Neben verschiedenen Berechnungsansätzen und der EDV-gestützten Modellierung von Bodenerosionsprozessen existieren vereinfachte Methoden erosionsgefährdete Flächen zu erkennen und den Bodenverlust qualitativ abzuschätzen. Eine dieser Methoden wird in der „Arbeitshilfe für eine umweltgerechte Landbewirtschaftung“ erläutert, die in Baden-Württemberg entwickelt wurde. Auf der Grundlage des ABAG-Modells wird mit einer Vor-Ort-Kartierung in 7 Schritten bewertet wie groß das Risiko der Flächenerosion ist und welche Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind (Abb. 19).

	Kennwert	Kennwert - Ermittlung	Seite
1 Schritt Geländeeigenschaften ermitteln			
	Hanglänge/-gefälle	Im Feld erheben	4 im Feld
	Geländewert	Mit Hanglänge + Hanggefälle: Wert aus Tabelle ablesen	5
2 Schritt Verschlämmlungsrisiko ermitteln			
	Jahresniederschlag	Aus Karte ablesen oder aus eigenen Aufzeichnungen	6
	Bodenart	Aus dem Bodenuntersuchungsbefund oder mittels Abbildung im Feld selber schätzen	7 (im Feld)
	Verschlämmlungsrisiko	Mit Bodenart und mittlerem Jahresniederschlag aus Tabelle ablesen	7
3 Schritt Fruchtfolgewert ermitteln			
	Bewirtschaftungstyp	Mit Abbildung ermitteln	8
	Fruchtfolgewert	Mit Abbildung ermitteln	9
4 Schritt Risiko für Gesamterosion berechnen			
	Flächenerosion	Berechnen	10
	Rinnenerosion	Mit Abfrage ermitteln, bei Bedarf im Feld	11 (im Feld)
	Gesamterosion	Berechnen	13
5 Schritt Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit bewerten			
	Gefährdungsstufe	Mit Bodentiefe (gemäß Ackerzahl oder Bohrstockerkundung) und Gesamterosion aus Abbildung ermitteln	14 (im Feld)
6 Schritt Maßnahmen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit wählen			
	Schutzmaßnahmen	Mit Gefährdungsstufe aus Tabelle auswählen	15
7 Schritt Maßnahmen bewerten			
	Pflanzenbaulich-standortkundlich	Risiko für Gesamterosion bei aktuellem und geplantem Bewirtschaftungsverfahren gegenüberstellen	18
	Betriebswirtschaftlich	Verfahrensabhängige Kosten von Bewirtschaftungsalternativen aus Tabelle ablesen und gegenüberstellen	19

Abb. 19: Verfahren zur Bestimmung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit aufgrund des Bodenabtrags durch Wassererosion (LAP, 2005)

Ob und wieviel Boden durch Wasser von einer landwirtschaftlichen Fläche abgeschwemmt wird, ist im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig:

- der Topografie, d.h. der Hangneigung, -länge und -form eines Schlages,
- der Verschlämmlungsneigung des Bodens, d.h. der Bodenart und des Humusgehaltes,
- den erosionswirksamen Regenereignissen, insbesondere zu Zeiten unbedeckter Böden, mit denen an einem Standort zu rechnen ist,
- dem Bodenbearbeitungsverfahren und der Fruchtfolge.

Ist das Hanggefälle kleiner als 2 %, ist das Erosionsrisiko gering. Maßgeblicher Parameter ist dann die Verschlämmlungsneigung des Bodens.

Das Risiko der Flächenerosion errechnet sich aus:

$$\text{Risiko für Flächenerosion} = \text{Geländewert} \cdot \text{Verschlämmlungsrisiko} \cdot \text{Fruchtfolgewert}.$$

Die Gesamterosion ist die Summe aus Flächenerosion und Rinnenerosion. Ein durchschnittlicher Bodenverlust in mm/Jahr berechnet sich anschließend aus dem Risiko der Gesamterosion dividiert durch 12 Monate. Die 7 Arbeitsschritte des Verfahrens werden explizit in der Arbeitshilfe beschrieben sowie Maßnahmen zur Reduzierung der Erosionsgefahr vorgeschlagen.

Den wichtigen Zusammenhang zwischen Erosion und Oberflächenabfluss spiegelt der folgende Satz wieder. „*Abfließendes Wasser ist verlorenes Wasser für die Kultur, damit abfließende Erdfracht ist verlorene Substanz. Beides sind existenzielle Bestandteile der Landwirtschaft, auf die wir keinesfalls verzichten können*“ (Unger, 2004). Der Beitrag der Landwirtschaft zum Hochwasserschutz besteht somit darin, den Oberflächenabfluss zu verzögern und möglichst viel Wasser möglichst lange auf der Fläche zu halten.

Die drei Hauptfaktoren, die sowohl Erosion als auch den Oberflächenabfluss maßgeblich beeinflussen, sind die Geländegestalt, das heißt Hangneigung, Hanglänge und die Hangform, der Niederschlag und die Infiltrationskapazität. Die Infiltrationsleistung hängt maßgeblich vom Bodenzustand und der Wassersättigung ab. Unter dem Bodenzustand wird beispielweise die Oberflächenrauigkeit, die Verdichtung und das Porenvolumen verstanden. Das heißt wassergesättigte, gefrorene oder unbedeckte Böden sind besonders stark gefährdet.

Bei den Niederschlägen sind vor allem intensive bzw. langanhaltende Regenereignisse von Bedeutung. Der Jahresverlauf der Eintrittswahrscheinlichkeit erosiver und Oberflächenabfluss hervorrufender Niederschläge zeigt, dass diese überwiegend in den Sommermonaten zwischen Mai und September auftreten (Abb. 20).

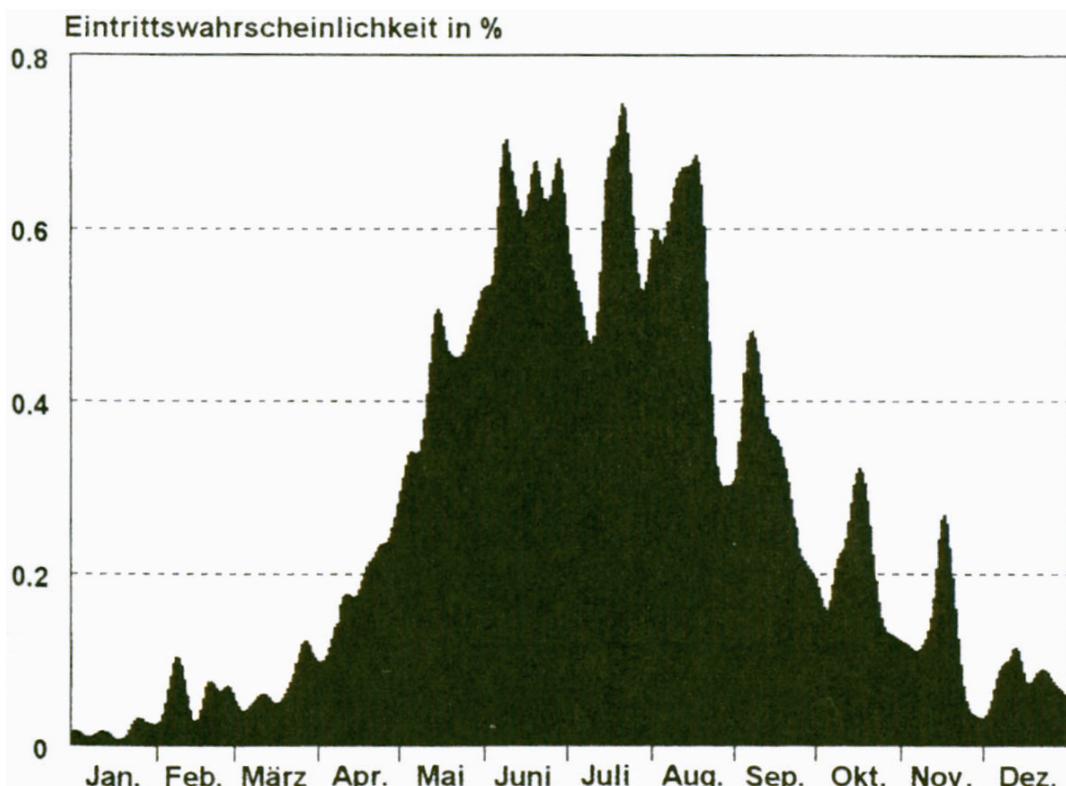


Abb. 20: Jahresverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines erosiven Niederschlages (DVWK, 1999)

Somit ist in dieser Zeit die Erosionsgefahr für landwirtschaftliche Nutzflächen am größten. Entscheidend für die Reduzierung der Erosion und Oberflächenabflüsse während diesem Zeitraum ist der Bodenbedeckungsgrad, das heißt wie stark eine Fläche bewachsen ist.

Topografische Begebenheiten wie Mulden, Tiefenlinien in Form von Wegen und Senken sowie Fahrspuren landwirtschaftlicher Geräte lenken den Erosionsverlauf und kanalisieren den Oberflächenabfluss (Abb. 21).



Abb. 21: Abflusskanalisierung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Kreitmayer, J., 2004)

In der Praxis existieren zahlreiche Orientierungswerte, die auf eine verstärkte Gefahr der Wassererosion hinweisen (Tab. 6). Der Prozess der Bodenerosion kann als Indikator für einen verstärkten Oberflächenabfluss angesehen werden und als Entscheidungskriterium für die Umsetzung von Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen verwendet werden.

Parameter	Wann tritt Wassererosion auf?
Niederschlag	> 7,5 mm Menge oder > 5 mm je Stunde (Intensität)
Bodenart	bevorzugt sandige Lehme und lehmige Sande sowie Schluffe
Hanglängen	> 50 m*
Hangneigung	> 4 %
Bodenoberfläche	fehlende Bodenbedeckung

* In Einzelfällen kann bereits bei geringerer Hanglänge und –neigung starke Wassererosion auftreten.

Tab. 6: Orientierungswerte für auftretende Wassererosion (BMELV, 2001)

3.5 Einflüsse auf die Abflussbildung

Grundsätzlich steuern die naturräumliche Ausstattung und die Landnutzung die Aufteilung des Abflusses in Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss. Die jährlich stattfindende Bodenbearbeitung erlaubt die Optimierung der Wasserinfiltration zur effizienten Nutzung des Wasserspeichers Boden. Insgesamt wirkt sich die landwirtschaftliche Nutzung über die Beeinflussung von Interzeptionsspeicher, Evapotranspiration, Infiltration, Oberflächenabfluss, Volumen und Auffüllung des Bodenspeichers sowie Wasserleitfähigkeit des Bodens auf die Abflussbildung aus. In den folgenden Abschnitten werden Parameter und Maßnahmen beschrieben, die zur Reduzierung von Erosion und Abfluss beitragen. Unterschieden werden dabei natürliche und anthropogene Faktoren (Abb. 22).

Naturräumliche Ausstattung

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Bodenarten : z.B. gS, mS, SI4, St2, Ls2 - hoher Humusgehalt - rauhe Bodenoberfläche, hohe Aggregatstabilität - vertikal konvexe oder gestreckte Hangformen (Hangrücken) - geringe Niederschlagsenergie und -menge | <ul style="list-style-type: none"> - Bodenarten: z.B. Su2, Su3, Su4, Lu, Uu, Us, Uls, Ut, Tl, Tt - geringer Humusgehalt - geringe Basensättigung - feinkrümelige Bodenoberfläche, geringe Aggregatstabilität - vertikal konkave Hangformen (Hangmulden, Thalwege) - hohe Niederschlagsenergie und bzw./oder -menge |
|---|--|

gering

Oberflächenabfluss

hoch

- (weitestgehend) ganzjährig Pflanzenbestand, vielgliedrige Fruchfolgen, mehrjährige Ackerfutterfrüchte, Zwischenfruchtanbau
- keine bzw. geringe Bodenbearbeitungsintensität
- geringer Viehbesatz¹
- naturnahe Wälder, Plenterwirtschaft
- hohe Anteile an Landschaftsstrukturelementen (Hecken, Raine, Terrassen etc.)

- häufige Brachezeiten oder geringe Bodendeckung, insbesondere zu Zeiten hoher Niederschlagsintensität (Gewitterregen), (weitestgehend) ohne Zwischenfruchtanbau, geringe Fruchfolgediversität
- hohe Bodenbearbeitungsintensität
- hoher Viehbesatz
- naturferne Wälder in Verbindung mit Kahlschläge oder Windwurf
- geringe bzw. keine Anteile an Landschaftsstrukturelementen

Landnutzung

¹Der Viehbesatz steuert über die Trittbelaustung Schadverdichtungen und Auflockerungen der Grünlandnarbe, die ihrerseits maßgeblich das Abflussgeschehen auf Grünland beeinflussen.

Abb. 22: Faktoren für die Höhe des Oberflächenabflusses (DVWK, 1999)

3.5.1 Natürliche Faktoren

Der Einfluss der Topografie in Form der Hangneigung, Hanglänge und Hangform auf die Oberflächenabflusssumme wird in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen. Dabei ist die Hangneigung besonders für den Bodenabtrag bedeutsam. Die Menge an Oberflächenabfluss wird durch zahlreiche weitere Faktoren beeinflusst. Bodenabtrag findet übereinstimmend in vielen Literaturquellen ab einer Geländeneigung von 4 % statt. Im Hangneigungsbereich bis etwa 4 % nimmt gleichzeitig die Oberflächenabflussmenge mit steigender Hangneigung zu. Neben der Hangneigung spielt die Rauigkeit der Bodenoberfläche und das Vorhandensein von Geländemulden eine Rolle. Bei kleineren Regenereignissen kann Niederschlagswasser in Geländemulden gespeichert werden, so dass zunächst kein oberirdischer Wasserabfluss in einen Vorfluter stattfindet.

In kleinerem Maßstab erfolgt dieser Muldenrückhalt auch bei rauer Bodenoberfläche (grobes Saatbett, Pflugfurche). In dem Bereich von 0 bis 4 % Gefälle nimmt die Oberflächenabflussmenge mit steigender Hangneigung tendenziell zu, da die Mulden gefüllt sind und weiterer Niederschlag somit abflusswirksam wird. Bei glatter Bodenoberfläche (z. B. feines Saatbett), d. h. fehlender Muldenspeicherung, fließt das Wasser aber auch von weitge-

hend ebenen Flächen oberflächlich ab und die Hangneigung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Abflussmenge. Entscheidend hingegen ist das Geländegefälle für die Abflussgeschwindigkeit und die Fließzeit bis zum Gewässer.

Mit weiter steigender Hangneigung beschreiben die Autoren das Abflussverhalten unterschiedlich. Poesen (1984) und Govers (1991) wiesen eine Abnahme der Abflussmenge mit steigender Hangneigung nach, was sie darauf zurückführten, dass die Bodenoberfläche an steilen Hängen weniger stark verschlämmt, da die Verschlämzungshaut ständig wegerodiert. Ebenfalls verbreitet ist die Annahme, dass bei größerer Hangneigung ein effektiver Rückhalt von Niederschlag durch verschiedene Maßnahmen nur schwer möglich ist.

Der Boden hat einen großen Einfluss für den lateralen und vertikalen Wasserfluss. Maßgeblich für das Abflussgeschehen sind vor allem die Bodeneigenschaften:

- Infiltrationsrate,
- Verschlämungsneigung,
- Feldkapazität,
- und Wasserleitfähigkeit im gesamten Bodenprofil.

Auf die maximale Infiltrationsrate und die Verschlämungsanfälligkeit (Abb. 23) wirken sich unter anderem die Aggregatstabilität, Rauigkeit, Humus- und Steingehalt, Vegetation und allgemein die Bodenbedeckung aus. Verschlämungsanfällige, schluffige Sand- und Lehmböden, Schluffböden oder Böden mit geringer Infiltrationsrate wie Lehm- und Tonböden tragen mehr zum Oberflächenabfluss bei als beispielsweise reine Sandböden.



Abb. 23: Verschlämung und erosive Rinnenbildung eines konventionell bewirtschafteten Bodens nach einem Starkniederschlagsereignis am 28.09.2007 in der Gemarkung Ottrau (Foto: Weiß)

Charakteristisch für die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ist die Feldkapazität. Die Feldkapazität gibt die Wassermenge an, die ein Boden gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Je höher sie ist, umso mehr Niederschlag kann im Boden gespeichert werden. Somit steigt der Gebietsrückhalt an. Zu beachten ist dieser Zusammenhang bei Niederschlägen geringer Intensität, da unter diesen Bedingungen in der Regel die maximale Infiltrationsleistung des Bodens nicht begrenzend auf die Wasseraufnahme wirkt. Die nutzbare Feldkapazität (im Boden zurückgehaltene Wassermenge, welche von den Pflanzen aufge-

nommen werden kann) ist entscheidend für die maximale Transpiration eines Standortes. Die Transpiration ist auf Standorten mit großen nutzbaren Feldkapazitäten hoch. Als Folge sinkt der Abflussanteil. Auf Standorten mit hoher Feldkapazität jedoch geringer nutzbarer Feldkapazität ist die Transpiration geringer. Die Feldkapazität des Bodens hängt darüber hinaus von der Verdichtung des Bodens ab. Je stärker ein Boden verdichtet ist, desto geringer ist die nutzbare Feldkapazität und somit auch die Wasserspeicherung (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Bestimmend für die Feldkapazität sind zudem die Bodenarten (Schroeder, 1992). Je feinkörniger sie sind, desto mehr Wasser kann an ihrer Oberfläche adsorbieren und in den Poren kapillar gebunden werden (Kapillarwasser wird durch Oberflächenspannung und Meniskusbildung in den Poren gehalten).

Bodenarten sind in Abhängigkeit von der den Oberflächenabfluss auslösenden Niederschlagsstruktur unterschiedlich zu bewerten. Ein Boden neigt nach einem Landregen mit geringer Intensität (< 5 mm/h) weniger zur Oberflächenabflussbildung, wenn er eine große Feldkapazität und somit eine große potenzielle Wasseraufnahmefähigkeit besitzt. Bei Starkniederschlägen (> 10 mm/h) spielt die Feldkapazität eine untergeordnete Rolle, denn die Bildung von Oberflächenabfluss wird maßgeblich durch die Verschlämmsneigung und die Wasserleitfähigkeit der Böden bestimmt (DVWK, 1999). Weiterhin zu beachten ist, ob eine Stauschicht in den Versickerungsprozess eingreift und zum Zwischenabfluss führt.

Weitere natürliche Begebenheiten beeinflussen die Abflussbildung zusätzlich. Beispielhaft sei das Klima, und hier speziell der Niederschlag mit räumlicher Verteilung, Niederschlagsintensität, -struktur und -menge genannt.

3.5.2 Anthropogene Faktoren

Gegenüber der Topografie können die Bodeneigenschaften direkt durch verschiedene Maßnahmen der Bewirtschaftung und Bearbeitung beeinflusst werden. Die maßgeblichen Parameter, die sich durch Maßnahmen auf der Fläche verändern lassen, sind dabei die Infiltration und die Zusammensetzung der Poren in der Bodenmatrix.

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben wie sich Maßnahmen auf der Fläche auf diese Parameter auswirken und welche weiteren anthropogenen Einflüsse das Abflussverhalten verändern. Diesbezüglich wird aufgezeigt, welche Rückhaltepotenziale bisher in Verbindung mit einer Reduzierung der Bodenverdichtung, mit Dränagen, mit unterschiedlicher Flächenvegetation und durch das Anlegen von Feldspeichern erreicht werden konnten.

Zur Beurteilung der Standorteigenschaften eines Bodens unter ackerbaulicher Hinsicht sind das **Porenvolumen** und die Porengrößenverteilung im Boden charakteristische Größen, die den Wasserhaushalt des Bodens wesentlich bestimmen. Die Porengrößenverteilung ist ein bestimmender Faktor für das Ausmaß der Speicherung des Wassers in der Bodenmatrix sowie für die Dynamik des Wassertransports. Gesamtporenvolumen und Lagerungsdichte sind gegenläufig abhängige Größen. Das Gesamtporenvolumen hat eine geringere Auswirkung auf die Leitfähigkeiten von Wasser und Luft, maßgebend sind die unterschiedlich großen Porenanteile. Nimmt der weite kontinuierliche Grobporenanteil im Boden zu, steigt auch die Wasserleitfähigkeit, wohingegen mit Erhöhung der mittleren Poren die Wasserleitfähigkeit sinkt.

Das Poresystem hat eine besondere Bedeutung für die Gefügestabilität der Bodenmatrix, dabei gilt insbesondere ein hoher Anteil der Mittelporen als Garant für die Wasserhaltefähigkeit des Bodens.

Folgende Klassifikation ist zu unterscheiden (Abb. 24):

- Grobporen ($>10 \mu\text{m}$) wirken dränend: $>50 \mu\text{m}$ schnell, 10 bis $50 \mu\text{m}$ langsam,
- Mittelporen (0,2 bis $10 \mu\text{m}$) halten Wasser in pflanzenverfügbarer Form; sind in ausgetrocknetem Boden mit Luft gefüllt,
- Feinporen ($<0,2 \mu\text{m}$) halten Wasser in nicht pflanzenverfügbarer Form.

Während die Grobporen des Bodens das Wasser nur schwach binden, sind in Mittelporen und Feinporen Kapillarkräfte wirksam, die das Wasser unterschiedlich stark an die Matrix binden. Nur in Poren mit Durchmessern $< 10 \mu\text{m}$ sind die Kapillarkräfte stark genug, um das Wasser entgegen der Schwerkraft im Boden zu halten.

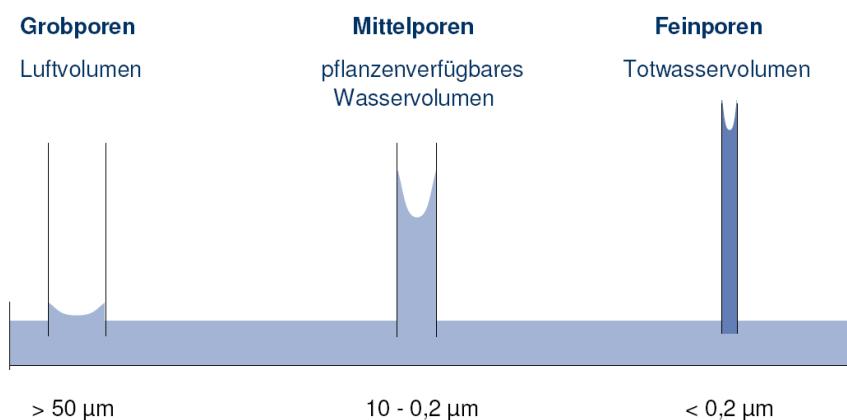


Abb. 24: Unterscheidung von Porengrößen nach ihrem Äquivalentdurchmesser (Kölbl, 2006)

Die Zuordnung der Grobporen zu einer stabilen Gefügestruktur ist an bestimmte Volumenanteile gebunden. Getreide benötigt etwa 10-15 Volumenprozent Grobporen, Grünlandpflanzen hingegen gedeihen bereits auf Böden mit nur 6-10 Volumenprozent Luftkapazität. Das Verhältnis von Parendurchmesser und der notwendigen Durchlüftung in Ackerböden ist in Tab. 7 zusammengefasst:

Durchlüftung	Poren $> 50 \mu\text{m}$ (Vol.%)
sehr schlecht	<4
schlecht	4 – 8
genügend	8 – 12
gut	12 – 16
sehr gut	>16

Tab. 7: Parendurchmesser und Durchlüftung in Ackerböden (Buchner, 2003)

Die nicht wendende bzw. stark reduzierte Bearbeitung des Bodens bei konservierender Bearbeitungsvariante führt zu einer Zunahme der Lagerungsdichte. Zahlreiche Literaturquellen und Untersuchungen weisen darauf hin, dass das Gesamtporenvolumen bei pflugloser Bearbeitung abnimmt. Bei der Wahl geeigneter Maschinen (Beispiel Grubber und Tiefenlockerer) kann sich jedoch das Gesamtporenvolumen auch erhöhen.

Dennoch wird, trotz der zum Teil hohen Dichte der Böden, bei konservierender Bearbeitung die Funktionalität im Hinblick auf die Wasserinfiltration nicht gemindert, sondern sogar verbessert. Dies weist auf die hohe Kontinuität der vertikalen Makroporen in den nicht

gepfügten Bodenbearbeitungsvarianten hin (Tab. 8). Die Ursachen sind einerseits in der Schonung bestehender Poren durch eine geringere Bodenbearbeitungsintensität und andererseits durch die erhöhte Neubildung von Makroporen durch die gestärkte biologische Aktivität und das verstärkte Auftreten von Regenwurmarten zu erklären. Das auf der Bodenoberfläche bzw. in oberflächennahen Schichten angereicherte Mulchmaterial trägt zu einer Förderung von Bodenorganismen bei, da Bodenklima und Nahrungsangebot verbessert werden. Es kommt in der obersten Schicht zu einer Humusakkumulation, zu einer erhöhten Aggregatstabilität sowie zu einem Aufbau eines bis in größere Tiefen reichenden, ungestörten Makroporensystems.

	konventionelle Landwirtschaft	dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung (pfluglos)
Makroporen >1 mm in 10 cm Tiefe [Poren·m ⁻²]	264	493
Makroporen >1 mm in 30 cm Tiefe [Poren·m ⁻²]	317	864

Tab. 8: Anzahl der Makroporen in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (Deutscher Bundestag, 2004)

Wie komplex die Wirkung des Makroporenflusses im Untergrund sein kann zeigt die nachfolgende Abbildung (Abb. 25). Es existieren hydraulische Verbindungen der Bodenoberfläche mit verschiedenen Bodentiefenbereichen sowie präferenzielle Leitbahnen auf relativ dicht gelagerten Schichten wie z. B. der Pflugsohle der konventionell bewirtschafteten Flächen oder auf undurchlässigen Schichten im Untergrund.

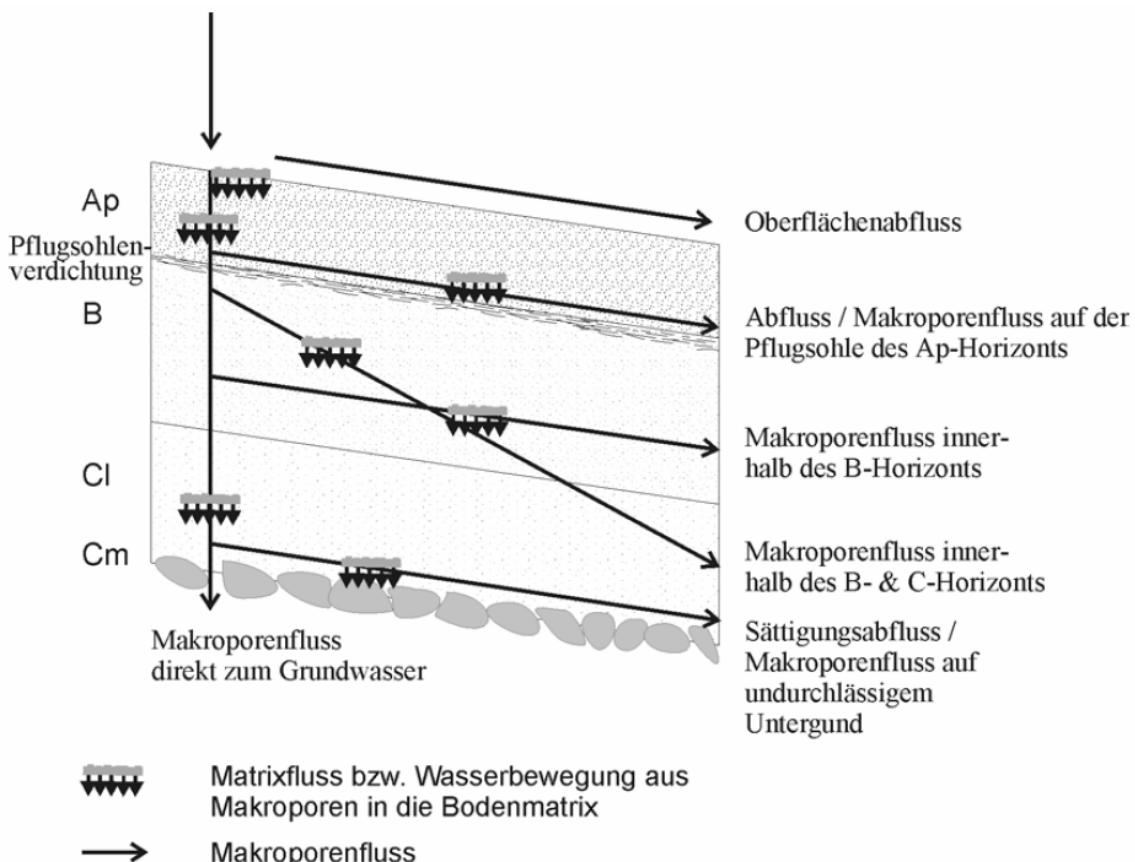


Abb. 25: Schematisch dargestellte Fließwege in einem Boden mit Makroporen (Ackermann, 2004)

Neben dem Porenvolumen beeinflusst die **Infiltration** maßgeblich das Wasserrückhaltepotenzial landwirtschaftlich genutzter Flächen. Die Infiltration kann direkt durch Maßnahmen wie unterschiedliche landwirtschaftliche Bodenbearbeitungsmethoden verändert werden und wird in Kapitel 6 im hydrologischen Modell abgebildet und variiert.

Unterschieden wird zwischen der Infiltrationskapazität und der Infiltrationsrate. Die Infiltrationsrate (mm/h) ist die Wassermenge, die pro Zeiteinheit in den Boden eintritt, während die Infiltrationskapazität (mm/h) die maximale Infiltrationsrate bezeichnet, die ein Boden erreichen kann. Die unterschiedlichen Böden weisen verschiedene Infiltrationskapazitäten auf und lassen einen charakteristischen Verlauf der Infiltrationskapazität in Abhängigkeit der Zeit erkennen. Die Infiltrationskapazität verringert sich mit der Zeit und nähert sich asymptotisch einem stationären Wert. Die Abnahme der Infiltrationskapazität ist mit der Verringerung des hydraulischen Gradienten durch Eindringen einer Feuchtefront in den Boden zu erklären (Bronstert, 2005).

Wenn die Intensität des Bestandsniederschlags die Summe der Infiltrationsraten in die Bodenmatrix und in die Makroporen übertrifft, kommt es schließlich zum Infiltrationsüberschuss. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität, akkumuliert sich das nicht-infiltrierende Wasser in Senken und Mulden. Sind diese gefüllt, setzt der laterale Oberflächenabfluss ein.

Infiltrationsparameter variieren beträchtlich und sorgen dafür, dass verschiedene Flächen eines Hanges oder eines Einzugsgebietes während eines Niederschlagsereignisses unterschiedlich stark zum Oberflächenabfluss beitragen. Nach Betson (1964) wird der Gebietsabfluss zum großen Teil durch Infiltrationsüberschuss gering durchlässiger Flächen bestimmt, die restlichen Flächen tragen wenig bei. Eine Folge der räumlichen Variabilität entlang eines (Oberflächen-) Fließpfades ist, dass Oberflächenabfluss auf seinem Weg zum Gewässer auf Abschnitten größerer Infiltrationskapazität wieder infiltrieren kann. Dieser Re-Infiltrationseffekt (run-on process) wird im Allgemeinen nicht berücksichtigt (Bronstert, 2005).

Abb. 26 zeigt deutlich, dass ein konventionell bearbeiteter Boden mit zunehmender Regendauer weniger Niederschlagswasser aufnehmen kann, gegenüber Böden, die konservierend bewirtschaftet werden.

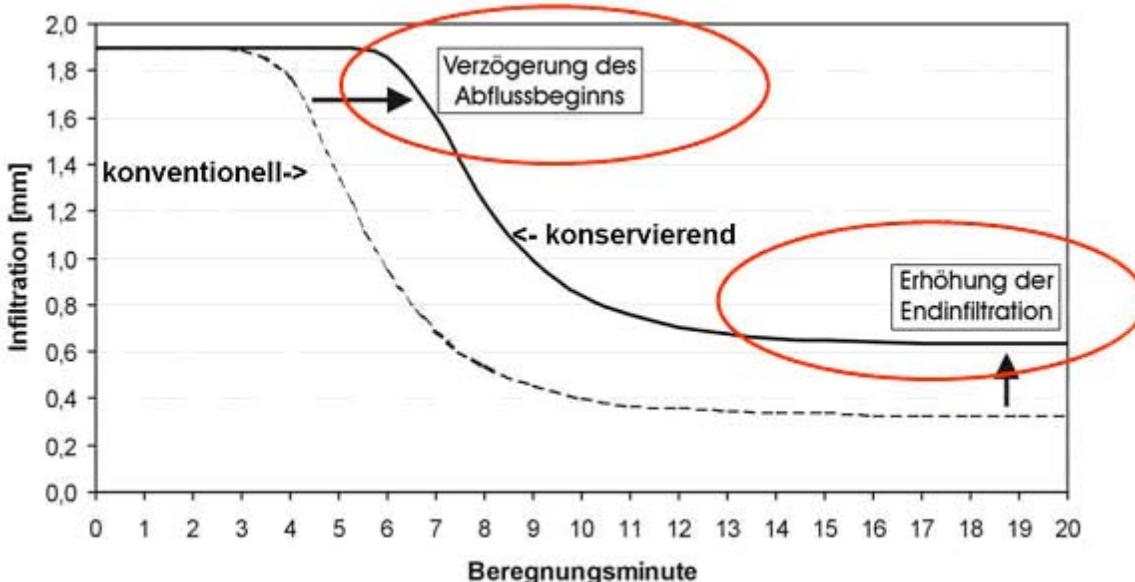


Abb. 26: Schematische Darstellung der Änderungen des Wasserinfiltrationsverlaufes bei Umstellung von konventioneller auf dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung (Regensimulationsversuch, Beregnungsintensität 1,9 mm/min) (LfL, 2006)

Die Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB, 2006) weist auf das bis zu 75 % höhere Infiltrationsvermögen konservierend bearbeiteter Böden hin und unterstreicht die positiven Einwirkungen auf die Bodenmatrix. In zahlreichen Untersuchungen wird somit belegt, dass die Wasserinfiltration bei vorhandener Krumenbasisverdichtung eingeschränkt und das Niederschlagswasser verstärkt oberirdisch oder über die Zwischenschicht abgeleitet wird. Mit zunehmender Zeit der pfluglosen Bodenbearbeitung nimmt die Infiltrationsleistung zu (Tab. 9).

Bodenbearbeitung	Wasserversickerung mm/min	
	Anfang Mai 1996	Ende Juni 1996
8 Jahre pfluglos	55	79
8 Jahre pfluglos, 1996 Pflug	45	33
ständige Pflugbearbeitung	10	5

Tab. 9: Wasserversickerung auf Maisäckern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Umweltbundesamt, 2003)

Die Wasserinfiltration kann durch eine mechanische Unterbodenlockerung verbessert werden. Ein Aufbrechen der Krumenbasisverdichtung kann die Infiltration in tiefere Bodenschichten fördern. So führt die Lockerung zu einer signifikanten Zeitverkürzung bis zum Beginn des Sickerwasserabflusses.

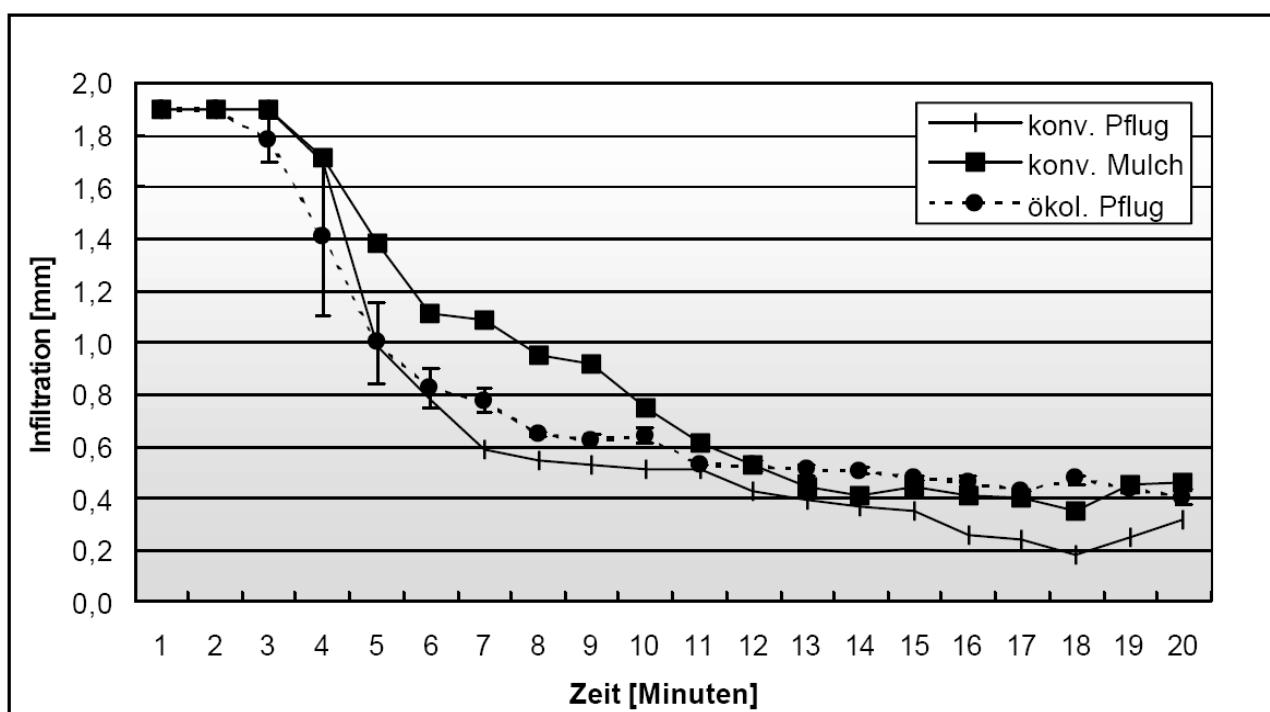


Abb. 27: Infiltrationsrate pro Minute bei Berechnungssimulationen am 13.05.2003 an den Standorten Lützschora (ökol. Pflug) und Niederstriegis (konv. Mulch, konv. Pflug.). Frucht: Mais (0-3 % Bedeckung), Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)

Die Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) in Sachsen untersuchte in Beregnungsversuchen den Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden. Die 1 m² großen Beregnungsparzellen wurden jeweils im Oberhangbereich positioniert. Die Hangneigung betrug in allen Varianten 5 %. Die Beregnungsversuche fanden nach der Maissaat statt.

Bestätigt wird abermals der positive Einfluss einer geänderten Bodenbearbeitung, beispielsweise mittels Mulchsaat, gegenüber einer reinen konventionellen Pflugbewirtschaftung (Abb. 27). Darüber hinaus wird ebenfalls der Vorteil des ökologischen Landbaus gegenüber einer konventionellen Bewirtschaftung deutlich, der sich durch eine Erhöhung der Gesamtinfiltration bzw. Reduzierung des Gesamtoberflächenabflusses bemerkbar macht (Tab. 10).

	ökol. Pflug	konv. Mulch	konv. Pflug
Gesamtinfiltration [%]	43	46	38
Gesamtoberflächenabfluss [%]	57	54	62

Tab. 10: Gesamtinfiltration und -oberflächenabfluss in Prozent bei Beregnungssimulationen am 13.05.2003 an den Standorten Lützschora („ökol. Pflug“) und Niederstriegis („konv. Mulch“, „konv. Pflug“), Frucht: Mais, Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)

Erklärbar ist dies beispielsweise mit einem höheren **Regenwurmbesatz (Regenwurm-biomasse)**, wodurch die Böden ein höheres Potenzial zur Bildung eines Makroporensystems aufweisen. Durch günstigere Bedingungen für die Bildung von „Bioporen“, geschaffen durch die Aktivität von Bodenlebewesen, insbesondere von Regenwürmern, weisen ökologisch bewirtschaftete Ackerböden unter ansonsten gleichen Bedingungen etwa doppelt so hohe Infiltrationsraten auf wie konventionell bewirtschaftete Böden (Rosner, 2005).

Positive Auswirkungen der Regenwürmer auf die Bodenmatrix sind:

- das Zerkleinern und Zersetzen pflanzlicher Reststoffe,
- das Einarbeiten von Pflanzenresten und die Verlagerung von Nährstoffen in große Bodentiefen,
- Regenwürmer fressen verdichtete humose Bodenaggregate und scheiden lockere, stabilisierte Bodenaggregate aus,
- das Vermischen von organischem Material, Mikroorganismen und mineralischen Bodenbestandteilen,
- die Umlagerung von Boden und Produktion von Lösung,
- Regenwürmer und Pflanzenwurzeln bohren Röhren in den Boden und schaffen damit Luft- und Wasserabzugsbahnen.

Schmidt et al. (2001) konnten den positiven Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Regenwurmpopulation nachweisen (Abb. 28).

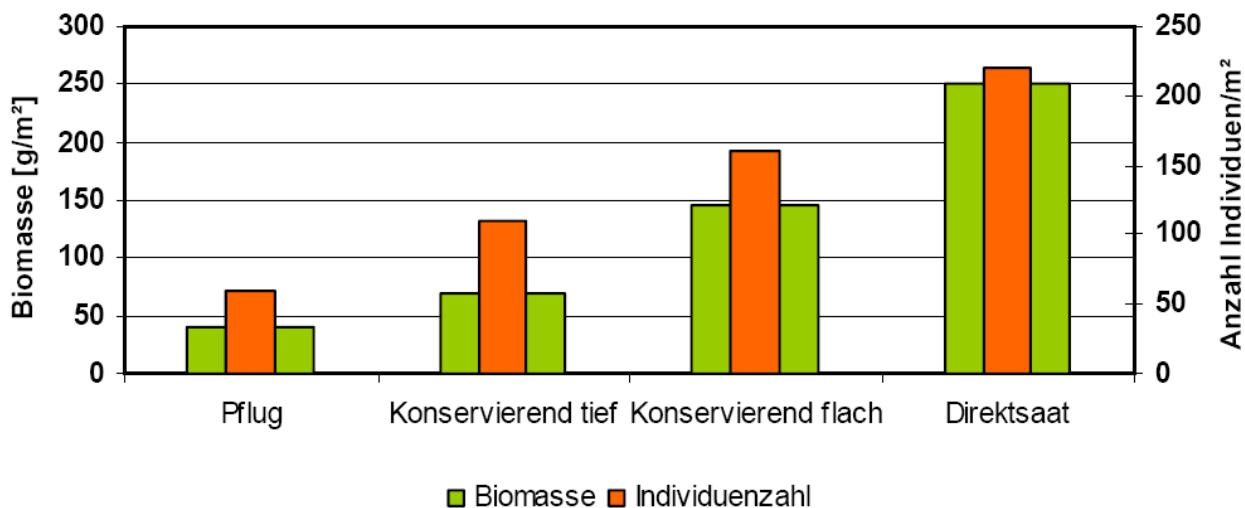


Abb. 28: Regenwurmbiomasse und Regenwurmabundanz nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung (Schmidt et al., 2001)

Auch Tebrügge konnte in Feldversuchen (2000) auf Flächen, die seit mehreren Jahren mit reduzierter Bodenbearbeitungsintensität bewirtschaftet wurden, bereits nach wenigen Jahren der Umstellung von Pflugbewirtschaftung auf Direktsaat einen Anstieg der Regenwurmpopulation von 20 bis 35 auf bis zu 200 Regenwürmer pro m² nachweisen.

Abb. 29 und Abb. 30 zeigen deutlich die Unterschiede der Bodenstruktur von Böden mit hohem und niedrigem Regenwurmbesatz. Das Krümelgefüge (rundliche, kleine, stabile Aggregate) ist häufig biologischer Ursprung (Regenwurmkom).



Abb. 29: Gute Bodenstruktur mit Krümelgefüge und hohem Regenwurmbesatz bei optimalen Humusgehalten (Rogasik, 2004)



Abb. 30: Verdichtete Bodenhorizonte ohne stabiles Porensystem und geringem Regenwurmbesatz nach langjährig fehlender organischer Düngung (Rogasik, 2004)

Durch die grabende Tätigkeit der Individuen wird unterschiedliches Bodenmaterial vermischt und dabei ein tiefreichendes kontinuierliches Röhrensystem erreicht, welches eine bessere Bodenlüftung und eine zügige Ableitung von Überschusswasser zur Folge hat. Regenwürmer durchdringen Krume und Unterboden und schaffen somit vertikal kontinuierliche Gänge (Abb. 31).

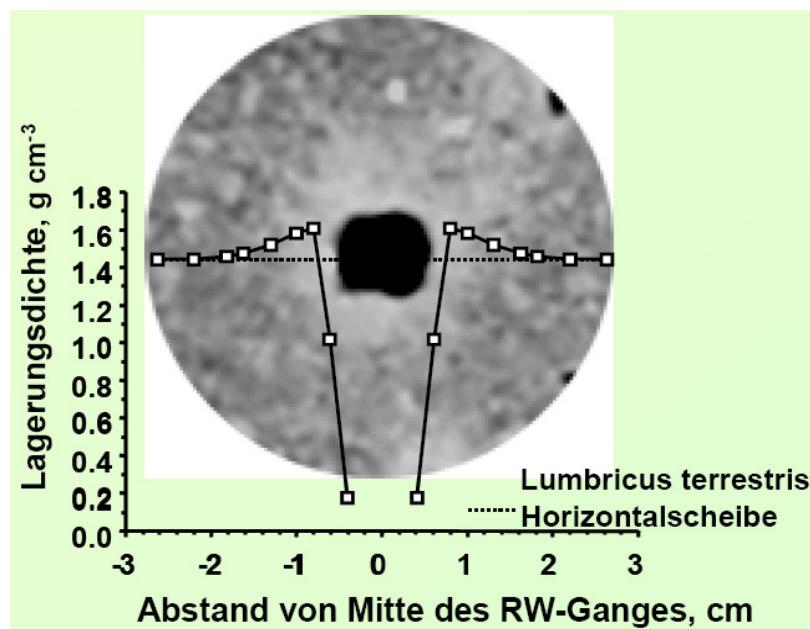


Abb. 31: Lagerungsdichteverteilung in der Umgebung eines Regenwurmgangs (Rogasik et al., 2005)

Die Wasserleitfähigkeit ist abhängig von der Körnung und der damit verbundenen Porengrößenverteilung, dem Porenvolumen sowie dem Aggregatzustand und der Dichte. Eine besondere Bedeutung hat jedoch die Kontinuität, Tortuosität (Abb. 32) und Vernetzung der Poren und insbesondere der Anteil der Makroporen.

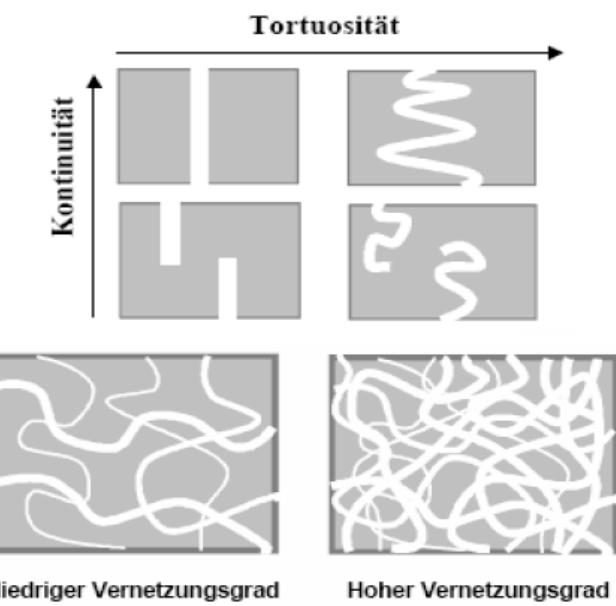


Abb. 32: Definition von Kontinuität, Tortuosität und Vernetzungsgrad (Kölbl, 2006)

Abb. 33 zeigt, dass das Porenvolumen bei konventioneller Bodenbearbeitung in Abhängigkeit der Bodenart höher sein kann, die Leitfähigkeit eines konservierend bearbeiteten Bodens jedoch größer ist aufgrund der durch Regenwürmer geschaffenen vertikal-kontinuierlichen Gänge.

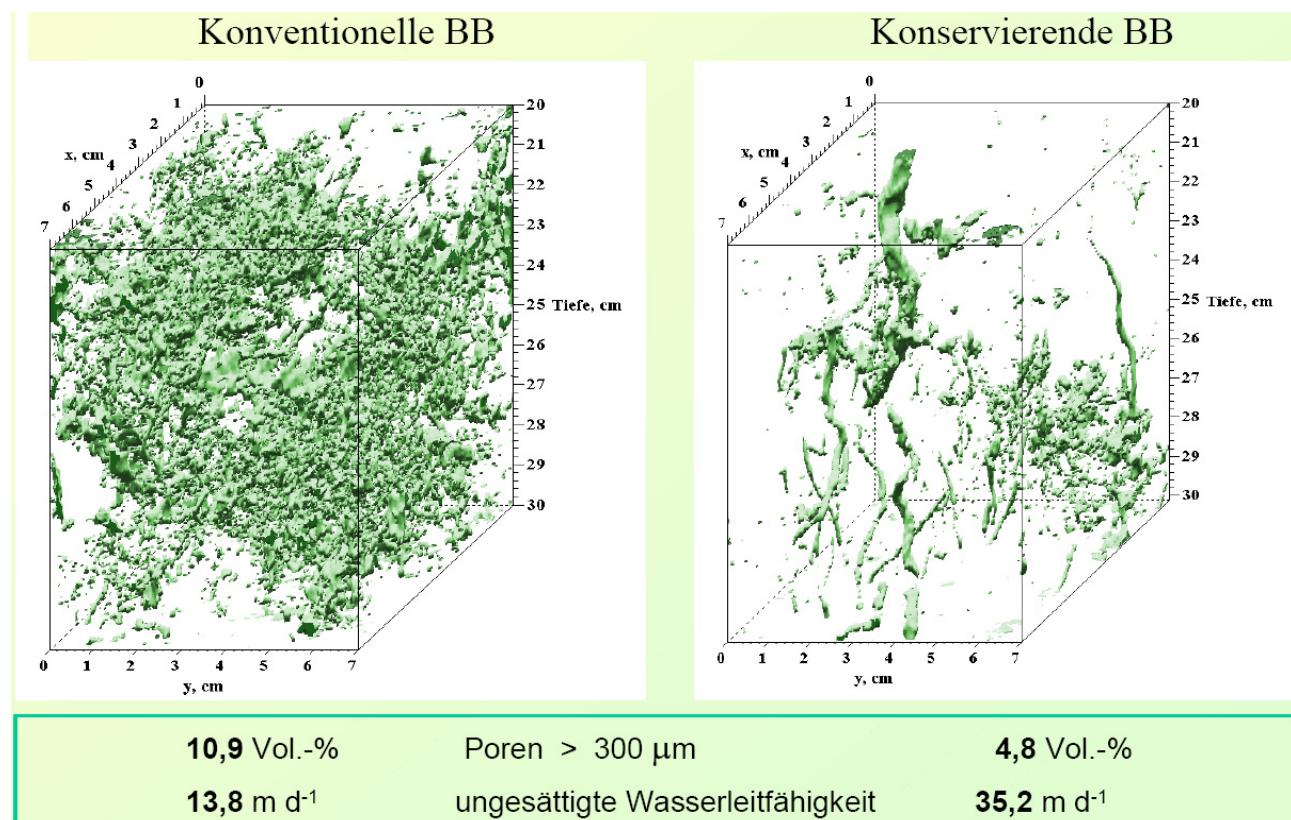


Abb. 33: Makroporensystem bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Rogasik et al., 2005)

Welchen Einfluss Makroporen im Niederschlagsereignis haben verdeutlicht Abb. 34.

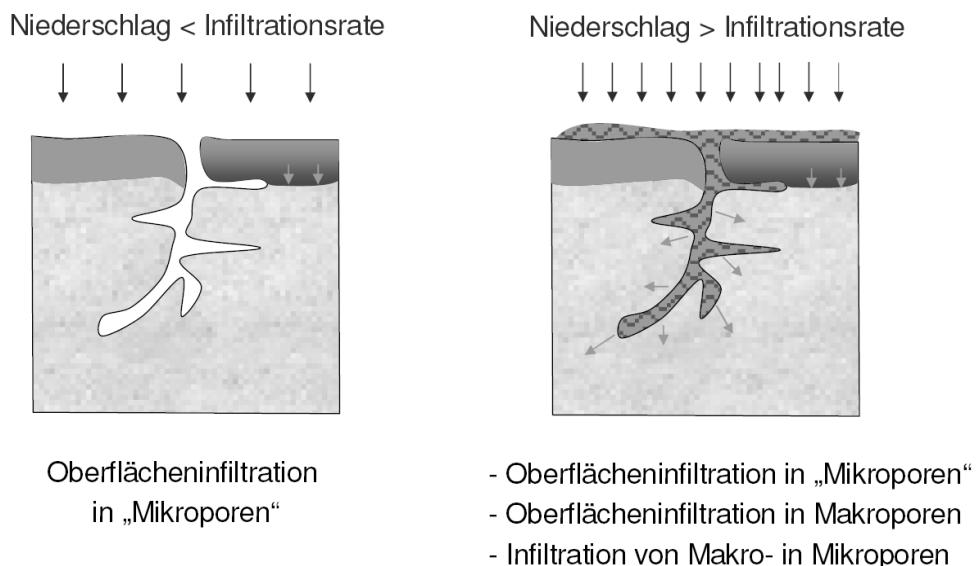


Abb. 34: Einfluss der Makroporen auf die Infiltration (Kölbl, 2006)

Billen et al. (2006) weisen auf den Unterschied der Bodenlebewesen in Ackerland und Grünland hin. Dauerhaftes Gründland weist 25 Regenwurmporen auf einer Fläche von 0,15 m² auf, wohingegen in der Ackerkrume lediglich 10 Regenwurmporen auf 0,15 m² nachweisbar sind.

Die ökologische Bewirtschaftung der Flächen schafft ebenfalls gut durchwurzelte Böden, in denen bis zu 600 Regenwürmer unter einem Quadratmeter Fläche nachgewiesen wurden. Damit wird die Wasseraufnahmefähigkeit auf bis zu 150 Liter pro Stunde gesteigert. Dagegen ist die Wasseraufnahmefähigkeit der konventionell bewirtschafteten Flächen mit 10-20 Regenwürmern pro m² deutlich geringer (Richter, 2006).

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 11) zeigt zusammengefasst die positive Entwicklung auf die Bodenfauna für unterschiedliche Bodenbearbeitungsvarianten.

Bodenbearbeitung	Bodentiere	g/m ² Biomasse	g/m ² TM Nahrung im Jahr	cm ³ Röhrenvolumen pro m ³ Boden	kg/m ² Regenwurm-lösung im Jahr
Pflug mit Folgebearbeitung	25	18	85	98	1,4
Schwergrubber mit Rotoreggé	36	45	218	240	3,5
Frässaat	45	51	246	270	3,9
Direktsaat	153	147	709	1.100	11,1

Tab. 11: Bodenleben nach verschiedener Bodenbearbeitung in einer Getreidefruchtfolge mit jährlicher Strohdüngung im 5. Versuchsjahr (Umweltbundesamt, 2003)

Auffällig ist, dass sich in Abhängigkeit der Bodenbearbeitungsverfahren ein unterschiedliches Artenspektrum ausbildet. Die tiefgrabende Regenwurmart *Lumbricus terrestris* konnten Joschko et al. (1995) in mit Mulchsaat bearbeiteten Böden nachweisen. In Böden mit konventioneller Wendetechnik fehlten diese. Lediglich die flachgrabenden Arten *Aporrectodea caliginosa* und *Aporrectodea rosea* konnten in diesen Böden kartiert werden (Abb. 35).

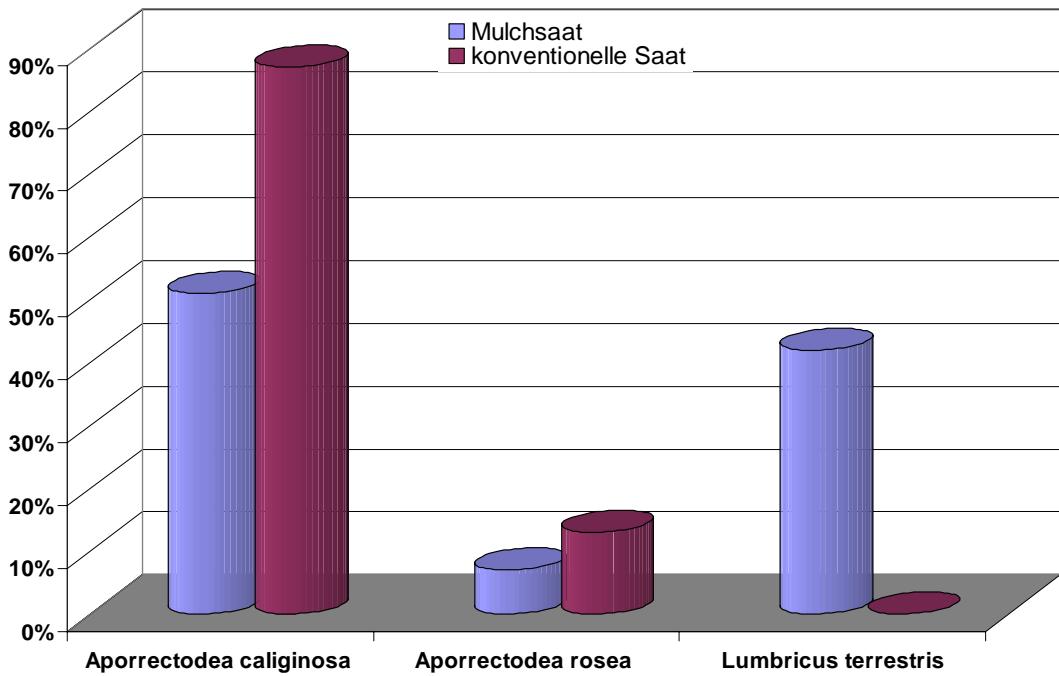


Abb. 35: Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulationen bei unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren (Joschko et al., 1995)

Beweidung zerstört in vielen Fällen die Regenwurmgänge an der Bodenoberfläche. Eine Zuteilung großer Flächen und zeitliche Einschränkungen bzw. ein Verzicht auf Beweidung bei ungünstiger Witterung wirken diesbezüglich vorbeugend.

Durch die verstärkte technogene Bodenbelastung wird die Bodenmatrix landwirtschaftlicher Nutzflächen in zunehmendem Maße verdichtet. Durch die **Bodenverdichtung** wird das Versickern des Niederschlagswassers und der kapillare Aufstieg des Bodenwassers aus tieferen Schichten erschwert. Ein verdichteter Boden hat zudem ein geringeres Porenvolumen. Besonders der für einen günstigen Luft- und Wasserhaushalt relevante Anteil an Grobporen ist dann zu gering. Das bedeutet für einen Pflanzenbestand eine Verschlechterung der Versorgung mit Luft und Wasser und führt zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Ertragsfähigkeit und Ertragssicherheit. Darüber hinaus erschwert der verdichtete Boden das Eindringen der Wurzeln in den Untergrund, das heißt, das durch Pflanzenwurzeln und Regenwürmer erzeugte Leitbahnsystem im Boden ist zerstört. Im Gegensatz dazu hat sich gezeigt, dass ein aufgelockerter Boden über einen größeren Anteil an Grobporen und Wurzelraum verfügt. Dadurch wird eine schnelle Versickerung von Niederschlagswasser erreicht und ein besserer Luft- und Wärmeaushalt in der Bodenmatrix.

Die Verdichtungsgefahr des Untergrundes ist sehr stark abhängig von der Art des Bodens. Die Bodenarten werden eingeteilt in Bodenartenhauptgruppen, Bodenartengruppen und Bodenartenuntergruppen. Die Bodenartenuntergruppen, ihre Kurzzeichen und die Grenzwerte ihrer Fraktionsanteile werden in einem rechtwinkligen Dreiecksdiagramm dargestellt (Abb. 36). Aus dem Diagramm kann bei bekannten prozentualen Anteilen der Kornfraktionen Schluff und Ton die entsprechende Bodenart ermittelt werden. Die Kurzzeichen der Bodenartenuntergruppen bestehen aus einem Großbuchstaben und einem nachgestellten Kleinbuchstaben sowie meist einer Kennziffer (2 = schwach, 3 = mittel, 4 = stark) bzw. einem zweiten Kleinbuchstaben.

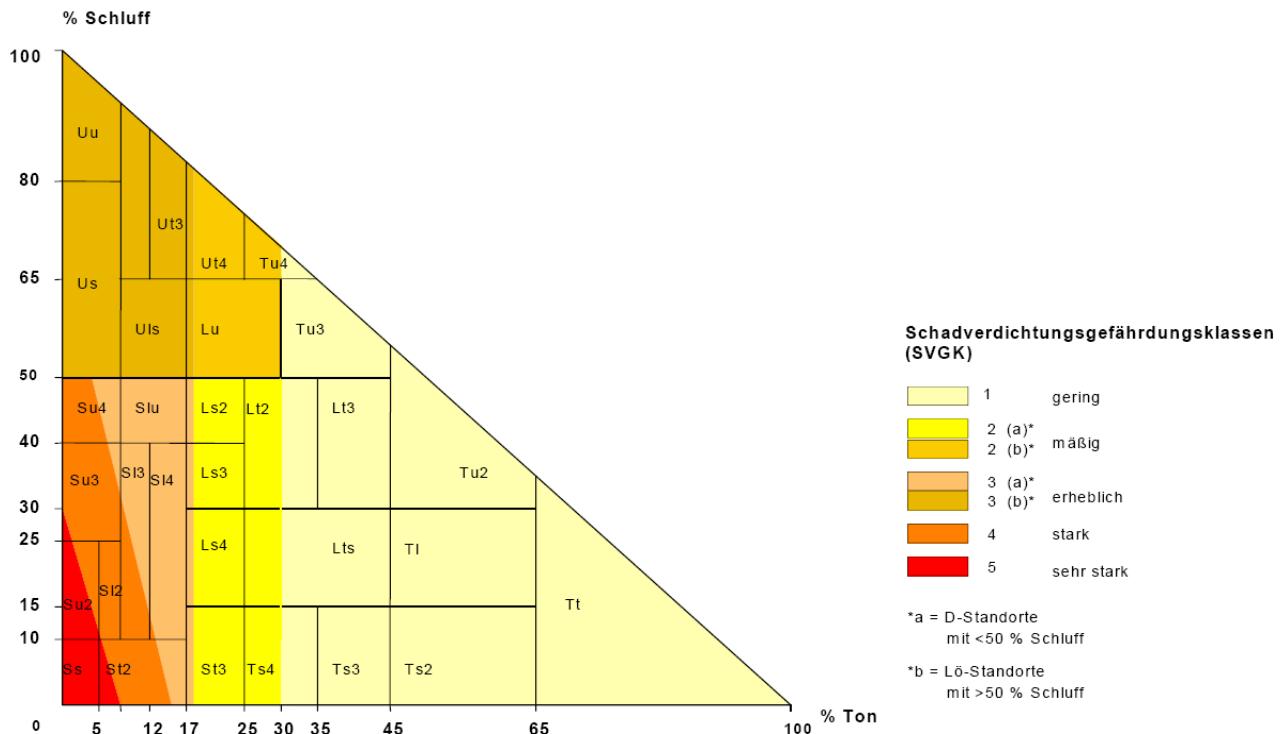


Abb. 36: Schadverdichtungsgefährdungsklassen für Böden (Frielinghaus et al., 2001)

Den negativen Einfluss der Bodenverdichtung auf das Porenvolumen konnte Fenner (1997) quantitativ belegen. Auf einem Ackerstandort auf Löss reduzierte sich nach 20-jähriger Befahrung und Bodenbearbeitung das Grobporenvolumen in 40 cm Tiefe von ursprünglich 20 % um 45 % bis 60 %. Das Verdichtungsphänomen ließ sich in bis zu 70 cm Bodentiefe nachweisen.

Die wichtigsten Fahrwerkskennwerte für die Bodenbeanspruchung sind die Radlast und der Kontaktflächendruck (Abb. 37). Weiterhin sind die Überrollhäufigkeit und der Radschlupf zu berücksichtigen. Der Kontaktflächendruck entspricht etwa dem Reifeninnendruck. Hoher Kontaktflächendruck verursacht große Spurtiefen. Die Radlast ist die absolute Last je Einzelrad. Bei gleichem Kontaktflächendruck nimmt die Tiefenwirkung des Belastungsimpulses mit steigender Radlast zu. Wird der Boden durch mehrfaches Befahren in derselben Spur mit gleicher Radlast und gleichem Kontaktflächendruck wiederholt beansprucht, dann steigt der Bodendruck so, als wäre der Boden mit einer höheren Radlast überfahren worden. Die Struktur des Oberbodens, die Ackerkrume, wird dadurch geschädigt und stark verdichtet. Bei der Kraftübertragung auf den Boden kommt es zu einer Boden- und Reifendeforrmation sowie zu einem Gleiten. Dieser als Schlupf bezeichnete Vorgang bewirkt ein bodenschädliches Zuschmieren von Bodenporen, wie z. B. Regenwurmgängen (LAP, 2002 a). Durch das Befahren entstehen mechanische Spannungen im Boden, das heißt Bodenbeanspruchungen. Übersteigen die Bodenbeanspruchungen die Eigenstabilität des Bodengefüges, ist die Folge eine Abnahme des Porenvolumens. Betroffen können sowohl luftführende Grobporen als auch wasserspeichernde Mittelporen sein. Eine Bodenschadverdichtung liegt vor, wenn das Poresystem im Boden so weit verformt ist, dass die Versorgung mit Luft und Wasser für den Pflanzenbestand beeinträchtigt wird.

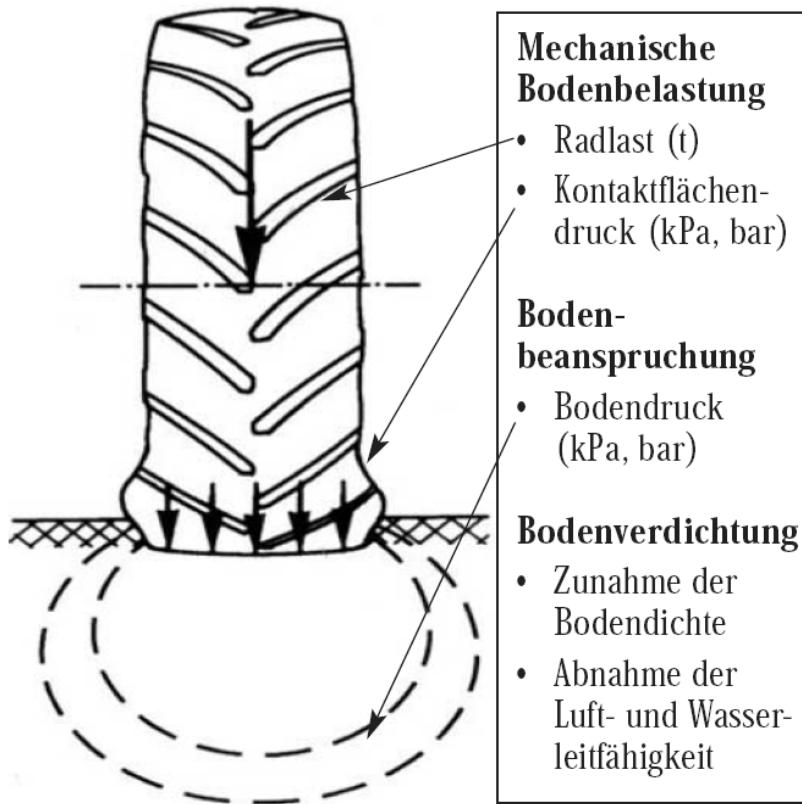


Abb. 37: Grundlegende Begriffe zur Bodenverdichtung (LAP, 2002 a)

Die technogene Beanspruchung wird bewertet durch die Ermittlung:

- der betroffenen Flächenanteile (befahrene und summierte Spurfläche [%]),
- der Radlast F je Rad [kN],
- der Reifendimension (Tragfähigkeit [kg]), Reifenbreite B [mm], Aussendurchmesser D [mm],
- des Reifeninnendruckes P_i [bar],
- der Reifenkontaktfläche FR [m^2],
- des Kontaktflächendruckes p [kPa] und
- der Anzahl der Überrollungen n.

Die Auswirkungen einer Bodenverformung zeigt Abb. 38.

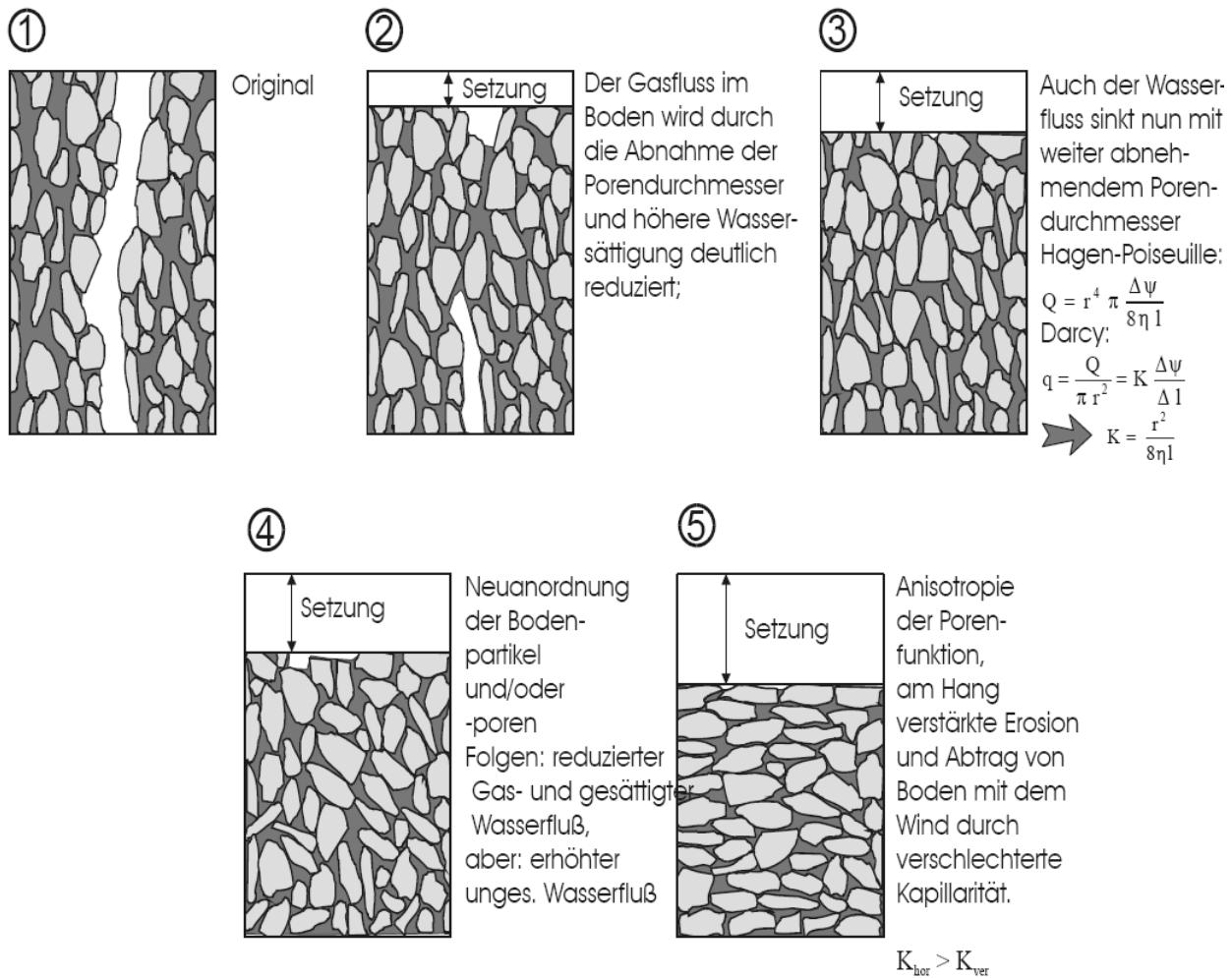


Abb. 38: Auswirkung einer Bodendeformation auf den Wasser- und Gashaushalt (Horn, 2001)

Die Folgen von Schadverdichtungen sind:

- der Rückgang der Wasserleitfähigkeit (Wasserstau bei Nässe, ungenügender kapillarer Wasseraufstieg bei Trockenheit),
- ein eingeschränktes Wasseraufnahmevermögen des Bodens, dadurch erhöhter oberflächiger Wasserabfluss mit zunehmender Erosionsgefahr,
- eine gestörte Boden- und Wurzelatmung durch Sauerstoffmangel, dadurch gestörtes Wurzelwachstum mit ungünstigen Nährstoffaufnahmebedingungen,
- ein Rückgang des nutzbaren Vorrats an Bodenwasser (LAP, 2002 a).

Hangabwärts gerichtete Fahrspuren sind oftmals die Auslöser von Bodenabtrag durch Wasser. Sie sollten daher möglichst vermieden werden, beispielsweise indem Ackerflächen nur in tragfähigem Zustand sowie mit bodenschonender Bereifung befahren werden. Abb. 39 zeigt deutlich, dass besonders Fahrspuren und Ackerrandfurchen den Oberflächenabfluss schneller abführen und somit die Abflusskonzentration maßgeblich beeinflussen.

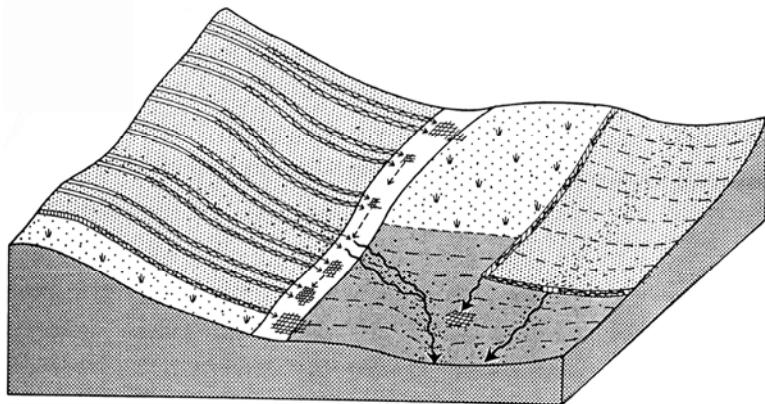


Abb. 39: Oberflächenabfluss in Fahrspuren und Ackerrandfurchen (Prasuhn, 1991)

Durch eine den Standortbedingungen angepasste Maschinenwahl kann eine Schadverdichtung verhindert werden. Allgemein bedeutet dies eine Reduzierung des Kontaktflächendruckes sowie der Überrollhäufigkeiten. Durch eine geringe Bearbeitungsintensität werden die im Boden vertikal ausgerichteten Makroporen nicht mehr regelmäßig unterbrochen. Die Folge ist eine erhöhte Anzahl von kontinuierlichen Makroporen bei konservierender Bodenbearbeitung (Edwards et al., 1988; Heisler et al., 1998). Diese kontinuierlichen Makroporen können als präferenzielle Fließbahnen dienen, in denen Makroporenfluss auftritt (Carter et al., 1999; Trojan et al., 1998).

Mögliche Maßnahmen für eine Reduzierung der Bodenverdichtung sind in Abb. 40 zusammengestellt:

• Technische Möglichkeiten, u.a.:	• Möglichkeiten der Anpassung von Arbeitsverfahren, u.a.:	• Verbesserung der Befahrbarkeit des Bodens, u.a.:
<ul style="list-style-type: none"> · Minderung des Kontaktflächendrucks (z.B. Gitterräder, Zwillingsreifen, Breit- und Terrareifen, Bandlaufwerke, Absenken des Reifeninnendrucks, Anpassung der Radlast an den Bodenzustand) · Radlastreduzierung (z.B. Mehrachsen, bodenschonende Fahrwerke) · Einsatz von Maschinen und Geräten mit geringen Radlasten · Bodenschonende Kraftübertragung, Vermeidung von Bodenschlupf (z.B. Allradantrieb, zapfwellengetriebene statt gezogene Geräte auf schweren Böden, Aufsattel- und Anbaugeräte) 	<ul style="list-style-type: none"> · Zusammenlegung von Arbeitsgängen · Fahren außerhalb der Furche beim Pflügen · Fahrgassensysteme anwenden · Vermeidung des Befahrens nicht tragfähiger Böden · hohe Bunker- bzw. Tankvolumina unter feuchten Bodenbedingungen nicht ausschöpfen, Feld- und Zwischenlagerung vorsehen · mögliche Arbeitsbreite ausnutzen, um Spurenanteile zu minimieren 	<ul style="list-style-type: none"> · bodenartspezifische Lockerung nur unter optimalen Bedingungen · Pflugarbeit und Krumenlockerung fruchtfolge- und fruchtartenspezifisch auf das unbedingt notwendige Maß beschränken · Tiefenlockerung auf das nach vorangegangener Beurteilung (z.B. Bodensonde, Spatendiagnose) unbedingt notwendige Maß beschränken · konservierende Bodenbearbeitung oder Direktsaat, soweit möglich · Biologische Stabilisierung eines mechanisch gelockerten Bodengefüges (Zwischenfruchtanbau, Flächenstillegung o.ä.) · Rückverfestigung des Bodens, z.B. durch Packer

Abb. 40: Maßnahmen gegen Bodenverdichtung (LUNG, 2004)

Durch Vermeidung mechanischer Eingriffe in den Boden (Bodenruhe durch mehrjähriges Ackerfutter; konservierende Bodenbearbeitungsstrategien) stellt sich schon relativ kurzfristig ein Bodengefüge mit verbesserten Regulationsfunktionen (erhöhte Wasserinfiltration in das Bodenprofil) ein. Pfluglose Bodenbearbeitung erhöht zudem die Tragfähigkeit von Böden und verhindert die Bildung von Fahrspuren. Im Bereich des ökologischen Landbaus werden derzeit Möglichkeiten untersucht, mittels geeigneter Maschinennutzung die Bearbeitungsintensität zu reduzieren, um damit positiven Einfluss auf die Verdichtungsproblematik zu nehmen und die Bodenmatrix bzgl. ihrer wasserspeichernden Möglichkeiten zu beeinflussen. 2003 wurden diesbezüglich Langzeituntersuchungen auf der Domäne Frankenhausen, einem Versuchsbetrieb der Universität Kassel, gestartet. Ziel ist es, die Wirkungen von verschiedenen Systemen der Bodenbearbeitung unter den Anforderungen des ökologischen Landbaus auf pflanzenbauliche und bodenökologische Parameter zu untersuchen. Dadurch soll die Bewertung der eingesetzten Bearbeitungsverfahren hinsichtlich einer umweltschonenden und effizienten Bodennutzung im ökologischen Landbau ermöglicht werden. Eine abschließende Beurteilung der nachweisbaren Effekte kann erst nach einer Dauer von etwa 10 Jahren getroffen werden, da sich die Fließgleichgewichte von Bodenparametern erst nach 5 bis 10 Jahren einstellen (Brandt et al., 2003).

Auch ein Beweiden kann je nach Art des Weideverfahrens, der Besatzdichte und der Witterung hinsichtlich der Bodenverdichtung problematisch sein. Offensichtlich kommt es zu steigender Bodenverdichtung mit gesteigerter Beweidungsintensität.

Der Anteil des Niederschlags der zum Abfluss kommt und die Erosionstendenz landwirtschaftlicher Nutzflächen werden von der Bodenbedeckung durch Pflanzen oder Pflanzenrückständen, das heißt durch die **Vegetation**, beeinflusst. Eine Schutzwirkung beginnt bereits bei mehr als 30 % gleichmäßig verteilter Bodenbedeckung (Tab. 12). Besonders gefährdet sind Flächen mit Hackfrüchten wie Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln. Intensive Frühjahrsniederschläge sind besonders erosiv. In diesem Zeitraum ist die Bodenbedeckung wachstumsbedingt noch sehr gering, sodass für diese Fruchtarten eine zusätzliche Bodenbedeckung zwischen den Reihen notwendig wird. Erreichbar ist dies durch Mulch- bzw. Direktsaat in einen Begrünungsbestand. Bei gleicher Bodenfeuchte wird die Menge des abgetragenen Bodenmaterials u.a. durch die Mulchbedeckung und die Aggregatstabilität bestimmt. Mulchmaterial schützt die Bodenaggregate vor dem direkten Regentropfenauftreff und damit vor dem Zerfall. Dadurch stehen weniger transportierbare Bodenpartikel bereit. Zusätzlich erhöht Mulchmaterial die Oberflächenrauigkeit, woraus eine verminderte Abflussgeschwindigkeit resultiert und ebenfalls weniger Bodenmaterial losgelöst wird. Je "rauher" die Bodenoberfläche durch den Pflanzenbestand wird, desto geringer wird die auf den Boden übertragene Energie. Die dem Wind entzogene Energie sinkt, wenn der Bewuchs flexibel reagiert. Lockere und sehr nachgiebige Ansaaten können die Schubspannungsgeschwindigkeit am Boden erhöhen.

Bodenbedeckung [%]	Pflanzenrückstände [t/ha]	Bodenabtrag durch Wasser [%]	Abfluss [%; Niederschlag = 100]
0	0	100	45
20 – 30	0,5	25	40
30 – 50	2	8	< 30
50 – 70	4	3	< 30
> 70	6	< 1	< 30

Tab. 12: Einfluss der Bodenbedeckung auf Abfluss und Bodenabtrag (LAP, 2002)

Aus Abb. 41 wird der Vorteil der Mulchsaat deutlich. Auf beiden Seiten wurde zu gleicher Zeit Winterweizen ausgesät. Rechts ist die Mulchsaat, links wurde konventionell gepflügt. Deutlich sichtbar ist die Verschlämzung des rechten Feldes nach Niederschlagsereignissen.



Abb. 41: Winterroggen im konventionellen (links) und konservierenden (rechts) Anbau (Landwirtschaftlich, Gärtnerische Fakultät Berlin, 2006)

Bei Bodenabtragsmessungen auf sächsischen Ackerflächen wurde die wassererosionsmindernde bzw. –verhindernde Wirkung von konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren herausgearbeitet (Schmidt et al., 1996). Die in der konservierenden Bewirtschaftungsform angewendete Mulchbedeckung führt zu einem Schutz vor Oberflächenverschlämzung, da das auf der Bodenoberfläche liegende Mulchmaterial die Bodenaggregate direkt vor dem Regentropfenaufschlag schützt. Somit ist von einer unmittelbar infiltrationsfördernden Wirkung des Mulchmaterials bei konservierender Bodenbearbeitung auszugehen (Auerswald et al., 1996). Besitzt ein Boden eine Oberfläche mit stabilen Aggregaten, so ist diese Oberfläche deutlich weniger verschlammungsanfällig und hat gleichzeitig bremsende Wirkung auf den Oberflächenabfluss.

Dieser Einfluss lässt sich selbst auf ökologisch bewirtschafteten Flächen mit konventionellem Pflugeinsatz beobachten. In Beregnungsversuchen konnten zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei zunehmendem Bodenbedeckungsgrad teilweise erhebliche Reduzierungen im Oberflächenabfluss beobachtet werden (Tab. 13).

	ökol. Pflug_1 17.09.	ökol. Pflug_2 14.10.	ökol. Pflug_3 24.11.
Gesamtinfiltration [%]	38a*	30a	73b
Gesamtoberflächenabfluss [%]	62	70	27
Bodenbedeckung [%]	<1	25	78

* Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen den Beregnungssimulationen (Test nach Mann-Whitney bei $p = 0,05$, $n=3$)

Tab. 13: Gesamtinfiltration und Bodenbedeckung bei Beregnungssimulationen auf ökologisch bewirtschafteten Parzellen in 2003 am Standort Lützschora; Frucht: Wintergerste, Niederschlagsintensität: 38 mm/20 min (Michel, 2004)

Die Abweichung des zweiten Beregnungsversuches bzgl. des Gesamtoberflächenabflusses ist mit Unterschieden hinsichtlich der Trockenrohdichte, der Anfangsfeuchte und der Aggregatstabilität zu erklären. Ein weiterer Faktor kann die natürliche Sackung des Bodens nach der lockernden Bodenbearbeitung sein. Durch die Bewirtschaftung nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus ist ein hohes Potenzial zur Erosionsminderung und durch die reduzierte Verschlämungsanfälligkeit auch ein positiver Einfluss auf den Oberflächenabfluss gegeben. Dies ist im hohen Anteil des Feldfutters in der Fruchtfolge und der Bedeutung des Zwischenfruchtanbaus im ökologischen Landbau zu begründen (Auerwald et al., 2003). Eine weitere Minderung der Erosionsanfälligkeit kann durch die Einführung konservierender Bodenbearbeitung in das System des ökologischen Landbaus erreicht werden.

Betrachtet man die Ergebnisse der Einflüsse von unterschiedlichen Pflanzenbeständen auf den Oberflächenabfluss wird auch hier die Wirksamkeit auf die Abflussreduzierung deutlich. Einzelmessungen (Kreitmayr, 2004) weisen den Einfluss auf den Oberflächenabfluss durch ein geändertes Wasseraufnahmevermögen verschiedener Pflanzenkulturen über die Wurzeln nach, entscheidender ist jedoch die Wirkung der Interzeption. Unter Interzeption versteht man in der Hydrologie das Auffangen bzw. Zurückhalten von Niederschlägen auf der „Oberfläche“ der Vegetation. Dieser Prozess kann im Modell berücksichtigt werden und wird in seiner Wirkung in Kapitel 6 in einem kleinen Einzugsgebiet untersucht. Neben der Infiltration und Interzeption wird im Modell ebenfalls der Einfluss von Änderungen der Oberflächenrauheit berücksichtigt. Oberflächenrauheiten können durch Variation der Stricklerwerte im Modell abgebildet werden. Die Oberflächenrauheit wird bestimmt durch die Vegetation der Fläche im Allgemeinen, aber auch durch Landschaftsstrukturelemente im Speziellen. Unter Landschaftsstrukturelementen werden im eigentlichen Sinne Hecken, Raine, Feldgehölze und zusammenhängende Uferrandstreifen verstanden. Die Strukturen beeinflussen das Abflussgeschehen durch im Vergleich zu Ackerflächen höhere Infiltrationsraten bzw. erhöhte Oberflächenrauheit und damit Dämpfung der Abflussgeschwindigkeit. Verschiedene Untersuchungen (Fabis, 1995) weisen in Einzelfällen für Uferrandstreifen Abflussreduktionen bis zu 100 % für Hochwässer geringer Jährlichkeit nach. Bei hohem Makroporenanteil erfolgt allerdings eine schnelle unterirdische Weiterleitung des infiltrierten Wassers in den Vorfluter. Somit ist in diesem Fall von keiner merklichen Reduzierung der Abflussfülle auszugehen.

Eine weitere Möglichkeit, den Oberflächenabfluss von landwirtschaftlichen Nutzflächen zu reduzieren, besteht in Form von **Feldspeichern**. Die Literatur bezeichnet diese Rückhalteräume unterschiedlich als Erdmulden, Abflussmulden, Retentionsmulden oder Kleinspeicher. Aus hydrologischer Sicht kann es sehr effektiv sein, wenn überschüssiges Oberflächenwasser aus Wege- und Kulturgräben sowie Abflusslinien in naturnahe Rückhalteräume eingeleitet und gesammelt wird. Die Rückhalteräume können anschließend antizyklisch zum jeweiligen Wasseranfall entleert werden bzw. das gesammelte Wasser versickert. Wasser, das so gespeichert wird, kann mit Verzögerung versickern und am Bodenwasserhaushalt teilnehmen. Der Rückhalt in Mulden, die durch Unebenheiten der Geländeoberfläche entstehen oder gezielt angelegt werden, sorgt für eine Speicherung von gegebenenfalls im lokalen Einzugsgebiet der Mulde entstandenen Oberflächenabfluss. Der Muldenrückhalt reduziert den Oberflächenabfluss, kann diesen aber nicht vollständig verhindern. Werden Versickerungsmulden gezielt in der Landschaft angelegt, ist deren Entleerungsverhalten festzulegen. Bemessungsrichtlinien existieren aus dem Bereich der Siedlungswasserwirtschaft (ATV-DWK, 2001).



Abb. 42: Naturnahe Feldspeicher im Wald (Foto: Röttcher, 10.03.2004)

Neben den bereits erläuterten Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen kann es sinnvoll sein, den Abfluss mittels dieser Rückhalteräume zu beeinflussen. Im Bereich der Forstwirtschaft kommen naturnahe Feldspeicher verstärkt zum Einsatz. Sie sind einfach zu erstellen und können bei Bedarf in Abhängigkeit der Topografie angelegt werden (Abb. 42).

Im Bereich der freien Landschaft und auf landwirtschaftlichen Nutzflächen werden vereinzelt begrünte Abflussmulden genutzt oder vorgesehen, um den Niederschlag in der Fläche zurückzuhalten (Abb. 43).



Abb. 43: Beispiel einer begrünten Abflussmulde (Auerswald, 2004)

Die Rückhaltewirkung resultiert aus der geänderten Fließzeit durch die ins Gelände modellierte Mulde, wodurch lokal das Fließgefälle reduziert wird. Im Modell wird dies über die Änderung der Konzentrationszeit berücksichtigt.

Gegenüber den Mulden sind wasserwirtschaftliche Kleinspeicher feste Stauanlagen, die zur vorübergehenden oder laufenden Wasserrückhaltung oder Wasserbewirtschaftung dienen. Diese Stauanlagen bestehen üblicherweise aus einem Absperrbauwerk und Betriebseinrichtungen (Hochwasserentlastung, Grundablass und Entnahmeanlagen).

Für Kleinspeicher gelten folgende Randbedingungen und Bemessungsvorgaben:

- Stauhöhe $H \leq 5,0$ m,
- Beckeninhalt $R \leq 100.000 \text{ m}^3$,
- Bemessungshochwasserabfluss $\text{BHQ} \leq 12,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kleinspeicher dienen unterschiedlichen Zwecken, neben der Bewässerung unter anderem auch dem Hochwasserschutz. Mehrere Kleinspeicher, die hintereinander angeordnet werden, können einen merklichen Beitrag zur Abflussregulierung haben. Assmann et al. (1999) zeigen Möglichkeiten für den Einsatz (Abb. 44) und die Wirkung der Kleinrückhalte. Da es sich dabei um Bauwerke im eigentlichen Sinne handelt, werden sie hier nicht weiter untersucht.

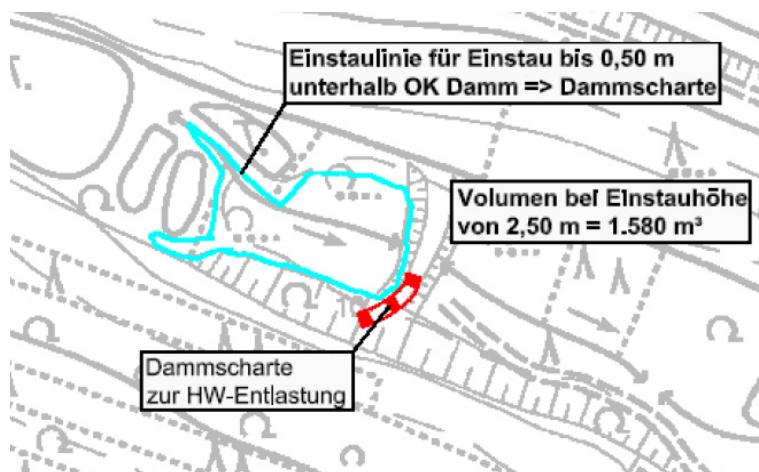


Abb. 44: Planungsskizze zur Anlage eines Kleinrückhaltes (Assmann et al., 1999)

Im Rahmen der späteren Modellierungen werden lediglich die natürlichen Rückhalteräume betrachtet.

Ein weiterer anthropogener Faktor, der im Rahmen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung Einfluss auf das Abflussverhalten von Flächen ausübt, sind **Dränagen**. Dränung ist nach DIN 1185 (1973) die Regelung des Bodenwasserhaushaltes durch Rohrdränung, rohrlose Dränung und Unterbodenmelioration (Tieflockern, Tiefpflügen). Allgemein wird unter Dränung die Entwässerung, Ableitung bzw. Abfluss verstanden.

Primär ist es das Ziel einer Dränage, die in der Landwirtschaft eingesetzt wird, die bewirtschafteten Flächen nutzbar zu machen (Moore, Flutrasen und Senken). Bearbeitungsflächen mit Stau- oder Haftnässe sollen dadurch früher abtrocknen und die Vegetationszeit verlängert werden (früher trocken im Frühjahr, länger trocken im Herbst). Verhindert werden soll ebenfalls, dass durch die Befahrung bei hoher Wassersättigung des Bodens eine erhöhte Bodenverformung auftritt. Dies führt zur Bildung von Fahrspuren und einer Zerstörung der Porenkontinuität durch Scherung (Hartge et al., 1999).

Dränagen nehmen im Allgemeinen nur frei bewegliches Grund- und Stauwasser auf, das zum Drän fließen kann, sich also im nahezu spannungsfreien Porenraum des Bodens bewegt. Dazu muss eine Bodendurchlässigkeit von wenigstens $k_f \geq 6 \text{ cm/Tag}$ gegeben sein. In Böden, die eine Durchlässigkeit $\leq 6 \text{ cm/Tag}$ besitzen, müssen für eine Dränung zusätzliche Maßnahmen getroffen werden (Eggelsmann, 1981). Dies können Kombidränungen (z.B. Rohrdränung in Kombination mit einer Tiefenlockerung) oder biologische (Anbau wurzelintensiver Pflanzen), chemische (hauptsächlich Maßnahmen zur Hebung oder Senkung des Boden-pH-Wertes oder zur Optimierung der Nährstoffgehalte) und physikalische

(alle Boden lockernden Maßnahmen) Meliorationsmaßnahmen sein, die die Bodenstruktur dahingehend verändern, dass das Wasser zum Drän hin abfließen kann.

Dränung kann neben höheren Nährstoff-Konzentrationen im Grundwasser auch dazu führen, dass Nährstoffe den Boden allgemein schneller passieren, beispielsweise durch präferentielle Fließwege in feinkörnigeren Böden (z.B. Lehme). Hier führt die Entwässerung zu Schrumpfungsvorgängen. Durch die größeren vertikalen Risse fließt in diesem Fall bevorzugt Wasser ab, das jegliche Bodenpassage somit umgeht (Wichtmann, 1994), die einen Teil der Nährstoffe unter Umständen zurückhalten könnte.

Nach Wohlrab et al. (1992) existieren grundsätzlich zwei Auffassungen zur Wirkung von Dränagen auf den Hochwasserabfluss. Eine Annahme berücksichtigt, dass die Fließdauer deutlich verkürzt, der Gebietsabfluss also komprimiert wird, was zu einem erhöhten Scheitelabfluss führt. Eine zweite Annahme geht hingegen davon aus, dass das Anfangsfiltrations- und Speichervermögen des nicht mehr gesättigten Bodens dermaßen erhöht ist, dass dadurch der Oberflächen- und damit auch der Hochwasserabfluss verringert wird (Eggelmann, 1981). Durch Grundwasser vernässte Überflutungsbereiche (Bach- u. Flussniederungen) stellen durch Dränung zusätzlichen Speicherraum in Form von Grob- und Mittelporen zur Verfügung, sofern das Bodengefüge nach der Dränung unverändert hinsichtlich der Infiltrationskapazität und Porenkontinuität bleibt.

In Mittelgebirgslagen wies Wohlrab (et al., 1992) in Feldversuchen nach, dass die Dränung die Ableitung von Wasser beschleunigt, weil nicht mehr der kluftige Untergrund durchflossen werden muss. Dies führte zu einer beschleunigten Ableitung des Hangwassers durch die Dräne, wodurch die Abflussscheitel bei mittelhohen Hochwässern stiegen. Bei einem größeren Hochwasser war der Einfluss kaum sichtbar, da in diesem Fall der Oberflächenabfluss dominierte, auf den eine Dränung nur wenig Einfluss hatte.

Robinson et al. (1985) konnten den Zusammenhang zwischen dem gedränten Flächenanteil und dem Abflussgeschehen im Gerinne aufzeigen (Abb. 45). Ein höherer Anteil von gedränten Flächen verzögerte den Abfluss im nahe gelegenen Gerinne sichtbar.

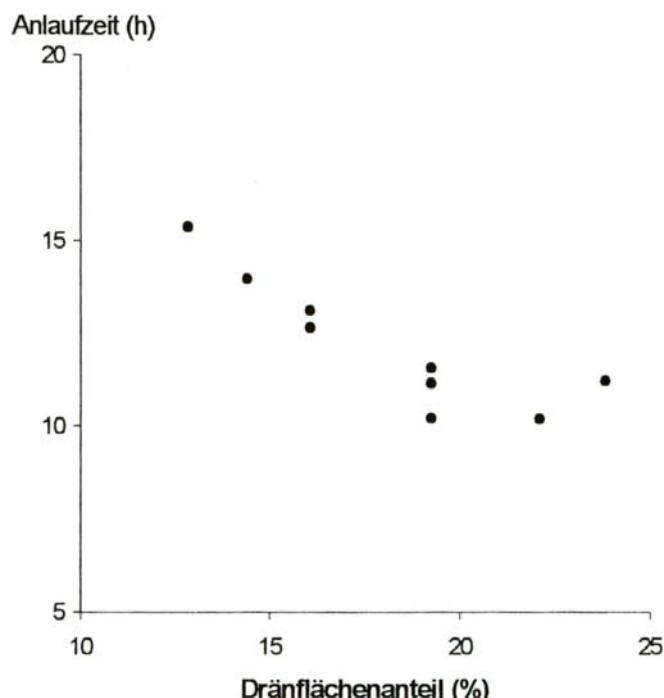


Abb. 45: Anlaufzeiten [h] der Hochwasserwellen in Abhängigkeit vom Dränflächenanteil [%] einzelner Versuchsflächen im Zeitraum 1971-1979 (Robinson et al., 1985)

Zu berücksichtigen ist, in welchem Abstand die Rohrdräne angeordnet sind. Für einen Auengley aus Hochflutlehm konnte Wetjen (1982) für verschiedene Dränrohrabstände einen unterschiedlichen Dränabfluss nachweisen. Im Extremfall sank der Abfluss von 64 % auf 23 % des Niederschlages und die maximale Dränspende von 4,0 auf 1,2 l/(s·ha), wenn die Dränrohrabstände von 32 auf 128 Meter aufgeweitet wurden (Tab. 14).

Abstand Rohrdräne m	Abfluss % Niederschlag	mittlerer Tagesabfluss mm/d	maximale Dränspende
			l/(s·ha)
32 (mit Erddräne)	64	1,05	4,0
64 (mit Erddräne)	41	0,75	1,3
128 (mit Erddräne)	23	0,43	1,2

Tab. 14: Einfluss des Rohrdränabstandes auf die Dränleistung (Wetjen, 1982)

Das Abflussverhalten vieler Dränagen zeigt einen saisonalen Verlauf. Im Sommer führen nur vereinzelte Starkniederschlagsereignisse ($> 10 \text{ mm/d}$) zu messbarem Abfluss, der jedoch die Abflussbilanz kaum beeinflusst, da aufgrund hoher Interzeptionsverluste nicht genügend Niederschlagswasser in den Boden infiltrieren kann. Ab November setzt eine regelmäßige Schüttung ein. Der Basisabfluss steigert sich bis zur ersten länger anhaltenden Frostperiode, die zu einer Verminderung des Abflusses führt. Nach den winterlichen Frostperioden steigert sich die Schüttung, die mit Beginn des Frühjahrs versiegt. Ab Mai setzt die kontinuierliche Dränagenschüttung aus und die Sommersituation ist wieder erreicht. In der winterlichen Versickerungsperiode bilden sich weniger deutliche Abflussspitzen als im Sommer aus, da der Anteil der Starkniederschlagsereignisse geringer ist. Es ist anzunehmen, dass in der winterlichen Versickerungsperiode der Dränagenabfluss hauptsächlich durch Stau- und Hangzugswasser gespeist wird. Durch erneute Niederschläge wird in der winterlichen Versickerungsperiode lediglich der Wasserdruck der Wassersäule über der Dränage erhöht und es kommt dadurch zu einem vermehrten Abfluss.

Itter (2000) konnte bei der Analyse von Abflussspitzen in Abhängigkeit von Bodenfeuchte, Bewuchs und Bodenbearbeitung saisonale Typen von Abflussspitzen nachweisen. Im Sommer bilden sich bei geringer Bodenfeuchte steile, nadelförmige Peaks unmittelbar nach den untersuchten Niederschlagsereignissen aus, die abhängig von der aktuellen Bodenfeuchte mehr oder weniger steil abfallen. Je feuchter der Boden ist, desto länger findet der Dränagenabfluss nach einem starken Niederschlagsereignis statt. Am Anfang und am Ende der winterlichen Vernässungsphase bilden sich Abflussspeaks aus, die wie im Sommer steil ansteigen und vor dem Versiegen der Dränage zu längerem Dränagenabfluss führen. Scheinbar geben neben den Makroporen auch die Mittel- und Feinporen Wasser an die Dränagen ab. Bei geringerer Anfangsfeuchte des Bodens speisen nur die Grobporen den Dränagenabfluss und es bildet sich eine steilere Abflussspitze. Im Winter werden in der Vernässungsphase die Abflussspitzen bei kontinuierlicher Schüttung der Dränagen wellenförmig auf den Grundabfluss addiert.

Auf Untersuchungsflächen westlich von Bonn mit überwiegend Pseudogley-Standorten und konventionell bewirtschafteten Flächen traten die Abflussspitzen im Schnitt ca. 4 bis 8 Stunden nach dem Niederschlagsereignis auf, d.h. bei einer angenommenen Dränagetiefe von 100 cm liegt die Geschwindigkeit des präferenziellen Flusses zwischen 300-600 cm/d, bei einer Dränagetiefe von 50 cm zwischen 150-300 cm/d (Itter, 2000).

Spezielle Verfahren der Dränung sind die rohrlose Dränung und die Tiefenlockerung. Die rohrlose Dränung wird mit dem Rohrpflug durchgeführt, der Hohlgänge in seichter Tiefe (60 cm) und geringen Abständen (2 m) voneinander schafft. Ein Lockerungsschar wird

durch den Boden gezogen, wodurch der hierauf auftreffende Boden angehoben wird. Der hinter dem Schar hergeführte Schlepp- bzw. Presskegel (Durchmesser ca. 10 cm) formt einen rundlichen Hohlraum aus, der größere Mengen Wasser abführen kann. Dabei findet gleichzeitig eine Lockerung des darüber liegenden Bodens statt, die sich zusätzlich auf den Wasserhaushalt auswirkt. Dieser Hohlraum unterliegt jedoch aufgrund der fehlenden Stabilisierung durch Rohre einer zeitlichen Veränderung. Die Haltbarkeit solcher Dräne liegt in Mineralböden zwischen 5 und 10 Jahren.

Unter Tiefenlockerung wird das Aufbrechen und Auflockern eines mindestens 40 cm tiefen Bodenbereichs mit einem Lockerungsgerät verstanden. Das Aufbrechen und Auflockern vergrößert den Anteil an Grobporen und den Wurzelraum. Ein schnelleres Versickern der Niederschläge und ein besserer Luft- und Wäremehaushalt sowie eine verbesserte Wasserspeicherung sind die Folge. In Extremfällen können Auflockerungen von 80 cm und mehr notwendig sein, vor allem in staunassen Böden.

Es existieren zahlreiche Modelle, die den positiven Einfluss einer Tiefenlockerung (Tiefpflügen) auf die Reduzierung des Oberflächenabflusses nachweisen. In der Praxis ist dieses Verfahren jedoch für eine großflächige Anwendung nicht geeignet. Die positive Wirkung ist nur temporär und darüber hinaus mit enormen Kosten verbunden, da der Energieaufwand einer Tiefenlockerung sehr hoch ist.

Es wird deutlich, wie stark die Ergebnisse von den jeweiligen standörtlichen Faktoren beeinflusst werden. Generelle Aussagen über die hochwasserverschärfende oder hochwas-serreduzierende Wirkung von Dränagen sind nicht möglich. Flächen sind diesbezüglich immer separat zu untersuchen und zu bewerten. Topografie, Bodenart, staunasse Böden und weitere lokal variierende Faktoren erschweren allgemeingültige Aussagen. Nicht hin-reichend genau kann die Wirkung von Dränagen in Modellen abgebildet werden. Aussa-gen können somit nur durch Langzeituntersuchungen mittels Schüttungsmessungen im Feldversuch getroffen werden.

Die bisher beschriebenen Faktoren geben Auskunft darüber wie der Oberflächenabfluss von landwirtschaftlichen Nutzflächen durch Maßnahmen, die auf die Bodenmatrix einwirken, beeinflusst werden kann. Die Wirkung von Maßnahmen auf den Oberflächenabfluss wurde bisher überwiegend durch Feldversuche untersucht und nur vereinzelt mit Hilfe hydrologischer Modelle abgeschätzt. Feldversuche wurden oft auf kleinflächigen Parzellen unter Verwendung von Beregnungsanlagen durchgeführt. Eine großflächige Übertragung der Ergebnisse ist damit nur bedingt möglich. Für flächenhafte Wirkungsabschätzungen sind an Naturdaten kalibrierte Niederschlag-Abfluss- und Flussgebietsmodelle nötig. Dar-aus resultieren Aussagen über die Wellenverformung im Gerinne.

Schmidt et al. (2006) zeigt am Beispiel einer einfachen Überschlagsrechnung, dass die abflussmindernde Wirkung landwirtschaftlicher Nutzflächen erheblich sein kann. Für Sommerhochwässer ist der Boden vor Beginn der hochwasserrelevanten Niederschlags-periode nicht wassergesättigt und als Wasserspeicher nutzbar. Die Beispielrechnung geht von einem mittleren Einzugsgebiet mit einer Größe von 200 km² und einem Ackerflächen-anteil von 50 % aus. Wird die Versickerung bei einem starken Niederschlagsereignis auf der gesamten Ackerfläche im Durchschnitt um 10 mm erhöht, so ergibt dies eine Minde- rung des Oberflächenabflusses von 1.000.000 m³. Bezogen auf die Fülle einer Hochwas-serganglinie ist der Rückhalt an Oberflächenabfluss sichtbar, nicht aussagekräftig ist er bzgl. der Veränderung des Spitzenabflusses im Gewässer.

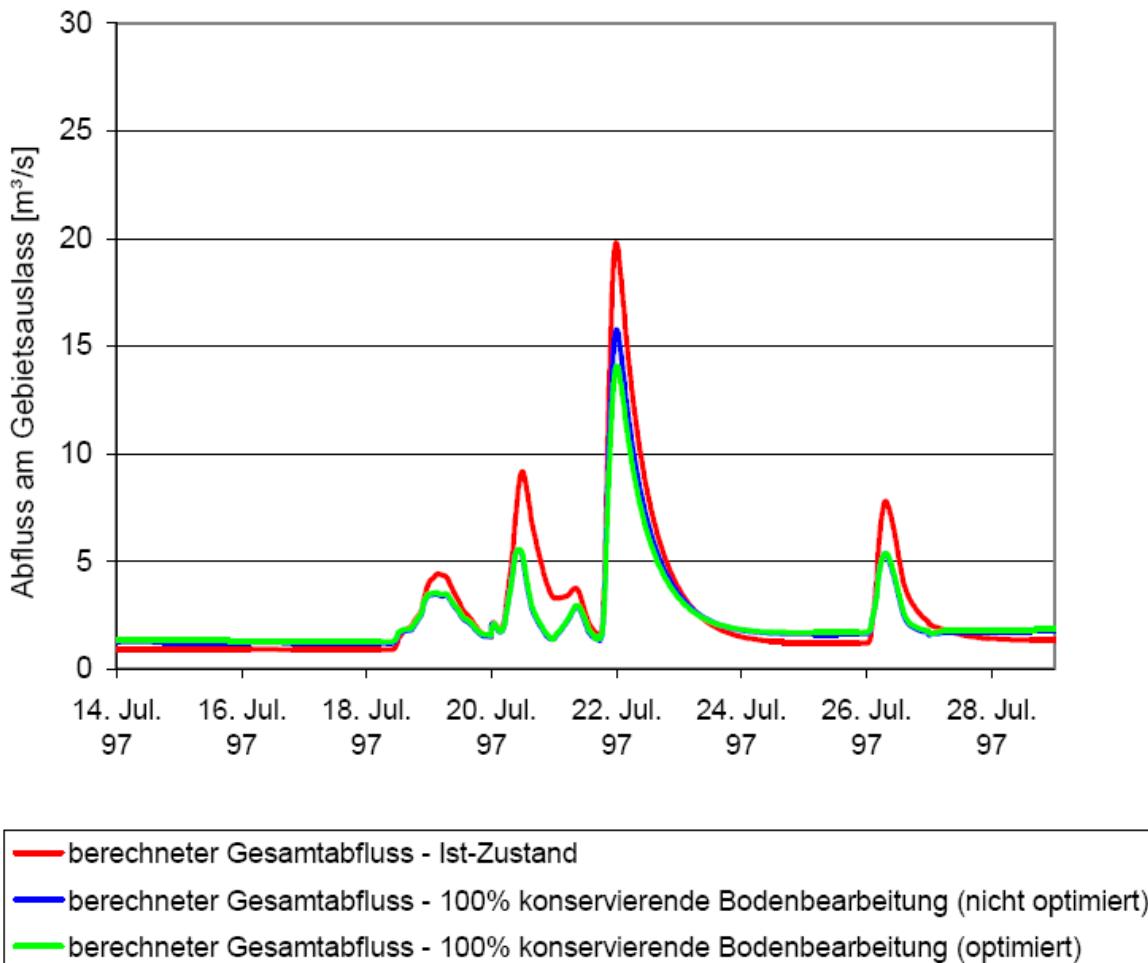


Abb. 46: Abflussreduzierung bei einem ca. 2-3 jährlichen Hochwasserereignis durch konservierende Bodenbearbeitung im Testgebiet Pließnitz (Sieker, 2002)

Der Einfluss der konservierenden Bodenbearbeitung auf die Wellenverformung wurde im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße untersucht. Im Modell wurde die konservierende Bodenbearbeitung durch die Modifikation der Infiltration berücksichtigt. Aussagen über die Änderung der Infiltrationskapazität basieren dabei auf Feldversuchen kleiner Messparzellen mit Beregnungsanlagen. Die Flächen wurden unterschiedlich stark beregnet und anschließend der Oberflächenabfluss messtechnisch erfasst.

Da die Wirksamkeit der konservierenden Bodenbearbeitung in Bezug auf das Infiltrationsvermögen auch von der Zeit ihrer kontinuierlichen Anwendung und der Sorgfalt des Landwirtes abhängt, wurden die Szenarien als „optimierte“ und „nicht optimierte“ konservierende Bodenbearbeitung bezeichnet (Sieker, 2002). Zu erkennen ist, dass sowohl der maximale Abfluss als auch die kleineren Abflusspeaks gegenüber dem Ist-Zustand sichtbar reduziert wurden (Abb. 46). Die hohen Scheitelreduzierungen begründen sich in einer 100%-igen Umsetzung konservierender Bodenbearbeitung auf den dortigen landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dies ist somit der Optimalwert, der aus Sicht der praxisnahen Umsetzung bisher schwer zu realisieren ist. Diese Werte resultieren zudem aus einer untersuchten Region mit teilweise gänzlich geänderten Randbedingungen bzgl. Topografie und Geologie und besitzen somit keine allgemeingültigen Aussagen, die sich auf Flusseinzugsgebiete, zum Beispiel im hessischen Raum, übertragen lassen. Untersuchungen für weitere Gebiete sind somit dringend erforderlich. Mit den hiesigen Untersuchungen sollen in den Kapiteln 6 und 7 die Annahmen aus der Literatur überprüft und für typische Mittelgebirgsregionen verifiziert werden.

4 Finanzielle Betrachtung

Die Motivation der Umsetzung von Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, die zur Oberflächenabflussreduzierung beitragen, steht maßgeblich unter dem Gesichtspunkt der Kostenersparnis. Die in Kapitel 3 genannten Maßnahmen bewirken einerseits, dass durch den positiven Einfluss auf den Oberflächenabfluss Schäden durch Hochwasserereignisse unter Umständen reduziert werden können, gleichzeitig ist zu untersuchen, welche Kosten und Nutzen die Umsetzung einzelner Maßnahmen für den Landwirt mit sich bringen. Es stellt sich die Frage nach dem finanziellen Nutzen durch die Reduktion der Bodenerosion, durch Ersparnisse als Folge reduzierter Bodenbearbeitungsintensität sowie positiven Einflüssen auf die Hochwasserscheitel mit der Reduzierung der Hochwasserschäden. Ebenfalls zu berücksichtigen sind mögliche finanzielle Nachteile für Landwirte durch die geänderte Bewirtschaftungsstrategie.

4.1 Monetärer Nutzen durch Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen

Ein wesentlicher positiver Einfluss geänderter Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft ist die Reduzierung der Bodenerosion. Bezogen auf die Fläche beziffert Emmerich (2005) den Schaden, den eine fortschreitende Erosion mit sich bringt, auf 52 € pro ha.

Doleschel et al. (1991) bewerten den monetären Verlust durch den Abtrag einer Tonne Boden gemessen am

- Ertragsverlust: 1,8 €/t
- Wertverlust (Nährstoffwert): 3,5 €/t

insgesamt mit 5,3 €/t.

Für das Bundesland Bayern schätzen Doleschel et. al (1991) die Kosten für die Beseitigung der Sedimente, resultierend aus Erosionsprozessen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, auf ca. 15 Mio. € pro Jahr.

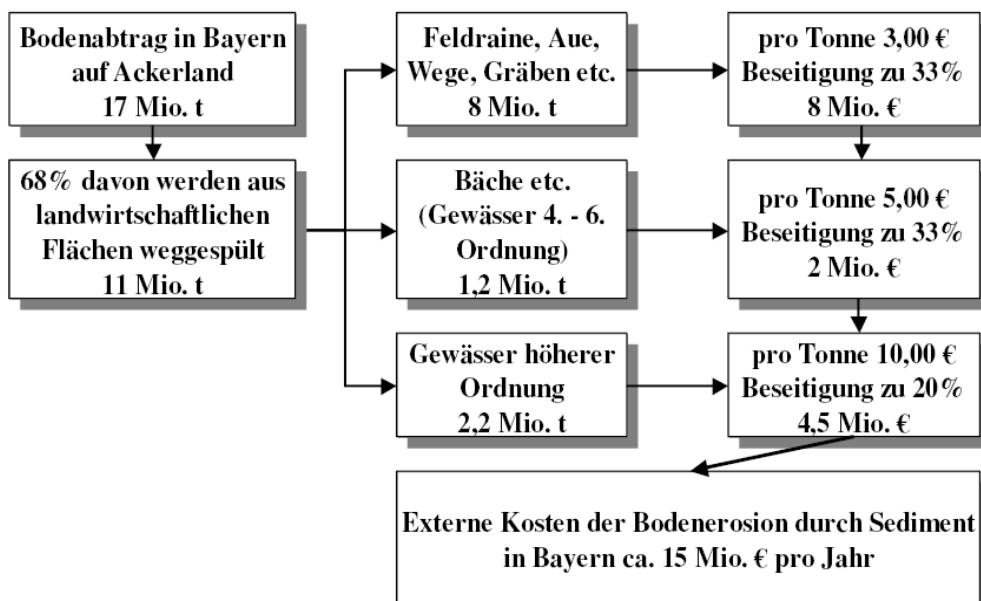


Abb. 47: Geschätzte jährliche Kosten des Sedimentaustrages in Bayern (Doleschel et al., 1991)

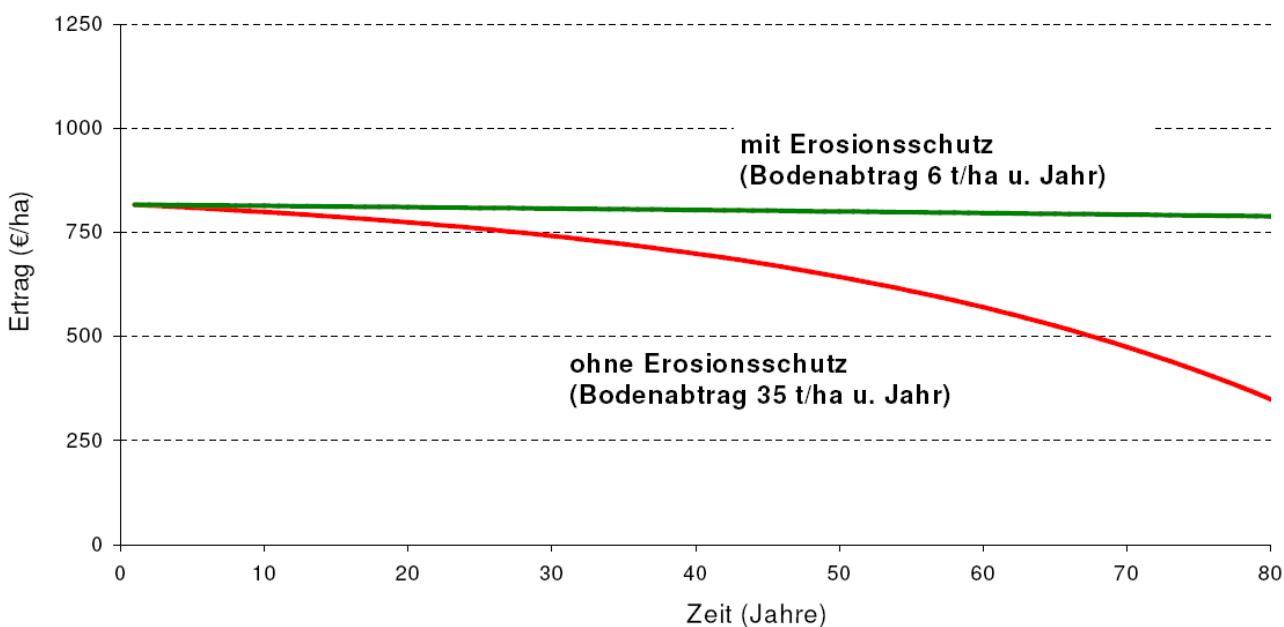


Abb. 48: Ertragsabhängigkeit mit und ohne Erosionsschutz in Abhängigkeit der Zeit (Döleschel et al., 1991)

Durch gezielte Maßnahmen können die Bodenerosion und die daraus resultierenden Ertragsverluste erheblich reduziert werden (Abb. 48).

Tebrügge (2000) zeigt in einer Abschätzung wie groß das Potenzial beispielsweise der Direktsaatmethoden bzgl. der Reduzierung der weltweiten Bodenerosion ist. In einem Szenario geht er davon aus, dass von den 75 Mio. Hektar Ackerland in der Europäischen Union etwa 40 % für die Direktsaat geeignet sind. 16 % dieser Flächen weisen ein hohes Erosionsrisiko auf (4,8 Mio. Hektar). Durch die Direktsaat könnte der Verlust an wertvoller Ackerkrume, im Vergleich zu konventioneller Pflugbodenbearbeitung, reduziert werden, womit Kosten durch on-und off site Schäden in Höhe von 369 Mio. € pro Jahr eingespart werden könnten. On-Site Schäden entstehen auf der Erosionsfläche (Verringerung der Bodenfruchtbarkeit, Verlust an durchwurzelbarem Feinboden, Verlust von Dünger und Pflanzenschutzmitteln etc.). Unter Off-Site Schäden versteht man Beeinträchtigungen außerhalb der Erosionsfläche (Verlandung von Gewässern durch Sedimentation, Eutrophierung und Eintrag von Schadstoffen etc.). Tebrügge (2000) prognostiziert eine pro Kopf Entlastung der EU-Bürger von ca. 17,63 €/Jahr durch den Wechsel von konventioneller Bodenbearbeitungsmethodik zur Direktsaat (Abb. 49). Der monetäre Nutzen durch die Reduktion der Bodenerosion, resultierend aus einer geänderten Bodenbearbeitung, wird ersichtlich.

Vergleich konventioneller Bodenbearbeitung mit Direktsaat unter Kostenaspekten für Umwelt und Produktionsinput

Grundlage: 75 Mio. ha Ackerfläche in der EU 15

Davon 40% für Direktsaat geeignet → 30 Mio. ha*

*Davon 4,8 Mio. ha (16%) mit hohem Energierisiko behaftet

Kostenersparnis durch Verringerung der on- und off-site Schäden (85,5 €)	369 Mio. € /Jahr
Einsparung an Dieselkraftstoff (28,65 € /ha)	860 Mio. € /Jahr
Kostenreduktion bei AfA, Instandhaltung und Arbeitszeitaufwand (150 € /ha)	4,5 Mrd. € /Jahr
Einsparungspotential durch Direktsaat	5,729 Mrd. € /Jahr
Pro Kopf Entlastung der EU(12) Bürger durch Direktsaat	17,63 € /Jahr

Abb. 49: Einsparungspotenzial durch eine Bodenbearbeitung mittels Direktsaat gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung (Tebrügge, F., 2000)

Aus landwirtschaftlicher Sicht zwingen abnehmende Verkaufserlöse zu Rationalisierungsmaßnahmen, insbesondere in der kosten-, energie- und zeitaufwendigen Bodenbearbeitung. Es stellt sich daher die Frage nach der notwendigen Intensität der Bodenbearbeitung, die sowohl den ökologischen Anforderungen als auch den ökonomischen Belangen des landwirtschaftlichen Betriebes entsprechen muss.

Für die konventionelle Bodenbearbeitung werden im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung höhere Inputs an Maschineninvestitionen, Instandhaltungen, Treibstoffen und Arbeitsbedarf erforderlich. Weniger Überfahrten führen zu Einsparungen beim Treibstoff, geringerer Wertminderung der Maschinen und Reduktion der Instandhaltungskosten. Die Literatur gibt beispielhaft für einen 200 Hektar Betrieb Einsparungen durch die Direktsaat zwischen 30 € und 60 € je Hektar gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung an (ABS, 2006). Jede Zwischenform der konservierenden Bodenbearbeitung bewegt sich je nach Bearbeitungsform innerhalb dieses Rahmens. Lütke Entrup et al. (2003) geben an, dass die Mulchsaat der Pflugsaat mit Einsparungen von 79 €/Hektar, bei einer bewirtschafteten Fläche von 150 Hektar, bzw. 56 €/Hektar, bei einer bewirtschafteten Fläche von 300 Hektar, überlegen ist. Mittels geeigneter Maschinenwahl in der konservierenden Bodenbearbeitung sind Kosteneinsparungen zwischen 30 % und 50 % durch eine reduzierte Zahl der Bearbeitungsgänge und eine deutlich erhöhte Hektarleistung der Bodenbearbeitungs- und Sätechnik (geringere Eingriffstiefen, höhere Fahrgeschwindigkeiten) realisierbar. Bei der Direktsaat kann diese Einsparung noch größer sein (GKB, 2006). Die folgende Abbildung (Abb. 50) zeigt einen Vergleich über die Einsparpotenziale durch geänderte Arbeitsgänge und Maschineneinsätze verschiedener Bewirtschaftungsmethoden. In Abhängigkeit von natürlichen Standortbedingungen, vor allem Bodengüte und Niederschlag, können diese Einsparungen unterschiedlich ausfallen. Die Einsparungen sind ebenfalls daran gebunden, ob die gesamte Betriebsorganisation auf die jeweilige Methode abgestimmt ist.

	Var. Kosten €/ha*	Fixe Kosten €/ha	Arbeitszeit Akh/ha**	Dieselverbrauch Liter/ha***	Summe €/ha
Konventionell					
Grubber 2,5 m	8,00	14,87	0,80	8,2	
Pflug 4-Schar	20,78	31,69	1,70	17,4	
Kompaktor	4,29	7,69	0,50	4,0	
Drillmaschine	5,11	9,74	0,87	4,60	
Gesamt € / ha	38,18	63,99	59,54	20,34	182,05
Mulchsaat					
Grubber 2,5 m	8,00	14,87	0,80	8,2	
Scheibenegge 4 m	6,96	15,90	0,57	6,7	
Drillmaschine	7,20	21,31	0,87	6,0	
Gesamt € / ha	39,19	56,18	38,60	12,98	155,97
Direktsaat					
Direktsämaschine	11,47	44,62	0,68	5,5	
Gesamt € / ha	34,17	48,72	14,62	3,93	101,44

* abzüglich Kraftstoffkosten (0,34 €/ha)

** veranschlagte Kosten pro Akh: 15,38 €

*** veranschlagter Preis des Dieselkraftstoffes: 0,59 €/l

Abb. 50: Vergleich der Kosten unterschiedlicher Bodenbearbeitungsmethoden (GKB, 2006)

Maschinenkosten bestehen aus fixen und variablen Kosten. In den fixen Kosten sind die jährliche Abschreibung und die Zinskosten (Zinssatz multipliziert mit dem halben Anschaffungspreis) enthalten. Die variablen Kosten umfassen die Ausgaben für Ersatzteile und Betriebsstoffe. Wartungskosten sind in der Regel nicht enthalten.

Zusammengefasst lassen sich die Vorteile bezüglich des Arbeits- und Maschineneinsatzes in Tab. 15 wie folgt darstellen.

Faktoren	konventionelle Bodenbearbeitung (mit dem Pflug)	konservierende Bodenbearbeitung (mit dem Grubber oder als Direktsaat)
Flächenleistung	• niedriger	• höher, durch geringere Eingriffstiefen und schnellere Fahrgeschwindigkeit
Arbeitsgänge	• mehr → Saatbettbereitung	• reduzierte Zahl der Bearbeitungsgänge
Arbeitszeitbedarf	• höher	• geringer durch weniger Arbeitsgänge
Maschineneinsatz	• höher → mehr Verschleiß	• geringer → Einsparungen bei Lohn- und Maschinenkosten etwa 30 - 50 %
Kraftstoffverbrauch	• höher	• geringer → Einsparpotenzial: 20 - 30 l/ha

Tab. 15: Vergleich von konventioneller- und konservierender Bodenbearbeitung (Monsanto, 2006)

Weiterhin zu betrachten ist der Ertrag in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung. Hier zeigt sich, dass die Direktsaat für einige Feldfrüchte im Vergleich zur konventionellen Pflugbearbeitung und der Mulchsaat einen Minderertrag erwirtschaftet. Positiv zu erwähnen ist der Mehrertrag bei Anwendung einer Mulchsaat und geeigneter Vorfrucht (Tab. 16). Durch die stark gestiegenen Getreidepreise (2007 und 2008) ist der Mehrertrag somit besonders hervorzuheben.

Fruchtfolge-feld	Vorfrucht	Ertrag dt/ha		
		Direktsaat	Mulchsaat	Pflug
Weizen	Ackerbohnen	99,7	97,3	95,0
Weizen	Zuckerrüben	107,6	102,5	101,1
Weizen	Weizen	82,7	97,8	98,2
Ackerbohnen	Weizen	60,0	56,1	52,0
Zuckerrüben	Weizen	646,0	774,5	734,5

Tab. 16: Mehrjährige Erträge verschiedener Kulturen im Systemversuch des Versuchsguts Merklingsen (Lütke Entrup et al., 2003)

Tab. 17 zeigt die Mehreinnahmen durch reduzierte Arbeitskosten, gesteigerten Ertrag und belegt, dass sowohl Mulchsaat als auch die Direktsaat bei verschiedenen Fruchtfolgearten ein finanzielles Plus für den Landwirt bedeuten können. Eine Änderung der Bodenbearbeitung ist aus diesem Blickwinkel als Anreiz für eine Änderung der Bodenbearbeitungsstrategie zu sehen.

Fruchtfolge	ZR-WW-WW-WW			ZR-WW-AB-WW			ZR-WW-WW-WW			ZR-WW-AB-WW		
Bodenbearbeitung	Pflug	MS	DS									
Betriebsgröße	150 ha						300 ha					
Marktleistung €/ha	1424	1447	1280	1331	1393	1292	1424	1447	1280	1331	1393	1292
EU Prämie €/ha	275			288			275			288		
Geldrohertrag €/ha	1699	1722	1555	1619	1681	1580	1699	1722	1555	1619	1681	1580
Direktkosten €/ha	529	541	539	503	511	516	529	541	539	503	511	516
Direktkostenfreie Leistung €/ha	1170	1181	1016	1116	1170	1064	1170	1181	1016	1116	1170	1064
Arbeitserledigungskosten €/ha	617	549	480	599	529	438	507	462	371	444	398	308
DAL €/ha	553	632	536	517	641	626	663	719	645	672	772	756
Rel. Pflug = 100	100	114	94	100	124	121	100	108	97	100	115	113

ZR: Zuckerrübe, WW: Winter-Weizen, AB: Ackerbohnen, MS: Mulchsaat, DS: Direktsaat

Tab. 17: Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAL) im Durchschnitt von zwei Fruchtfolgen bei differenzierter Bodenbearbeitung (Lütke Entrup et al., 2003)

Es ist schwieriger abzuschätzen, ob Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen durch Hochwasserschäden verursachte Kosten reduzieren können. Es existieren verschiedene Datenbanken (HOWAS 21: Datenbank des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft) über finanzielle Schäden durch Hochwasserereignisse und Software gestützte Algorithmen wie das Programm HWSCalc. HWSCalc ist das Informationssystem zur Abschätzung von Hochwasserschadenspotenzialen des Landes Nordrhein-Westfalen. HWSCalc berechnet auf der Basis von Variantenvorgaben, Wasserspiegellagen, Nutzungen und Schadensfunktionen quantitative und monetäre Hochwasserschäden.

Zur Bewertung von Schäden infolge von Hochwässern wird oftmals auf Informationen vergangener Hochwasserereignisse zurückgegriffen. Mittels Schadensfunktionen wird versucht abzuschätzen wie hoch die finanziellen Belastungen in Folge von Hochwasserereignissen sind. Schadensfunktionen sind die Darstellung der Schäden/Fläche in Abhängigkeit von einem charakteristischen Parameter des Überflutungsgeschehens. Bisher kommt überwiegend der Wasserstand als charakteristischer Parameter bei der Erstellung solcher Funktionen zum Einsatz. Schadensfunktionen lassen sich durch statistische Auswertungen der Schadensdaten abgelaufener Hochwasserereignisse mittels Regressionsrechnung ermitteln. Bei der Anpassung der Schadensfunktionen an die empirischen Datenkollektive sind verschiedene lineare und nichtlineare Verfahren möglich (Patt, 2001). Je nach Datengrundlage können Schadensfunktionen mittels statistischer Auswertungen für sehr spezielle Nutzungsarten abgeleitet werden. Bespielhaft wurde durch die Zusammenfassung von Schadensfunktionen verschiedener Nutzungen durch die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) die Höhe möglicher Sachschäden entlang des Rheins ermittelt (Deutscher Bundestag, 2004).

Wie groß die Reduzierungen der Schäden in tatsächlichen Geldwerten sind, die durch eine Wellendämpfung möglich sind, wird maßgeblich von der Reduzierung des Wasserstands beeinflusst. Aussagen über finanzielle Einbußen durch Hochwässer mittels generalisierter Schadensfunktionen sind kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse können lediglich als sehr grobe Schätzung angesehen werden und sind oftmals aufgrund geänderter Voraussetzungen bzgl. der lokalen Bebauung nicht aussagekräftig. Dies ist nur möglich, wenn für das jeweilige untersuchte Überschwemmungsgebiet detaillierte Erhebungen im Hinblick auf die Eigenschaften der Bebauung und Nutzobjekte gemacht werden.

4.2 Monetäre Einbußen durch geänderte Bewirtschaftungsmethoden

Um die konservierende Bodenbearbeitung einzuführen, ist ein entsprechendes Maschinensystem erforderlich. Die Anschaffung neuer Maschinen kann über einen längeren Zeitraum erfolgen, sodass der Kostenfaktor diesbezüglich gering gehalten werden kann und unter Umständen nicht nachteilig wirkt.

Die erste Umstellung der Bewirtschaftungsmethode beinhaltet eine kritische Überprüfung bisheriger Betriebskonzepte und Arbeitsweisen. Im Einzelfall kann eine grundsätzliche Änderung der Fruchfolge und der Produktionsverfahren nötig sein, wenn nur dadurch ökonomisch vorteilhafte und den Boden schützende Bearbeitungssysteme realisiert werden können. Die Entwicklung einer angepassten Frucht- oder Anbaufolge kann viele Probleme des Acker- und Pflanzenbaus in Verbindung mit der nicht wendenden Bodenbearbeitung verringern oder gar nicht erst entstehen lassen.

Dennoch kann unter Umständen eine Änderung der Bewirtschaftungsmethodik oder der Landnutzung aus Sicht der betroffenen landwirtschaftlichen Betriebe vielfältige Konflikte auslösen und finanzielle Einbußen mit sich bringen. Werden unter dem Aspekt des vorbeugenden Hochwasserschutzes in geeigneten Bereichen der Aue höhere Überflutungshäufigkeiten angestrebt, um die Retention zu verbessern, sind diese finanziellen Einbußen

am größten. In diesem Zusammenhang sind im Wesentlichen die Umwandlung von Acker in Grünland und die Extensivierung der Grünlandbewirtschaftung hervorzuheben. Dieser Übergang vom Ackerbau zur Grünlandnutzung und/oder der Wechsel von intensiven zu extensiveren Bewirtschaftungsverfahren können mit wirtschaftlichen Nachteilen verbunden sein. Als Konsequenzen einer eingeschränkten betrieblichen Entwicklung werden reduzierte Einkommensmöglichkeiten sowie sinkende Verkehrs- und Beleihungswerte für betroffene Flächen befürchtet. Zudem verstärkt eine Drosselung der Nutzungsintensität das Erfordernis, die Betriebsflächen über das allgemeine Betriebswachstum hinaus zusätzlich auszudehnen. Die dadurch bedingte Flächenverknappung verschärft sich zusätzlich durch den Flächenentzug für Maßnahmen der Gewässer- und Biotopentwicklung in den Auen. So wohl zunehmende Überflutungshäufigkeiten als auch steigende Grundwasserstände führen häufig zu einer aus landwirtschaftlicher Sicht abnehmenden Nutzungseignung. Dieses Problem gewinnt in Mittelgebirgslandschaften zusätzlich an Brisanz, weil dort Auenflächen meist zu den besonders fruchtbaren und gut geeigneten landwirtschaftlichen Standorten zählen. Da heute die überwiegenden Flächen der landwirtschaftlichen Betriebe Pachtflächen darstellen und die Verpächter in der Regel gerne bereit sind, in der Aue betroffene Flächen zu verkaufen, sehen sich die in den Auen wirtschaftenden Betriebe mit mehr oder weniger umfangreichen Pachtflächenverlusten konfrontiert (Hentschel, 2004). Zur Milderung dieses Konfliktes können Pachtenschutzregelungen vereinbart werden.

Besonders zu berücksichtigen ist die Problematik der Verunreinigungen durch Hochwasserereignisse. Dies ist weniger relevant für Flächen der freien Landschaft, sondern vielmehr für landwirtschaftliche Flächen der Aue, die temporär überstaut werden. Dies können Flächen in Gewässernähe sein, vor allem grüne Becken zum Schutz vor Hochwasser. Nach Hochrechnungen der Agrar- und Wasserwirtschaftsverwaltungen liegen etwa 360.000 Hektar bzw. maximal ca. 700.000 Hektar Ackerfläche in Überschwemmungsgebieten (Deutscher Bundestag, 2004). Werden Bewirtschaftungsformen und Bodenbearbeitungsmethoden auf diesen Flächen geändert, bzw. müssen durch Auflagen und Vorgaben geändert werden, können die finanziellen Verluste erheblich sein. Die verschiedenen Nutzungseinschränkungen sind abhängig vom Wiederkehrintervall der Hochwasserereignisse (Tab. 18).

	Nutzungseinschränkung 1	Nutzungseinschränkung 2
	$\leq HQ_5$	$> HQ_5 - HQ_{100}$
Beschränkungen	Kein Ackerbau Keine Düngung (ausgenommen Kalkung) Kein PSM-Einsatz (ausgenommen Einzelpflanzenbehandlung) Keine Neudränerung, Rückbau vorhandener Dräne	Ackerbau nur mit weitgehend ganzjähriger Bodenbedeckung Düngung und PSM-Einsatz im Rahmen der ordnungsgemäßen Landwirtschaft Keine Neudränerung, Rückbau vorhandener Dräne

Tab. 18: Vorgesehene Bewirtschaftungsauflagen für landwirtschaftliche Flächen in Retentionsräumen (Schätzl et al., 2003)

Auf Grundlage dieser Nutzungseinschränkungen ergeben sich für Flächen in Retentionsräumen empfohlene Nutzungen (Tab. 19).

Ausgangssituation	Zielsituation		
	Flächen ohne Dränage		Flächen mit Dränage
	<= HQ ₅	> HQ ₅ – HQ ₁₀₀	Alle
Ackerland	ungedüngtes Grünland	Ackerland mit Auflagen	feuchtes Grünland
Grünland	ungedüngtes Grünland	Grünland	feuchtes Grünland
Sonderkultur	ungedüngtes Grünland	Sonderkultur mit Auflagen	feuchtes Grünland

Tab. 19: Entwicklung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Retentionsräumen (Schätzl et al., 2003)

Aus den Nutzungsänderungen ergeben sich die durchschnittlichen finanziellen Nachteile in Abhängigkeit von Standort und Bepflanzung (Tab. 20).

Ausgangssituation	Ackerland				Grünland		Summe	
	Umwandlung in		Acker mit Auflagen	ungedüngtes Grünland		ungedüngtes Grünland	ha	€
			ha	€	ha	€		
Wirtschaftl. Nachteil durch Bewirtschaftungsaufgaben	0,77	-24	8,40	-4.224	0,24	-36	9,41	-4.283
Durchschnittlicher jährlicher Überschwemmungsschaden	0,77	-18	8,40	-406	0,24	-12	9,41	-436
Gesamtnachteil	0,77	-42	8,40	-4.630	0,24	-48	9,41	-4.719

Tab. 20: Wirtschaftliche Nachteile für die Landwirtschaft auf der Retentionsfläche bei Neustadt/Donau (Schätzl et al., 2003)

Neben dem Ertragsverlust bei längerem Überstau können vor allem Verunreinigungen durch Heizöl und überschwemmte Kläranlagen negative Folgen haben. Kritisch ist dabei die Verbreitung von Keimen zu sehen. Eine Gefährdung der Tiere über das Futter kann die Folge sein. Meist kann verschmutztes Mähgut oder geschädigtes Pflanzengut (Abb. 51) nach langem Überstau oder starker Vernässung nicht dem biologischen Abbau zugeführt werden, sondern muss gemäß Bioabfallverordnung kostenpflichtig entsorgt werden. Sommerhochwässer sorgen dabei auf Grünland für hohe Schäden. Winterhochwässer sind auf Grund der kargen Vegetation ein geringeres Problem bzgl. der Entschädigungskosten durch den Ertragsausfall, jedoch kritisch zu beurteilen im Hinblick auf eine verstärkte Erosionsgefahr.



Abb. 51: Schäden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen nach dem Einstau des Hochwasserrückhaltebeckens Treysa-Ziegenhain (Foto: Peter Kugler, Mai 2002)

Um die finanziellen Verluste auszugleichen, werden oft von organisierten Wasserverbänden in Absprache mit Bauernverbänden Vereinbarungen über Entschädigungen im Hochwasserfall mit den Landwirten abgeschlossen. Beispielhaft hierfür wird auf eine Vereinbarung zwischen dem Hessischen Bauernverband-Kreisverband Ziegenhain e.V. und dem Wasserverband Schwalm verwiesen. Bereits 1984 wurde in dieser Vereinbarung geregelt, wann eine Entschädigung im Hochwasserfall an den Landwirt zu zahlen ist. Aufgeführt sind Entschädigungsregelungen für landwirtschaftlich genutzte Grundstücke, die im gezielt überstaute Bereich liegen. Geregelt werden die Entschädigungen für unmittelbare Schäden am Aufwuchs eines betroffenen Grundstückes, die Folgeschäden und die Beseitigung für Ablagerungen und Abschwemmungen. Die Höhe der zu zahlenden Aufwuchsentschädigung ergibt sich aus Tabellen, die jährlich mit Wirkung zum 1. Februar fortgeschrieben werden. Die Aufstellung und Fortschreibung erfolgt durch die zuständige Abteilung im Regierungspräsidium Kassel. Wenn möglich, sollten die betroffenen Flächen käuflich erworben werden, da ein häufiges Auftreten von Schadereignissen zu hohen Kosten führen kann. Das HQ₁₀₀ von 1983 verursachte Entschädigungskosten für die Landwirtschaft und die Fischerreiverbände in Höhe von ca. 1,3 Mio. € nach der Nutzung der Flächen im Retentionsraum der Hochwasserrückhaltebecken des Schwalmgewässers.

Die beiden nachfolgenden Tabellen (Tab. 21 und Tab. 22) beinhalten die Entschädigungsätze verschiedener von Hochwässern vernichteter Kulturen.

Produkt	Korn/Stroh Knolle/Blatt Verhältnis	Preise EUR/dt incl. MwSt.		Ertragsstufen und Entschädigungssätze							
		Frucht (1), (2)	Stroh / Blatt	I	II	III	IV	V	VI	VII	
		Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha
Brotweizen	1	0,8	10,2	1,5	45	5,13	55	6,27	65	7,41	75
Futterweizen	1	0,8	9,7	1,5	45	4,91	55	6,00	65	7,09	75
Futtergerste	1	1	9,2	1,5	42	4,49	50	5,35	58	6,21	66
Brotroggen	1	1,1	8,7	1,5	46	4,76	54	5,59	60	6,21	68
Braugerste	1	0,8	12,0	1,5	35	4,62	40	5,28	45	5,94	50
Hafer u. Triticale	1	1,1	9,0	1,5	38	4,05	46	4,90	54	5,75	62
Körnermais (4)	1	13,0		50	5,00	60	6,00	70	7,00	80	8,00
Raps food	1	21,0		20	4,20	25	5,25	30	6,30	35	7,35
Zuckerrüben (3)	1	0,8	5,6	0,7	400	24,64	450	27,72	500	30,80	550
Kartoffeln	0,75	0,25	12,0	2,5	220	21,18	270	25,99	320	30,80	370
Erbsen	1	12,0		25	3,00	30	3,60	35	4,20	40	4,80
Bohnen	1		11,0		25	2,75	30	3,30	35	3,85	40

(1) Die Preise stellen **durchschnittliche Verkaufspreise** frei erster Erfassungsstufe **incl. MwSt.** für den Zeitraum der Ernte 2004 dar.

(2) Zuschläge für Qualitätsweizen, Saatgutvermehrung bzw. Kontraktware sind auf Nachweis möglich.

(3) Rübenpreis incl. Schnitzelvergütung,
Richtwerttabellen im Internet: Die Tabellen 1 und 2 sind aktuell über die Internetadresse: www.rp-kassel.de/abt5/dez51/dez51-5.htm erhältlich.

Tab. 21: Richtwerte zur Ermittlung von Aufwuchsschäden an Idw. Kulturen, inkl. Stroh und Blattanfall; Marktfrüchte im Wirtschaftsjahr 2004/2005 (RP Kassel, 2004)

Produkt	Wurzel / Blatt Verhältnis Bemerkung	Preise in EUR/dt incl. MwSt.										Ertragsstufen und Entschädigungssätze					
		Haupt- frucht	Blatt	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha	Cent/ m ²	dt/ha
Massenrüben	1 0,3	2 0,25	700 14,53	800 16,60	900 18,68	1000 20,75	1100 20,75	1100 22,83									
Luzerne/Rottklee/Kleegras (1) Heu	12	70 8,40	80 9,60	90 10,80	100 12,00	110 13,20	120 13,20	120 14,40									
Wiese (3)	Heu	8,3 40	3,32 60	4,98 80	6,64 90	7,47 100	8,30 100	8,30 120	9,96								
Silomais, TS 28% (4, 5)	MJNEL/kg TM	6,4 10 MJNEL	400 8,85	450 9,96	500 11,07	550 12,17	600 13,28	700 15,49									
Silomais, TS 34% (4, 5)	MJNEL/kg TM	6,5 10 MJNEL	380 10,37	430 11,74	470 12,83	520 14,19	570 15,56	650 17,74									
Sonst. GPS-Silagen (5, 6)	MJNEL/kg TM	6 10 MJNEL	200 4,74	300 7,11	400 8,49	500 10,61	600 12,73	700 14,85									
Nutzungsformen und Nettoerträge auf Grünland:																	
Hutung, Stand- u. Umtriebweide	10.000-30.000 MJNEL	0,19 /10 MJNEL	10.000 1,90	15.000 2,85	20.000 3,80	25.000 4,75	30.000 5,70	30.000 5,70									
Mähweide / Portionsweide	25.000-50.000 MJNEL	0,19 /10 MJNEL	25.000 4,75	30.000 5,70	35.000 6,65	40.000 7,60	45.000 8,55	50.000 9,50									
Intens.- Silagenutzung (2)	40.000-55.000 MJNEL	0,19 /10 MJNEL	40.000 7,60	45.000 8,55	50.000 9,50	55.000 10,45	60.000 11,40	65.000 12,35									
Gründüngung																	
(1) Es entfallen auf den 1. Schnitt 40 %, 2. Schnitt 40 % und 3. Schnitt 20 %									(2) Es entfallen auf den 1. Schnitt 60 % und auf die Restschnitte 40 %								
(3) Es entfallen auf den 1. Schnitt 50 %, 2. Schnitt 30 % und 3. Schnitt 20 %									(6) Sonstige einjährige Futterpflanzen und Futterzischenfrüchte.								
(4) Silomais sowie andere Grün- und Silofuttermittel werden wenig gehandelt, deshalb können für sie kaum Marktpreise ermittelt werden. Stattdessen werden für diese Grundfuttermittel die Ersatzfuttermittelpreise pro MJ NEL als Entschädigungsbasis herangezogen.																	
(5) Sillenverliste: Sillomas 5 %, sonst. GPS-Silagen 15 %																	
Die Wiederherrichtung zerstörter Grasnarben kostet bei rationellem Maschineneinsatz je nach Verfahren 2 - 10 Cent/m ² . Es kann auch nach Stunden abgerechnet werden, z. B. je Arbeitsstunde 10 bis 20 EUR und Schlepper 40 bis 100 PS: 10 EUR bis 25 EUR/Std.									gut 2,5 Cent/m ²	sehr gut 3 Cent/m ²							

Tab. 22: Richtwerte zur Ermittlung von Aufwuchsschäden an landwirtschaftlichen Kulturen; Futterpflanzen, Grünland und Gründüngung im Wirtschaftsjahr 2004/2005 (RP Kassel, 2004)

4.3 Förderprogramme

Die vorherigen Abschnitte zeigen, dass eine Änderung der Art der landwirtschaftlichen Flächennutzung einerseits durch den verbesserten Wasserrückhalt und die Reduzierung der Erosion einen erheblichen Nutzen erzielt, gleichzeitig jedoch der ausführende Landwirt nicht nur finanzielle Vorteile hat, sondern durch eventuelle Auflagen auch finanzielle Verluste verzeichnen kann. Um diese Verluste auszugleichen und die Umwandlung von ackerbaulicher Nutzung in Grünlandwirtschaft bzw. die Änderung der Bewirtschaftungsmethodik attraktiv zu gestalten, werden Förderprogramme angeboten. Einzelne Bundesländer gewähren unter finanzieller Beteiligung der Europäischen Gemeinschaft und des Bundes nach Maßgabe der jeweiligen Landesrichtlinien und der Haushaltssordnungen Zuwendungen an land- und forstwirtschaftliche Unternehmen. Für die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Brandenburg, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein sind Förderprogramme bekannt.

In **Bayern** ist das Förderprogramm derzeit ausgesetzt - laufende Verträge werden erfüllt, aber keine neuen Verträge abgeschlossen.

Für **Baden-Württemberg** regelt der Marktentlastungs- und Kulturlandschaftsausgleich (MEKA II) die Förderung (GKB, 2006). Gefördert wird die extensive und umweltschonende Pflanzenerzeugung mit Mulchsaat.

Gegenstand der Förderung:

- Einsaat von Hauptfrüchten ohne/oder mit Saatbettbereitung, jedoch ohne Umbruch, in die oberflächig verbleibende organische Substanz von Begrünungen oder ausreichenden Ernterückständen der Vorkultur,
- intensive Bodenbearbeitung höchstens bis zur Saattiefe.

Höhe der Förderung:

- 60,- €/Hektar

Verpflichtungszeitraum:

mind. 5 Jahre

Brandenburg bietet finanzielle Zuwendungen im Agrarinvestitionsförderprogramm 2003 - AFP an (GKB, 2006).

Gegenstand der Förderung:

- verstärkte Umstellung und Ausrichtung der landwirtschaftlichen Produktion auf die Anforderungen und Prinzipien besonders umweltschonender Produktionsverfahren,
- Verbesserung der betrieblichen Produktions- und Arbeitsbedingungen sowie Rationalisierung und Senkung der Produktionskosten,
- Erhaltung und Verbesserung der natürlichen Umweltbedingungen, insbesondere zur Energieeinsparung sowie Emissionsminderung,
- Anschaffung von Maschinen und Geräten zur umweltgerechten Ausrichtung der Produktion und für nachwachsende Rohstoffe.

Höhe der Förderung:

- Zuschuss von bis zu 35 % bei einem förderfähigen Investitionsvolumen von bis zu 50.000 € bei Anschaffung von Maschinen und Geräten,
- die Höchstförderung nach diesen Fördergrundsätzen kann während eines Zeitraumes von sechs Jahren maximal einmal gewährt werden.

In **Hessen** werden Förderprogramme vor allem durch die Festsetzungen des HMULV (2007) angeboten. Bespielhaft wird hier auf das Hessische Kulturlandschaftsprogramm (HEKUL) verwiesen. Ziel des HEKUL ist es, landwirtschaftliche Produktionsverfahren zu fördern, die auf den Schutz und die Verbesserung der Umwelt sowie die Erhaltung des ländlichen Lebensraums ausgerichtet sind.

Im Einzelnen sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- a) ökologischer Landbau,
- b) extensive Grünlandnutzung,
- c) Modulationsmaßnahmen.

Im Zuge der Modulation sind folgende neue Maßnahmen hinzugekommen:

- Mulchsaat, Direktsaat- oder Mulchpflanzverfahren.
- Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten in ökologisch wirtschaftenden Betrieben.

Die Antragsteller verpflichten sich:

- die ökologische Wirtschaftsweise in ihrem gesamten Betrieb gemäß den Vorschriften der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91 anzuwenden (BMELV, 2007),
- bei Mulchsaat, Direktsaat- oder Mulchpflanzverfahren jährlich auf mindestens 5 % der in Hessen gelegenen Ackerflächen (ohne Stillegungsflächen) ihres Betriebes, mindestens auf zwei Hektar, Hauptfrüchte ohne wendende Bodenbearbeitung anzubauen, so dass Pflanzenreste der Vor- oder Zwischenfrüchte oder Untersaaten auf der Bodenfläche verbleiben,
- jährlich auf mindestens 5 % des in Hessen gelegenen Ackerlandes des Betriebes (ohne Stillegungsfläche), mindestens auf zwei Hektar, nach der Ernte der Hauptfrüchte Zwischenfrüchte anzubauen bzw. Untersaaten beizubehalten, so dass in den Monaten Oktober bis 15. Januar ein bodenbedeckender Bestand vorliegt,
- den Umbruch der Flächen nicht vor dem 15. Januar vorzunehmen,
- in dem auf die Aussaat folgenden Kalenderjahr einen Fruchtwechsel zu berücksichtigen.

Die Förderung erfolgt nach Teilnahme am Antragsverfahren in Form einer jährlichen Beihilfe, vorbehaltlich der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel. Tab. 23 stellt die Höhe der Förderungen für die jeweiligen Bewirtschaftungsformen zusammen.

Förderhöhe HEKUL	
	Förderhöhe
1. ökologischer Landbau	
Ackerkulturen und Dauergrünland	190 €/Hektar
Feldgemüse (inkl. Spargel und Erdbeeren)	350 €/Hektar
Dauerkulturen und Baumschulen	670 €/Hektar
Kontrollkostenbeihilfe	35 €/Hektar; maximal 530 € je Betrieb
2. extensive Grünlandnutzung	
Extensive Grünlandnutzung (Basis)	90 €/Hektar
3. Modulationsmaßnahmen	
Mulch- oder Direktsaat- oder Mulchpflanzverfahren	60 €/Hektar
Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten in ökologisch wirtschaftenden Betrieben	70 €/Hektar

Tab. 23: Förderhöhen im Hessischen Kulturlandsschaftsprogramm (HMULV, 2007)

Eine weitere Förderung erfolgt über das Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) und die Förderung landwirtschaftlicher Betriebe in benachteiligten Gebieten (Ausgleichszulage). Über Direkt- und Zinszuschüsse werden betriebliche Investitionen und Ausgleiche unter anderem für den ökologischen Landbau und nachhaltige Bewirtschaftungsformen, die insbesondere den Belangen des Umweltschutzes Rechnung tragen, geschaffen.

Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2006) förderte durch das Agrar-Umweltpogramm (NAU) in 2003 die Mulch-, Direktsaat oder Mulchpflanzverfahren im Ackerbau jährlich mit 72 € je Hektar. In der aktualisierten Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen für das Niedersächsische/Bremer Agrar-Umweltpogramm (NAU/BAU) vom 31.10.2006 wird dafür keine Förderung mehr aufgeführt.

Bei extensiver Grünlandnutzung wird der Hektar Dauergrünland jährlich mit einer Zuwendung von 90 € bedacht. Abweichend hiervon wird für Flächen, die im Gebiet der Freien Hansestadt Bremen liegen, eine Zuwendung von jährlich 110 € je Hektar gewährt.

Bei ökologischen Anbauverfahren beträgt die Zuwendung bei Einführung und Beibehaltung der Maßnahme:

- 137 € je Hektar Ackerfläche und Grünland,
- 271 € je Hektar Gemüsebau und
- 662 € je Hektar für Dauerkulturen und Baumschulkulturen.

Ergänzend zu den Zuwendungen werden jährlich für die Kontrollkosten weitere 35 € je Hektar, höchstens jedoch 530 € je Zuwendungsempfänger, gewährt.

Nordrhein-Westfalen regelt die Förderungen im Erosionsschutzprogramm (GKB, 2006).

Gegenstand der Förderung:

- erosionsmindernde Bodenbearbeitungs- und Bestellmaßnahmen auf Ackerflächen in Verbindung mit einer weitgehenden Bodenbedeckung,
- Einsaat mehrjähriger Grasarten auf (Teil-) Schlägen auf den förderfähigen Ackerflächen des Betriebes.

Höhe der Förderung:

- erosionsmindernde Bodenbearbeitungs- und Bestellmaßnahmen: 102 € je Hektar und Jahr,
- bei der Einhaltung einer extensiven Bewirtschaftung des Dauergrünlandes des Betriebes 153 € je Hektar Dauergrünland,
- bei der Umwandlung von Ackerland in extensiv zu nutzendes Dauergrünland je Hektar umzuwandelnde Ackerfläche 429 €

Auflagen/Verpflichtungen:

- Die geförderten Flächen müssen sich in anerkannt erosionsgefährdeten Gebieten befinden.
- Die geförderten Flächen müssen zum Zeitpunkt der Antragstellung selbst bewirtschaftet werden.
- Für die Dauer von mindestens fünf Jahren dürfen nur speziell aufgeführte Kulturen angebaut werden.

Rheinland-Pfalz bietet das Förderprogramm Umweltschonende Landbewirtschaftung (FUL 2000) (GKB, 2006) an.

Gegenstand der Förderung:

- Förderung und Beibehaltung von Mulchsaatverfahren bei Mais und Zuckerrüben
 - mit Zwischenfruchteinsaat
 - Einsaat einer Zwischenfrucht nach der Ernte vor der Vorfrucht,
 - Verzicht der Futternutzung des Aufwuchses und auf wendende Bodenbearbeitung nach Ausaat der Zwischenfrucht,
 - mit Strohmulch
 - Zerkleinerung und gleichmäßige Verteilung des Strohs,
 - Stoppelbrache bis mind. 30. September,
 - Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung.

Höhe der Förderung:

- bei Zwischenfruchtanbau: 117 €/Hektar
- bei Strohmulchverfahren: 46 €/Hektar

Verpflichtungszeitraum:

- 5 Jahre

Sachsen – Anhalt regelt die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung extensiver Produktionsverfahren bei Ackerkulturen oder bei Dauerkulturen - Umsetzung der VO (EG) Nr. 1257/99 (GKB, 2006).

Gegenstand der Förderung:

- Anwendung von Mulch- oder Direktsaat oder Mulchpflanzverfahren im Ackerbau.

Höhe der Förderung:

- 42,- €/Hektar - mit der Einschränkung, dass nur 27 % der Ackerfläche gefördert werden.

Verpflichtungszeitraum:

- mind. 5 Jahre

Der Freistaat **Sachsen** (SMUL, 2005) fördert eine nachhaltige Landwirtschaft mit den folgenden Geldwerten:

1. umweltgerechter Ackerbau

bodenschonende Maßnahmen

- | | |
|-------------------------------|-------------|
| • Ansaat von Zwischenfrüchten | 66 €/Hektar |
| • Untersaaten | 51 €/Hektar |
| • Mulchsaat im Herbst | 42 €/Hektar |
| • Mulchsaat im Frühjahr | 42 €/Hektar |

ökologischer Ackerbau

- | | |
|--|--------------|
| • ökologisch wirtschaftende Betriebe | 230 €/Hektar |
| • Betrieb in Umstellung (max. 2 Jahre) | 337 €/Hektar |

2. extensive Grünlandwirtschaft

Umweltgerechte Grünlandbewirtschaftung

- | | |
|--|-------------|
| • reduzierter Mitteleinsatz (Grundförderung) | 51 €/Hektar |
|--|-------------|

Zusatzförderung

- | | |
|---|--------------|
| • Verzicht auf den Einsatz chemisch-synthetischer N-Düngemittel | 51 €/Hektar |
| • extensive Weide und Wiese | 102 €/Hektar |

ökologische Grünlandwirtschaft

Thüringen fördert in seinem Programm zur Förderung von umweltgerechter Landwirtschaft, Erhaltung der Kulturlandschaft, Naturschutz und Landschaftspflege unter anderem die folgenden Maßnahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft (KULAP) (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, 2007):

bodenschonende Maßnahmen

- | | |
|---|--------------|
| • Ansaat von Zwischenfrüchten | 70 €/Hektar |
| • konservierende Bodenbearbeitung | 54 €/Hektar |
| • Ackerrandstreifen | 452 €/Hektar |
| • Uferrandstreifen (jährliche Nachsaat) | 540 €/Hektar |

ökologischer Landbau: Einführung

- | | |
|----------------------|--------------|
| • Ackerland/Grünland | 187 €/Hektar |
| • Gemüse | 440 €/Hektar |
| • Dauerkulturen | 840 €/Hektar |

ökologischer Landbau: Beibehaltung

- | | |
|-----------------|---------------|
| • Ackerland | 137 €/Hektar |
| • Grünland | 160 €/Hektar |
| • Gemüse | 271 €/Hektar |
| • Dauerkulturen | 662 €/Hektar. |

Schleswig-Holstein gewährleistet die folgenden Zahlungen (GKB, 2006):

Gegenstand der Förderung:

- Mulchsaat- und Direktsaatverfahren,
- Mulchpflanzverfahren.

Höhe der Förderung:

- 60,- €/Hektar

Verpflichtungszeitraum:

- mind. 5 Jahre

Die Richtlinien zur Förderung bodenschonender Maßnahmen werden in regelmäßigen Abständen angepasst.

Weitere Instrumente zur Flächenutzung oder Bewirtschaftungsänderung stehen im Rahmen der Flurneuordnung zur Verfügung.

4.4 Cross Compliance

Ein wichtiger Aspekt einer Förderung ist die Bindung von Direktzahlungen an Umweltstandards. Diese sogenannte Cross Compliance-Regelung besagt, dass ein Landwirt seine Direktzahlungen nur dann in voller Höhe erhält, wenn er bestimmte Vorschriften, unter anderem in den Bereichen Pflanzen- und Tiergesundheit, Lebensmittelsicherheit sowie Tier- und Umweltschutz einhält. Zusätzlich werden der Bereich des Bodenschutzes und Standards zur Erhaltung eines guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustands genannt. Diese Standards sind von Bedeutung, da zukünftig unrentable Flächen nicht mehr landwirtschaftlich genutzt werden müssen, um die Prämien zu erhalten. Diese Flächen sollen jedoch in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand erhalten werden und nicht verbuschen. Die Vorschriften der Cross Compliance koppeln im Bereich der Agrarpolitik der Europäischen Gemeinschaft ab 2005 die Prämienzahlungen an Regelungen des Fachrechts. Die Einhaltung der Regelungen wird systematisch kontrolliert. Im Laufe der nächsten Jahre sollen alle 21 existierenden Richtlinien sukzessive von den Bundesländern umgesetzt werden. Es wurde festgelegt, dass Vorgaben zum Erosionsschutz, zur Bodenstruktur und zum Erhalt der organischen Bodensubstanz auf nationaler Ebene festzulegen sind. Als Erosionsschutzmaßnahme wird beispielsweise vorgeschrieben, dass mindestens 40 % der Ackerflächen eines Betriebes in der Zeit vom 1. Dezember bis 15. Februar entweder mit Pflanzen bewachsen sein müssen oder die auf der Oberfläche verbleibenden Pflanzenreste nicht untergepflügt werden dürfen. Verstößt ein Landwirt gegen die festgelegten Standards, muss er je nach Schwere des Vergehens mit einer Kürzung der Direktzahlungen rechnen. Bei Fahrlässigkeit bis zu 5 %, im Wiederholungsfall bis zu 15 %, bei Vorsatz nicht unter 20 %, was bis zu einer völligen Kürzung bestimmter Direktzahlungen führen kann. 25 % der so einbehaltenden Mittel fließen in den Mitgliedsstaat zur dortigen Verwendung zurück (Beerbaum, 2003). Zu einer Kürzung der Prämie kommt es nur, wenn die Prüfung im Jahr der Bewilligung der beantragten Prämie erfolgt. Die Umsetzung von Cross Compliance in Deutschland erfolgt durch das Direktzahlungen-Verpflichtungsgesetz und die Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung (BMELV, 2004; geändert am 22. April 2008). Die Cross Compliance-Regelungen beinhalten unter anderem Vorgaben zum Erosionsschutz von landwirtschaftlichen Flächen durch Vorgaben in der Bewirtschaftung, die dem Stand der Technik entsprechen und berücksichtigen somit ebenfalls den verbesserten Wasserrückhalt durch geänderte Bodenbearbeitungsmethoden. Damit kommt Deutschland der Verpflichtung nach, konkrete Anforderungen für die Bereiche Bodenschutz, Instandhaltung von Flächen und Landschaftselementen vorzuschreiben.

5 Hydrologische Modellierung

Die Entstehung und die Ausbildung von Oberflächenabfluss wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt, durch die Eigenschaften des Niederschlags (Intensität, Dauer, Tropfengröße), des Bodens (Textur, Struktur, Tonmineralogie etc.) und seiner Bodenflora und –fauna (Makroporen, etc.), der Landnutzung bzw. Vegetation (Bodenbearbeitung, Wachstumsstadium, etc.) und der Oberfläche (Mikrotopografie, Rauigkeit, Gefälle). Ein Teil dieser Größen unterliegt direkt anthropogenen Einflüssen. Jahreszeitliche Einflüsse können zusätzlich eine wichtige Rolle spielen. Ziel jeder Niederschlag-Abfluss- und Flussgebietsmodellierung ist die Abschätzung verschiedenster Maßnahmen im Einzugsgebiet eines Gewässersystems auf den Wasserkreislauf.

5.1 Hydrologische Modellierung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen

Es existieren unterschiedliche methodische Vorgehensweisen, die sich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und dem Untersuchungsaufwand deutlich unterscheiden. Je nach Zielsetzung und abhängig von den hydrologisch-hydraulischen Randbedingung variieren die zu untersuchenden Gebiete in der Größe deutlich. Es lassen sich mikroskalige, mesoskalige und makroskalige Verfahren unterscheiden. Der Aufwand hinsichtlich des Pre- und Postprocessing nimmt vom mikroskaligen Ansatz zum makroskaligen Ansatz ab. Hiermit verbunden ist eine Abnahme der Genauigkeit und somit eine erhöhte Unsicherheit der Ergebnisse. Zu den groben Einsatzgrenzen der verschiedenen Maßstabsebenen liefert Abb. 52 Hinweise.

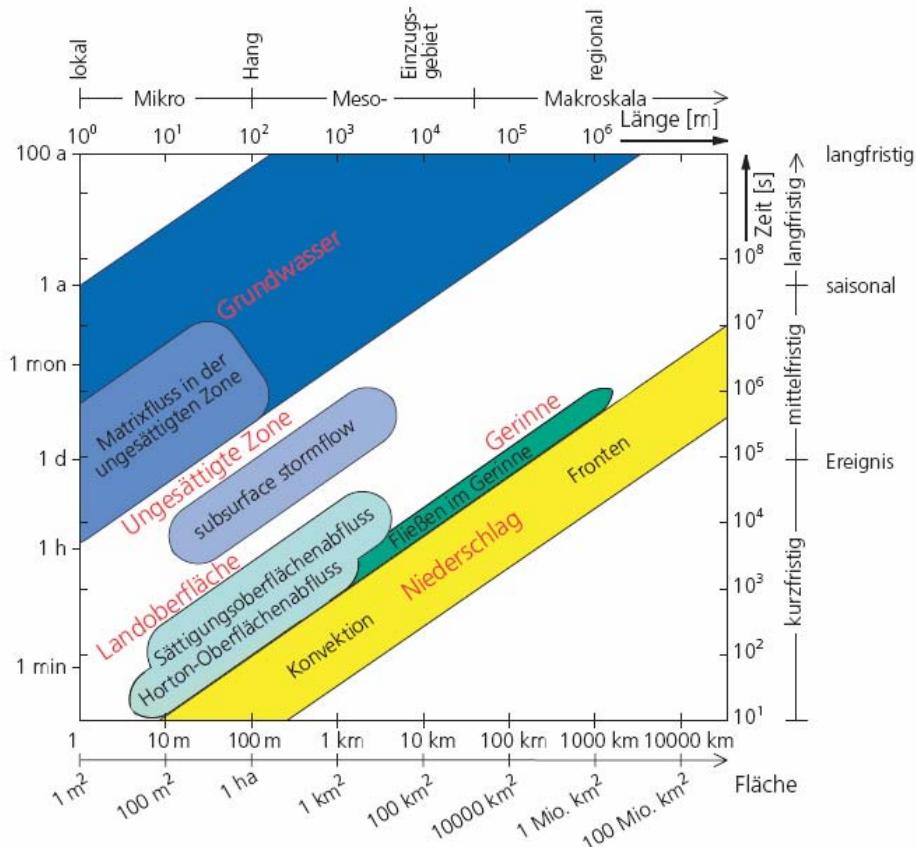


Abb. 52: Charakteristische Raum- und Zeitskalen hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung (Niehoff, 2001)

Mikroskaliger Ansatz

Der mikroskalige Ansatz eignet sich aufgrund der aufwendigen Datenerhebung für kleinräumige Untersuchungsgebiete von wenigen Quadratmetern bis Hektar.

Mesoskaliger Ansatz

Der mesoskalige Ansatz eignet sich aufgrund des Vorgehens bei der Datenerhebung z.B. für Flussabschnitte, Flussgebiete oder Küstenregionen. Die Flächennutzungseinheiten werden größer gewählt als beim mikroskaligen Ansatz. Häufig wird die Flur oder eine äquivalente Flächeneinheit als Basis der räumlichen Erfassung gewählt. Als grober Richtwert der charakteristischen Flächennutzungseinheit beim mesoskaligen Ansatz kann 1 km² angegeben werden. Oft wird die Nutzungsklassifizierung auf Basis des Amtlichen Topografischen-Kartografischen Informationssystems (ATKIS) durchgeführt.

Makroskaliger Ansatz

Bei großräumigen Untersuchungsgebieten kommt in der Regel der makroskalige Ansatz zur Anwendung. Die Flächennutzungseinheiten sind noch größer als beim mesoskaligen Ansatz.

Bisherige Informationen bzgl. Infiltrationsverhalten und Wasserleitfähigkeit von Böden resultieren überwiegend aus Beregnungsversuchen und entsprechen eigentlich der mikroskaligen Sichtweise. Für die Ermittlung des Einflusses von Landnutzungsänderungen, vor allem im Bereich der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, auf das Hochwassergeschehen eines Einzugsgebietes benötigt man Daten zum Einfluss der einzelnen Prozesse in der Meso- bzw. Makroskala.

In den nachfolgenden Untersuchungen werden hydrologische Modelle kleinflächig im Bereich der Domäne Frankenhäusen (Mesoskala) und großflächig im Einzugsgebiet der Fulda und Diemel (Makroskala) aufgestellt und kalibriert. Mittels Szenarienberechnungen wird der Einfluss von Bewirtschaftungs- und Bodenbearbeitungsmethoden auf landwirtschaftlichen Nutzflächen auf den Hochwasserabfluss aufgezeigt.

5.2 Eignung existierender hydrologischer Modelle

Zahlreiche Modelle mit mikroskaligem Ansatz mit Flächengrößen von wenigen Quadratmetern oder Hektar zeigen den Einfluss von Boden, Bodenbewirtschaftung und Landnutzung auf. Eine quantitative Übertragung auf größere Einzugsgebiete ist nicht ohne weiteres möglich. Der Grund liegt darin, dass oftmals in meso- bzw. makroskaligen Einzugsgebieten qualitativ hoch aufgelöste Daten fehlen (DVWK, 1999). Weiterhin ist es nicht immer möglich, abflusswirksame Effekte von Landschaftsstrukturelementen zu erfassen und im Modell abzubilden. Auch dazu fehlen meist Daten zur räumlichen Verteilung und Größe.

Nicht jedes Modell eignet sich zur Beantwortung der relevanten Fragestellungen. Die existierenden Modelle werden in der Praxis in Abhängigkeit ihrer Einsatzgrenzen angewendet. Berücksichtig werden in diesem Fall die Abbildung von Hochwassereignissen in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen. Die gesamte Spannweite von Landnutzungseinflüssen kann nicht modellhaft abgebildet werden. Die Modelle sollten dennoch die wichtigsten Teilkomponenten des Wasserhaushalts und des Hochwassers abbilden können. Um die Variabilität der Abflussprozesse abbilden zu können, müssen räumliche Unterteilungen im Einzugsgebiet möglich sein. Zur Berücksichtigung der Hochwasserdynamik sind kleine Zeitschritte im Simulationsprozess erforderlich. Der Einsatz von Modellen mit einer zeitlichen Auflösung im Minutenbereich ist anzustreben. Bei größeren Einzugsgebieten können größere Zeitschritte sinnvoll sein. Alle

eindimensionalen (berechnen den Wasserfluss nur in vertikaler Richtung) und zweidimensionalen Hangmodelle scheiden aus, da Modelle, die ausschließlich auf Einzelhängen oder noch kleineren Flächen eingesetzt werden, hier nicht zum Einsatz kommen.

Die Untersuchung der Hochwasserverhältnisse in einem Einzugsgebiet erfordert den kombinierten Einsatz von Modellen über die Abflussbildung (NA-Modell) und Modellen über den Hochwasserwellenablauf in den einzelnen Gewässerabschnitten (Flood-Routing Modelle).

Hydrologische Modelle lassen sich grundsätzlich in folgende Kategorien unterscheiden:

- physikalische Modelle
- und mathematische Modelle (Abb. 53).

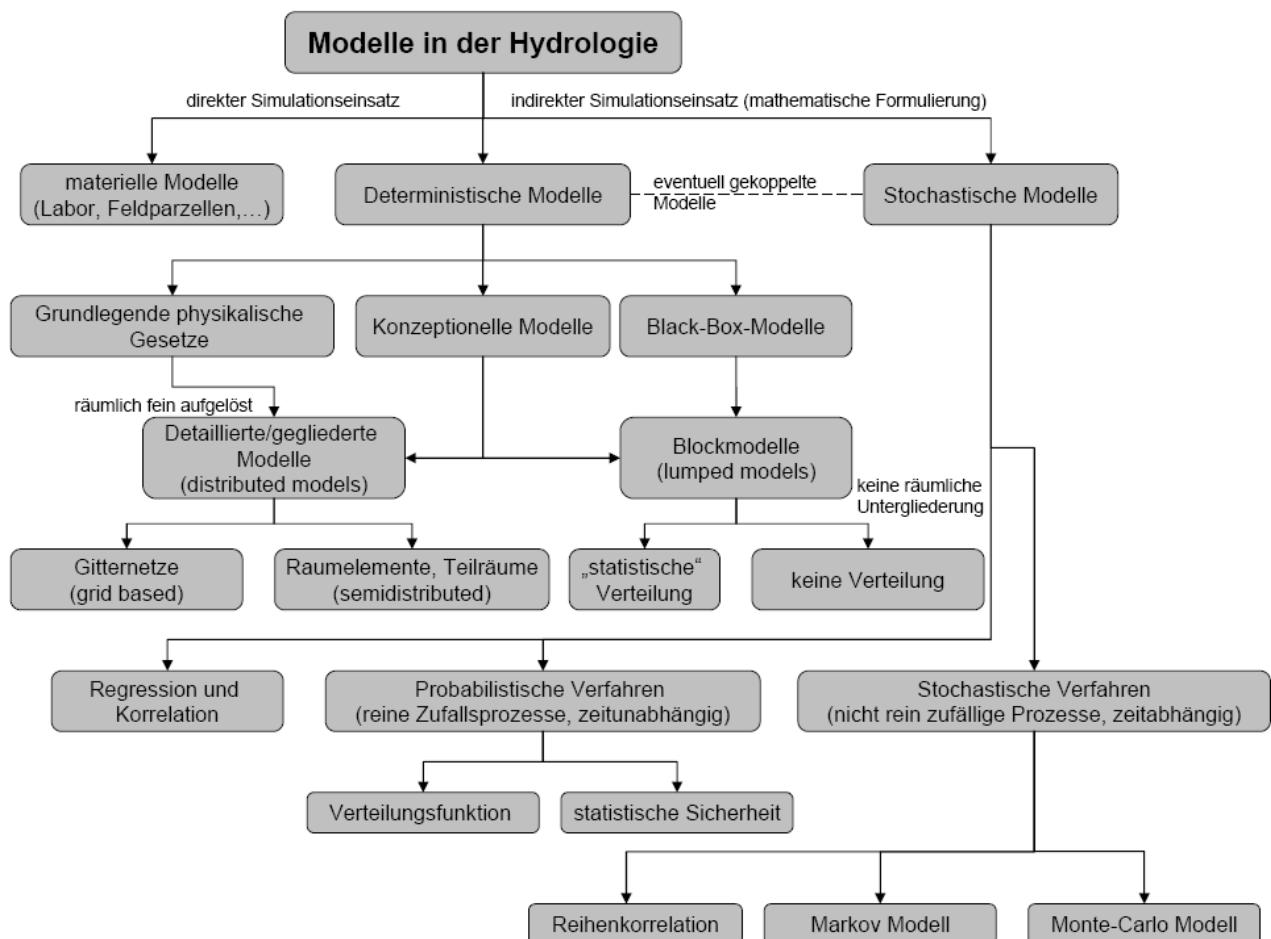


Abb. 53: Klassifizierung der hydrologischen Modelle

Mittels Kriterien wie Prozessbeschreibung, Skala und Lösungsmethode können die Modelle unterschieden werden. Nähere Beschreibungen der Modellansätze gibt die einschlägige Literatur. Verwiesen wird auf Maniak (1997). Die DVWK Materialien (1999) zeigen eine Zusammenstellung der gängisten N-A-Modelle.

Für die Abschätzung der hydrologischen Wirkung von Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen sollen für ein Einzugsgebiet der Mesoskala das Modell NASIM und für Einzugsgebiete der Makroskala das Modell NAXOS eingesetzt werden. Diesbezüglich muss geprüft werden, ob die Modelle zur Nachbildung der landnutzungsbedingten Änderung des natürlichen Abflussgeschehens geeignet sind.

Die komplexen Zusammenhänge und Abflussprozesse können in ihrer Gesamtheit nicht in einem Modell abgebildet werden, somit unterliegt man Einschränkungen in der Anwendung. Beispielsweise kann die Abflusskonzentration durch landeskulturelle Maßnahmen, Meliorationsmaßnahmen oder durch Landschaftsstrukturelemente beeinflusst werden. Es ist vorteilhaft, wenn diese Strukturen und Maßnahmen mit ihrer Wirkung auf das Abflussgeschehen modelliert werden können. Da die meisten Modelle jedoch nicht oder nur eingeschränkt in der Lage sind, dies abzubilden, kann daraus nicht zwangsläufig ein Ausschlusskriterium formuliert werden.

Die wesentlichen abzubildenden Einflussgrößen des Abflussgeschehens vor dem Hintergrund der zu untersuchenden Fragestellungen sind:

- Evapotranspiration und Interzeption,
- Dynamik der Bodenfeuchte,
- Dynamik der Infiltration,
- Dynamik der Wasserleitfähigkeit,
- Entwässerungsmaßnahmen und
- Landschaftsstrukturelemente.

Können diese Parameter nicht direkt abgebildet werden, ist es dennoch möglich, über Hilfsgrößen die Fragestellungen zu untersuchen. Die nachfolgenden Tab. 24, Tab. 25 und Tab. 26 stellen zusammen, welche Prozesse in den gängigen Modellen abgebildet werden können und wo die Einsatzgrenzen liegen. Hervorgehoben sind die beiden Modelle NASIM und NAXOS, die in dieser Untersuchung eingesetzt werden.

Modell	Modelltyp	Wasser- haushalt	Einsatzbereiche			Diskretisierung räumliche	zeitliche (minimale)	Einzugsge- bietsgröße (km ²)
			HW- Simulation	HW- Vorhersage	Ganglinien- separation			
AGNPS	e, e		X			R	keine ¹⁾	1 - 1000
ARC/EGMO	k, k/e	X	X			R, TG	≥ 5min	k.B.
ASGi (nur Wasserflußmodell, vgl. WaSiM-ETH Vers. 1)	ph/k, k/e	X	X			R	min	k.B.
BCENA-REV 2	k, k	X	X	X		TG	≥ 5min	k.B.
CATchment Model	k, k	X	X			TG	≥ 5min	k.B.
EROSION 3D	ph, e	X	X			R	min	< 10
FGM	k, e	X	X	X	X	TG	≥ 5min	k.B.
FGMOD	k, e	X	X	X		TG	≥ 5min	k.B.
HILLFLOW 3D	ph, k/e	X	X			R	min	< 10
HYDRO 5.2	k, k	X	X	X	X	TG	≥ 5min	k.B.
LARSIM	k, k/e	X	X	X	X	R/TG	≥ 5 min	1 - 1000
LISEM	ph, e		X			R	min	1 - 100
LISFLOOD	ph, k/e	X	X			R	> 15 min	> 10
Mike SHE (MP+SE)	ph, k/e	X	X			R	min	k.B.
NAMLFW	e, e	X	X			TG	min	k.B.
NASIM	k, k	X	X	X		TG	min	k.B.
NAVMO 2	k, k	X				TG	1 Tag	k.B.
NAVMOC	k, k	X				TG	1 Tag	k.B.
NAXOS	k, k/e	X	X			R/TG	>15 min	k.B.
MMS-PRMS	ph, k/e	X	X	X		TG	1 h	> 100
SWAT	k, k	X	X		X	R, TG	1 Tag	k.B.
TOPMODEL	ph/k, k/e	X	X			TG	min	k.B.
TOPSIM	ph, k/e	X	X			R, TG	min	< 10
WaSiM-ETH Vers. 1	ph/k, k/e	X	X			R/TG	min	k.B.
WaSiM-ETH Vers. 2	ph, k/e	X	X		X	R/TG	min	k.B.
WEPP (EZG-Version)	ph, k/e	X	X			R	min	< 10

Quelle: KADEN et al. (1997, ergänzt)

Erläuterungen:

Modelltyp: Die 1. Angabe bezeichnet den Modellansatz; e = empirisch; k = konzeptionell; ph = physikalisch basiert.
Die 2. Angabe bezeichnet die betrachtete Zeitspanne; e = Ereignismodell, k = Kontinuumsmodell.

räumliche Diskretisierung: R = Rastermodell; TG = Teilgebietmodell (z.T. in Kaskaden und / oder Hydrotopen untergliedert)

zeitliche Diskretisierung: min = Zeitschritte ≥ 1 Minute möglich; längere Zeitschritte bei Kontinuumssimulationen und größeren Einzugsgebieten, kürzere Zeitschritte bei Ereignissimulationen und kleinen Einzugsgebieten

Einzugsgebietsgröße:
1) k.B. = keine Beschränkung (nach Angaben der Modellentwickler)
keine zeitliche Diskretisierung; jedoch Scheitelabflussberechnung nach empirischer Formel aus Einzugsgebietscharakteristika und Abflusskonzentration

Tab. 24: Modelltyp, Einsatzbereiche, Diskretisierungsgrad und Einzugsgebietsgrößen verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)

Modell	Evapo-transpiration u. Interzeption	Infiltration	Oberflächenabfluss	Direktabfluss Zwischenabfluss	Grundwasserabfluss	Basisabfluss	Hangwasser-austritt
AGNPS / AGNPSm	(I)	(X)		(keine Differenzierung, nur Direktabfluss)			
ARC/EGMO	E, T, I	X	X		X	X	
ASGi	E, T, I	X	X	X		X	
BCENA-REV 2	E, T, I	(X)	X	X	X	X	
CATchment Model	E, T, (I)	(X)	X	X			
EROSION 3D		X	X				
FGM	(I)	(X)		(keine Differenzierung, nur Direktabfluss)			
FGMOD	E, T, (I)	(X)	(X)	(X)		(X)	
HILLFLOW 3D	E, T, I	X	X	X			X
HYDRO 5.2	E, T, I	(X)	X	X		X	
LARSIM	E, T, I	(X)	X	X	X		
LISEM	I	X	X				
LISFLOOD	E, T, I	X	X		X	X	
Mike SHE (MP+SE)	E, T, I	X	X		X	X	
NAMLFW			X	X			
NASIM	E, T, I	X	X	X	X	X	
NAXOS	E, T, I	(X)	X	X	X	X	
MMS-PRMS	E, T, I	X	X	X	X		
TOPMODEL	E, T, I	X	X			X	
TOPSIM	E, T, I	X	X	X		X	X
WaSiM-ETH Vers. 1	E, T, I	X	X	X		X	
WaSiM-ETH Vers. 2	E, T, I	X	X	X	X	X	X
WEPP (EZG-Vers.)	E, T, I	X	X	X			X

Quelle: KADEN et al. (1997, ergänzt)

Erläuterungen:

(I) = Interzeption wird nur indirekt im Anfangsverlust berücksichtigt, der z.T. als Residuum des Abflussbeiwertes bestimmt wird

(X) = nur eingeschränkt erfüllt; z.B. werden Abflussbeiwertverfahren (inkl. SCS-CN-Verfahren) als nur indirekte Ableitungen für die Infiltration eingestuft

Tab. 25: Berücksichtigte Teilprozesse verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)

Modell	Bodenmodul			Entwässerung	Landschaftsstrukturelemente
	Dynamik der Bodenfeuchte (zeitl. u. vertikal)	Dynamik der Infiltration	Wasserleitfähigkeit		
ARC/EGMO	X	X	X		
ASGi	(X)	(X)	X		
BCENA-REV 2	(X)	(X)	X		
EROSION 3D					(X)
HILLFLOW 3D	X	X	X		
HYDRO 5.2	(X)	(X)		(X)	
LARSIM	(X)	(X)		(X)	
LISEM	X	X	X		X
LISFLOOD	X	(X)	X		X
Mike SHE (MP+SE)	X	(X)	X	(X)	(X)
NASIM	(X)	(X)	X	(X)	
NAXOS	(X)	(X)		(X)	
MMS-PRMS	X	(X)	(X)		
TOPMODEL	(X)	(X)		(X)	
TOPSIM (H-kin)	(X)	X	(X)		
WaSiM-ETH Vers. 1	(X)	(X)	X		
WaSiM-ETH Vers. 2	X	X	X	X	X
WEPP (EZG-Vers.)	X	X	X	X	(X)

Tab. 26: Berücksichtigte, durch die Landnutzung beeinflusste Parameter des Abflussgeschehens verschiedener N-A-Modelle (DVWK, 1999)

Die Tabellen zeigen, dass die Modelle NASIM und NAXOS zur Untersuchung der Wirkung verschiedener Maßnahmen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf die Bodenmatrix geeignet sind. Mit dem Programm NAXOS wurden im Rahmen des INTERREG IIIB Projektes „Umweltverträglicher Hochwasserschutz für die Einzugsgebiete von Fulda und Diemel“ verschiedene Maßnahmen für den Hochwasserschutz in den Gewässereinzugsgebieten der Fulda und Diemel untersucht. NASIM wurde für die kleinflächigen Untersuchungen auf der Domäne Frankenhausen eingesetzt. Tab. 27 beinhaltet die maßgeblichen Daten der betrachteten Gewässer und Einzugsgebiete sowie deren Einordnung bzgl. der Modellskala und Einzugsgebietsgröße nach WRRL.

	Jungfernbach	Diemel	Fulda
Gewässerlänge [km]	5,8	110,0	220,0
Einzugsgebietsgröße [km ²]	9,04	1.760,0	6.945,0
Gebietskennziffer	4481200	44	42
Modellskala	Mesoskala	Makroskala	Makroskala
Einzugsgebietsgröße nach WRRL	klein	groß	groß

Tab. 27: Untersuchte Gewässereinzugsgebiete

6 Hydrologische Modellierung in einem kleinen Einzugsgebiet am Beispiel des Jungfernbaches

Zunächst wurde in einem kleinen Einzugsgebiet die Wirkung verschiedener Maßnahmen der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Verformung der Hochwasserwelle untersucht. Ausgewählt wurde das Areal der Staatsdomäne Frankenhausen, das vom Gewässer Jungfernbach durchflossen wird. Für die Modellierung der verschiedenen Änderungen auf und im Bodenkörper wurde das Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM 3.3.1 der Firma Hydrotec verwendet.

6.1 Beschreibung des Einzugsgebietes des Jungfernaches

Das untersuchte Gewässer Jungfernach (Gebietskennziffer 4481200) befindet sich nördlich der Stadt Kassel und östlich der Ortschaft Calden (Abb. 54). Die Bundesstraße B83 kreuzt den Jungfernach von Norden nach Südosten verlaufend. Der Jungfernach entspringt südlich der Ortschaft Calden, ca. 1 km südwestlich von Schloss Wilhelmsthal. Das Einzugsgebiet des Jungfernaches beträgt 9,04 km². Nach ca. 5,8 km mündet der Jungfernach südöstlich der Ortschaft Burguffeln in die Esse, die wiederum zum Einzugsgebiet der Diemel gehört. Der Jungfernach durchfließt die von der Universität Kassel bewirtschaftete landwirtschaftliche Domäne Frankenhausen von Südwesten nach Nordosten. Begründet ist die Auswahl dieses Gebietes damit, dass die teilweise ungünstigen Hangneigungen von über 4 % einen verstärkten Oberflächenabfluss erwarten lassen. Ein größerer Anteil von Reihenkulturen wie Kartoffeln und Möhren im Bereich des Domänengeländes, die eine verstärkte Anfälligkeit gegen Wassererosion aufweisen, unterstützen diese Gebietsauswahl. Die gute Datenbasis des Domänengeländes ist hilfreich aus Sicht der Modellierung.

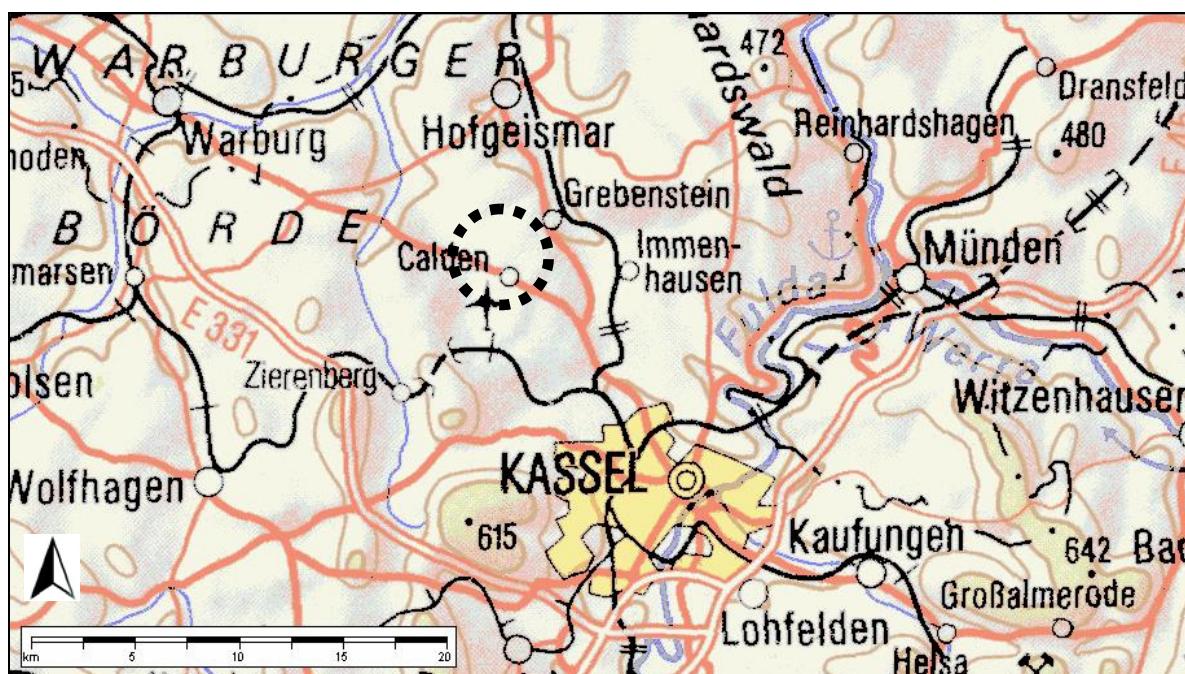


Abb. 54: Lage der Domäne Frankenhausen (Müller, 2006)

6.1.1 Betrachtetes Untersuchungsgebiet Frankenhausen

Resultierend aus den gewählten Standorten der Pegel, der Hauptpegel (P1) misst in einem Rohrdurchlass unter der Bundesstraße 83, wird lediglich ein reduziertes Einzugsgebiet des Jungfernaches untersucht, das bedeutet, von dem ursprünglich $9,04 \text{ km}^2$ großen Einzugsgebiet werden $7,6 \text{ km}^2$ im Modell abgebildet. Abb. 55 zeigt das Einzugsgebiet des Jungfernaches, das im N-A-Modell berücksichtigte Untersuchungsgebiet und die Grenzen der Domäne Frankenhausen.



Abb. 55: Lage und Einzugsgebiet des Jungfernaches

Seit dem 1. Juli 1998 wird die Hessische Staatsdomäne Frankenhausen als Betrieb des ökologischen Landbaus bewirtschaftet und ist anerkannter Mitgliedsbetrieb im Bioland- und Naturland-Verband. Die Böden werden mit den dafür benötigten Methoden bearbeitet. Die Flächen werden überwiegend ackerbaulich bewirtschaftet. In unmittelbarer Gewässernähe befinden sich vereinzelte Gehölze, Gebüsch und Gräser. Abschnittsweise schließen Waldflächen direkt an das Gewässer an. Das übrige Einzugsgebiet des Jungfernaches ist ebenfalls geprägt durch landwirtschaftliche Nutzung.

6.1.2 Boden und Geologie

Brandt et al. (2002) beschreiben die wichtigsten Standortfaktoren der Domäne Frankenhausen.

- Lage: Hofgeismarer Rötsenke,
- Geologie: Rötmergel mit überwiegender Lößlehmabdeckung,
- Höhenlage: 150 – 300 m über NN,
- Oberflächengestalt: 75 % eben bis leicht geneigt,
- 25 % leicht hängig bis hängig,
- Klima: 650 mm durchschnittliche Jahresniederschläge,
- 8,5 °C mittlere Jahrestemperatur.

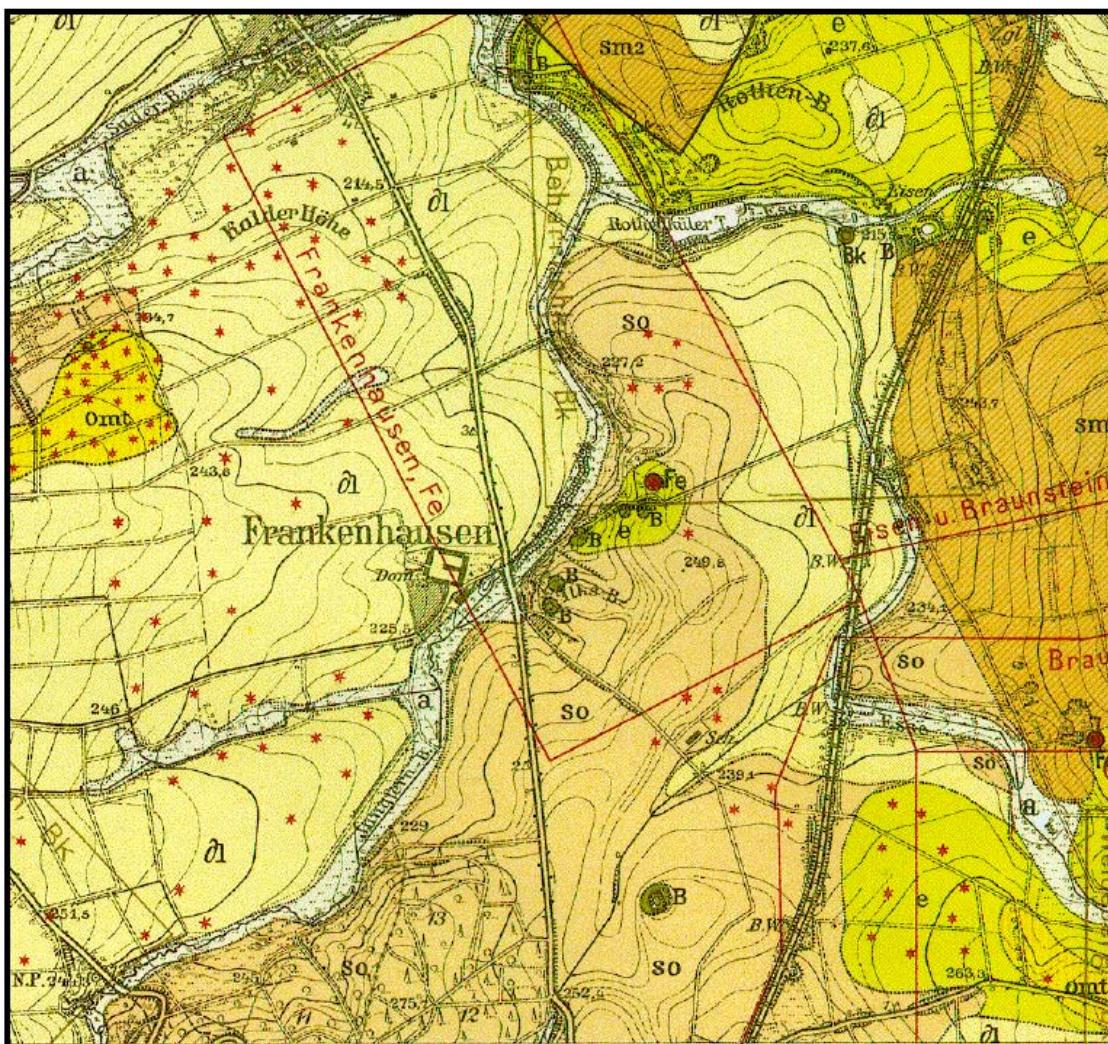
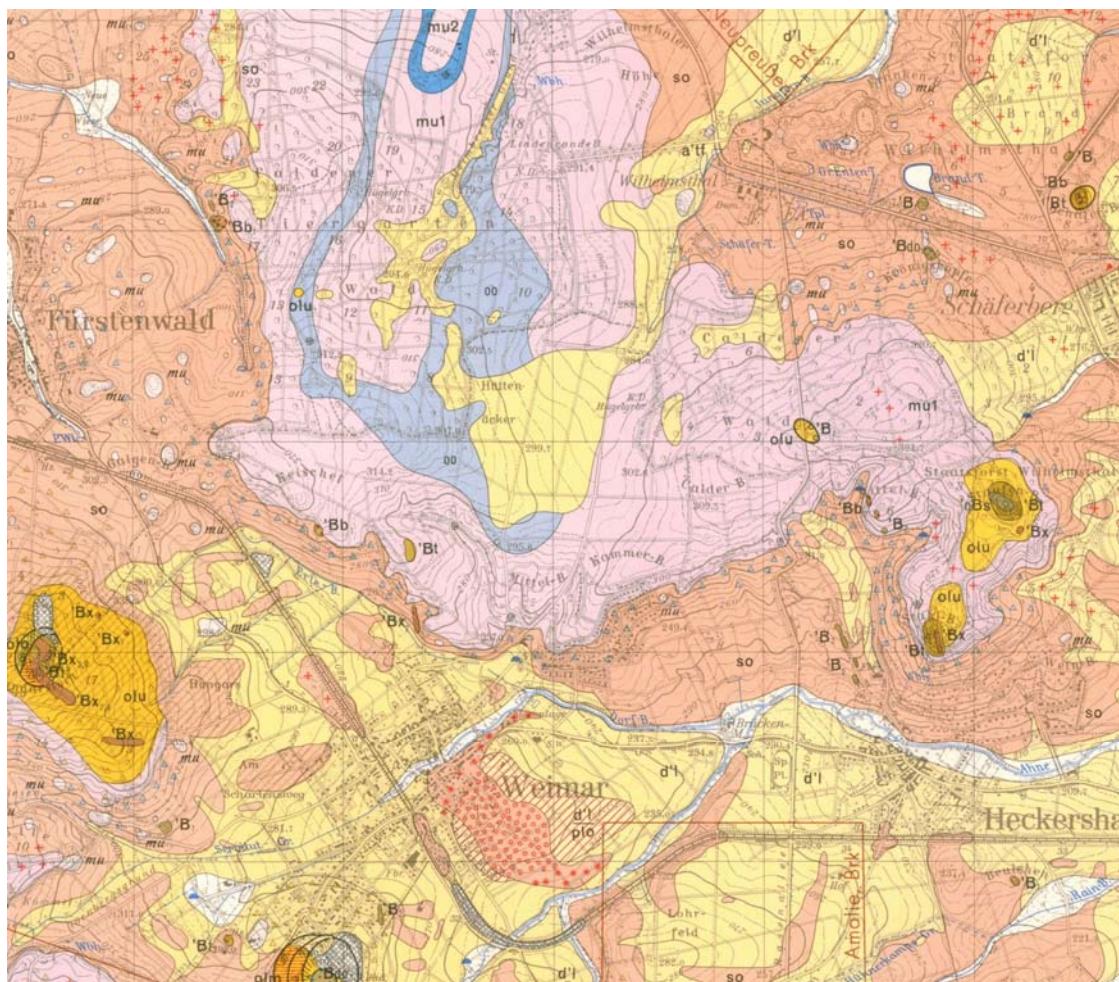


Abb. 56: Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:25.000 Blatt 4522

Die Hofgeismarer Rötsenke erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung von Kassel bis Trendelburg und ist Teil einer Senkenfolge der Westhessischen Senke. Im Westen wird sie durch das Oberwälder Land, einer aus Kalksteinen des unteren und mittleren Muschelkalkes bestehenden Hochfläche und deren Ausläufer begrenzt. Im Osten bilden die Höhenzüge des Reinhardswaldes, der aus harten Gesteinen des mittleren Buntsandsteins besteht, die Grenze. Dominierend für die Region ist eine 7,5 m mächtige Lössauflage. Östlich des Jungfernaches befinden sich Schichten mit oberem Buntsandstein (Röt) (Abb. 56). Die Lössschicht ist dort geringer und bereits in geringer Bewirtschaftungstiefe stößt man auf Tonmergel und Schiefertone (Brandt et al., 2002). In Fließrichtung links des Jungfernaches dominiert Löss, rechts des Jungfernaches oberer Buntsandstein bei den bodenbildenden Gesteinen (Abb. 57).



Legende:

- so: Oberer Buntsandstein Roter, grauer und grünlicher Ton und Mergel
- d1: Löss (Diluvium) Löss, oberflächlich, meist entkalkt u. verlehmt
- a: Flussaufschüttungen (Alluvium) meist verschwemmter Lösslehm
- B: Ergussgestein (Tertiär) Basalt
- e: Eozän (Tertiär), meist gelber Sand mit Braunkohle und Brauneisenstein
- d'l: Löss, meist verlehmt
- mu: Kalkstein und Mergelstein
- olu: Ton, Sand, Kies, Braunkohle
- so: Bunter bankiger und plattiger aufblätternder Ton- und Mergelstein
- *: (Tertiär) Blöcke von Quarzit
- omt: Mitteloligozän (Tertiär), grauer fetter Tonmergel
- Fe: Fundbohrloch auf Eisenerz

Abb. 57: Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:25.000 Blatt 4622

6.1.3 Landnutzung und Vegetation

Das untersuchte Einzugsgebiet wird charakterisiert durch drei dominierende Landnutzungsarten. Dies sind land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen sowie Grünland. Abgegrenzt wurden diese Flächen anhand vorhandener Atkisdaten (ATKIS, 2004). Für die Flächen der Domäne Frankenhausen existieren digitale Schlagkarten, anhand derer die jährlichen Flächennutzungen detailliert bestimmt werden können. Für diese Flächen sind jahreszeitliche Vegetationsbestände dokumentiert. Im Modell wird später etwa die Hälfte dieser Flächen abgebildet (ca. 1,1 km²). Der übrige Anteil der Domäne liegt in einem benachbarten Gewässereinzugsgebiet (Gebietskennziffer 4481100). Die Fruchtfolge ab 2002 wurde mit Kleegras, Kleegras, Winterweizen/Hackfrucht, Hackfrucht/Winterweizen, Körnerleguminosen und Sommer-/Wintergetreide geplant (Godt et al., 2002). Im Zeitraum der Messdatenerfassung 2005 bis 2007 wurden die Schläge mit den folgenden Kulturen bewirtschaftet (Tab. 28).

Kultur	2005 [ha]	2006 [ha]	2007 [ha]
Erbsen	-	2,9	-
Gemüse	-	1,4	0,9
Grünland	23,2	23,0	25,0
Kartoffeln	6,5	6,9	9,7
Kleegras	14,6	17,3	20,1
Landschaft	-	0,1	0,1
Luzerne	-	-	3,9
Möhren	-	4,6	11,3
Raps	-	9,4	-
Roggen	48,7	-	-
Sommergerste	-	-	2,6
Sommerweizen	-	6,5	-
Sonderfläche	3,7	-	-
Streuobstwiese	0,3	0,3	0,3
Triticale	-	-	7,9
Versuchswesen	3,5	19,8	18,0
Weg	1,7	-	-
Winterweizen	-	20,0	2,1

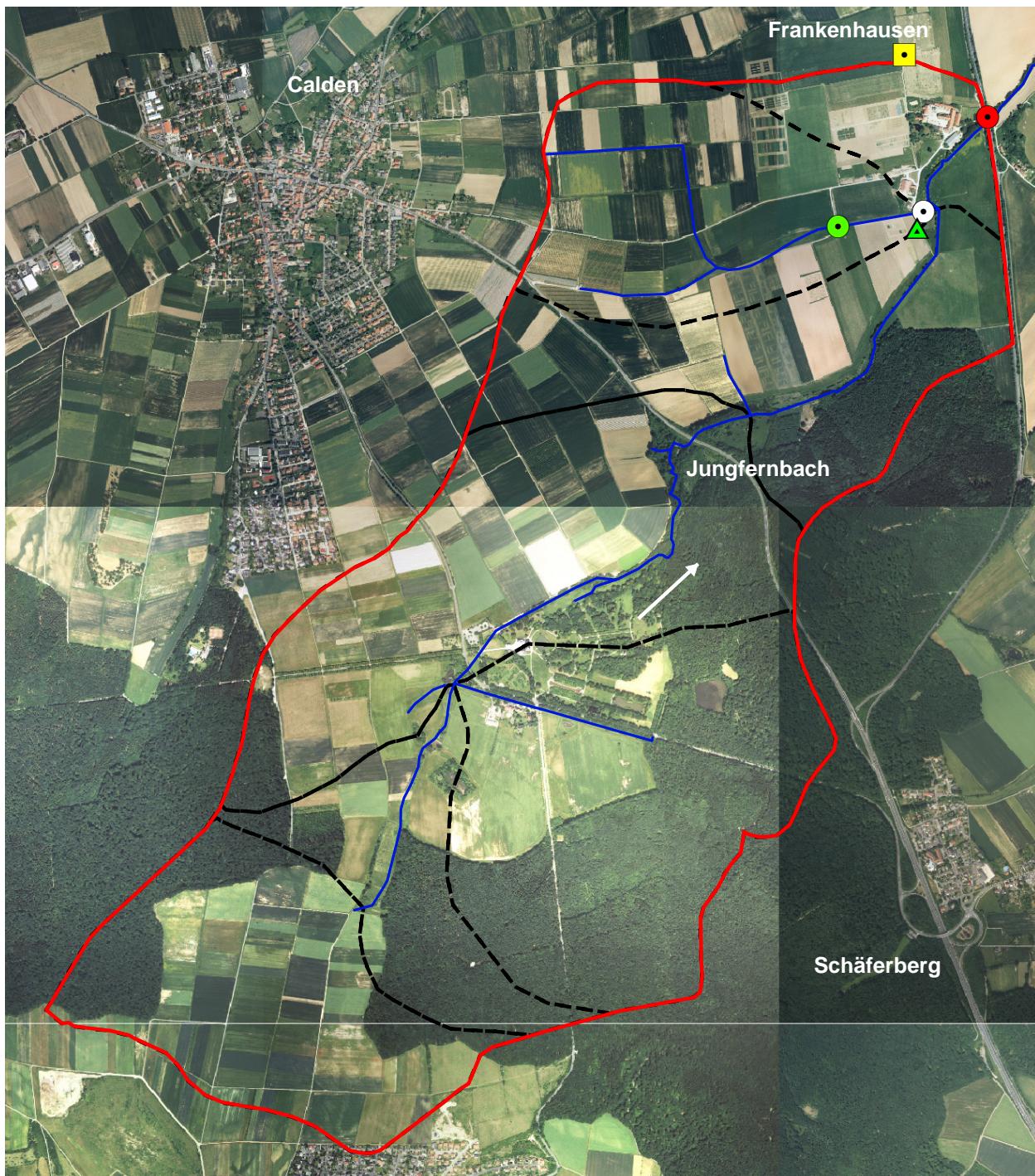
Tab. 28: Landnutzung in den Jahren 2005, 2006 und 2007 auf der Domäne Frankenhausen

Die restlichen Flächen sind unterverpachtete bzw. sonstige Flächen wie Hofraum und Wasserflächen. Die weiteren Flächen des betrachteten Einzugsgebietes unterliegen zum größten Teil der ackerbaulichen und forstwirtschaftlichen Nutzung.

6.2 Feldmessungen

Maßgeblich für die Güte der im Modell berechneten Ergebnisse ist die Kalibrierung des Systems an gemessenen Ereignissen. Neben den Aufzeichnungen von Niederschlagsmessstationen sind Pegeldaten elementare Eingangsparameter für eine erfolgreiche Kalibrierung des Modells. Besonders Gewässer in kleineren Einzugsgebieten sind bislang messtechnisch nur unzureichend ausgestattet. Kostspielige Messapparaturen und langwierige Messreihen verhindern oft, dass eine ausreichende Datenbasis vorliegt.

Ziel der hiesigen Messungen war es, sowohl eine Teilfläche, als auch einen Großteil des Untersuchungsgebietes messtechnisch zu erfassen, um ein Niederschlag-Abfluss-Modell als Grundlage für spätere Variantenrechnungen zu kalibrieren.



- Teilgebiete
- Jungfernbach
- Einzugsgebiet Pegel P1
- Pegel P1
- Pegel P2
- Pegel P3
- Niederschlagsmesser N1
- Klimastation K1

Abb. 58: Messnetz im Untersuchungsgebiet

Im Untersuchungsgebiet wurden drei Pegel installiert und seit Mitte 2005 kontinuierlich betrieben und ausgewertet. Der Hauptpegel erfasst den Abfluss einer Fläche von 7,6 km² und befindet sich in einem Rohrdurchlass unter der Bundesstraße 83 (Jungfernbach km 1,3 – **Pegel P1**). Die Bundesstraße stellt eine anthropogene Grenze im Einzugsgebiet dar. Ca. 1,8 km oberstrom der Mündung des Jungfernaches in die Esse entwässert ein Quellbach (ohne Namen) in einem stark eingetieften Graben in den Jungfernbach.

Zwei Quellabschnitte entspringen am östlichen Ortsrand von Calden in einer Höhe von etwa 265 m ü. NN. Das Gewässer durchfließt ein fast ausschließlich landwirtschaftlich genutztes leicht hügeliges Einzugsgebiet. Das zumeist begradigte Gewässer mündet nach einer Fließstrecke von etwa 1,92 km in einer Höhe von etwa 220 m ü. NN in den Jungfernbach. Der Gewässerabschnitt sammelt Oberflächen- und Dränagewasser. Ca. 840 m oberstrom der Mündung in den Jungfernbach ist das Gewässer auf einer Strecke von etwa 450 m verrohrt. 390 m oberstrom der Grabenmündung wird der Abfluss durch den verrohrten Abschnitt erfasst (**Pegel P3**). Etwa 60 m oberstrom der Grabenmündung in unmittelbarer Nähe eines landwirtschaftlichen Gebäudes (neuer Kuhstall) erfasst eine weitere Messstation das Dränagewasser sowie den Oberflächenabfluss der angrenzenden landwirtschaftlichen Nutzflächen (**Pegel P2**). Direkt neben dem Pegel misst ein Niederschlagschreiber die regionalen Niederschläge (**N1**).

Dieser Abschnitt wurde detailliert untersucht, da aufgrund der Geländetopografie mit ihrer gleichmäßigen Neigung in Richtung des Grabens davon ausgegangen werden kann, dass während Starkniederschlagsereignissen ein Oberflächenabsfluss messbar ist. Eine weitere Messeinrichtung befindet sich 600 m nördlich in Form einer Klimastation (**K1**). Die Lagen und Bezeichnungen der Messstationen im Untersuchungsgebiet sind in Abb. 58 dargestellt.

6.2.1 Abflussmessungen

Die Schwierigkeiten der Erhebung von Messdaten im Gelände sind vielfältig. Im hiesigen Beispiel werden sowohl Oberflächenabflüsse nach Niederschlagsereignissen als auch kontinuierlich die Dränageschüttungen berücksichtigt. Dränageschüttungen werden üblicherweise stichprobenartig mit Messbechersystemen erfasst, da eine ständige Datenaufzeichnung zu aufwendig und kostenintensiv ist. Jeder Leitungsstrang sollte separat betrachtet werden, um die Effektivität der Dränagewirkung nachzuweisen.

Ähnlich schwierig gestaltet sich die Wahl einer geeigneten Messmethodik zur Erfassung der Abflüsse von Teilflächen bzw. auch im Gewässer selbst. Drucksonden setzen das Vorhandensein eines Absturzes voraus, der als Querbauwerk bereits bei nur geringen Höhen von 20 cm eine Wanderbarriere für die Fischfauna und den Makrozoobenthos darstellt. Das Fließverhalten wird verändert, Sedimentationsprozesse und die Erwärmung des Wassers sind weitere negative Begleiterscheinungen, die die Organismenzusammensetzung nachhaltig verändern und die natürliche Längsentwicklung des Gewässers unterbrechen. Ähnliche Nachteile besitzen Wehrkonstruktionen. Zusätzlich liegt die Einsatzgrenze von Messwehren im geringen Abflussspektrum. Messungen mit dem Lattenpegel sowie Flügelmessungen sind nur Momentaufnahmen und eignen sich ebenso wenig wie Tracerverfahren. Genaue und kontinuierliche Messdaten liefern hingegen Ultraschallmessungen.

6.2.1.1 Venturi Messgerinne

Für die Abflussmessungen kann eine Methodik genutzt werden, die bisher überwiegend in der Abwassermesstechnik verwendet wird, das Venturi-Gerinne. Abflussmessungen nach dem Venturi-Prinzip erzwingen durch eine eingebaute Engstelle einen Fließwechsel vom

Strömen zum Schießen. Dadurch ergibt sich ein hydraulisch eindeutiger Zusammenhang zwischen einem Wasserstand h und dem Durchfluss Q . Für die Durchflussmessung mit Venturigerinnen ist die DIN 19 559 Teil 2 (1983) zu beachten.

Baulich zeichnet sich das Venturi-Gerinne durch eine symmetrisch angeordnete Einschnürung aus, die strömungsgünstig geformt ist. Die Besonderheit des in Frankenhausen installierten Venturigerinnes ist der Verzicht auf eine lange Drosselstrecke (Khafagi-Venturi) und eine allmähliche Aufweitung, was jedoch keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Gerinnes hat. Es werden lediglich die nötigen Einbauten im Gewässer bzw. der Verrohrung verringert.

Der Vorteil der Messmethodik liegt im großen Messbereich von wenigen l/s bis zu mehreren m³/s. Gerade für kleinere Gewässer bietet sich diese Lösung an, da ein definierter Querschnitt einfach in das natürliche Gerinne eingebaut werden kann. Zur kostengünstigen Herstellung eignen sich Kunststoffplatten aus Recyclingmaterial. Zur Gestaltung des Einlaufs werden an dem trapezförmigen Querschnitt seitlich halbzylindrisch geformte Bleche angeschraubt, die in die natürliche Böschung eingebunden werden und dafür sorgen, dass keine Unterspülung mit der Gefahr des Aufschwimmens der Messstation eintritt. Mit einer zusätzlichen Kunststoffplatte im Einlaufbereich, die die Funktion einer Rampe übernimmt, besteht der Vorteil im Gewässer darin, dass die Durchgängigkeit für die Fischfauna von Oberstrom gewährleistet wird, da das Einbaugerinne direkt auf die Sohle gesetzt werden kann. Der Fischaufstieg ist ebenfalls für die meisten Fischarten gewährleistet. Der Makrozoobenthos kann durch das Lückensystem die Messstelle unterwandern. Das Venturi-Gerinne erzeugt einen vergleichsweise kleinen Energieverlust und lässt eine Lücke für Geschiebe, Schwebstoffe und Schwimmstoffe offen. Ablagerungen in der Gerinnestrecke können die zu messende Fließtiefe als auch das Geschwindigkeitsprofil beeinflussen. Aufgrund von Fließgeschwindigkeiten von üblicherweise mehr als 0,5 m/s besteht diese Problematik in der Venturimessstrecke nicht. In Grabensystemen, die parallel zu landwirtschaftlichen Nutzflächen verlaufen, ist dies ein maßgeblicher Vorteil, da verstärkt Einträge durch Oberflächenabtrag stattfinden. Im hiesigen Fall wurde auf Schwebstoffablagerungen geachtet und, wenn nötig, die Ablagerungen geräumt.

In einem Rohrdurchlass mit Durchmesser 2,20 m unter der Bundesstraße 83 (Pegel P1) sowie ca. 60 m oberstrom der Grabenmündung in den Jungfernbach (Pegel P2) wurde diese Messmethodik in Form des Venturi-Gerinnes angewendet. Da im Bereich der Engstelle die kritische Tiefe durchschritten wird, genügt eine Messung der Fließtiefe im Oberwasser, um den Durchfluss zu ermitteln. Dabei ist darauf zu achten, dass kein Rückstau vom Unterwasser erfolgt. Die Messung der Fließtiefe (h) erfolgt über eine Ultraschallsonde (Typ HT 68). Die Datenaufzeichnung übernimmt ein Datenlogger. In diesem Fall wurde das Loggersystem der Firma Züllig, m-line II, verwendet. Vorteilhaft ist die Option, dass sowohl im Intervall- als auch im Dauerbetrieb gemessen werden kann und der Strombedarf gering ist, wodurch Langzeitmessungen möglich sind. Als externe Stromquelle dient eine Akkubatterie (12 V, 24 AH), sodass ein autarker Betrieb ohne Festnetzversorgung möglich ist. Auf einer CF-Card werden die Messzeitpunkte sowie der Höhenwert zwischen Wasserspiegel unterhalb der Sonde in Bezug zur Höhe der Sohle des Venturi-Gerinnes aufgezeichnet. Die Messgenauigkeit der Ultraschallsonde beträgt +/- 1 mm, wodurch es möglich ist, bereits sehr geringe Abflüsse aufzuzeichnen. Ein Einbau des Gerinnes ohne Gefälle in der Engstelle ist der optimale Zustand (Volkart et al., 2001). Schwache Gefälle beeinflussen die Ergebnisse geringfügig. Von Juni bis Anfang Dezember 2005 wurden die Daten im 1-Minuten-Takt erfasst. Anschließend wurde die Datenerfassung auf einen 5-Minuten-Takt umgestellt. Pro Intervall speichert der Datenlogger einen Messwert. Eine Kalibrierung der Messstation ist nicht nötig.

Abb. 59 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Venturi-Messtrecke.

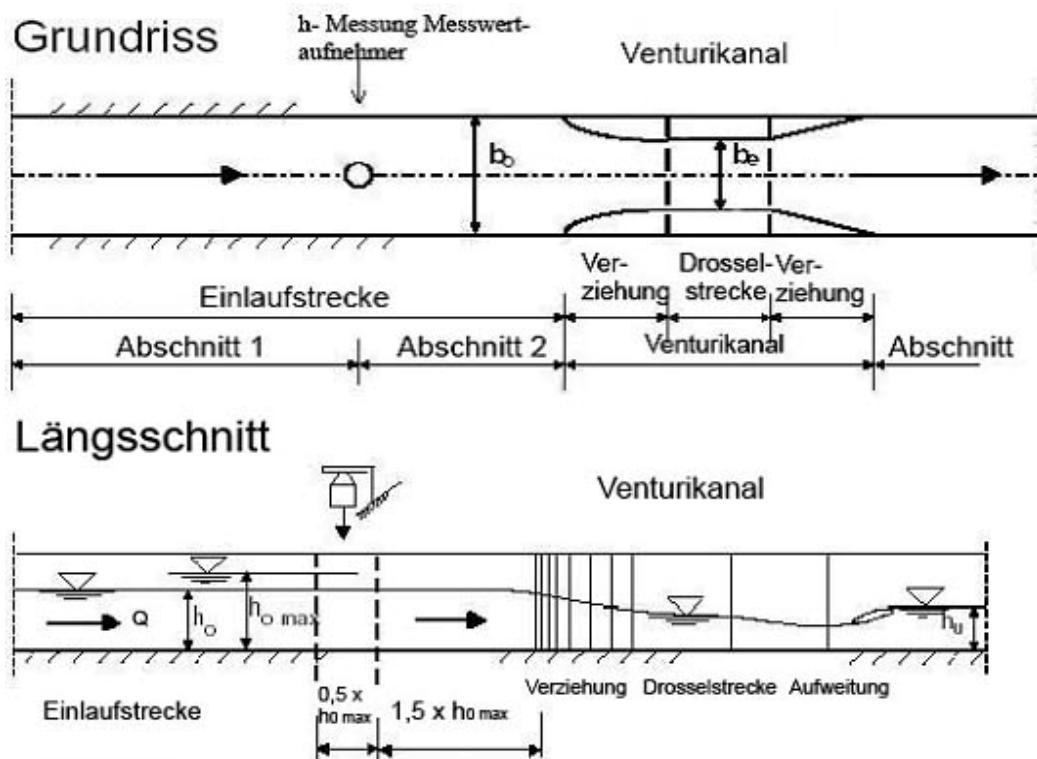


Abb. 59: Venturi Messgerinne im Grund- und Längsschnitt (Volkart et al., 2001)

Abb. 60 zeigt das eingebaute Venturi-Messgerinne im Rohrdurchlass unter der Bundesstraße 83 (Pegel1).



Abb. 60: Venturi-Messgerinne im Rohrdurchlass unter der Bundesstraße 83 (Pegel P1) (Schlößer, 2007)

Die Ermittlung des Durchflusses nutzt den eindeutigen Zusammenhang zwischen Durchfluss Q und Fließtiefe h. Zur praktischen Umsetzung muss man die Übertragungsfunktion Q(h) kennen. Diese Funktion wurde berechnet, sodass aus den aufgezeichneten Wasserstandswerten mit der Übertragungsformel die Abflüsse bestimmt werden können (Abb. 61).

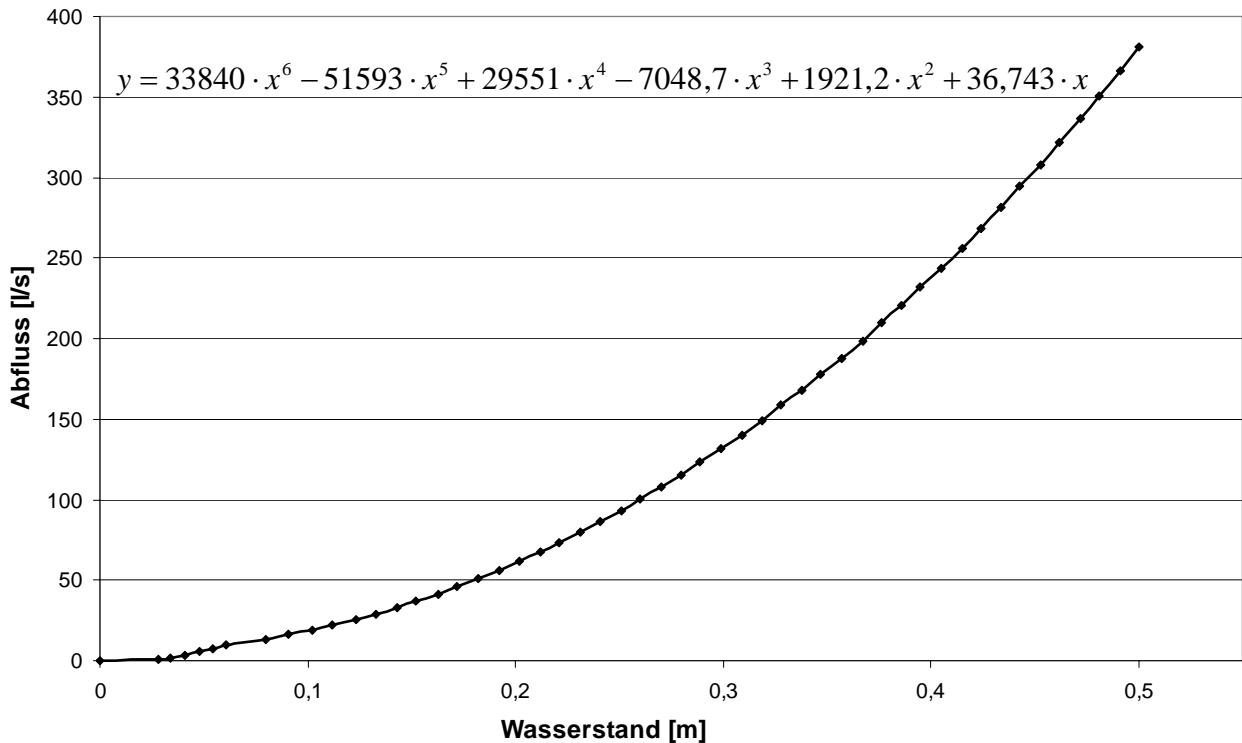


Abb. 61: Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Messstation P1

Ca. 60 m oberstrom der Grabenmündung in den Jungfernbach wurde die gleiche Messstechnik verwendet (Abb. 62).



Abb. 62: Pegelstation P2 und Niederschlagsmesser N1 ca. 60 m oberstrom der Grabenmündung in den Jungfernbach (Schlößer, 2007)

6.2.1.2 Messung von Dränageschüttungen

Aus den 60-er Jahren liegen Informationen über den Verlauf des Dränagenetzes als digitale Informationen in einer GIS-Datenbank vor. Das Domänengelände ist zu ca. 80 % dräniert. Informationen über ein Dränagenetz des übrigen Einzugsgebietes liegen nicht vor. Der überwiegende Teil der Sammler entwässert über den Endstrang direkt in den Jungfernbach. Die Flächen im näheren Umkreis des neuen Kuhstalls entwässern in den Graben, in dem das Venturi-Messgerinne (Pegel P2) eingebaut ist.

Der mit einem DN 500 verrohrte Abschnitt sammelt das Oberflächenwasser der weiter oberhalb gelegenen Flächen sowie das Quellwasser. Am Ende des verrohrten Abschnittes wurde der Pegel P3 installiert. An das Rohrende ist eine Blechblende in Dreiecksform, ähnlich einem Thomsonwehr, aufgesetzt. Das Betonrohr hat ein Gefälle von teilweise mehr als 5 %. Um die Fließgeschwindigkeiten im Rohr zu reduzieren, wurden am Ende des Betonrohrs raue Fußmatten und Borstenelemente, die auch für den Bau von Fischaufstiegsanlagen verwendet werden, auf die Betonrohrsohle aufgeschraubt.

Zunächst wurde hinter der Blechblende der Einbau einer Drucksonde vorgesehen. Eine Kalibrierung im Labor zeigte zuverlässige Messungen. Im Feldversuch sorgte jedoch unter anderem das Makrozoobenthos dafür, dass die Drucksonde keine brauchbaren Ergebnisse lieferte. Der Einfluss der Kleinstlebewesen auf die Druckmembran erzeugte zahlreiche Fehlmessungen, daher wurde auf einen Einsatz dieser Messmethodik verzichtet.

Es wurde die Wasserstandsmessung mittels eines Schwimmers gewählt. Der Wasserstand vor der Blende wird mittels des Prinzips der kommunizierenden Röhren in ein links neben dem Betonrohr angebrachtes Kunststoffrohr übertragen. Ein im Kunststoffrohr befindlicher Schwimmkörper, der über eine Drehscheibe mit einem Kontergewicht verbunden ist, gibt über die Lageänderung und der daraus resultierenden Drehbewegung den Wasserstand vor der Messblende an einen Datenlogger weiter (Abb. 63). Der Datenlogger zeichnet die Wasserstandsänderung im 5-Minutenintervall auf. In regelmäßigen Abständen wurden Kontrollmessungen mit Stoppuhr und einem Auffangbehälter durchgeführt und mit den aufgezeichneten Loggerwerten verglichen. Das Aufstellen einer Wasserstands-Abflussbeziehung ist nicht möglich, da gerade bei größeren Abflüssen die Messungenauigkeiten der Kontrollmessungen zu groß sind.



Abb. 63: Pegelstation P3

Im betrachteten Grabenabschnitt entwässert das Dränagenetz unterhalb der Messstation P2 mit einem Sammler, oberhalb mit drei Sammlern in Fließrichtung rechts und mit einem Sammler in Fließrichtung links. Die Dränageschüttungen wurden ebenfalls stichprobenartig gemessen. Betrachtet man die gemessenen Abflüsse der Pegel P2 und P3 ist davon auszugehen, dass die Abflussdifferenz, außer im Niederschlagsereignis, lediglich aus Dränagewasser der umliegenden dränierten Flächen besteht. Eine einfache Differenzbildung ist aufgrund der beschriebenen Methodik nicht möglich, dennoch besteht die Möglichkeit trotz der Messungenauigkeiten der Abflüsse am Pegel P3 wenigstens qualitativ zu beurteilen wie sich die Dränagewirkung im Niederschlagsereignis ändert, wie gut oder schlecht die Flächen entwässern und ob ein zeitlicher Nachlauf der Dränagen besteht.

6.2.2 Niederschlagsmessungen

Direkt neben der Pegelstation P2 (Abb. 62) misst ein Niederschlagsmesser der Serie Ott Pluvio die Niederschlagsmenge und –intensität (N1). Das Gerät arbeitet nach dem Wägeprinzip, das heißt, der Niederschlag wird in einem Auffangbehälter gesammelt und das Gewicht in Gramm sowie die Niederschlagsmenge in Millimeter aufgezeichnet. Die Entleerung des Auffangbehälters erfolgt automatisch. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität und Stromspeisung über Batterie werden die Daten nach jeweils drei Wochen ausgelesen. Über eine optische oder serielle Schnittstelle kann der Datensammler vor Ort mittels Notebook ausgelesen bzw. parametriert werden. Das Gewicht wird im 10-Minutenintervall bestimmt. Über die Gewichtsänderung kann gleichzeitig eine Aussage über die Verdunstungsverluste getroffen werden. Die Aufzeichnung der Niederschläge in Millimeter erfolgt minütlich. Die gemessenen Niederschläge wurden mit der ca. 600 m entfernten Klimastation K1 verglichen. Etwaige Fehlmessungen bzw. Datenverluste in der Messreihe wurden mit Hilfe dieser Daten korrigiert. Während der Messphase erwies sich der verwendete Niederschlagsmesser als sehr zuverlässig, sodass keine größeren Datenverluste auftraten.

6.2.3 Klimamessungen

Relevante Klimadaten für das Untersuchungsgebiet liefert eine ca. 600 m nördlich des Niederschlagsmessers (N1) gelegene Klimastation (K1). Die Klimastation der Firma Theodor Friedrichs & Co enthält eine Temperaturmesseinrichtung in Strahlungshütte und eine kombinierte Messeinrichtung zur Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsbestimmung (Abb. 64). Zusätzlich wird der Niederschlag und die relative Luftfeuchte im 5 Minutenintervall aufgezeichnet.

Bei Datenverlust wurde auf die Messdaten der Wetterstation Kassel-Nord (Rechtswert: 3533600, Hochwert: 5689600) zurückgegriffen. Nach einem Gutachten des DWD (2005a) sind die Beobachtungs- und Messdaten (außer Windmessungen) der etwa 8 km entfernt gelegenen Wetterstation Kassel ausreichend repräsentativ.



Abb. 64: Klimastation (K1) in Frankenhausen (Schlößer, 2007)

6.3 Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM 3.3.1

Für die Untersuchung der Fragestellungen wurde das Modell NASIM (Version 3.3.1) verwendet. NASIM (**N**iederschlag-**A**bfluss-**SIM**ulation) erlaubt die Simulation von Abflüssen sowohl aus natürlichen als auch städtischen Einzugsgebieten. Das Programm repräsentiert den Typ des deterministischen, detaillierten, nicht linearen hydrologischen Modells. Im Gegensatz zu den probabilistischen Modellen ist NASIM zufallsunabhängig.

Dabei wird es durch folgende Merkmale charakterisiert:

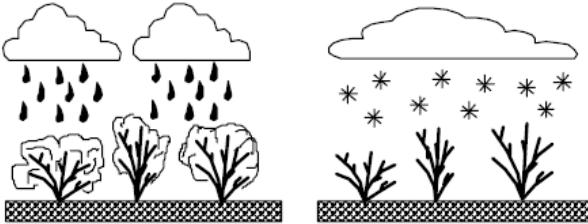
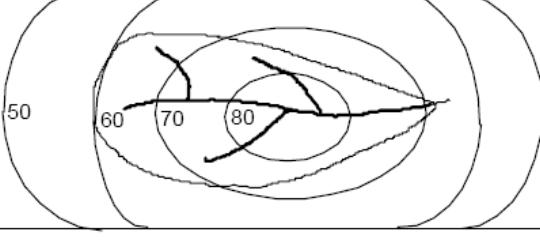
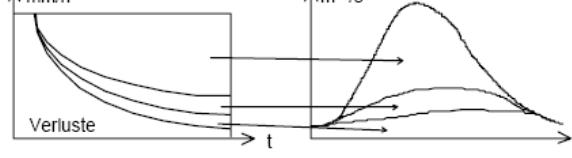
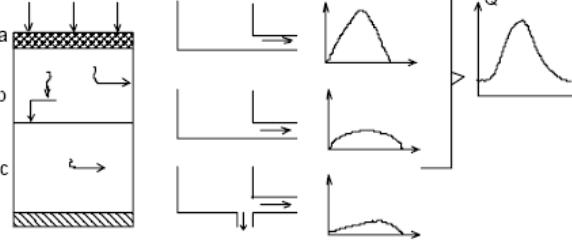
- kontinuierliche Simulation der vollständigen Wasserbilanz über beliebig lange Zeiträume auch mit hoher zeitlicher Auflösung (bis zur Mikroskala),
- Abbildung wesentlicher physikalischer Prozesse der Speicherung und Wasserbewegung, z.B. Bodenfeuchte, Schnee, Grundwasser und Gewässer,
- Berücksichtigung physikalischer Parameter für Flächennutzung und Bodentypen unter Verwendung allgemein verfügbarer Daten,
- Berücksichtigung von Elementarflächen und Böden mit mehreren Bodenschichten,
- Gebietsniederschlagsmodell,
- Berücksichtigung von Fruchtfolgen,
- Simulation urbaner Abflüsse unter Berücksichtigung hydraulisch wirkender Elemente eines Kanalnetzes.

NASIM wird dabei u.a. auf folgenden Gebieten eingesetzt:

- flächendetaillierte wasserwirtschaftliche Grundlagen in beliebiger zeitlicher Auflösung (Zeitreihen, extreme Jahre, Dauerlinien, Überflutungsdauer,...),
- flächendeckende Kalibrierung der Abflussbilanzgrößen,
- Szenarien für Klima und Systemzustände,
- Simulation möglicher Szenarien der Flächennutzung und Bewirtschaftung,
- Simulation der vollständigen Wasserbilanz unter Berücksichtigung von Bodenkennwerten, Flächennutzung, Versiegelung, Flurabstand, Interzeption, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Interflow, Infiltration, Exfiltration, Leakage und Basisabfluss für beliebige Flächengrößen,
- Ermittlung maßgeblicher Niedrigwasserperioden für die Gewässergüte,

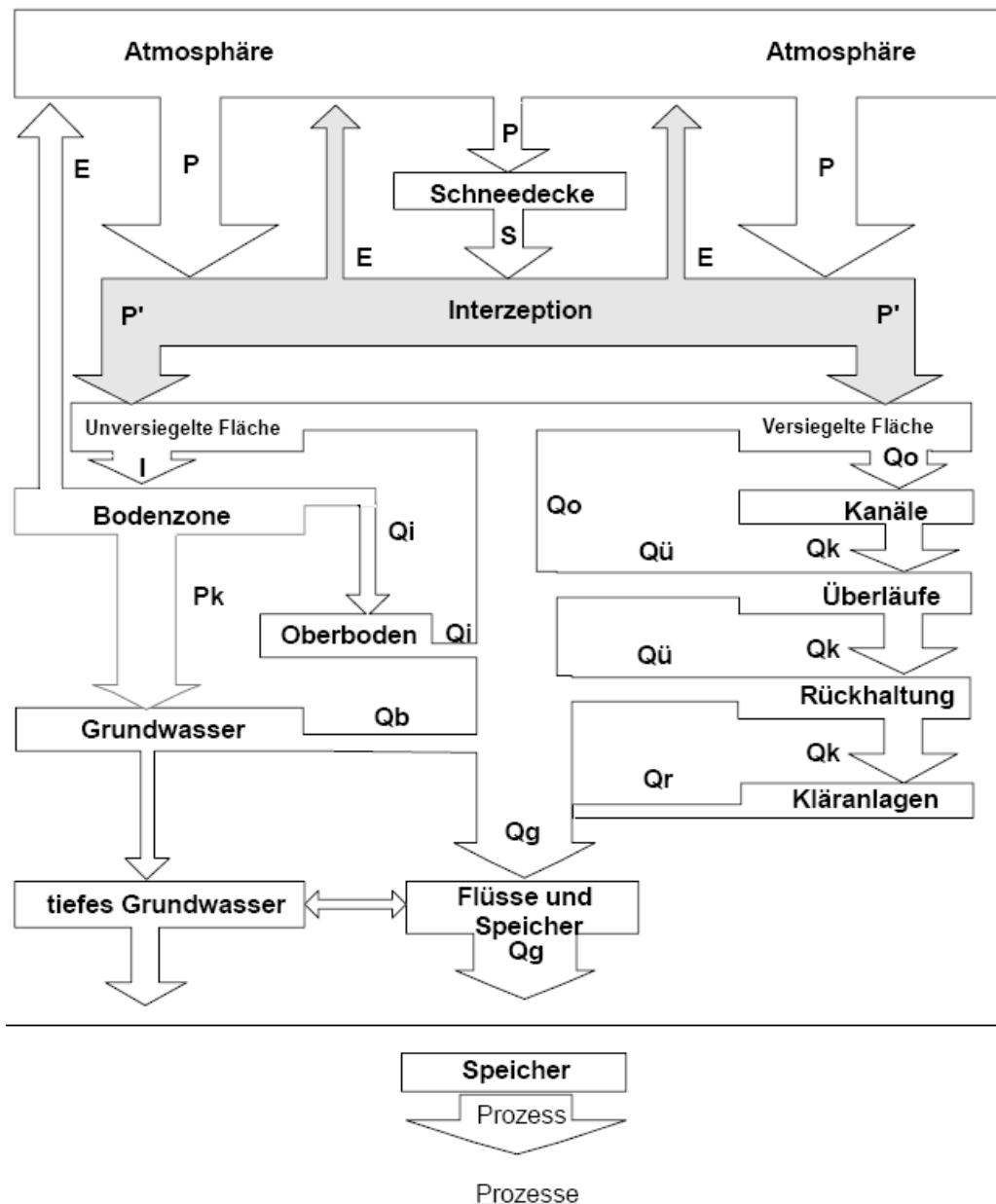
- Echtzeitsteuerung von Hochwasserschutzsystemen und Aufbau von Warnsystemen,
- Wasserhaushalt des Gewässer-Vorland-Systems (Auenwälder, Altarme ...),
- Bemessung und Überprüfung von Hochwasserschutzmaßnahmen, Optimierung der Betriebsregeln und Beckensteuerung (Hydrotec, 2004).

Die wesentlichen Modellalgorithmen in NASIM zeigen die folgenden Abbildungen und Tabellen. NASIM bildet die wesentlichen Elemente (Tab. 29) des hydrologischen Kreislaufs ab und ermöglicht so die Simulation der geschlossenen Wasserbilanz.

Belastungs- bildung	Bildung der Belastung aus Regen oder Schneeschmelze	
Belastungs- verteilung	Berechnung des Gebietsniederschlags	
Belastungs- aufteilung	Aufteilung der Belastung in Versickerung, Verdunstung und Abflussanteile	
Abfluss- konzentration	Transport und Verzögerung der Abflussanteile	
Translation der Welle	Verformung der Abflusswelle durch Gerinneretention	

Tab. 29: Untergliederung des hydrologischen Kreislaufs in NASIM (Hydrotec, 2004)

Die Speicher- und Transportvorgänge sind in ihrem Ablauf in Abb. 65 dargestellt.



P : Gesamtniederschlag
 S : Schneeschmelze
 I : Infiltration
 Q_i : Interflow
 P_k : Perkolation
 Q_b : Basisabfluss
 Q_g : Gerinneabfluss

P' : Nettoniederschlag
 E : Evapotranspiration
 Q_o : Oberflächenabfluss
 $Q_{ü}$: Überlaufabfluss
 Q_k : Kanalabfluss
 Q_r : Gereinigter Abfluss

Abb. 65: Speicher- und Transportvorgänge in NASIM (Hydrotec, 2004)

Zur Berechnung der instationären Hochwasserwellenabläufe in offenen Gerinnen nutzt NASIM das hydrologische Verfahren nach Kalinin-Miljukov. Der Grundgedanke des Verfahrens besteht darin, eine eindeutige Beziehung zwischen dem Abfluss und dem zugehörigen Wasservolumen für rechnerisch festzulegende Gerinneabschnitte zu finden. Demnach ist ein bestimmter Gerinneabschnitt mit der Länge L zu finden, in dem ein linearer Verlauf der Wasserspiegellage angenommen werden kann (Hydrotec, 2004).

6.3.1 Erstellung des NA-Modells

NASIM verfügt über verschiedene Schnittstellen, an denen mittels Sekundärsoftware maßgebliche Daten übergeben werden können.

Zu Beginn erfolgt der Modellaufbau (Preprocessing). Die Datenaufbereitung und Visualisierung von Eingangsdaten und Ergebnissen erfolgt mit einem geografischen Informationssystem (ArcView).

Dieser Schritt beinhaltet (Abb. 66):

- die Einteilung des Gesamtgebietes in Teileinzugsgebiete,
- die Aufbereitung der Bodenarten, Bodendaten und Landnutzungen sowie die Zuweisung zu den entsprechenden Teileinzugsgebieten und die Erzeugung der Zeitflächenfunktion.

Dazu existieren spezielle Erweiterungen, die das Preprocessing mit ArcView unterstützen.

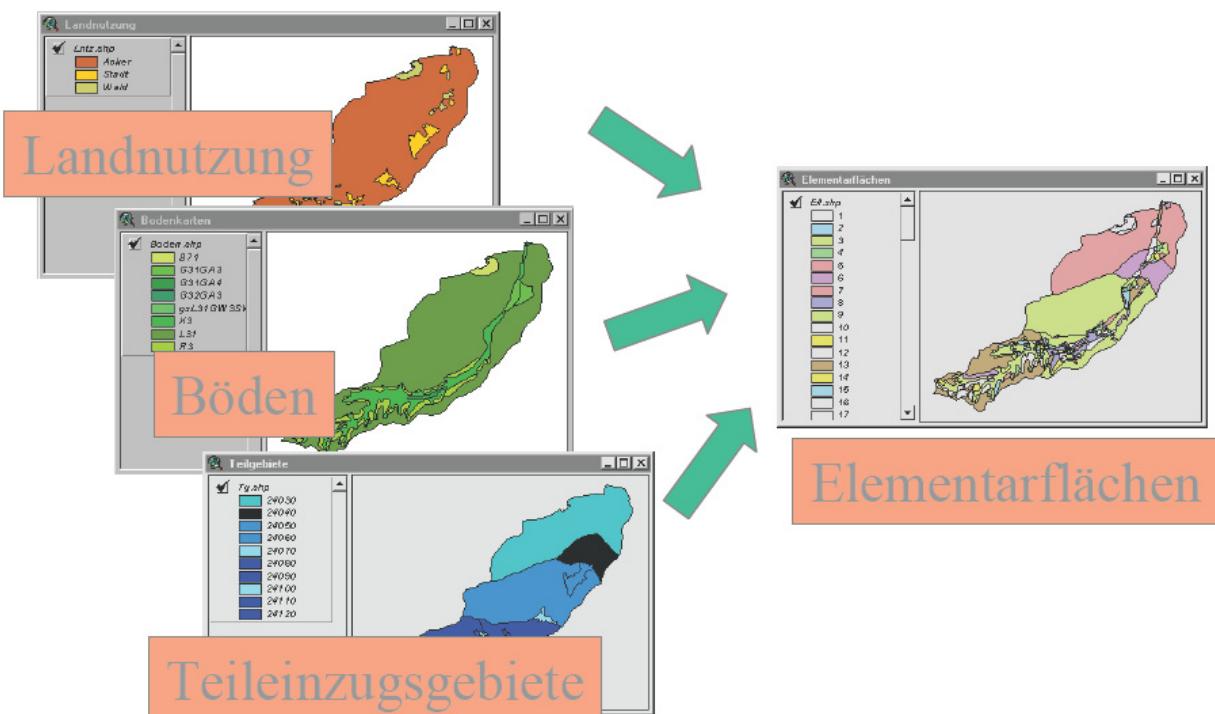


Abb. 66: Input-Daten aus thematischen Karten (Bornebusch, 2006)

Die Informationen in ArcView stehen in Form von Tabellen zur Verfügung. Diese Attribut-Tabellen können Verweise auf Tabellen außerhalb des GIS enthalten und bilden eine Schnittstelle zu NASIM.

Dabei handelt es sich um die folgenden Tabellen:

- Tabelle **TG**: Teileinzugsgebietsdaten (Höhe, Referenzpunkt, ...),
- Tabelle **Lntztyp**: Nutzungsdaten (Art der Nutzung, Durchwurzelungstiefe, Interzeptionsspeicher),
- Tabelle **Boart**: Bodenarten (Bodenartkennwerte),
- Tabelle **Bodentyp**: Bodendaten (Schichtaufbau, Schichtdicken, Bodenart jeder Schicht),
- Tabelle **EFL**: Elementarflächendaten (sind das Produkt der Verschneidung von Boden- sowie Nutzungs- und Einzugsgebietspolygonen).

Die benötigten Zeitreihen werden aus verfügbaren Messdaten wie Niederschlägen, Pegel-daten und Klimadaten mit Hilfe der Software TimeView erzeugt und an NASIM übergeben. Abb. 67 zeigt, welche Beziehungen und Verknüpfungen zwischen den verwendeten Pro-grammen bestehen.

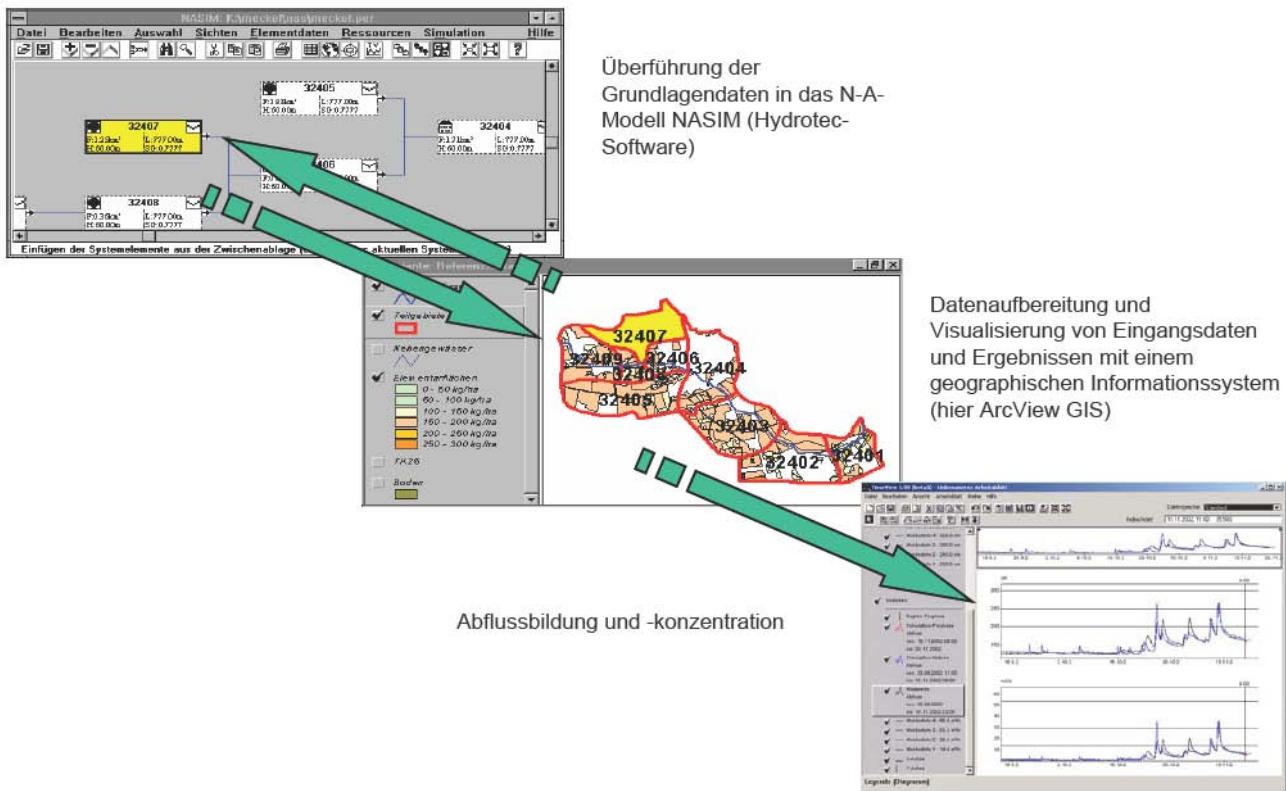


Abb. 67: Schnittstellen und Datenübergabe in NASIM (Bornebusch, 2006)

Als Modelloutput liefert NASIM für die im Modell festgelegten Systemelemente (Teilgebiete des Einzugsgebietes) bzw. Gewässerabschnitte u.a. die folgenden Datenoutputs:

- Abflussganglinien der Systemelemente,
- Spitzenabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten,
- Parameter des Wasserhaushalts der betrachteten Teileinzugsgebiete.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt im dbf-Format. Ein sich anschließendes Postproces-sing erfolgt mit diesen Datensätzen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte des Modellaufbaus beschrie-ben.

6.3.1.1 Topografie

Zur Abbildung der Topografie liegt ein digitales Höhenmodell mit einer Rasterweite von 40 m vor. Mittels tachymetrischer Geländeaufnahmen wurden die für das Gewässer repräsentativen Querprofile aufgemessen und in NASIM als Transportelemente berücksichtigt. Durch unterschiedliche k_s -Werte wurde die Rauheit in Abhängigkeit des Bewuchses für Gerinne und Vorländer berücksichtigt.

6.3.1.2 Abgrenzung der Teilgebiete

Ein betrachtetes Einzugsgebiet ist weiter zu unterteilen, wenn detailliertere Untersuchungen zum Oberflächenabflussverhalten geplant sind. Durch die Unterteilung eines Flussgebiets in Teilflächen wird versucht, die besonderen Flächeneigenschaften zu berücksichtigen. Teilflächen sind die kleinsten Elemente in einem Flussgebietsmodell. Die mittlere Größe ist abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung. Für jede Teilfläche und für jeden Zeitschritt wird mittels hydrologischer Verfahren aus Niederschlägen der Abfluss am Teilflächenauslass berechnet und auf die Folgeflächen übertragen. An Kontrollpunkten kann die Abflussganglinie ausgegeben werden. Dabei sind Punkte interessant, an denen sich der Gerinneabfluss infolge von Einleitungen ändert. Gemeint sind damit nicht nur Einleitungen aus urbanen Systemen, sondern auch von natürlichen Flächen. Kriterien zur Abgrenzung von Teilgebieten sind Gebietseigenschaften wie Topografie (Wasserscheiden), Flächennutzungen, Zuflüsse, Einleitungen, Kontrollquerschnitte (Pegel), Gerinnegeometrien und die Lage von Speichern.

Aus diesen Kriterien ergeben sich im Untersuchungsgebiet 7 Teilgebiete (Abb. 68).

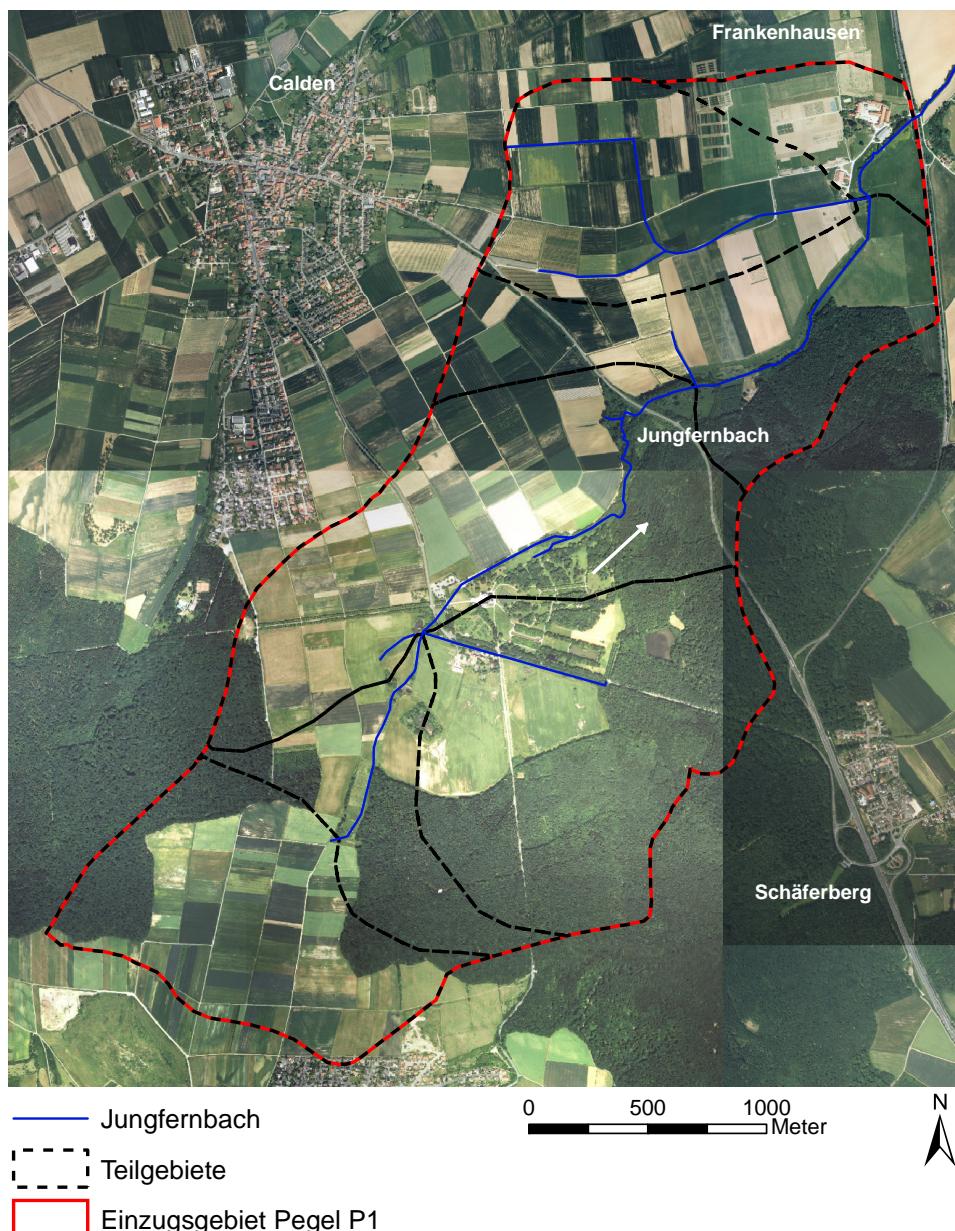


Abb. 68: Festgelegte Teilgebiete im Untersuchungsgebiet

6.3.1.3 Klimadaten

Zur Modellkalibrierung wurden die tatsächlich gemessenen Niederschläge des Untersuchungszeitraumes aufbereitet und geprüft. Die Niederschlagsdaten wurden im Minutenintervall aufgezeichnet. Die Zeitreihe wird in Form einer Summenlinie in Nasim eingelesen.

Für das NASIM-Modell wird eine Verdunstungsreihe als Input-Datei benötigt. Die potenzielle Evapotranspiration kann je nach Verfügbarkeit der notwendigen Eingangsdaten mit verschiedenen Verfahren ermittelt werden. Mit Hilfe der Haude-Formel kann die Verdunstung relativ einfach berechnet werden. Die Haude-Formel hat den Vorteil, dass lediglich die Messwerte von Luftfeuchte und Temperatur (für 14³⁰ Uhr) erforderlich sind. Ihre Anwendung findet die Haude-Formel für die hiesigen Klimaverhältnisse bis zu einer Verdunstung von 7 mm/d.

Die Haude-Faktoren differieren je nach Autor. Zugrundegelegt wurden hier die Angaben des DVWK (1996) (Tab. 30).

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
f _{Haude}	0,22	0,22	0,22	0,29	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22

Tab. 30: Haude-Faktoren zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration von niedrigem Gras (DVWK, 1996)

Die potenzielle Evapotranspiration berechnet sich mit der Formel:

$$ETP_{Haude} = f \cdot (e_s(T) - e)_{14} \leq 7 \text{ mm/d} \quad \text{Gl. 3}$$

mit:

f: Haude-Faktoren für Monate in mm/(hPa·d)

(e_s(T)-e)₁₄: Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf in hPa um 14³⁰-Uhr MEZ

Die Berechnung des Sättigungsdampfdruckes e_s(T) erfolgt nach der Magnus-Formel.

$$e_s(T) = 6,11 \cdot e^{\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T} \right)} \quad \text{Gl. 4}$$

Bei negativen Temperaturen ist der Sättigungsdampfdruck über Eis:

$$e_s(T) = 6,11 \cdot e^{\left(\frac{22,64 \cdot T}{272,62 + T} \right)} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Haude-Formel wurde für die Berechnung der potenziellen Verdunstung von Gras entwickelt. Somit ist es wichtig, die Wahl der Verdunstungskoeffizienten der Vegetation in Abhängigkeit von Gras zu treffen. Eine Grasfläche besitzt einen Verdunstungsfaktor von 1. Die Verdunstung nach Haude wird daher mit den Haude-Faktoren berechnet und anschließend mit den jeweiligen Bestandskoeffizienten k_c als Korrekturfaktoren für Vegetation, Boden, Hangneigung und Exposition modifiziert. Die Literatur gibt verschiedene Werte an. Im betrachteten Modellgebiet wird unterschieden in Ackerland (überwiegend Getreide), Wald (überwiegend Laubwald), Grünland und versiegelte Flächen. Für diese Flächennutzungen hat Gödeke (2007) Mittelwerte für die Bestandskoeffizienten aus den unterschiedlichen Literaturquellen abgeleitet. Die Bestandskoeffizienten können monatlich unterschiedlich sein, da sie abhängig sind vom Wachstumsstadium der Pflanzen. Für Getreide und Hackfrüchte existieren jeweilige Monatswerte, nicht jedoch für Wald- und versiegelte Flächen.

Flächennutzung	Bestandskoeffizient k_c
Ackerland außerhalb der Domäne	0,94
Gemüse	1,00
Kartoffeln	1,00
Kleegras	1,00
Raps	0,94
Sommergetreide	1,03
Wintergetreide	0,94
Versuchsflächen	1,00
versiegelte Fläche	0,60
Wald	1,37
Wiese	1,00

Tab. 31: Bestandskoeffizienten k_c zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration (Gödeke, 2007)

Daher wurden die ermittelten Verdunstungen jeweils mit einem konstanten Bestandskoeffizienten modifiziert (Tab. 31). Die Bestandskoeffizienten werden für die Kalibrierung im Modell für die verschiedenen Flächennutzungen berücksichtigt.

Die mit Haude berechneten Verdunstungswerte wurden mit der Gewichtszeitreihe des Niederschlagsschreibers (N1) verglichen. Es zeigten sich gute Übereinstimmungen, womit die Anwendung des Verfahrens bestätigt wird.

6.3.1.4 Landnutzung

Informationen über die Landnutzung im betrachteten Untersuchungsgebiet wurden den ATKIS Daten als Grobinformation sowie den Schlagkarten der Domäne Frankenhausen aus den Jahren 2005 bis 2007 als Detaillinformation entnommen. Die Schlagkarten geben Auskunft über den Bewuchs einzelner Flurstücke. Zu berücksichtigen ist, dass nach der Ernte die Nutzung bzw. Vegetation auf der jeweiligen Fläche üblicherweise wechselt. Im Modell kann dies mit Berücksichtigung des Fruchfolgewechsels abgebildet werden. Erschwert wird die Abbildung jedoch, wenn sich gleichzeitig auch die Flächengrenzen ändern. In diesem Fall müsste theoretisch für jeden Vegetationszustand ein neues NAModell erstellt werden. Die Schlagkarten der Jahre 2006 und 2007 sind in ihrer Flächenaufteilung sehr ähnlich und trotz wechselnder Vegetation auf einzelnen Flächen sind die Pflanzenbestände vergleichbar in den Eigenschaften, die im Modell berücksichtigt werden können. Daraus ergibt sich eine repräsentative Flächennutzung vor allem für die Jahre 2006 und 2007 für den Kalibrierungszeitraum. Da die Abfluss- und Niederschlagsmessstationen die größten Ereignisse in 2007 aufgezeichnet haben, wird die Flächennutzung aus 2007 für die Kalibrierung verwendet.

Die Informationen aus ATKIS-Daten und Schlagkarten wurden zusammengefügt und ergeben die nachfolgende Landnutzungskarte (Abb. 69). Eine detaillierte Berücksichtigung der Flächennutzung und Kulturen konnte auf dem Domänengelände erfolgen. Für die außerhalb der Domäne im Untersuchungsgebiet liegenden Flächen kann aus den ATKIS-Daten lediglich Wald, Acker und Grünland unterschieden werden. Für Ackerlandflächen wurde hierbei nach einer Ortsbegehung von Wintergetreide als übliche Frucht ausgegangen.

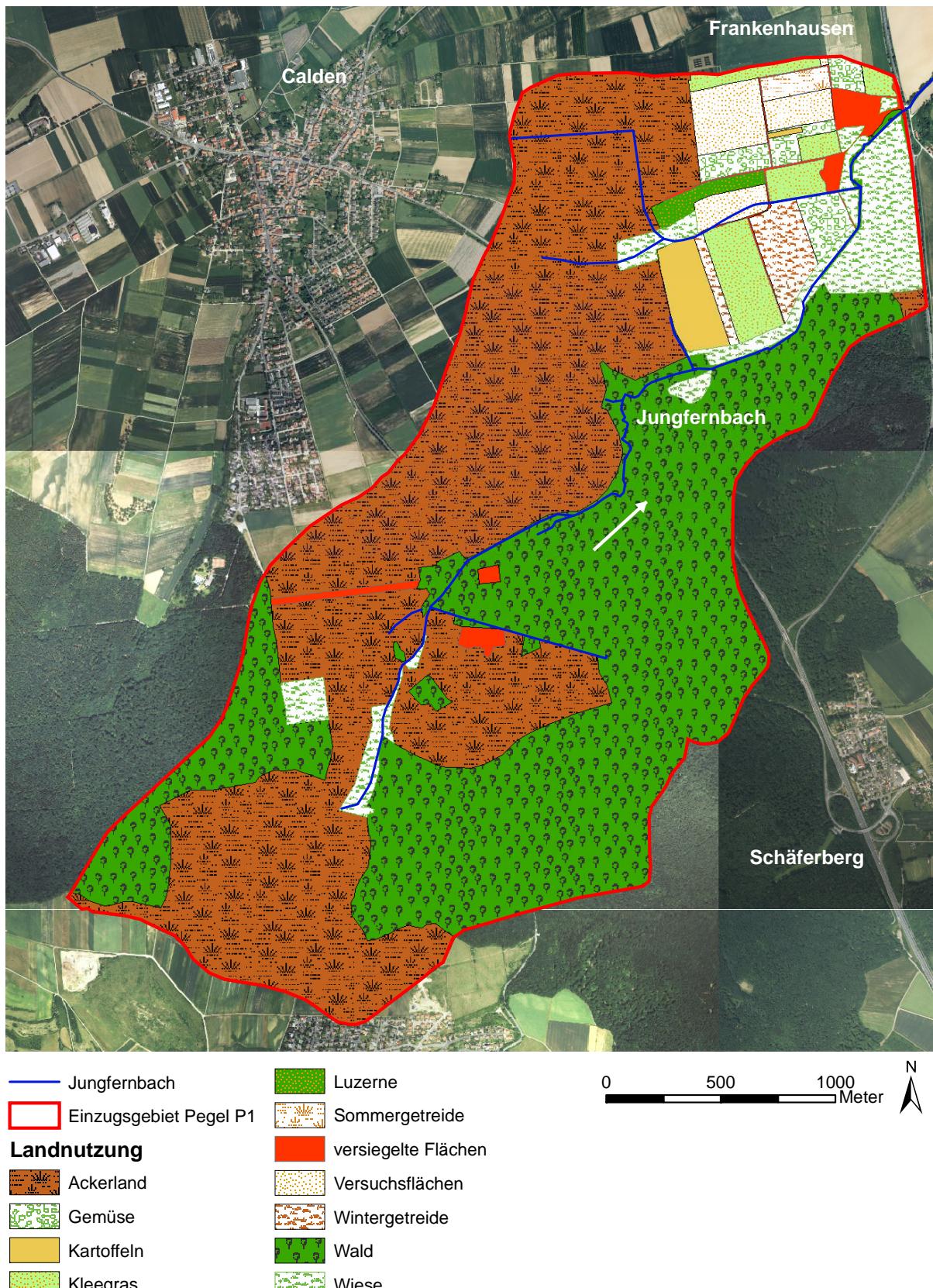


Abb. 69: Landnutzung im Untersuchungsgebiet

Berücksichtigt wurden Jahresgänge für die Durchwurzelungstiefe der Vegetation sowie die schwankende Interzeption (Hoyningen-Huene, 1983; Brechtel, 1984; Baumgartner et al., 1996; UBA, 2001; Hydrotec, 2004).

6.3.1.5 Bodenarten

Für das NA-Modell ist zu berücksichtigen, welche Bodenschichten für das Verhalten der Bodenmatrix maßgebend sind. Grundlage für Informationen ist die digitale Bodenkarte von Hessen im Maßstab 1:50.000. Verifiziert wurden diese Daten unter Zuhilfenahme von dokumentierten Bodenprofilen (G10/2, G10/3 und G10/4 Brandt et al., 2004). Die Lage der Bodenprofile ist in Abb. 70 dokumentiert.

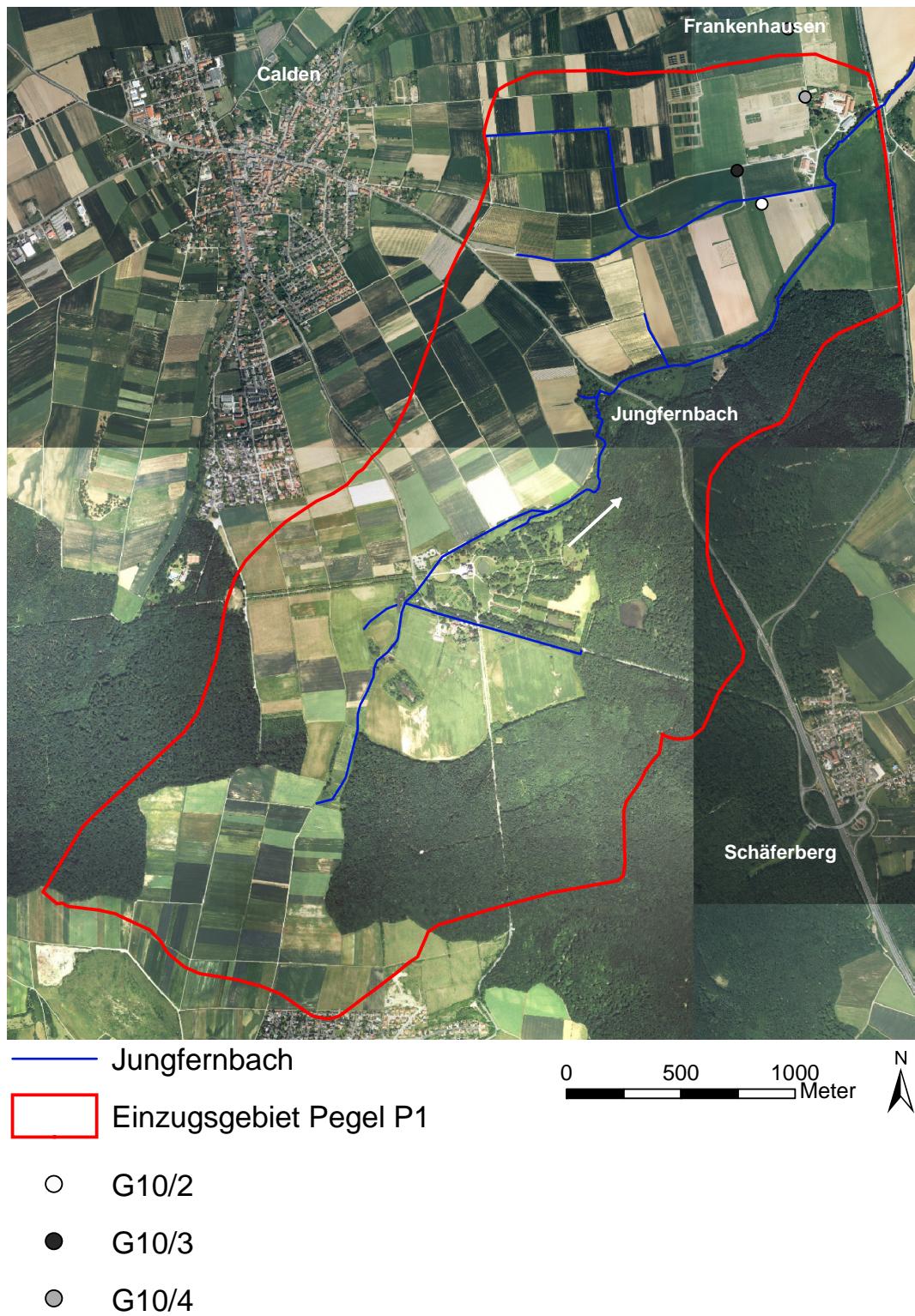


Abb. 70: Lage der Bodenprofile im Untersuchungsgebiet

Neben den Bodenprofilen wurden im 50 m Raster Bohrlochkartierungen auf den Schlägen der Domäne durchgeführt. Daraus ergibt sich für die Domänenfläche ein hochauflöstes Bodeninformationsnetz (Abb. 71).

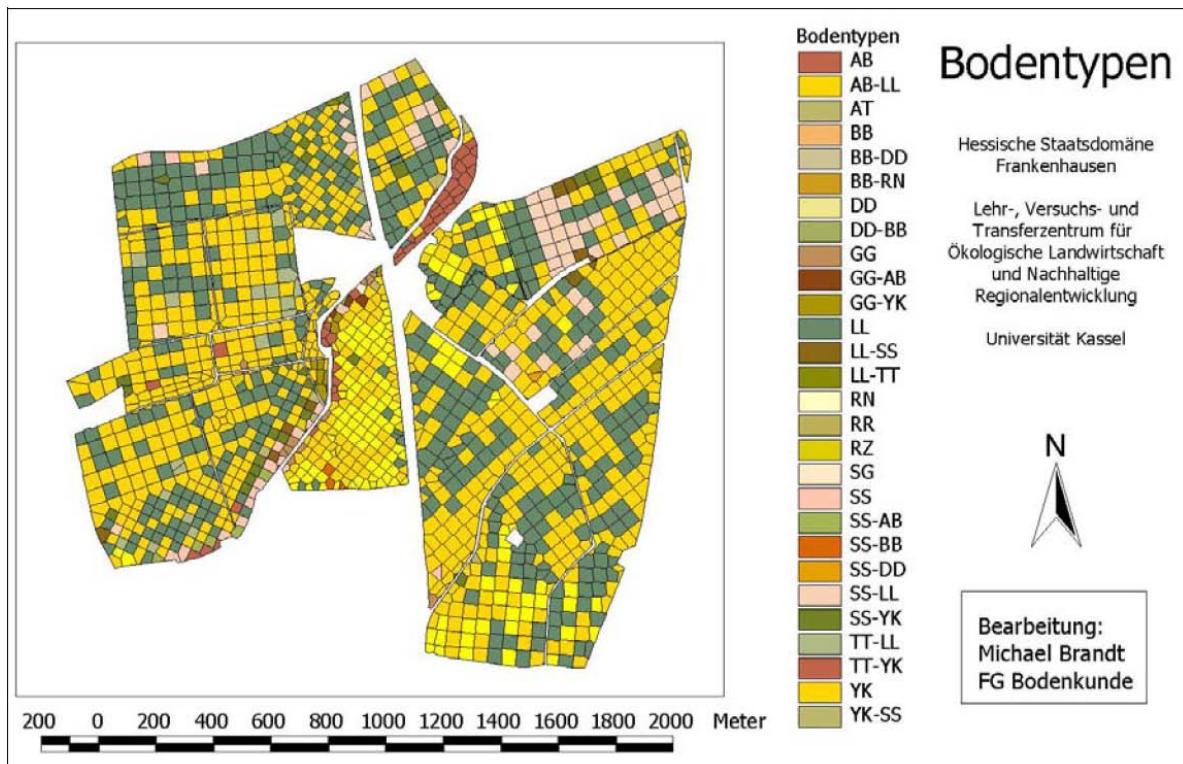


Abb. 71: Bodentypen der Staatsdomäne Frankenhausen auf Grundlage der 50 m Rasterkartierung (Brandt et al., 2002)

Diese Informationen können im Modell nicht derartig hochauflöst abgebildet werden. Für jedes betrachtete Teileinzugsgebiet müssen repräsentative Bodenwerte verwendet werden. Somit wurden die Informationen über die Bodenmatrix aus den exemplarischen Bodenprofilen, der digitalen Bodenkarte und einem hydrologischen Modell, das im Vorfeld des Hochwasseraktionsplanes für das Diemeleinzugsgebiet durch das Büro Hydrotec (2003) erstellt wurde, entnommen.

NASIM verfügt über eine Datenbank, in der die charakteristischen Werte für verschiedene Böden abgelegt sind. Diese Werte wurden auf Plausibilität überprüft (DVWK, 1982) und im Bereich der gemessenen Bodenprofile G10/2, G10/3 und G10/4 ergänzt. Im Modell wurde der oberste Meter des Bodenkörpers abgebildet. Die Bodeneigenschaften variieren in dieser Schicht nur gering.

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 72) zeigt die angenommenen Bodenarten im untersuchten Gebiet. Im Bereich der bewirtschafteten Domänenflurstücke wurde eine feinere Einteilung vorgenommen. Hintergrund ist die Abbildung im Modell bzw. die Zuordnung zu verschiedenen Landnutzungen. Dazu wurden in diesem Bereich verschiedene Böden definiert. Im Modell können diese später wieder zusammengefasst werden bzw. besteht die Möglichkeit, Bodeneigenschaften flurstücksbezogen zu ändern. Dazu müssen jedoch die Flächen verschieden benannt werden.

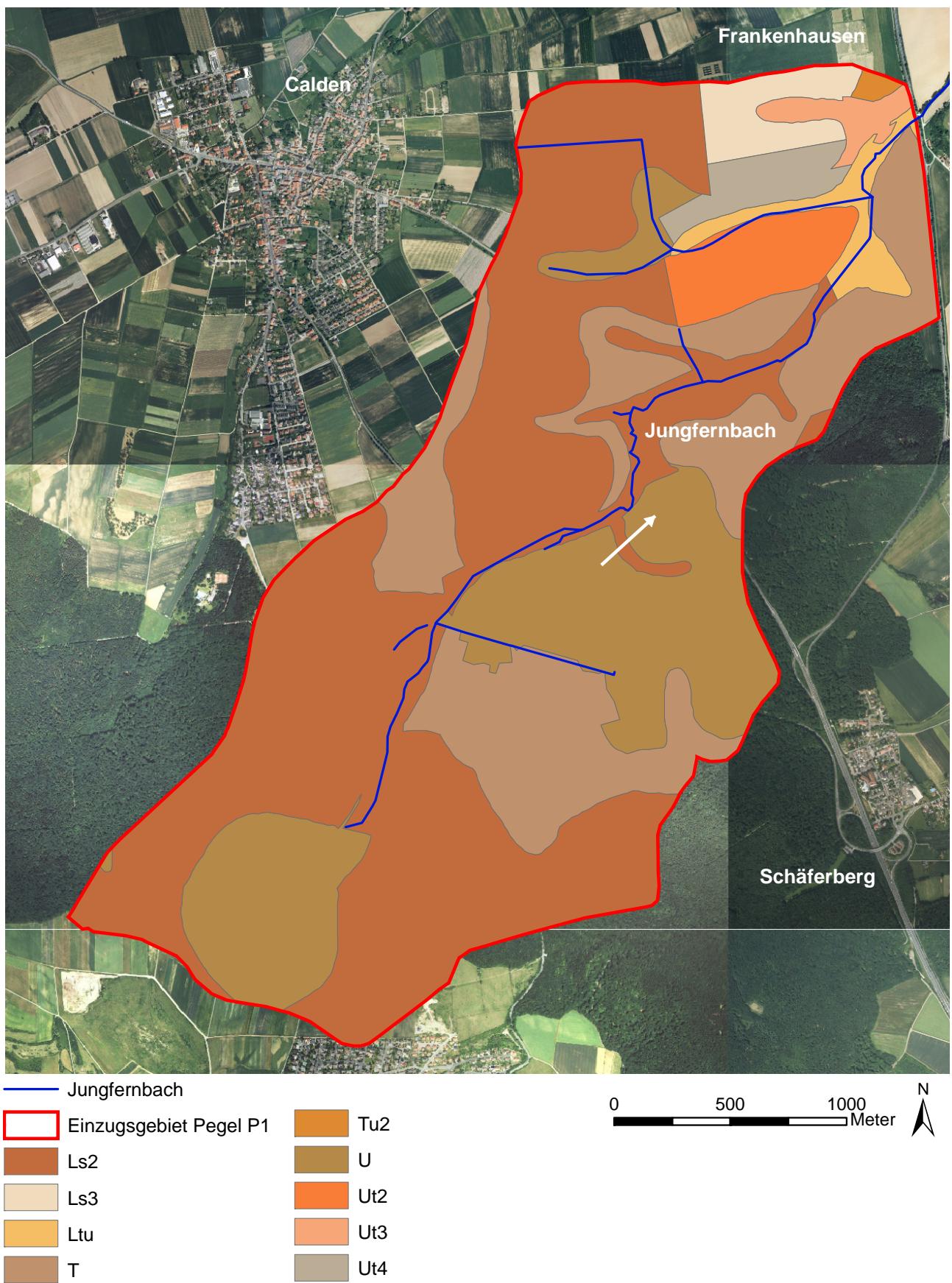


Abb. 72: Im Modell definierte Bodenarten im Untersuchungsgebiet

6.3.1.6 Zeitflächenfunktion

Die Zeitflächenfunktion beschreibt die Translation einer Welle auf der Oberfläche, das heißt die Verlagerung einer Welle in der Zeit ohne Retention. Die Funktion gibt für jeden Zeitpunkt wieder wie groß die Fläche ist, die zum Oberflächenabfluss dieses Zeitpunkts bezogen auf den Gebietsauslass beiträgt. Mit der Konzentrationszeit bezeichnet man die Zeit, die benötigt wird, um das gesamte Einzugsgebiet zu entwässern. Die Zeitflächenfunktion ist abhängig von Gebietsgröße und -form, Gefälle, Rauigkeit der Oberfläche, Dichte des Gewässernetzes und der Fließtiefe. Mit einer Erweiterung von ArcView kann die Zeitflächenfunktion für das Untersuchungsgebiet ermittelt werden. Dabei werden Fließwege und Fließzeiten für alle Teileinzugsgebiete mit Hilfe eines digitalen Höhenrasters berechnet. Die berechnete Funktion wird in NASIM implementiert.

6.3.2 Kalibrierung

Mittels eines Programmtools werden die Informationen über das Untersuchungsgebiet in sogenannten Elementarflächen zusammengeführt. Die zum Elementarflächen-Shapefile gehörende Attributabelle wird als Eingabedatei für die Modellerstellung in NASIM genutzt. Sie enthält für jede gebildete Elementarfläche Einträge über den Boden, das zugehörige Teilgebiet und die Landnutzung. Für das Untersuchungsgebiet wurden für die 7 Teilgebiete insgesamt 103 Elementarflächen mit Größen zwischen 340 m² und 78 ha erzeugt.

Nach dem Import der GIS-Daten in NASIM werden die Teilgebiete im Systemplan, dem NASIM Editor, miteinander verknüpft und Angaben zur Hydraulik und Geometrie der Vorfluter editiert. Neben Sohlgefälle und Länge des Vorfluters im jeweiligen Teilgebiet werden die Abmessungen der repräsentativen Gerinnequerprofile eingegeben und visualisiert. Für die Simulationsläufe werden das Hauptgewässer, das Nebengewässer sowie die Oberlieger festgelegt.

Als Ergebnis erhält man das vollständig aufgebaute Niederschlag-Abfluss-Modell des Untersuchungsgebietes mit flächenhaften Informationen zu Böden und Landnutzung sowie linienhaften Informationen zu den Gerinnen. Die entstandene Baumstruktur zeigt den Aufbau des Entwässerungssystems mit der Benennung der einzelnen Teilgebiete sowie den Pegel am Gebietsauslass (Abb. 73).

Im Modell wurde ohne tiefen Grundwasserspeicher gerechnet. Aus den digitalen Bodenflächendaten (Hlug, 2002; Blatt 4522 und 4722) von Hessen geht hervor, dass es sich im Untersuchungsgebiet nicht um Standorte mit potenziell starkem Grundwasserfluss handelt. Überwiegend wird der Standort mit einem hohen Wasserspeichervermögen charakterisiert.

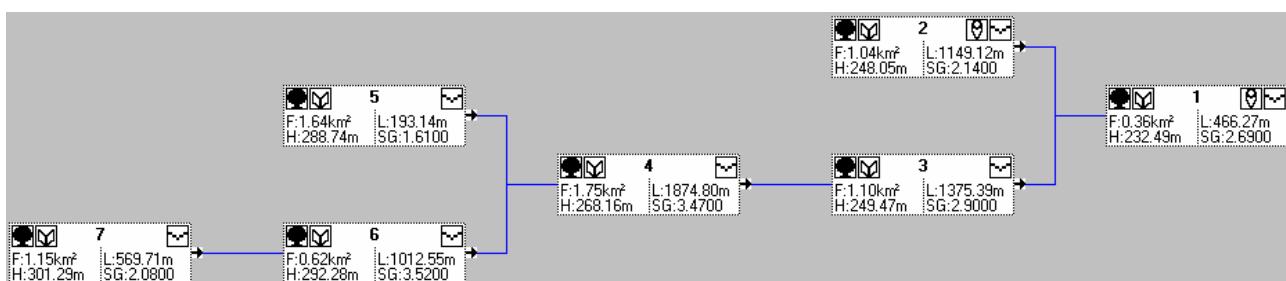


Abb. 73: NASIM-Systemplan mit den zugehörigen Teilgebieten des Untersuchungsgebietes

Die Niederschlagsmessreihe umfasst den Zeitraum vom 31.05.2005, 14⁵⁰ Uhr, bis zum 29.06.2007, 10¹⁰ Uhr. Für den aufgezeichneten Zeitraum betrug die an der Niederschlagsstation (N1) gemessene Niederschlagssumme 1555,90 mm.

Gottardi et al. (2003) geben für Frankenhausen mittlere jährliche Niederschlagssummen von 650 mm an. Das Jahr 2006, mit lediglich ca. 540 mm Jahresniederschlag, zeichnete sich als trockenes Jahr aus. 2005 lag ebenfalls unter dem mittleren Jahresschnitt. In 2007 lag der Jahresniederschlag mit ca. 680 mm leicht über den mittleren Niederschlagsmengen.

Das Modell wurde an Niederschlagsereignissen aus dem Jahr 2007 kalibriert, da auch in diesem Jahr die Abflussmaxima durch die Pegel aufgezeichnet wurden. Die aufgezeichneten Niederschlagsereignisse wurden nach den Empfehlungen des DWD (2005) ausgewertet. Starkniederschlagshöhen werden dabei für drei Bereiche von Dauerstufen unterschieden. Der Dauerstufenzonenbereich 1 ist der Kurzzeitbereich. Er berücksichtigt die Dauerstufen von 5 Minuten bis einschließlich 60 Minuten. Stufe 2 berücksichtigt Niederschlagsereignisse mit Dauerstufen zwischen 60 und 720 Minuten und Stufe 3 alle Ereignisse mit einer Niederschlagsdauer von über 720 Minuten. In Abhängigkeit der Dauerstufe wurden die Jährlichkeiten unter Zuhilfenahme der verschiedenen Ansätze bestimmt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kurzzeitniederschläge fast ausschließlich aus Schauern und/oder Regen mit Gewitter (konvektiver Niederschlag) bestehen. Zu längeren Dauerstufen hin nehmen die Niederschläge als Regen (advektiver Niederschlag) erheblich zu. Entsprechend dieser vereinfachten Einteilung des Starkniederschlagsgeschehens in die zwei Grundtypen mit ihrer jeweiligen charakteristischen Niederschlagsdauer, wird eine Bereichsabgrenzung der Dauerstufen bei 60 Minuten und 720 Minuten gewählt. Die auffälligen Niederschlagsereignisse der Jahre 2005 bis 2007 lassen sich den beiden Grundtypen zuordnen. Für den Untersuchungszeitraum wurden die Jährlichkeiten der einzelnen Niederschlagsereignisse bestimmt. Für das niederschlagsreiche Jahr 2007 traten dabei bzgl. der Jährlichkeit die größten Werte auf. Einige Ereignisse mit ihrer zugehörigen Jährlichkeit sind in Tab. 32 aufgeführt.

Beginn Niederschlagsereignis	Gesamtdauer [min]	Gesamtnieder- schlagshöhe [mm]	Intensität [mm/min]	Jährlichkeit T [a]
14.02.2007 14:10	336	5,92	0,018	0,16
03.03.2007 03:05	248	5,52	0,022	0,17
22.05.2007 21:49	65	14,77	0,227	0,87
26.05.2007 23:23	135	20,11	0,149	1,21
29.05.2007 06:21	716	22,37	0,031	0,64

Tab. 32: Auffällige Niederschlagsereignisse aus dem Jahr 2007

Je nach Größe der angeschlossenen Flächen sind Ereignisse aus unterschiedlichen Jahreszeiten maßgebend für die höchsten Abflüsse. In größeren Einzugsgebieten sind in der Regel Winterereignisse maßgebend. Kennzeichnend für diese Ereignisse sind lange Dauerstufen, geringe Niederschlagsintensitäten und eine hohe Niederschlagssumme. In kleineren Einzugsgebieten und in Mittelgebirgsregionen dominieren vor allem die Sommerereignisse das Abflussgeschehen. Kennzeichnend für diese Ereignisse sind eine kurze Niederschlagsdauer, hohe Niederschlagsintensitäten sowie eine geringe Niederschlagssumme.

Die berechneten Abflüsse wurden am Gebietsausgang mit den aufgezeichneten Pegeldaten verglichen. Über die Anpassung der Eichfaktoren in NASIM wurden die Ergebnisse der

Modellrechnung den Naturwerten angenähert. Die Kalibrierung und Verifizierung des Modells erfolgte an zwei Zeiträumen im Jahr 2007. Die Zeiträume zwischen dem 31.01.2007 und dem 18.03.2007 (Abb. 74) sowie zwischen dem 20.05.2007 und dem 03.06.2007 (Abb. 75) konnten im Modell gut abgebildet werden. Die gewählten Zeiträume decken das hydrologische Jahr mit Ereignissen im Winterhalbjahr (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) ab.

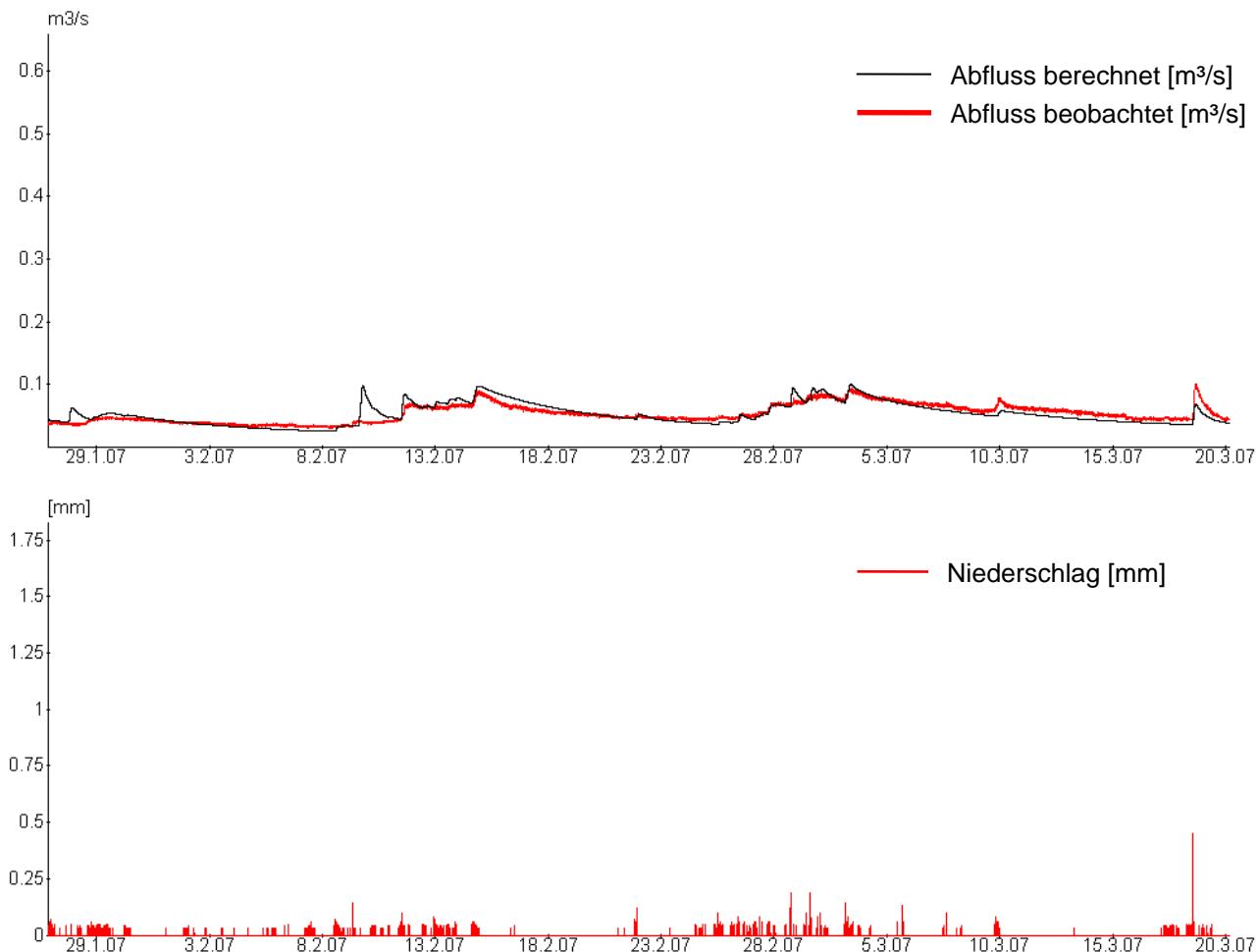


Abb. 74: Beobachtete und berechnete Abflüsse sowie dazugehörige Niederschlagsergebnisse im Zeitraum zwischen dem 31.01.2007 und dem 18.03.2007

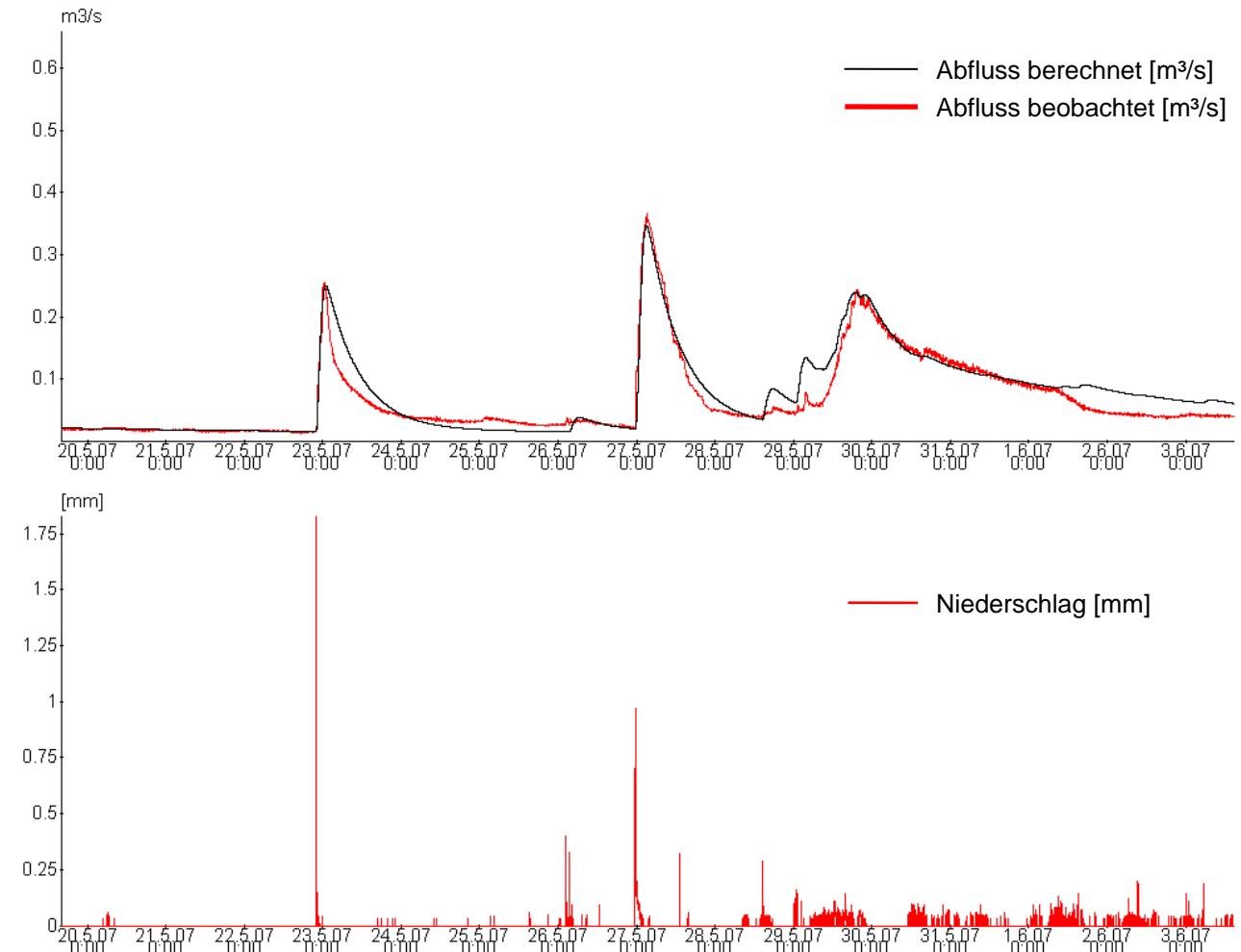


Abb. 75: Beobachtete und berechnete Abflüsse sowie dazugehörige Niederschlagsergebnisse im Zeitraum zwischen dem 20.05.2007 und dem 04.06.2007

Es wurden sowohl niedrige Abflussverhältnisse als auch die aufgezeichneten Spitzendischarge des Jungfernaches kalibriert. Ein Ereignis größerer Jährlichkeit ($T > 2a$) konnte im Messzeitraum Mitte 2005 bis Mitte 2007 nicht registriert werden. Die Anpassung des Modells wird somit erschwert. Für die Beurteilung der Qualität der Modellierungen wurden die Spitzendischarge und Wellenvolumina der beobachteten und berechneten Ergebnisse verglichen. Die Gütebeurteilung erfolgte mit den Maßzahlen nach Hydrotec GmbH (2004).

Das Fehlermaß nach Nash berechnet sich aus:

$$Nash = \frac{\sqrt{\sum (Q_{\text{beo}}(I) - Q_{\text{ger}}(I))^2}}{\sqrt{\sum (Q_{\text{beo}}(I) - \text{SUM}Q_{\text{beo}}(I))^2}} \quad \text{Gl. 6}$$

$Q_{\text{beo}}(I)$ = beobachteter Abfluss [m^3/s] im Zeitschritt I

$Q_{\text{ger}}(I)$ = gerechneter Abfluss [m^3/s] im Zeitschritt I

SUM Q_{beo} = mittlerer beobachteter Abfluss [m^3/s]

Für den Zeitraum vom 31.01.2007 bis zum 18.03.2007 ergibt sich ein Wert von 0,69 und für den Zeitraum vom 20.05.2007 bis zum 04.06.2007 ein Wert von 0,39.

Aus den Gütwerten der nachfolgenden Tab. 33 ergibt sich eine zufriedenstellende bis sehr gute Anpassung der berechneten Abflüsse im Modell an die aufgezeichneten Pegelwerte. Größere Abflussereignisse werden, wie zu erwarten, besser abgebildet. Über den gesamten Zeitraum Januar bis Juni 2007 liegt der Nash-Koeffizient im Bereich 0,6 bis 0,4 (gut).

Gütemaß	unzureichend	ausreichend	zufriedenstellend	gut	sehr gut	optimal
Nash	> 1,2	1,0 - 0,8	0,8 - 0,6	0,6 - 0,4	< 0,4	0,00

Tab. 33: Gütebeurteilung der Modellierung nach dem Kriterium von Nash (Hydrotec, 2004)

Aufgrund einer Messlücke von 3 Tagen an der Pegelstation P1 Ende März 2007 wurde eine mittlere Abflussspitze nicht erfasst und somit auf eine durchgehende grafische Darstellung verzichtet.

Das Jahr 2005 kann nicht mit dem gleichen Parametersatz berechnet werden, da in 2005 die Nutzung der Flächen und die Flurstücksgrenzen gegenüber 2006 und 2007 sehr stark abweichen. Für die Jahre 2006 und 2007 sind die Flächenanteile an Sommergetreide, Gemüsearten, Kleegras und Wintergetreide sowie die Flurstücksgrenzen hingegen vergleichbar. Das Jahr 2006 zeigte lediglich geringe Abflüsse im Jungfernbach ohne markante Abflussspitzen, sodass auf eine Darstellung verzichtet wurde.

Das angepasste, kalibrierte NASIM-Modell ist hinreichend genau, um die weiteren Fragestellungen über Maßnahmen im Einzugsgebiet des Jungfernaches zu modellieren.

6.4 Hydrologische Wirkung von Maßnahmen

Für die Modellierung mit statistischen Niederschlagsereignissen wurden die Niederschlagshöhen des DWD (2000) für das Rasterfeld Calden verwendet (Tab. 34). Das Rasterfeld deckt eine Fläche von 71,5 km² ab und damit auch das untersuchte Modellgebiet. Zur Anwendung in hydrologischen Modellen müssen die Niederschläge mit einem Intensitätsverlauf versehen werden. Der einfachste Anwendungsfall ist der Blockregen mit gleich bleibender Intensität. Das DVWK-Merkblatt Heft 113 (1984) empfiehlt einen Niederschlagsverlauf mit Vorregen, Starkregenphase und Nachlauf. Dieser Verlauf stellt aufgrund bisheriger Untersuchungen den hinsichtlich des Scheitels und der Fülle ungünstigsten Fall dar (Hydrotec, 2004). Dies konnte im untersuchten Gebiet durch exemplarische Vergleiche mit block- und endbetonten Niederschlagsverteilungen bestätigt werden.

Der DWD berücksichtigt bei der Auswertung der Niederschlagshöhen und –spenden drei Zeitspannen, die Zeitspanne von Oktober bis April für das Winterhalbjahr, von Mai bis September für das Sommerhalbjahr sowie für die Dauer eines ganzen Jahres. Mit dieser Vorgehensweise berücksichtigt man, dass die Ergebnisse für die Zeitspanne Sommer bzw. Winter unterschiedlich ausfallen. Für die hiesigen Modellrechnungen wurden die drei Zeitspannen überprüft. Die Winterzeitspanne lieferte wie erwartet geringere Gebietsabflüsse. Zwischen der Sommerzeitspanne und den Jahreswerten ergaben sich lediglich geringe Unterschiede. Da die Kalibrierung mit Ereignissen aus dem Winter- und Sommerhalbjahr durchgeführt wurde, wurden auch bei der Modellierung mit statistischen Ereignissen die Niederschlagshöhen und –spenden des DWD für die Zeitspanne Januar bis Dezember verwendet.

Niederschlagshoehen und -spenden fuer das ausgewahlte Rasterfeld

T	I	I	I	.5	1.	2.	5.	10.	20.	50.	100.
D	I	I	I	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN
5 min	I	I	I	2.8	93.4	4.5	148.6	6.1	203.7	8.3	276.6
10 min	I	I	I	5.1	84.2	7.3	121.5	9.5	158.8	12.5	208.1
15 min	I	I	I	6.6	73.1	9.3	102.8	11.9	132.5	15.5	171.7
20 min	I	I	I	7.7	63.8	10.7	89.1	13.7	114.3	17.7	147.7
30 min	I	I	I	9.0	50.2	12.7	70.3	16.3	90.4	21.0	116.9
45 min	I	I	I	10.1	37.4	14.4	53.4	18.7	69.4	24.4	90.5
60 min	I	I	I	10.6	29.5	15.5	43.1	20.4	56.6	26.9	74.6
90 min	I	I	I	12.0	22.2	17.2	31.8	22.3	41.4	29.2	54.1
2 h	I	I	I	13.1	18.2	18.5	25.6	23.8	33.4	31.0	43.0
3 h	I	I	I	14.7	13.7	20.4	18.9	26.2	24.2	33.7	31.2
4 h	I	I	I	16.0	11.1	22.0	15.3	27.9	19.4	35.8	24.8
6 h	I	I	I	18.1	8.4	24.4	11.3	30.6	14.2	38.9	18.0
9 h	I	I	I	20.3	6.3	27.0	8.3	33.6	10.4	42.4	13.1
12 h	I	I	I	22.1	5.1	29.0	6.7	35.9	8.3	45.1	10.4
18 h	I	I	I	23.0	3.5	30.8	4.7	38.5	5.9	48.8	7.5
24 h	I	I	I	23.8	2.8	32.5	3.8	41.2	4.8	52.6	6.1
48 h	I	I	I	28.1	1.6	37.5	2.2	46.9	2.7	59.3	3.4
72 h	I	I	I	35.2	1.4	45.0	1.7	54.8	2.1	67.7	2.6

- Wiederkehrzeit (in a): mittlere Zeitspanne in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder ueberschreitet

- Niederschlagsdauer einschliesslich Unterbrechungen (in min, h)

- Niederschlagshohe (in mm)
- Niederschlagspende (in % / (s*ha))

Tab. 34: Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld Calden (Spalte 30, Zeile 50) für die Zeitspanne Januar bis Dezember (DWD, 2000)

Für die Modellierung mit statistischen Niederschlagsereignissen ist, abhängig von der Wiederkehrzeit, zu ermitteln, welche Kombination von Niederschlagshöhe und –spende für das betrachtete Modellgebiet die Maxima für Scheitel und Abflussfülle liefert. Für die hiesige Fragestellung wird primär die Änderung der Abflussscheitel untersucht, daher wurden alle Kombinationen der KOSTRA-Tabelle berechnet und in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit die Dauerstufe ermittelt, für die der Abflussscheitel jeweils am größten ist.

Bisherige hydrologische Modellierungen in Mittelgebirgsregionen haben gezeigt, dass der 2-Stunden-Niederschlag erfahrungsgemäß den größten Abfluss erzeugt (Hydrotec, 2004). Im Untersuchungsgebiet jedoch liefert der 60-minütige Niederschlag für die unterschiedlichen Wiederkehrzeiten den größten Abflussscheitel.

Bei der Modellierung mit Bemessungsniederschlägen sind in NASIM folgende Besonderheiten zu beachten:

- Die Berücksichtigung von Jahresgängen für Interzeption und Wurzeltiefe der jeweiligen Flächenvegetation ist nicht möglich.
- Es wird eine konstante Verdunstung von Null angenommen.
- Es wird eine konstante Temperatur von 10° Celsius angenommen.

Eine Änderung von Wurzeltiefe und Interzeption kann unter Umständen das Scheitelmaximum bei einer anderen Niederschlagsdauer erbringen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde dennoch der 60-minütige Niederschlag als Bemessungsdauer der Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Wiederkehrzeiten festgelegt.

In Langzeitmodellierungen (bei Verwendung von kontinuierlichen Messreihen) können die Parameter Interzeption und Wurzeltiefe mit Jahresgängen berücksichtigt werden. Eine Überregnung der Flächen mit Niederschlägen der verschiedenen Jährlichkeiten ($T= 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100$) führt somit in Monaten ohne Vegetation (nach der Ernte) auf den Flächen zum größten Abfluss.

In kleineren Einzugsgebieten sind vor allem Sommerereignisse maßgeblich für hohe Scheitelabflüsse. Der Jahresverlauf der Eintrittswahrscheinlichkeit erosiver und Oberflächenabfluss hervorrufender Niederschläge zeigt, dass diese überwiegend zwischen Mai und September auftreten (Abb. 20). Die Auswertung der Pegelmessungen konnte dies bestätigen. Die maximalen Abflussspeaks wurden in den Monaten Mai und Juni aufgezeichnet. Der größte Abfluss der Messzeitreihe trat im Mai 2007 auf. Somit wurde als fiktiver Berechnungszeitraum jeweils der Mai 2007 angenommen und für Interzeption und Wurzeltiefe die Werte für diesen Monat aus den Jahresgängen angenommen. Die Dauer der Ereignisse berechnet sich aus einer Standardvorlaufzeit von einer Stunde, der Ereignisdauer selbst und der eingestellten Nachlaufzeit. In der Nachlaufzeit erfolgt die Berechnung der ablaufenden Welle.

Viele Untersuchungen liefern Aussagen hinsichtlich der Wirkung von Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen lediglich hinsichtlich der Reduzierung des Oberflächenabflusses in Millimetern, nicht jedoch hinsichtlich der direkten Verformung der Hochwasserwelle im Gerinne. In kleinen Einzugsgebieten des Mittelgebirges mit schnell anlaufender Hochwasserwelle spielt der Hochwasserscheitel eine wesentliche Rolle, wenn es um kritische Wasserstände in Ortslagen und um die Ergreifung von Maßnahmen hinsichtlich des Hochwasserschutzes geht. Der Scheitelabfluss ist somit eine wichtige Eingangsgröße für hydrodynamisch-numerische Modelle. In den folgenden Abschnitten wird die Wirkung verschiedener Maßnahmen der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet im Hinblick auf die hydrologische Wirkung, primär die Änderung der Abflussscheitel im Gerinne, untersucht. Dies geschieht im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse im Modell.

Maßnahme	berücksichtigt im Modell durch Änderung von/ Auswertung durch
ökologischer Landbau	k_f -Wert und max. Infiltrationsrate
konservierende Bodenbearbeitung	max. Infiltrationsrate und k_f -Wert
geänderte Vegetation	Interzeption / Wurzeltiefe / k_{st} -Wert
Feldabflussspeicher	Topografie
Dränagen	Messwertvergleich im Feldversuch

Tab. 35: Bzgl. der hydrologischen Wirkung untersuchte Maßnahmen der Landwirtschaft

Tab. 35 zeigt, welche Maßnahmen im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden und Bodenbearbeitungsformen untersucht und im Modell berücksichtigt werden.

6.4.1 Ökologischer Landbau

Zunächst wurde versucht, die abflussreduzierende Wirkung des ökologischen Landbaus nachzuweisen. Für das NASIM-Modell wurden die Bodenkennwerte aus einem für das Diemeleinzugsgebiet erstellten hydrologischen Modell (Hydrotec, 2003) entnommen. Diese Daten basieren auf den Ergebnissen der digitalen Bodenkarte von Hessen. Die Werte für Welkepunkt, Feldkapazität, Gesamtporenvolumen und k_f -Wert wurden den DVWK-Regeln 116 (1982) entnommen. Die Angaben für Welkepunkt, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen erfolgen dort in Volumenprozent oder in mm je dm Schichtmächtigkeit. In NASIM werden die Angaben für Welkepunkt, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen in der Einheit mm/m implementiert.

Dieser Parametersatz der Bodenarten (Tab. 36) entspricht im Folgenden dem „**Ausgangszustand**“ und symbolisiert den Zustand, bevor die Domäne Frankenhauen nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus betrieben wurde, das heißt, als noch konventionelle Bodenbearbeitung durchgeführt wurde.

Weder die digitalen noch die analogen Bodenkarten geben Informationen über die für die Simulation benötigten Angaben zur maximalen Infiltration wieder. Durch Literaturauswertung wurde ein Verfahren entwickelt, diese Werte in Abhängigkeit der Größe des k_f -Wertes abzuschätzen (Hydrotec, 2004). Abb. 76 zeigt den Zusammenhang von k_f -Werten und maximaler Infiltration.

Bodenart	Welkepunkt [mm/m]	Feldkapazität [mm/m]	Gesamtporen- volumen [mm/m]	k_f -Wert [mm/h]	max. Infiltration [mm/h]
Ls2	160	330	430	23	63,4
Ls3	160	330	430	23	63,4
Ltu	250	420	490	23	63,4
T	390	540	580	5	17,7
Tu2	350	490	530	5	17,7
U	90	340	440	11	35,8
Ut2	110	360	440	11	35,8
Ut3	130	370	440	11	35,8
Ut4	160	370	450	11	35,8

Tab. 36: Kenndaten der Bodenarten im Modell (Ausgangsszustand)

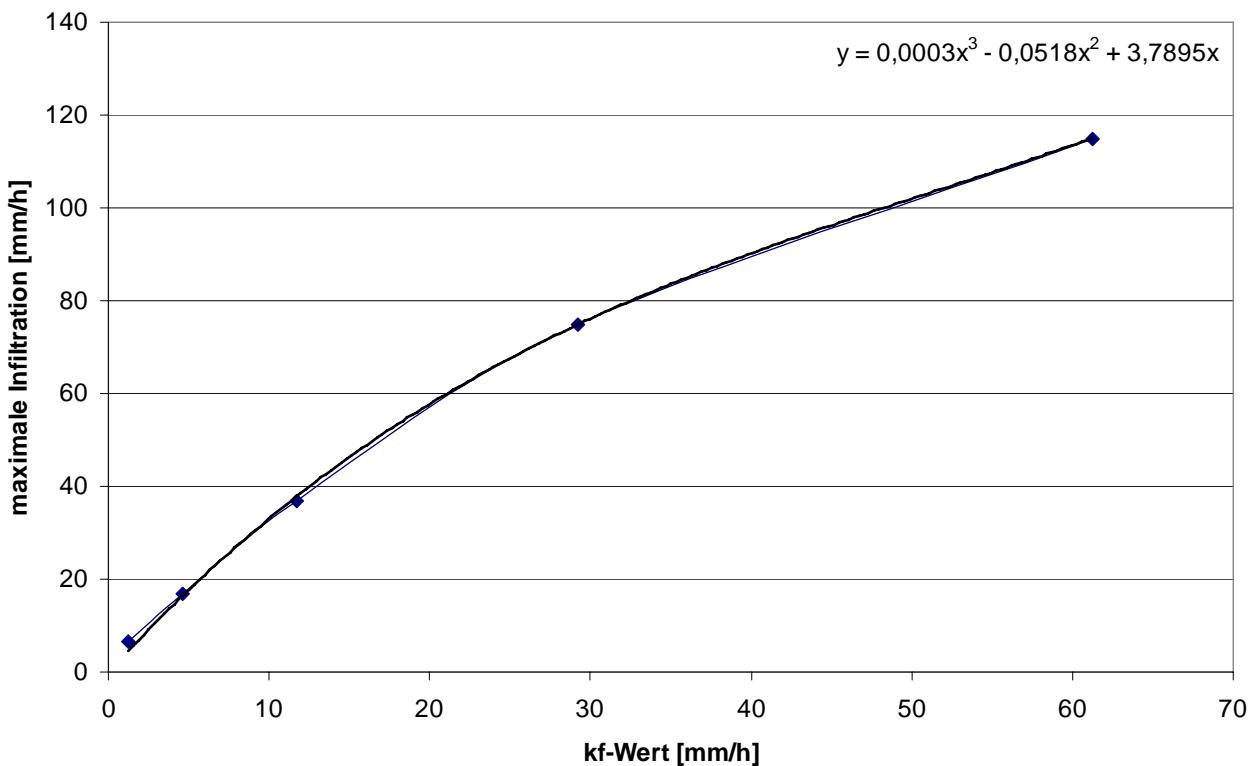


Abb. 76: Anpassung der maximalen Infiltration über den kf-Wert

Die Kenndaten der digitalen Bodenkarten wurden unter Zuhilfenahme von dokumentierten Bodenprofilen (G10/2, G10/3 und G10/4, Brandt et al., 2004) auf Plausibilität geprüft und verifiziert. Im Rahmen des Bodenmonitorings wurden die Profile durch den Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Bodenkunde, der Universität Kassel im Rahmen eines Projektes zur Anwendung reduzierter Bodenbearbeitung im ökologischen Landbau aufgenommen. Die im Untersuchungsgebiet gelegenen Bodenprofile zeigten hinsichtlich des kf-Wertes gegenüber den Angaben der Bodenkarten leicht erhöhte Werte. Diese erhöhten Werte wurden im Modell auf 6 % der Gesamtfläche berücksichtigt (Tab. 37).

Bodenart	Welkepunkt [mm/m]	Feldkapazität [mm/m]	Gesamtporenvolumen [mm/m]	kf-Wert [mm/h]	max. Infiltration [mm/h]
Ls2	160	330	430	23	63,4
Ls3	160	330	430	23	63,4
Ltu	250	420	490	23	63,4
T	390	540	580	5	17,7
Tu2	350	490	530	5	17,7
U	90	340	440	11	35,8
Ut2	110	360	440	17	50,9
Ut3	130	370	440	17	50,9
Ut4	160	370	450	17	50,9

Tab. 37: Kenndaten der Bodenarten (ökologischer Landbau)

Untersuchungen an verschiedenen Standorten haben bundesweit gezeigt, dass konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat neben der Tragfähigkeit auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit deutlich verbessern kann (Stahl et al., 2001).

Die aus den Bodenprofilen erkennbare Verbesserung der Wasserleitfähigkeit wurde für die Modellierung als positiver Effekt des Ökolandbaus angenommen. Seit 1998 wird der Betrieb der Domäne Frankenhausen nach den Richtlinien des Ökolandbaus betrieben. Die restlichen Flächen des Untersuchungsgebietes werden konventionell bewirtschaftet. Untersuchungen gehen davon aus, dass Verbesserungen der Bodenleitfunktionen frühestens nach einigen Jahren nachzuweisen sind. Somit besteht diesbezüglich die berechtigte Annahme, dass der Ökolandbau im abgebildeten Modellgebiet einen positiven Einfluss hervorgerufen hat. Verglichen wird dieser Zustand mit den Ergebnissen bei Verwendung der Bodenwerte aus der digitalen Bodenkarte (Ausgangszustand = konventionelle Bodenbearbeitung).

Bei ökologischem Landbau auf den Teilflächen der Domäne Frankenhausen ergeben sich für den Monat Mai die in Tab. 38 aufgeführten Änderungen der Abflussscheitel im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung.

statistisches Hochwasserereignis HQ_x	Scheitelabfluss bei konventioneller Bodenbearbeitung (Ausgangszustand) [m³/s]	Scheitelabfluss bei ökologischem Landbau [m³/s]	Scheiteländerung durch ökologischen Landbau [%]
HQ _{0,5}	0,205	0,198	-3,16
HQ ₁	0,543	0,533	-1,72
HQ ₂	1,014	1,003	-1,06
HQ ₅	1,747	1,723	-1,34
HQ ₁₀	2,352	2,313	-1,64
HQ ₂₀	2,999	2,959	-1,34
HQ ₅₀	4,019	3,977	-1,03
HQ ₁₀₀	4,818	4,776	-0,88

Tab. 38: Scheitelabflüsse der statistischen Hochwasserereignisse bei konventioneller Bodenbearbeitung (Ausgangszustand) sowie ökologischem Landbau und zugehörige Scheiteländerungen [%]

Die ökologisch bewirtschafteten Flächen zeigen reduzierte Abflussscheitel. Die Bewirtschaftungsmethodik auf der Domäne Frankenhausen mit Berücksichtigung von Fruchtwechseln und Zwischenfrüchten sowie geändertem Maschineneinsatz führt zu einem positiven Einfluss auf den Wasserrückhalt in der Fläche.

Zunächst erscheint die abflussreduzierende Wirkung zwar gering, da bisher jedoch lediglich ein geringer Flächenanteil des gesamten Untersuchungsgebietes ökologisch bewirtschaftet wurde, wird der positive Rückhalteeffekt bei flächiger Umsetzung ansteigen.

6.4.2 Konservierende Bodenbearbeitung

In Kapitel 3.5 wurden zahlreiche Einflüsse aufgeführt, die den Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Nutzflächen fördern oder reduzieren. Ein Parameter, der die positiven Veränderungen der Bodenmatrix als Folge einer konservierenden Bodenbearbeitung bündelt, ist die Infiltration. Der geänderte Maschineneinsatz schützt vor der Ausbildung einer klassischen Pflugsohle, die Bodenverdichtung wird durch geringere Bearbeitungsintensität reduziert und die Anwendung der Mulchsaat führt zu einer gesteigerten biologischen Aktivität. Alle Einzelwirkungen haben die Zunahme der Infiltrationsleistung zur Folge.

Im Modell wurde die maximale Infiltrationsrate sukzessive bis auf einen Wert von 75 % gegenüber dem Ausgangszustand erhöht. In Beregnungsversuchen (LfL, 2006) konnten auf

Einzelflächen vereinzelt noch höhere Werte festgestellt werden, die jedoch lediglich bei geeigneten Böden und unter optimalen Bedingungen erzielt wurden (Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung über einen langen Zeitraum; 7 bis 10 Jahre). Bei Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung ist für einen Großteil der Böden eine Erhöhung der maximalen Infiltrationsrate um 20 % bis 30 % kurz nach Umstellung der Bodenbearbeitung als realistisch anzusehen.

Die prozentuale Scheitelreduzierung nach Steigerung der maximalen Infiltrationsrate gegenüber dem Ausgangszustand (konventionelle Bodenbearbeitung) verläuft relativ gleichmäßig über die statistischen Bemessungsniederschläge. Mit den Mittelwerten kann der Zusammenhang von Scheitelreduzierung und Steigerung der maximalen Infiltrationsrate dargestellt werden (Abb. 77).

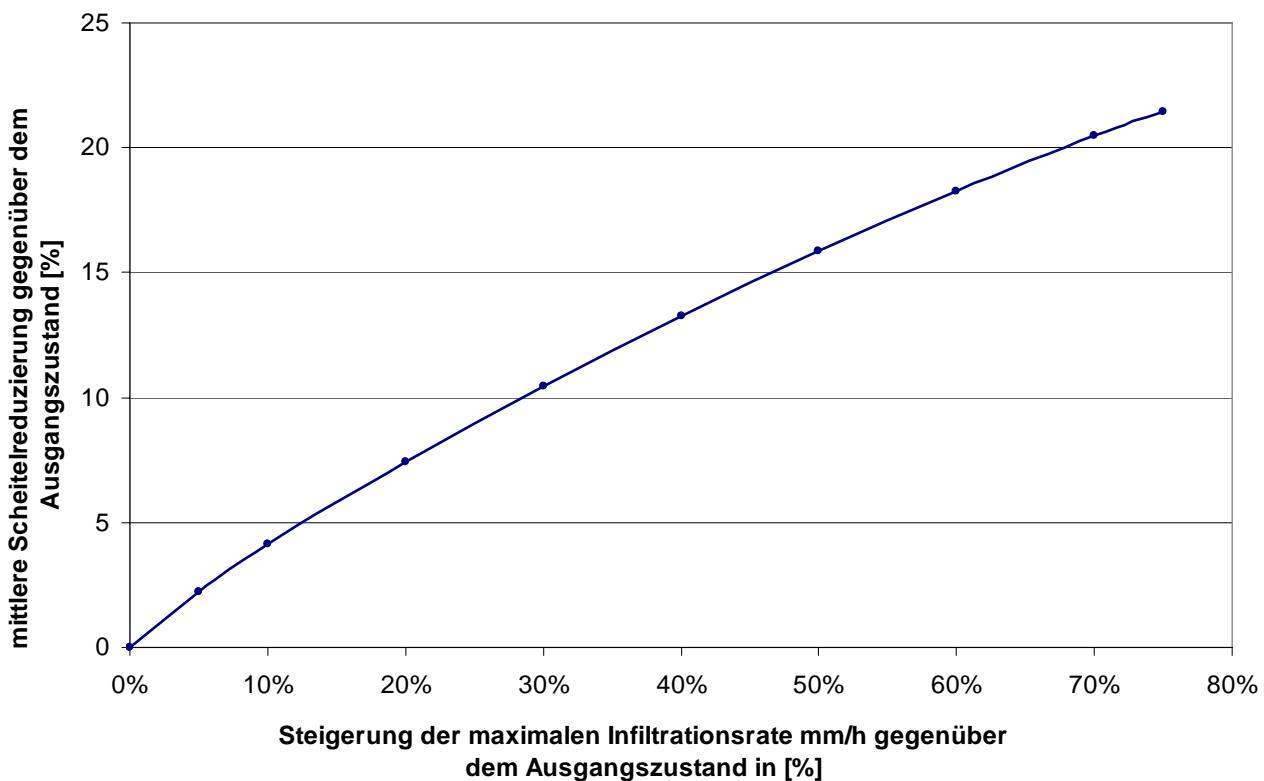


Abb. 77: Mittlere Scheitelreduzierung [%] gegenüber dem Ausgangszustand bei Zunahme der maximalen Infiltrationsrate

Bereits bei geringer Erhöhung der Infiltrationsrate zeigten sich gegenüber anderen Maßnahmen sichtbare Scheitelreduzierungen. Steigerungen der maximalen Infiltrationsrate um 20 % bis 30 % reduzieren die Scheitelabflüsse um ca. 7 % bis 10 %. Im Falle einer maximalen Erhöhung der Infiltrationsrate gegenüber dem Ausgangszustand um 75 % reduziert sich der Scheitelabfluss im Untersuchungsgebiet um ca. 21%. Im Modellgebiet erzielten infiltrationsfördernde Maßnahmen jedoch lediglich bei flächiger Umsetzung (100 % der Gesamtfläche) diese sichtbare Wirkung hinsichtlich der Abflussreduzierung. Somit handelt es sich dabei um ein Extremeszenario, welches in der Praxis nur schwer umsetzbar ist.

Die Wirkung von infiltrationsfördernden Maßnahmen zeigt sich nicht nur in der Änderung des Scheitelabflusses sondern auch an der Änderung des Basisabflusses. Erwartungsgemäß kann nach Auswertung der Berechnungen festgestellt werden, dass der Basisabfluss im Vergleich zum Ausgangszustand leicht gestiegen ist, da mehr Niederschlagswasser in tiefere Bodenschichten gelangt und von dort dem Gewässer stark verzögert zufließt.

6.4.3 Einfluss der Vegetation

Aus verschiedenen Untersuchungen ist bekannt, dass die Vegetation für die Entstehung des Oberflächenabflusses eine entscheidende Rolle spielt. Sie reduziert oder forciert den Verschlämungsprozess und die damit einhergehende Oberflächenabflussbildung. Darüber hinaus ist der Einfluss der Interzeption zu berücksichtigen.

6.4.3.1 Interzeption und Wurzeltiefe

Interzeption wird als Vorgang definiert, bei dem der Niederschlag an den Pflanzenoberflächen aufgefangen und vorübergehend gespeichert wird. Von dort verdunstet das Wasser teilweise sofort wieder oder es läuft zum Erdboden ab. Somit ist die Interzeption eine Niederschlagsverminderung. Zwischen vegetationsbedeckten und vegetationslosen Flächen kann ein deutlicher Unterschied bezüglich des den Boden erreichenden Niederschlagsanteils bestehen. In Wäldern ist der Rückhalteeffekt deutlich zu beobachten. Da durch die Interzeption eine räumliche, zeitliche und mengenmäßige Umverteilung des Niederschlags erfolgt, muss sie bei der Analyse hydrologischer Prozesse berücksichtigt werden. Im Modell wird die vom Bodenbewuchs abhängige maximale Größe des Interzeptionsspeichers in Millimetern angegeben.

Ein weiterer im Modell abzubildender Parameter der Vegetation ist die Wurzeltiefe. Die Durchwurzelung hat eine positive Wirkung auf die Infiltrations- und Versickerungseigenschaften von Niederschlag, weil das Gefüge stabilisiert wird und die Wurzelgänge als Leitungsbahnen für das Wasser dienen können. In NASIM wird die vom Bodenbewuchs abhängige Dicke der durchwurzelten Bodenschicht in Metern angegeben.

Langzeitsimulationen berücksichtigen die Variabilität der Interzeption und Wurzeltiefe im Jahresgang. Für die Modellkalibrierung wurden diese Werte aus einer Literaturrecherche zusammengetragen und berücksichtigt (Hoyningen-Huene, 1983; Brechtel, 1984; Baumgartner et al., 1996; UBA, 2001; Hydrotec, 2004). Bei Modellierung mit statistischen Niederschlagsereignissen ist diese Option nicht möglich.

Es werden somit für die Modellierung im Monat Mai die folgenden Werte für den Ausgangszustand berücksichtigt (Tab. 39):

Nutzung im Ausgangszustand	Wurzeltiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	0,80	2,10
Gemüse	0,15	2,50
Kartoffeln	0,15	2,90
Kleegras	1,00	2,00
Luzerne	1,00	2,00
Sommergetreide	0,70	2,30
versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	0,80	2,10
Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	0,80	2,10
Wiese	1,00	1,50

Tab. 39: Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzeltiefe und Interzeption im Ausgangszustand

Um den Einfluss der unterschiedlichen Vegetation auf den Oberflächenabfluss abzuschätzen, wurden 55 % der Gesamtfläche mit geänderter Vegetation und geänderten Parametern für Wurzel Tiefe und Interzeption modelliert (Tab. 40 und Tab. 41).

Nutzung im Ausgangszustand	Szenario Kartoffeln: neue Vegetation	Wurzel Tiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Kartoffeln	0,15	2,90
Gemüse	Kartoffeln	0,15	2,90
Kartoffeln	Kartoffeln	0,15	2,90
Kleegras	Kartoffeln	0,15	2,90
Luzerne	Kartoffeln	0,15	2,90
Sommergetreide	Kartoffeln	0,15	2,90
versiegelte Flächen	versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	Kartoffeln	0,15	2,90
Wald	Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	Kartoffeln	0,15	2,90
Wiese	Wiese	1,00	1,50
Nutzung im Ausgangszustand	Szenario Wintergetreide: neue Vegetation	Wurzel Tiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Wintergetreide	0,80	2,10
Gemüse	Wintergetreide	0,80	2,10
Kartoffeln	Wintergetreide	0,80	2,10
Kleegras	Wintergetreide	0,80	2,10
Luzerne	Wintergetreide	0,80	2,10
Sommergetreide	Wintergetreide	0,80	2,10
versiegelte Flächen	versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	Wintergetreide	0,80	2,10
Wald	Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	Wintergetreide	0,80	2,10
Wiese	Wiese	1,00	1,50
Nutzung im Ausgangszustand	Szenario Kleegras: neue Vegetation	Wurzel Tiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Kleegras	1,00	2,00
Gemüse	Kleegras	1,00	2,00
Kartoffeln	Kleegras	1,00	2,00
Kleegras	Kleegras	1,00	2,00
Luzerne	Kleegras	1,00	2,00
Sommergetreide	Kleegras	1,00	2,00
versiegelte Flächen	versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	Kleegras	1,00	2,00
Wald	Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	Kleegras	1,00	2,00
Wiese	Wiese	1,00	1,50

Tab. 40: Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzel Tiefe und Interzeption der verschiedenen Vegetations- und Nutzungsszenarien

Nutzung im Ausgangszustand	Szenario Wiese: neue Vegetation	Wurzeltiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Wiese	1,00	1,50
Gemüse	Wiese	1,00	1,50
Kartoffeln	Wiese	1,00	1,50
Kleegras	Wiese	1,00	1,50
Luzerne	Wiese	1,00	1,50
Sommergetreide	Wiese	1,00	1,50
versiegelte Flächen	versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	Wiese	1,00	1,50
Wald	Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	Wiese	1,00	1,50
Wiese	Wiese	1,00	1,50

Tab. 41: Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzeltiefe und Interzeption der verschiedenen Vegetations- und Nutzungsszenarien (Fortsetzung)

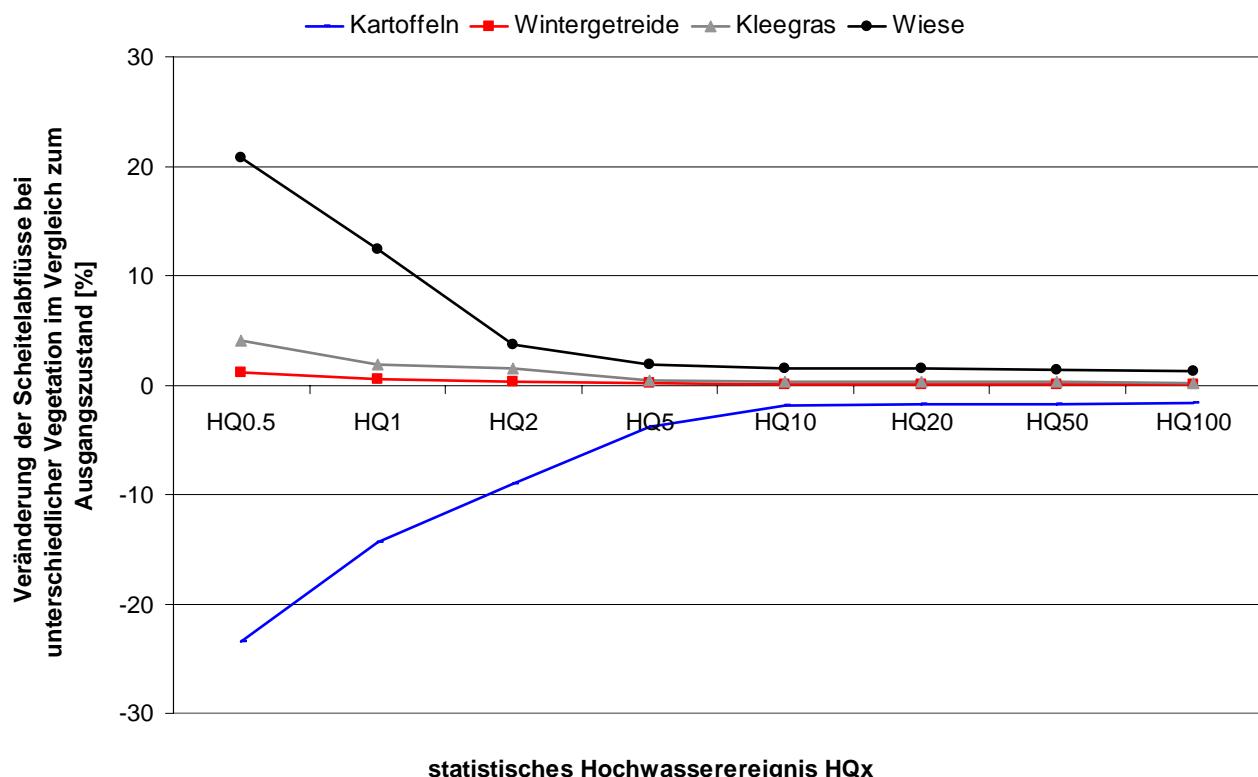


Abb. 78: Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei unterschiedlicher Vegetation im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat Mai)

Es wurde in den jeweiligen Szenarien davon ausgegangen, dass sich bis auf den versiegelten Flächen, Wald- und Wiesenparzellen eine einheitliche Vegetation auf den Flächen befindet.

Erkennbar ist in Abb. 78 die deutliche Scheitelreduzierung bei flächiger Kartoffelvegetation, besonders für Hochwässer geringer Jährlichkeit. Diese zunächst sehr hoch erscheinenden Abflussreduzierungen relativieren sich, wenn man die Problematik der Wassererosion berücksichtigt. Es ist bekannt, dass die Gefahr der Erosion durch Wasser auf Kartoffel- und anderen Reihenkulturen wie Mais und Gemüse sehr hoch ist. Durch den Ver-

schlämmungsprozess auf der Geländeoberfläche wird die Infiltration reduziert und der Oberflächenabfluss erhöht sich drastisch. Der Verschlämungsprozess ist in NASIM nicht direkt zu berücksichtigen. Die positive Wirkung der Kartoffelvegetation, begründet durch eine hohe Interzeption, wirkt sich somit nur positiv auf die Abflussreduzierung aus, wenn gleichzeitig die Gefahr der Erosion durch Wasser vermieden werden kann (durch Unteraaten).

Wintergetreide, Kleegras und eine reine Wiesenvegetation zeigen für den Monat Mai höhere Flächenabflüsse (Abb. 78). Die erhöhten Abflüsse auf Wiesen lassen sich mit der Jahreszeit begründen. Grundsätzlich sind Wiesen- und Weideflächen positiv zu bewerten bzgl. einer abflusshemmenden Wirkung, als Ausnahme ist der negative Einfluss durch Viehtritt bei zu starker Beweidung zu nennen. Im Allgemeinen schützen Wiesen ganzjährig vor schadhafter Flächenerosion. Für den Zeitraum nach der Ernte, in der Flächen temporär vegetationslos sind, wird der positive Einfluss am folgenden Beispiel deutlich.

Tab. 42 zeigt die im Monat September (nach der Getreideernte) für den Ausgangszustand angenommenen Werte für die Interzeption und Wurzeltiefe.

Nutzung im Ausgangszustand	Wurzeltiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	0,01	0,01
Gemüse	1,00	3,00
Kartoffeln	1,00	3,40
Kleegras	1,00	2,00
Luzerne	1,00	2,00
Sommergetreide	0,01	0,01
versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	0,01	0,01
Wald	1,50	5,00
Wintergetreide	0,01	0,01
Wiese	1,00	1,50

Tab. 42: Für den Monat September berücksichtigte Werte für Wurzeltiefe und Interzeption im Ausgangszustand

Tab. 43 listet zum Vergleich die Werte für die Interzeption und Wurzeltiefe im Monat September für das Szenario Wiese auf.

Nutzung im Ausgangszustand	Szenario Wiese: neue Vegetation	Wurzeltiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Wiese	1,00	1,50
Gemüse	Wiese	1,00	1,50
Kartoffeln	Wiese	1,00	1,50
Kleegras	Wiese	1,00	1,50
Luzerne	Wiese	1,00	1,50
Sommergetreide	Wiese	1,00	1,50
versiegelte Flächen	versiegelte Flächen	0,01	1,20
Versuchsfelder	Wiese	1,00	1,50
Wald	Wald	1,50	5,00
Wintergetreide	Wiese	1,00	1,50
Wiese	Wiese	1,00	1,50

Tab. 43: Für den Monat September berücksichtigte Werte für Wurzeltiefe und Interzeption im Szenario Wiese

Im Monat September wird durch die Nutzung der Flächen als Grünland eine deutliche Reduzierung der Oberflächenabflüsse erreicht, da im diesbezüglichen Ausgangszustand zahlreiche Flächen vegetationslos sind. Dies spiegelt sich auch in der Wirkung auf den Scheitelabfluss am Gebietsauslass wieder (Abb. 79).

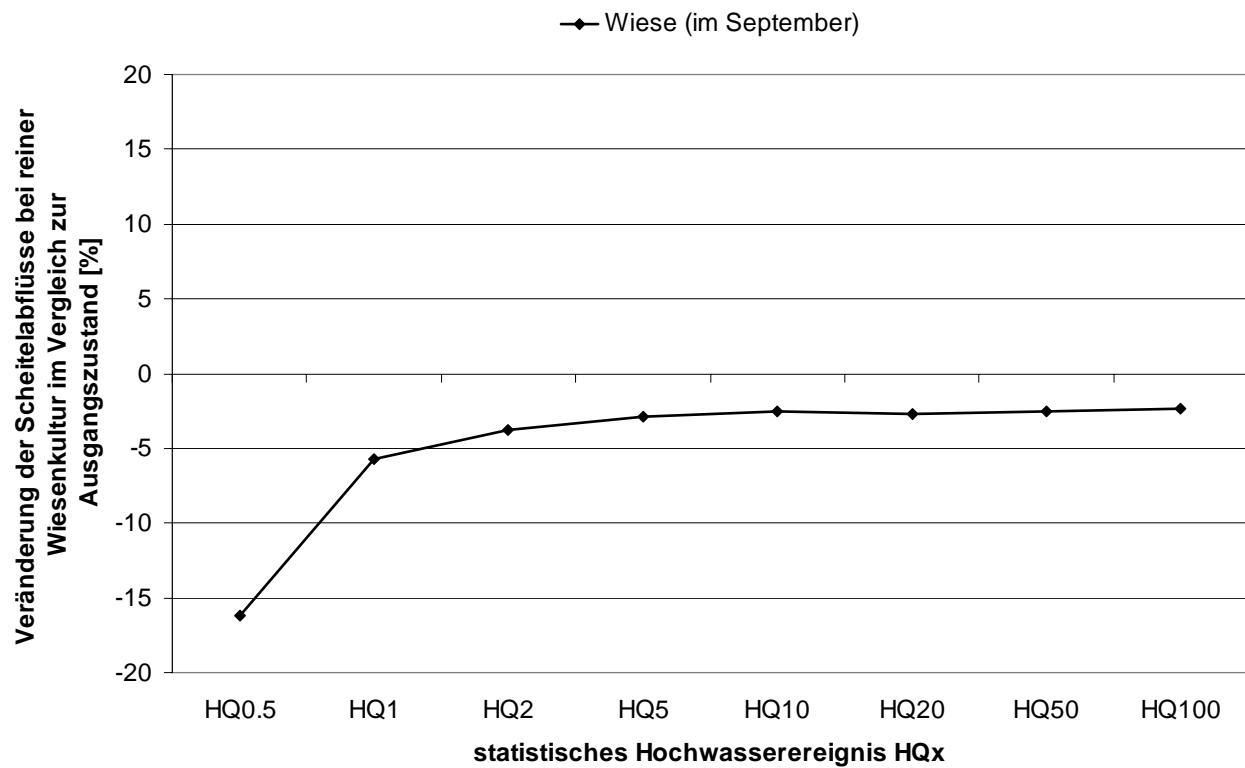


Abb. 79: Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei reiner Wiesenkultur im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat September)

Weiterhin wurde untersucht, wie groß die Abflussreduzierung ist, wenn sich im untersuchten Gebiet gegenüber dem Ausgangszustand (38 % Waldfläche; Tab. 39) ein flächiger Waldbestand entwickeln würde (100 % Waldfläche; Tab. 44).

Nutzung im Vergleichszustand	Szenario Wald: neue Vegetation	Wurzeltiefe [m]	Interzeption [mm]
Ackerland außerhalb der Domäne	Wald	1,50	6,00
Gemüse	Wald	1,50	6,00
Kartoffeln	Wald	1,50	6,00
Kleegras	Wald	1,50	6,00
Luizerne	Wald	1,50	6,00
Sommergetreide	Wald	1,50	6,00
versiegelte Flächen	Wald	1,50	6,00
Versuchsfelder	Wald	1,50	6,00
Wald	Wald	1,50	6,00
Wintergetreide	Wald	1,50	6,00
Wiese	Wald	1,50	6,00

Tab. 44: Für den Monat Mai berücksichtigte Werte für Wurzeltiefe und Interzeption bei einem reinen Waldbestand

Die großen Abflussreduzierungen (Abb. 80) bei einem reinen Waldbestand resultieren aus dem hohen Interzeptionsvermögen, besonders bei Laubwald. Bei Niederschlagsbeginn erreicht in einem dichten Wald kaum Wasser den Waldboden, da erst die Oberflächen der Blätter und Nadeln benetzt werden. Bei längerer Niederschlagsdauer oder höherer Niederschlagsintensität wird ihre Interzeptionskapazität schließlich überschritten und Wasser tropft auf den Boden.

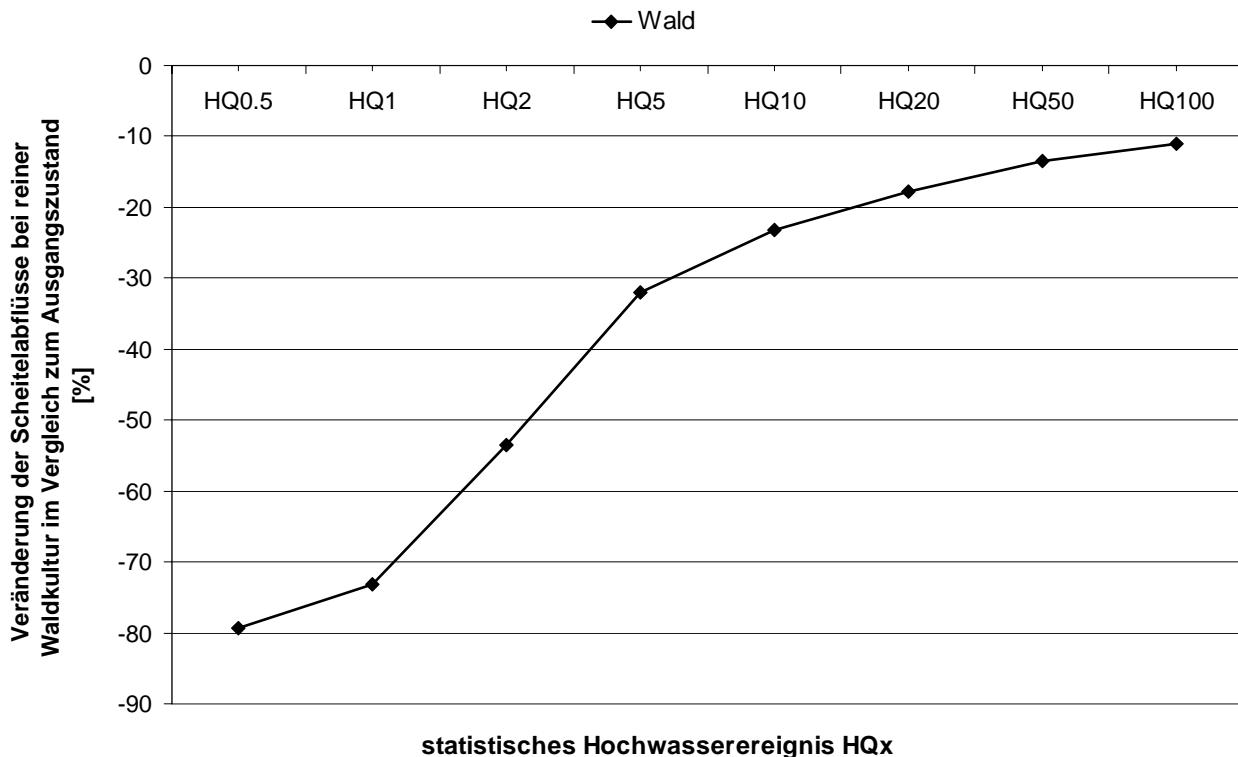


Abb. 80: Veränderung der Scheitelabflüsse [%] bei reinem Waldbestand im Vergleich zum Ausgangszustand (Monat Mai)

Betrachtet man den Scheitelabfluss, zeigt sich für Hochwässer geringer Jährlichkeit ($HQ_{0,5}$ und HQ_1), neben der starken Reduzierung, eine Scheitelverschiebung um 37 bzw. 17 Minuten (Abb. 81). Für Einzugsgebiete mit schnellem Wellenablauf ist dieser Effekt besonders positiv zu bewerten. Ereignisse geringer Jährlichkeit kann ein reiner Waldbestand fast völlig zurückhalten. Bei Ereignissen größerer Jährlichkeit ist keine wesentliche Scheitelverschiebung mehr festzustellen.

Bzgl. der Änderung der Abflussfülle wird der Einfluss des Waldbestandes auf den Rückhalt gegenüber anderen Vegetationen ebenfalls besonders deutlich. Es kann eine Reduzierung von 46 % für ein HQ_5 und immerhin 11 % für ein HQ_{100} beobachtet werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Interzeption im Vergleich zur Wurzelgröße einen deutlich sichtbaren Einfluss auf den Abflussprozess ausübt. Somit können Pflanzen mit großem Interzeptionsvermögen eine abflussreduzierende Wirkung unter der Voraussetzung haben, dass gleichzeitig der Erosionsproblematischen, bei Reihenkulturen beispielsweise durch geeignete Maßnahmen, entgegengewirkt wird. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass sich Verdunstungseffekte ebenfalls noch positiv auswirken können. Die Verdunstung wird modellbedingt nur bei Langzeitsimulationen berücksichtigt. Für mehrere in kurzen Abständen aufeinander folgende Niederschlagsereignisse ist die positive Interzeptionswirkung lediglich für das erste Ereignis zu erwarten. Gegenüber einer geänderten Infiltrationsleistung wird durch die Interzeption der Basisabfluss nicht erhöht.

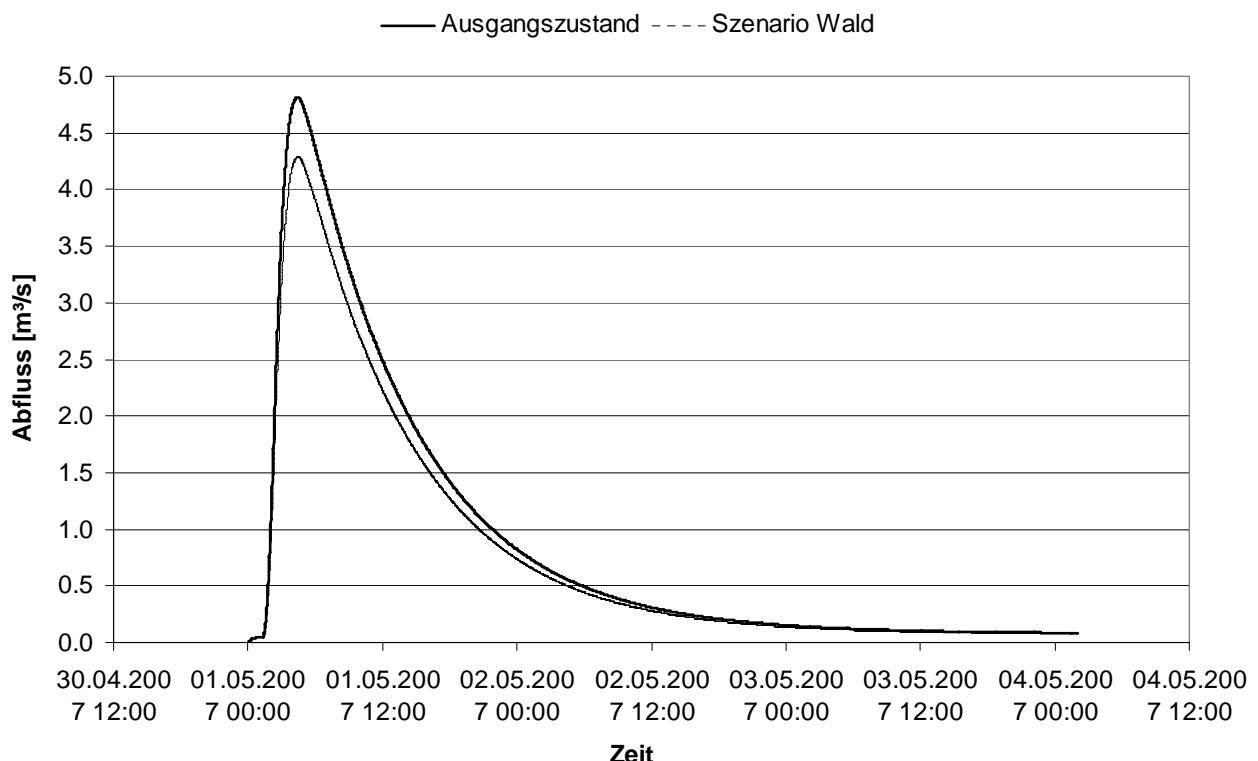


Abb. 81: Änderung der Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ bei reinem Waldbestand im Vergleich zum Ausgangszustand

6.4.3.2 Oberflächenrauheit

Neben der Interzeption ändert sich durch die Flächenvegetation ebenfalls die Oberflächenrauheit. In zahlreichen hydrologischen Modellen ist die Basis für die Berechnung des Oberflächenabflusses die Fließformel von Gaukler-Manning-Strickler. Der Stricklerwert [$m^{1/3}/s$] ist ein Integralparameter, der die Fließverluste im Gerinne oder Vorland zusammenfasst. Die Rauheit der Oberfläche wird dabei aus der Flächennutzung abgeleitet.

Müller (2006) wies die Änderungen der Wasserspiegellagen in Abhängigkeit unterschiedlicher Vegetation im direkten Gewässervorland unter Verwendung eines hydrodynamisch-numerischen Modells nach.

Mit Hilfe der NA-Modellierung wurde exemplarisch der Einfluss der Vegetation auf die Oberflächenabflussbildung quantifiziert. Für das Gerinne und das unmittelbar angrenzende Vorland wurde die Oberflächenrauheit durch abschnittsweise definierte k_{St} -Werte berücksichtigt. Für die übrigen Flächen des Einzugsgebietes kann die Oberflächenrauheit durch die Zeitflächenfunktion abgebildet werden. Die Zeitflächenfunktion beschreibt die Translation einer Welle auf der Oberfläche. Sie ist abhängig von Gebietsgröße und -form, Gefälle, Rauigkeit der Oberfläche, Dichte des Gewässernetzes und der Fließtiefe. Die Rauheit der Oberfläche kann aus der Flächennutzung abgeleitet werden.

Es gilt für

Wald:	$k_{St} = 5 \text{ [m}^{1/3}/\text{s}]$
Acker, Wiese:	$k_{St} = 10 \text{ [m}^{1/3}/\text{s}]$
Standardwert nach Hydrotec (2004):	$k_{St} = 8 \text{ [m}^{1/3}/\text{s}]$.

Für den Ausgangszustand wurde der k_{St} -Wert auf 8 gesetzt. Die neue Zeitflächenfunktion berücksichtigt eine geringfügige Erhöhung der Rauheit auf einen k_{St} -Wert von 7.

Verglichen mit dem Ausgangszustand reduzieren sich dadurch die Scheitelabflüsse im untersuchten Gebiet (Tab. 45).

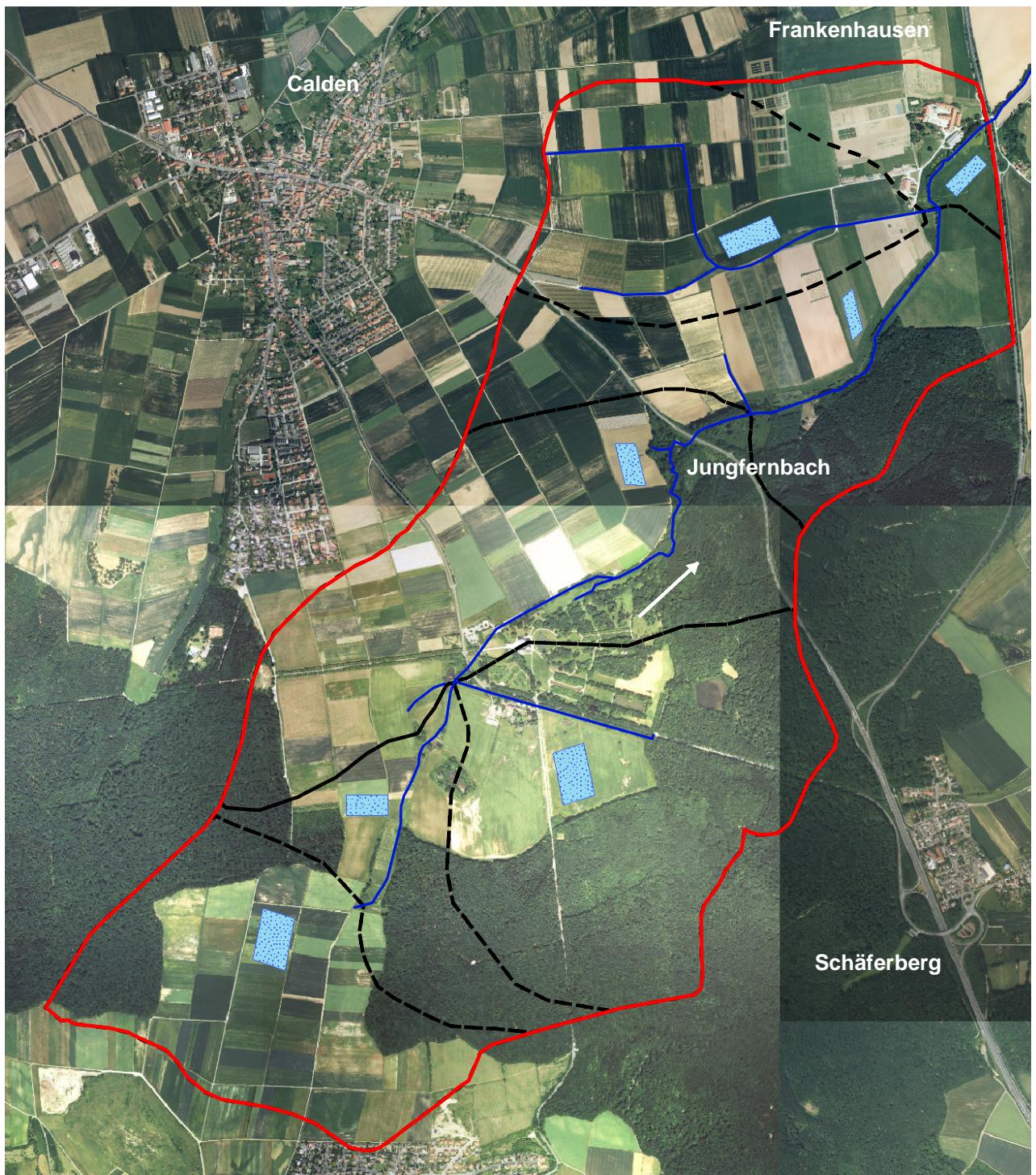
statistisches Hochwasserereignis HQ_x	Scheitelabfluss (Ausgangszustand) [m^3/s]	Scheitelabfluss nach Erhöhung der Oberflächenrauheit [m^3/s]	Scheiteländerung nach Erhöhung der Oberflächenrauheit [%]
$HQ_{0,5}$	0,205	0,201	-1,66
HQ_1	0,543	0,535	-2,02
HQ_2	1,014	0,992	-2,14
HQ_5	1,747	1,709	-2,18
HQ_{10}	2,352	2,300	-2,20
HQ_{20}	2,999	2,933	-2,21
HQ_{50}	4,019	3,929	-2,22
HQ_{100}	4,818	4,711	-2,23

Tab. 45: Scheitelabflüsse der statistischen Hochwasserereignisse bei konventioneller Bodenbearbeitung (Ausgangszustand) sowie nach Erhöhung der Oberflächenrauheit und zugehörige Scheiteländerungen [%]

Eine Reduzierung der Scheitelabflüsse und eine Verschiebung der Hochwasserscheitel um 15 Minuten werden bereits bei geringer Erhöhung der Rauheit im Untersuchungsgebiet nachgewiesen. Ausgelöst wird diese Rauheitserhöhung nicht nur durch das Wuchsstadium der Feldfrüchte, sondern auch durch Landschaftstrukturelemente wie Hecken, Raine (Ackergrenze), Feldgehölze und zusammenhängende Uferrandstreifen.

6.4.4 Feldspeicher

Im Bereich der freien Landschaft oder auf landwirtschaftlichen Nutzflächen können, neben den in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Formen von Rückhalten, vor allem begrünte Abflussmulden genutzt werden, um den Niederschlag in der Fläche zurückzuhalten. Sie sind einfach zu erstellen, kostengünstig und können bei Bedarf in Abhängigkeit der Topografie angelegt werden. Wichtig ist dabei, dass sie weiterhin die Bewirtschaftung der Flächen ermöglichen. Im Untersuchungsgebiet wurde in jedem Teilgebiet eine solche Abflussmulde ins Gelände modelliert (Abb. 82). Unter Berücksichtigung der Fließvektoren und Höhenlinien wurden die Mulden möglichst dort angelegt, wo sich Hangabflüsse gebündelt sammeln. Die Abflussmulden umfassen Flächen von ca. 0,8 ha bis 2,6 ha bei einer Tiefe von etwa 0,5 m. Durch die geringe Tiefe sind sie ins Landschaftsbild gut zu integrieren und ermöglichen weiterhin eine Bewirtschaftung. Der abgetragene Boden kann auf anderen Flächen des Untersuchungsgebietes wieder aufgetragen werden.



- Jungfernbach
- Einzugsgebiet Pegel P1
- [- -] Teilgebiete
- [■] Abflussmulden

0 500 1000 Meter N

Abb. 82: Lage der Abflussmulden im Untersuchungsgebiet

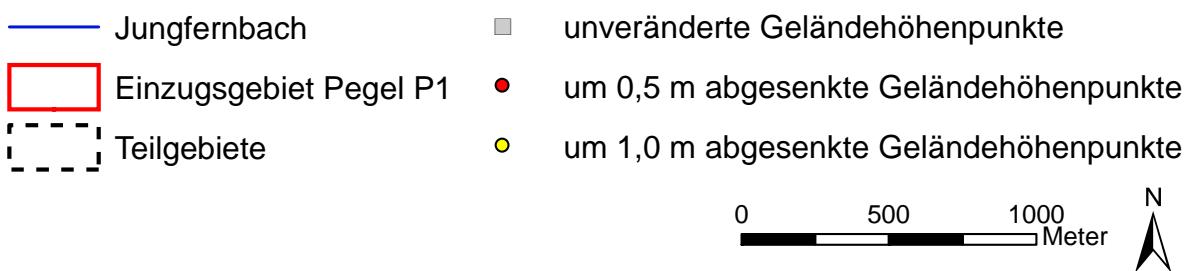
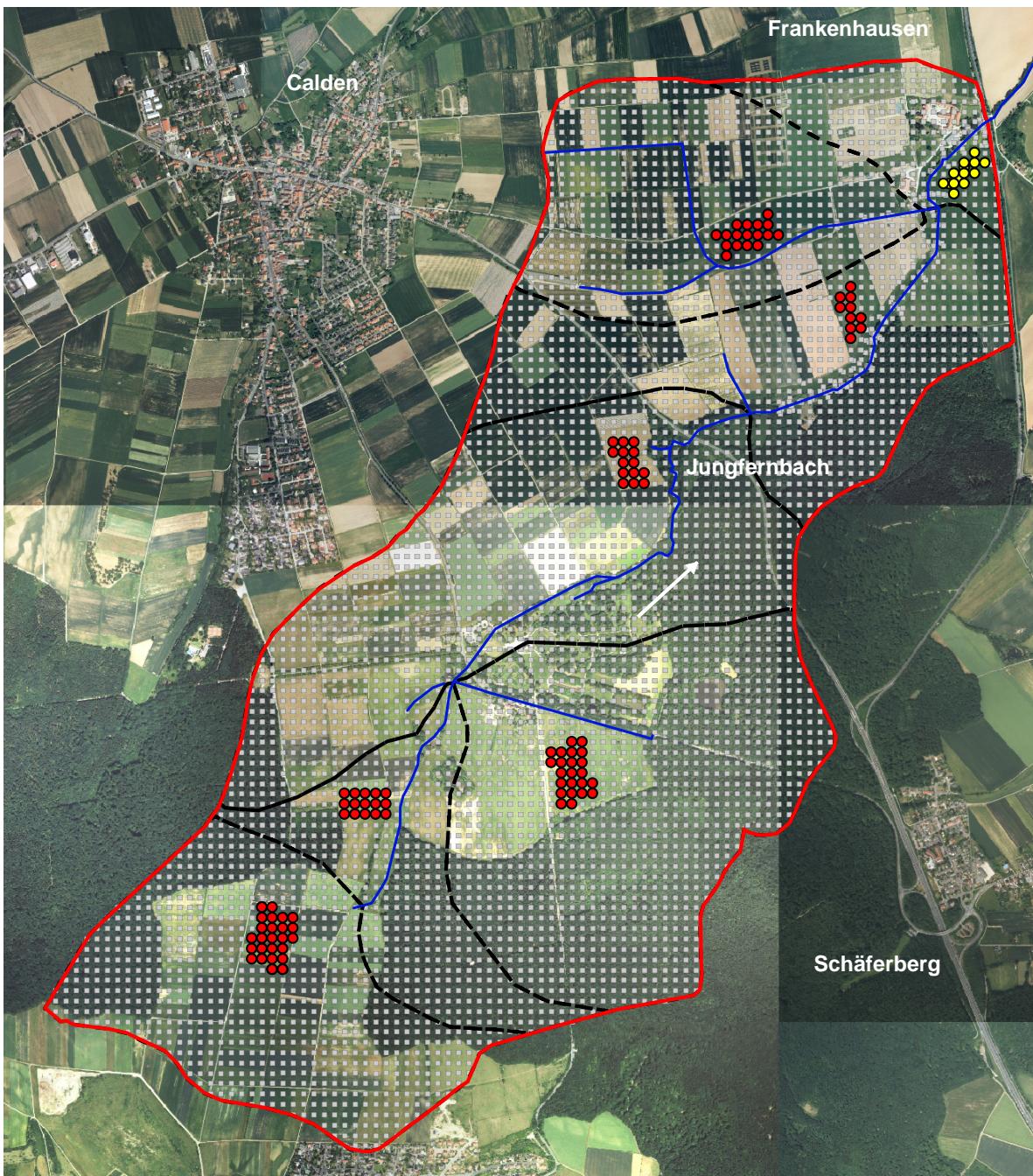


Abb. 83: Geänderte Geländehöhenpunkte im Untersuchungsgebiet

Abb. 83 zeigt, welche Höhenpunkte im Geländemodell geändert wurden. Mit einer ArcView-Erweiterung wird die Zeitflächenfunktion für das Untersuchungsgebiet neu ermittelt. Dabei werden Fließwege und Fließzeiten für alle Teileinzugsgebiete mit Hilfe des geänderten Höhenmodells berechnet. Die neu berechnete Funktion wird in NASIM implementiert.

statistisches Hochwasserereignis HQ_x	Scheitelabfluss ohne Abflussmulden (Ausgangszustand) [m^3/s]	Scheitelabfluss mit Abflussmulden [m^3/s]	Scheiteländerung durch Abflussmulden [%]
$HQ_{0,5}$	0,205	0,202	-1,28
HQ_1	0,543	0,534	-1,57
HQ_2	1,014	0,996	-1,72
HQ_5	1,747	1,715	-1,82
HQ_{10}	2,352	2,308	-1,87
HQ_{20}	2,999	2,942	-1,91
HQ_{50}	4,019	3,940	-1,95
HQ_{100}	4,818	4,724	-1,95

Tab. 46: Scheitelabflüsse der statistischen Hochwassereignisse ohne und mit Abflussmulden im untersuchten Gebiet sowie die zugehörigen Scheiteländerungen [%]

Eine leichte Reduzierung der Scheitelabflüsse (Tab. 46) am Gebietsauslass und eine Verschiebung des Hochwasserscheitels um ca. 16 Minuten durch die Fließzeitverlängerung konnten beobachtet werden. Gegenüber der lediglich geringen Scheitelreduzierung ist die Scheitelverschiebung für das kleine Einzugsgebiet des Jungfernaches positiv zu bewerten.

Die Effektivität von Abflussmulden ist stark gekoppelt an die Topografie des Einzugsgebiets. In Einzugsgebieten mit Muldentalcharakter kann die Wirkung hoch sein, wenn Abflussmulden möglichst günstig in die Hauptfließpfade des Oberflächenabflusses modelliert werden. Eine Umsetzung im Gelände erscheint hingegen nur sinnvoll, wenn die Abflussmulden weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden können, beispielsweise als extensives Grünland, und der ausgehobene Boden vor Ort wieder verwendet werden kann, wodurch der Kostenfaktor der Erstellung merklich gesenkt werden kann.

6.4.5 Dränagen

NASIM 3.3.1 bietet keinen direkten Algorithmus zur Berücksichtigung von Dränagen. In Einzelfällen bisheriger Anwendungen wurde die Modellierung von Dränagen in Deponien über die Simulation mittels Interflow abgebildet. Diese Berechnungsoption wird jedoch nicht empfohlen (Hydrotec, 2004).

Die primäre Aufgabe einer Dränage ist es, Staunässe im Boden zu verhindern. Ein gut dränierter Boden stellt im Niederschlagsfall Speichervolumen zur Verfügung, das heißt die Dränage sorgt dafür, dass ein Boden nach einem Niederschlagsereignis die Bodenfeuchte verzögert an den Vorfluter abgibt und bei erneutem Niederschlag als Speicher wieder aktiviert werden kann. Die Abflussverzögerung ist abhängig von Bodeneigenschaften wie dem k_f -Wert und der Topografie des Geländes und resultiert aus der Fließzeitverlängerung des vertikal versickernden Wasseranteils zum Dränagesauger und –sammler gegenüber dem direkt abfließenden Oberflächenabfluss.

Die Wirkung von Dränagen wurde im Untersuchungsgebiet durch den Laufzeitvergleich der Messwerte der Pegel P2 und P3 bewertet. Die Fließzeit vom Pegel P3 bis zum Pegel P2 wurde auf ca. 10 bis 15 Minuten geschätzt.

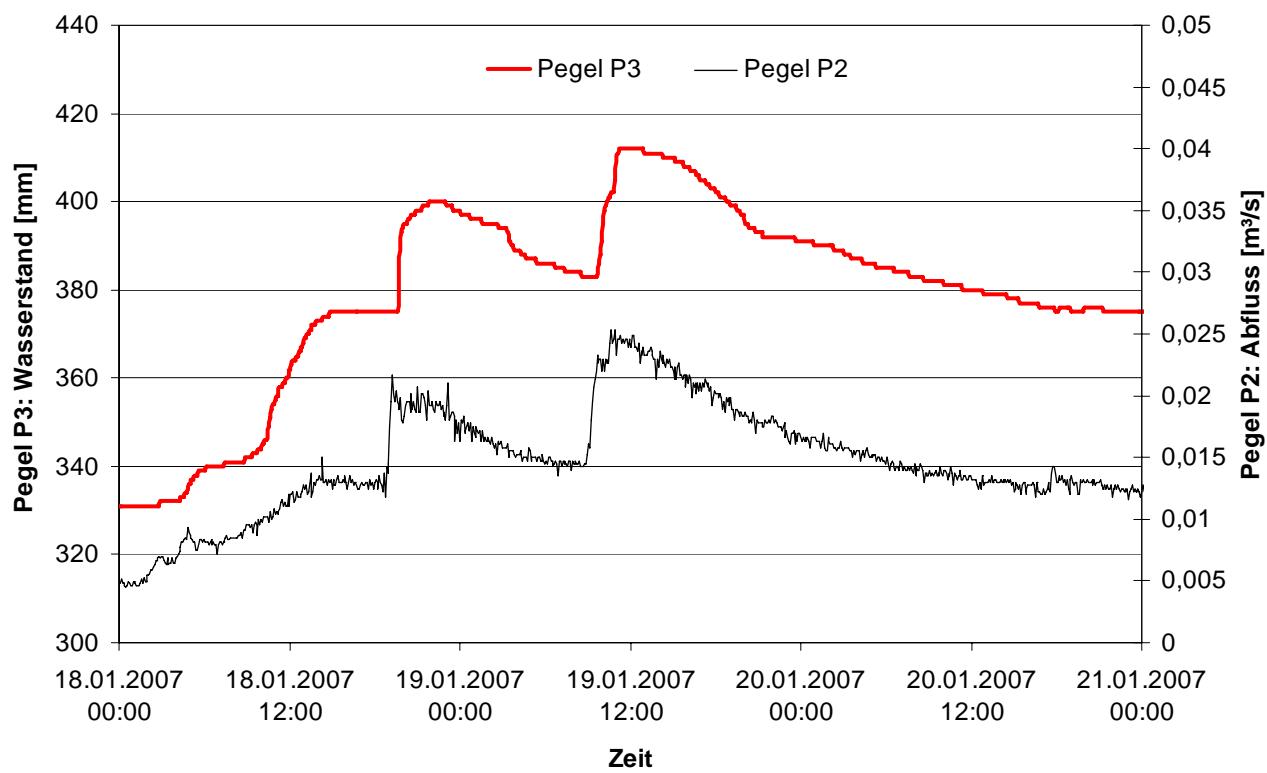


Abb. 84: Vergleich der durch Pegel P3 aufgezeichneten Wasserstände mit den am Pegel P2 ermittelten Abflüssen exemplarisch für ein Niederschlagsereignis im Januar 2007

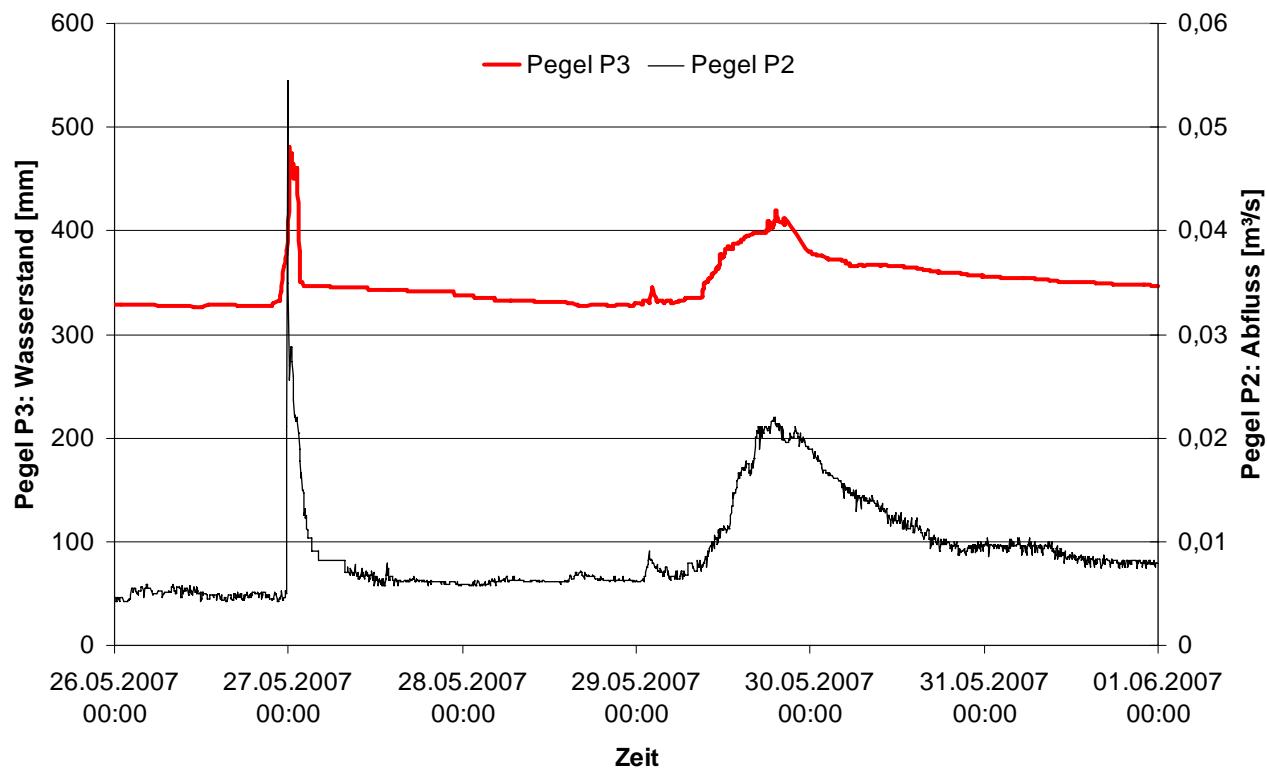


Abb. 85: Vergleich der durch Pegel P3 aufgezeichneten Wasserstände mit den am Pegel P2 ermittelten Abflüssen exemplarisch für ein Niederschlagsereignis im Mai 2007

Beide Messreihen verlaufen weitgehend parallel ohne zeitlichen Versatz (Abb. 84 und Abb. 85). Zu erwarten wäre, dass der Abfluss des Venturi-Messgerinnes (Pegel P2) vor allem in den Sommermonaten, abhängig vom k_f -Wert des Bodens, zeitlich versetzt nach Niederschlagsereignissen Abflusspeaks aufzeigen müsste bzw. ein zeitlicher Nachlauf zu erkennen ist, dies ist jedoch nicht zu beobachten.

Auf extreme Niederschlagsereignisse ist der Einfluss von Dränagen gering, da in diesem Fall der Oberflächenabfluss dominiert. Niederschlagsereignisse derartiger Intensität wurden im Messzeitraum zwischen 2005 und 2007 jedoch nicht aufgezeichnet.

Während der Sommermonate konnten an einzelnen Dränagesträngen Schüttungen von bis zu 500 ml/s nach vereinzelten Niederschlägen gemessen werden. Dies weist darauf hin, dass durch die Dränagen keine deutlich sichtbare abflussverzögernde Wirkung auf den betrachteten Flächen der Domäne erreicht wird, sondern der Boden im Gegenteil schnell entwässert wird, was unter ungünstigen Bedingungen eher auf eine abflussverstärkende Wirkung schließen lässt. In diesem Fall kann zur Verbesserung des Wasser- rückhaltes die Schließung der Dränagen sinnvoll sein.

7 Hydrologische Modellierung in großen Einzugsgebieten am Beispiel von Fulda und Diemel

Nachdem die Wirkung verschiedener Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen auf den Hochwasserscheitel in einem kleinen Einzugsgebiet untersucht wurde, soll die Wirkung großflächig abgeschätzt werden. Die Untersuchungen wurden in den Einzugsgebieten der Fulda (6.945 km^2) und Diemel (1.760 km^2) durchgeführt. Zusammen haben beide Einzugsgebiete eine Fläche von 8.705 km^2 . In Einzugsgebieten mit einer Größe von mehreren 1.000 km^2 wird die Hochwasserwelle stark durch die Charakteristik des Gewässernetzes beeinflusst. Hier ist eine Hochwasservorhersage mit Vorwarnzeiten möglich. Diesbezüglich hat die Betrachtung der Hochwasserscheitel eine bedeutende Rolle.

Die Abbildung einer solch großen Fläche erfolgt im Modell unter anderen Voraussetzungen. Diesbezüglich muss vor allem auf die oftmals fehlenden Datengrundlagen hingewiesen werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Inputdaten und Festlegungen vom Autor dieser Arbeit geliefert und die Auswertungen sowie die Interpretation der Ergebnisse vorgenommen. Die Berechnung der entwickelten Szenarien wurde vom Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt.

7.1 Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS

Für die hydrologische Modellierung der zu untersuchenden Fragestellungen wurde das Modell NAXOS (**N**iederschlag-**A**bfluss-**M**odell für **X** Operations-**S**ysteme) verwendet. Das Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS ist ein detailliertes konzeptionelles Einzugsgebiets-Modell, welches im Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig entwickelt worden ist. Für die Aufbereitung von Daten besteht eine Anbindung an ein GIS-System. Der Einsatzbereich liegt in Flusseinzugsgebietsgrößen von wenigen Hektar bis zu 30.000 km^2 und ermöglicht über Zusatzmodule die Bearbeitung verschiedener Fragestellungen. Der Einfluss von Flächennutzungsänderungen auf das Abflussverhalten kann im Modell berechnet werden.

7.1.1 Eingangsdaten für das Flussgebietsmodell der Fulda und Diemel

6.191 km^2 des Fuldaeinzugsgebietes liegen in Hessen, 632 km^2 in Nordrhein-Westfalen, 97 km^2 in Niedersachsen. 22 km^2 der bayerischen und 3 km^2 der thüringischen Rhön entwässern ebenfalls in die Fulda. Die Fulda entspringt an der Südseite der Wasserkuppe in 850 m Höhe. Ein Großteil der Fulda ist als Bundeswasserstraße ausgebaut. Das Einzugsgebiet hat Mittelgebirgscharakter und ist durch vielseitige Landschaftstypen und stark wechselnde Höhenlagen geprägt, wodurch Extremhochwasser überwiegend im Winter und Frühjahr auftreten. Von besonderer Bedeutung sind dabei Niederschläge und eine gleichzeitige Schneeschmelze in Vogelsberg und Rhön.

Die Geländehöhen variieren zwischen 100 m ü. NN in den Tälern und $600 – 800 \text{ m}$ in den Kammlagen. Die Fulda überwindet auf einer Gewässerlänge von 220 km einen Höhenunterschied von etwa 730 m . Überwiegend ist die Fulda mehr oder weniger tief in den Buntsandstein der von ihr durchflossenen Berg- und Hügelzüge eingeschnitten. Sie hat ein durchschnittliches Gefälle zwischen 14 % in der Quellregion und $0,4 – 1 \text{ %}$ in den weiten Talauen. Die Talbreite schwankt zwischen 250 m im Oberlauf und 2.000 bis 3.000 m im Kasseler Becken. Die Niederschläge variieren zwischen 300 mm und 1.800 mm im Jahr. Der mittlere jährliche Gebietsniederschlag beträgt etwa 740 mm . Der Mittelwasserabfluss der Fulda am Pegel Guntershausen (AEO = 6.366 km^2) beträgt $58 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht einer Mittelwasserabflussspende vom $M_q = 9,1 \text{ l/(s·km}^2)$ oder einer mittleren jährlichen

Abflusshöhe von 287 mm/a. Bei einem mittleren jährlichen Niederschlag von 740 mm kommen somit 453 mm, z. B. durch Verdunstung, nicht zum Abfluss.

71 % des Diemeleinzugsgebiets liegen in Hessen, 29 % in Nordrhein-Westfalen. Wie die Fulda hat auch das Diemeleinzugsgebiet typischen Mittelgebirgscharakter. Im Mittellauf sind flache Senken und geringe Erhebungen zu finden. Die Diemel entspringt auf einer Höhe von ca. 680 m ü. NN im Hochsauerlandkreis und hat einen Fliessweg von 110 km. Die höchste Erhebung liegt auf 840 m ü. NN. Bis zur Mündung überwindet die Diemel eine Höhendifferenz von 580 m. Das Talgefälle variiert von 20 ‰ im Oberlauf, 7 ‰ im westlichen Oberlauf und 1 ‰ im Mittel- und Unterlauf. Die mittleren jährlichen Niederschläge schwanken zwischen 900 mm und 1250 mm im Quellgebiet, 650 mm am Oberlauf und 800 mm im Mündungsbereich. Der Mittelwasserabfluss der Diemel am Pegel Helmarshausen (AEO: 1.755 km²) beträgt 15,6 m³/s. Dies entspricht einer Mittelwasserabflussspende von $M_q = 8,89 \text{ l/(s·km}^2)$ oder einer mittleren jährlichen Abflusshöhe von 280 mm/a. Charakteristisch für das Einzugsgebiet ist ein steiles Ansteigen und Abfallen der Hochwasserwellen. Die Ursache dafür ist die Topografie mit einer schmalen, langgestreckten Form des Einzugsgebietes und die Lage zwischen den Mittelgebirgen mit ihrem hohen Gefälle. Die anstehenden Böden sind zudem nach Sättigung meist nur noch in sehr geringem Maße durchlässig (Meon et al., 2006).

In einem Flussgebietsmodell werden physikalische Kenngrößen des Einzugsgebiets wie z. B. Gebiets- und Gerinnegefälle, Bodennutzung und Versickerungseigenschaften der oberflächennahen Bodenschicht als sogenannte Gebietskennwerte oder -parameter bestimmt. Nach Eingabe aller Daten erfolgt die Kalibrierung, d.h. der iterative Abgleich von Modellrechnungen und in Natura gemessenen Abflüssen.

Eingangsdaten in das Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS sind:

- statistische Niederschläge und in Gebieten mit Schnee die Lufttemperatur,
- gemessene Niederschläge (zur Kalibrierung),
- Abflussdaten (gemessene Ereignisse zur Kalibrierung),
- Gebietskennwerte für jede Teilfläche (z.B. Größe, Gefälle des Gebietes und des Gerinnes, Konzentrationszeit, Landnutzung, Bodenart und Vegetation),
- Topografie aus einem digitalen Höhenmodell.

Einzugsgebietsmerkmale wie Größe, Gefälle, Konzentrationszeit, Bodenart, Landnutzung und Vegetation werden aus Karten oder einem Geografischen Informationssystem gewonnen und aufbereitet.

Für das Niederschlag-Abfluss-Modell stehen die Daten von 57 Niederschlagsschreibern mit überwiegend im Minutentakt aufgezeichneten Werten zur Verfügung. Insgesamt 37 Pegel liefern Informationen über Wasserstände und Durchflüsse und dienen ebenfalls zur Modellkalibrierung.

Für die Fließgewässer müssen Daten in unterschiedlicher räumlicher Verteilung den oberirdischen Einzugsgebieten bzw. Teileinzugsgebieten zugeordnet werden. Im Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis des Landes Hessen wird das Einzugsgebiet der Fulda in 1.172 Teilflächen (mittlere Teilflächengröße 5,9 km²) eingeteilt, das der Diemel in 320 Teilflächen (mittlere Teilflächengröße 5,5 km²). Die Festlegung der Wasserscheiden der oberirdischen Einzugsgebiete erfolgt auf der Grundlage der Geländetopografie. Im Modell wird angenommen, dass der Niederschlag innerhalb einer Teilfläche einheitlich ist. Durch entsprechende Erhöhung der Teilflächenanzahl kann eine Anpassung an die räumliche Variation der Gebietsmerkmale von Einzugsgebieten erfolgen. Gebietskenndaten von außerhalb der hessischen Einzugsgebiete der Fulda und Diemel liegenden Teilflächen wurden, wenn vorhanden, mit Daten bereits existierender Modelle des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau ergänzt.

Die folgende Abb. 86 zeigt die räumliche Verteilung der im Modell berücksichtigten Pegel.

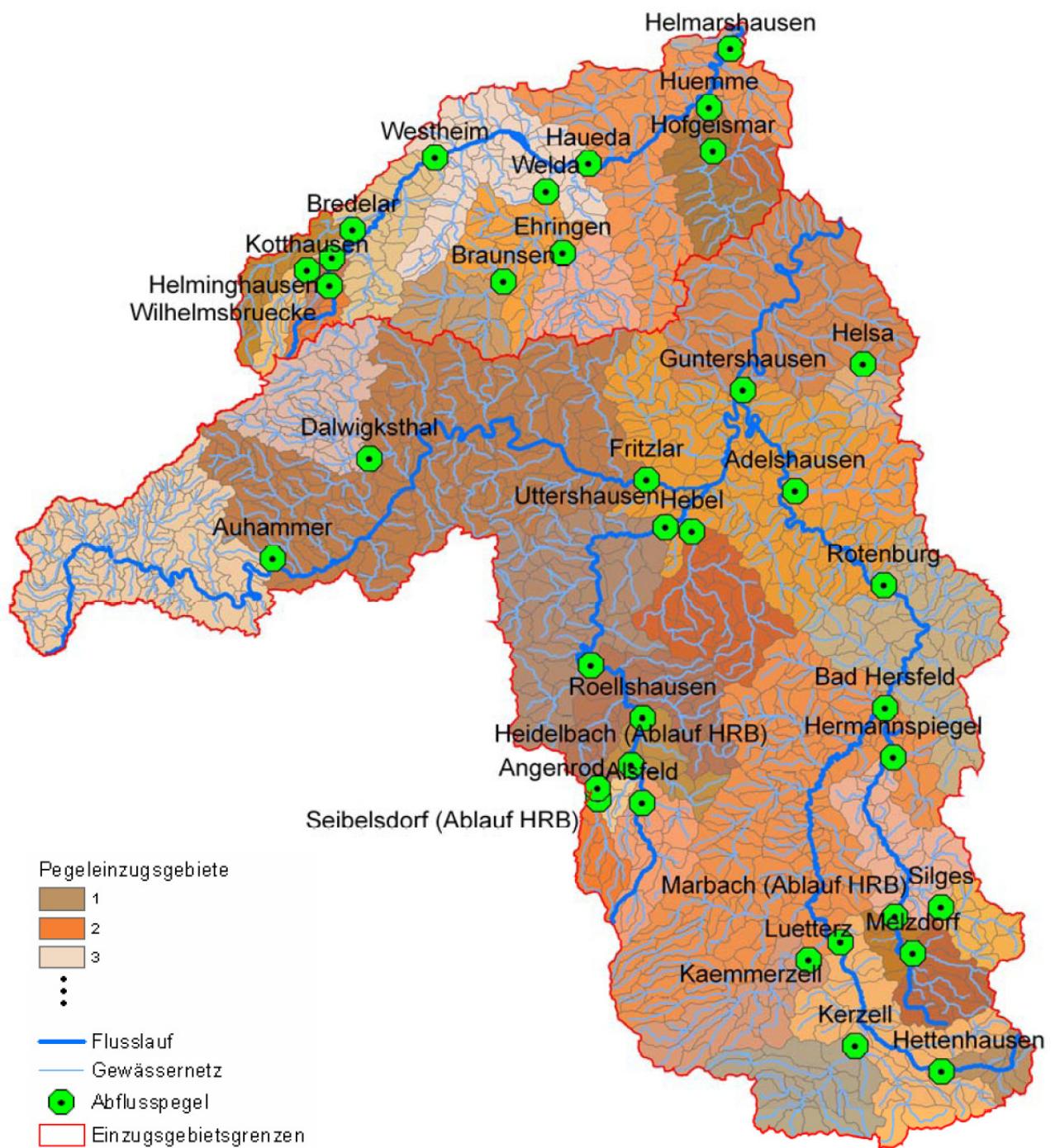


Abb. 86: Pegel in den Einzugsgebieten von Fulda und Diemel (Meon et al., 2006)

Die Topografie wird durch digitale Geländemodelle abgebildet. Für den hessischen Teil der Einzugsgebiete liegt ein Höhenmodell mit einer Rasterweite von 40 m, für den nordrhein-westfälischen Teil des Diemeleinzugsgebietes mit einer Rasterweite von 50 m vor.

Informationen zu den Böden im Einzugsgebiet wurden den digitalen Bodenflächendaten im Maßstab 1:50.000 aus dem Fachinformationssystem Boden entnommen (HLUG, 2005). Im Mittelpunkt steht dabei die strukturierte Beschreibung des Bodens für diskrete Flächen-einheiten unter Beachtung der Bodennutzung und Bodenbedeckung.

Um den Einfluss des Bodens auf die Höhe des abflusswirksamen Niederschlags zu erfassen, werden im hydrologischen Modell vier Gruppen hinsichtlich des Versickerungsvermögens bzw. der Abflussbereitschaft unterschieden.

Die Bodentypen werden aus Bodenkarten abgegriffen und den Bodengruppen 1 bis 4 nach dem SCS-Verfahren zugeordnet. Eine feinere Einteilung ist ebenfalls möglich. Die folgende Abb. 87 erläutert das Versickerungsverhalten der verschiedenen Böden und zeigt den quantitativen Anteil der verschiedenen Böden in den untersuchten Einzugsgebieten.

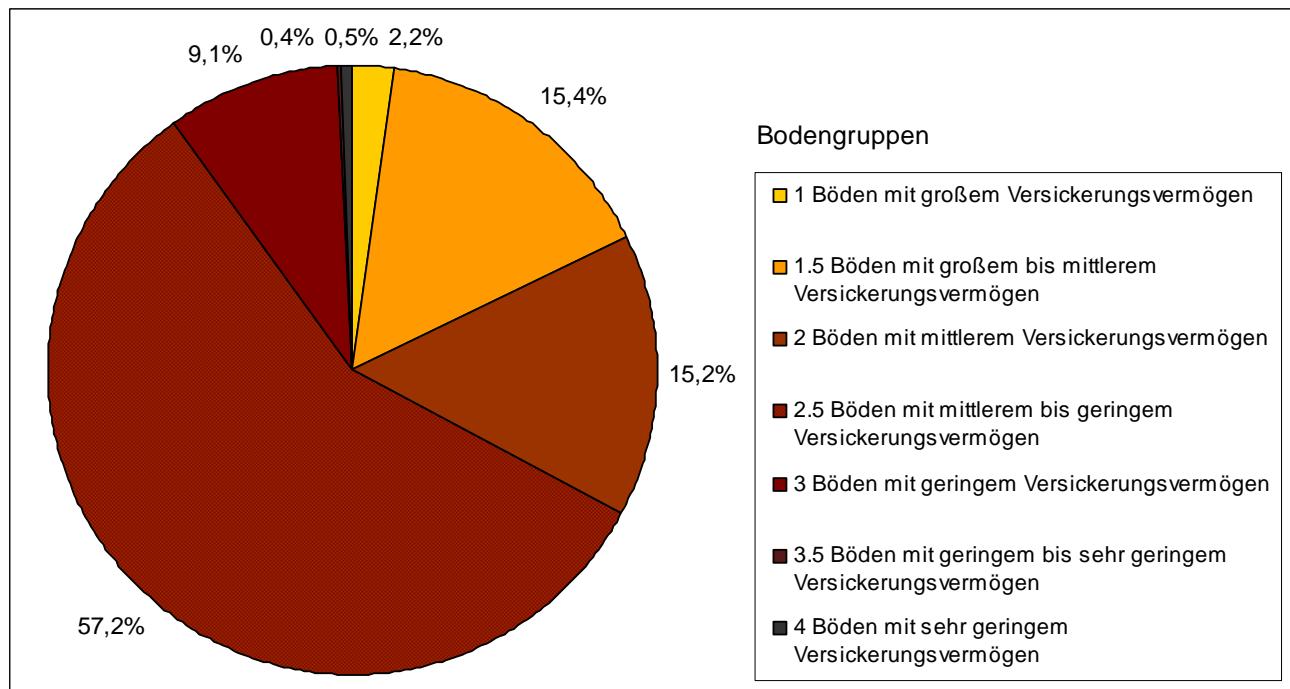


Abb. 87: Anteile der Bodengruppen in den Flussgebietsmodellen für Fulda und Diemel (Meon et al., 2006)

Zur Berücksichtigung der Landnutzung im Modell wurden die Daten von CORINE Land Cover (UBA, 2000) implementiert. Unterschieden wurden 37 verschiedene Bedeckungssarten. Digitale Landnutzungskarten dienen der Ableitung von Landnutzungskennzahlen für die unterschiedlichen Landnutzungen einer Teilfläche. Da die Landnutzung innerhalb einer Teilfläche nicht homogen ist, können beliebig viele Landnutzungen angegeben werden. Aus der Landnutzung wird der CN-Wert für das SCS-Verfahren im N-A-Modell abgeleitet. Der CN-Wert ist ein Maß für das maximale Speichervermögen in Abhängigkeit vom Boden, seiner Nutzung und dem Vorregen. Er bewegt sich im Bereich von 0 bis 100. Bei einem CN-Wert von 0 findet kein Abfluss statt, bei einem Wert von 100 hingegen fließt der gesamte Niederschlag auf der Oberfläche ab. Für die Ermittlung des mittleren CN-Wertes für die Teilfläche ist für jeden Landnutzungsanteil der zugehörige CN-Wert aus Tabellen zu entnehmen. Dieser wird mit der Flächengröße multipliziert und die Summe der somit gewichteten CN-Werte gebildet. Meon et al. (2006) konnte an mehreren Teilstücken bestätigen, dass die Auflösung der Datengrundlage (CORINE und ATKIS) im Niederschlag-Abfluss-Modell keinen Einfluss auf das Speichervermögen des Bodens hat (Abb. 88). Die ATKIS-Daten weisen jedoch eine höhere Lagegenauigkeit auf.

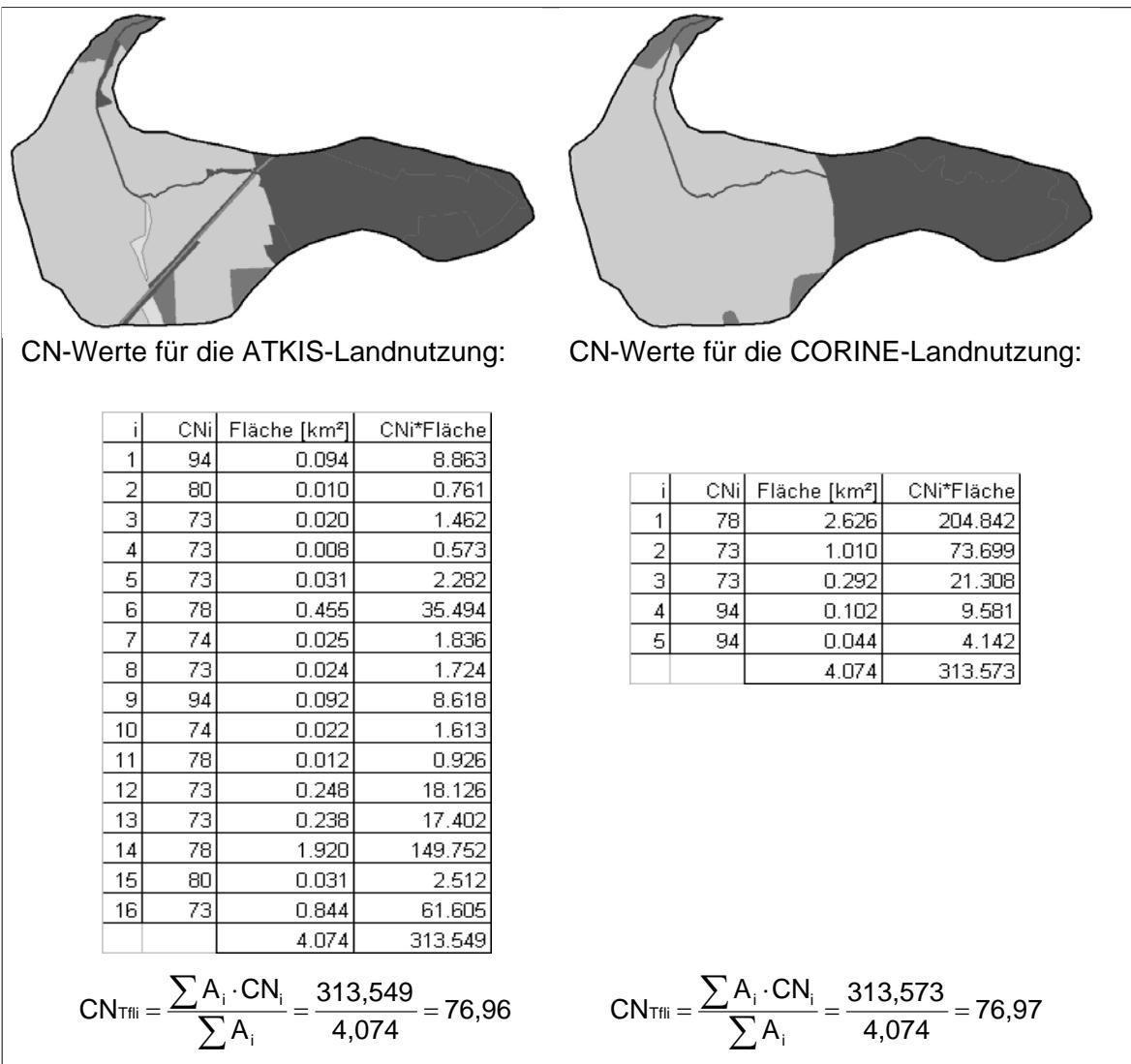


Abb. 88: Ermittlung des CN-Wertes für eine beliebige Teilfläche (Meon et al., 2006)

Für die hydrologischen Betrachtungen ist bei der Landnutzung insbesondere die Evapotranspiration von Bedeutung, die sich durch den unterschiedlichen Bewuchs ergibt. Dabei ergeben sich bei Verwendung von CORINE oder ATKIS nur geringe Unterschiede. In der hydrologischen Modellierung werden somit die Daten zur Landnutzung aus CORINE Land Cover verwendet. Da diese Daten flächendeckend für Deutschland vorliegen, können Probleme, die sich aus Unterschieden in der Erhebung von ATKIS-Daten in den einzelnen Bundesländern ergeben, vermieden werden. In anderen Untersuchungen (Raumplanung und Landschaftsplanung), die in der Regel sehr viel kleinräumiger sind, wird üblicherweise auf die detaillierten ATKIS Daten zurückgegriffen.

Die Ermittlung der Bemessungsregenfälle erfolgte unter Nutzung der Ergebnisse von KOSTRA 87 (Koordinierte Starkniederschlag-Regionalisierung – Auswertung 1987, DWD, 1997). Dabei handelt es sich um eine flächendeckende Aussage über Starkniederschlags-höhen in Abhängigkeit von Dauer und Häufigkeit.

Der Intensitätsverlauf des zu erstellenden Bemessungsregenfalls wird in Anlehnung an die DVWK-Regeln (1984) vorgegeben:

- nach ca. 30 % der Regendauer sind 20 % der Niederschlagssumme gefallen,
- nach ca. 50 % der Regendauer sind 70 % der Niederschlagssumme gefallen,
- nach 100 % der Regendauer sind 100 % der Niederschlagssumme gefallen.

Die Berechnung des Bemessungsniederschlags kann auf zweierlei Arten erfolgen.

Der KOSTRA 87-Atlas umfasst Karten mit Rasterfeldern einer Flächengröße von $71,5 \text{ km}^2$, denen regionalisierte Niederschlagshöhen zu entnehmen sind für:

- drei Dauerstufen: $D = 24 \text{ h}, 48 \text{ h}$ und 72 h ,
- drei Wiederkehrzeiten: $T = 1 \text{ a}, 10 \text{ a}$ und 100 a ,
- drei Zeitspannen: Sommer, Winter und Jahr.

Die aufgelisteten Verteilungsparameter $u_j(D)$ und $w_j(D)$ (D : Niederschlagsdauer [h]) ermöglichen die Berechnung von Starkniederschlagshöhen $h_N(T_n, D)$ in mm für Zwischenwerte der Wiederkehrzeit T_n [a] (DWD, 1997).

7.1.2 Berechnungsalgorithmen

Für die Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags aus dem gefallenen Niederschlag wird der Ansatz des SCS (U. S. Soil Conservation Service) eingesetzt. Mit diesem Verfahren ist es möglich die Bodennutzung sowie Bodennutzungsänderungen bei der Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags zu berücksichtigen. Als Parameter werden Bodennutzung und SCS-Bodengruppe der Teileinzugsgebiete vorgegeben.

Eine Speichervorfüllung wird durch den Modellparameter relative Bodenfeuchte (bofeu) berücksichtigt, Interzeptions- und Muldenverluste durch den Anfangsinfiltrationsverlust (I_a). Die maximal möglichen Verluste (I_{max}), die während der gesamten modellierten Zeitspanne auftreten, sind vorgegeben. Der Anfangsverlust (I_a) wird als Verlusthöhe in mm angegeben. Bei Langzeitmodellierungen wird bei Simulationsbeginn ein Wert von 2 mm angenommen. Bei Hochwasserereignissen wird die Verlusthöhe aus den Ganglinien der gemessenen Ereignisse bestimmt, indem der Niederschlag angesetzt wird, der zwischen Niederschlagsbeginn und Beginn des Anstiegs des Abflusses gefallen ist.

Die maximal mögliche Infiltration ist abhängig von den CN-Werten und der aktuellen Bodenfeuchte. Die CN-Werte liegen tabelliert in Abhängigkeit der Bodengruppe und der Bodennutzung vor. Weiterhin werden drei Bodenfeuchteklassen definiert, wobei die Bodenfeuchtekasse I für trockenere, Klasse II für mittlere und Klasse III für feuchtere Verhältnisse Gültigkeit hat. Der Startwert der relativen Bodenfeuchte ist ein Kalibrierungsparameter. Er ergibt sich aus der fortlaufenden Wasserbilanzierung, die am Ende jedes Rechenschrittes aus Niederschlag, Verdunstung, Bodenfeuchtesättigung und Flächenabfluss bilanziert wird. Die Bodenfeuchte ändert sich während des gesamten Simulationsablaufs. Mit abnehmender Anfangsbodenfeuchte verringert sich der Direktabflussanteil bzw. der Gesamtabflussbeiwert, da ein Teil des Niederschlagswassers im Boden verbleibt oder stärker verzögert abfließt. Zur Nachbildung der Saugspannung im Boden wird eine vereinfachte lineare Abhängigkeit zwischen Niederschlag und Aufsättigungsanteil verwendet.

Trifft der Niederschlag auf einen trockenen Boden, wird ein Teil zur Aufsättigung der Bodenfeuchte verwendet. Da die Aufenthaltszeit des Oberflächenabflusses in der Teilfläche zu kurz ist, wird nur der Interflow- und Grundwasseranteil des Abflusses zum Vorgang der Bodenfeuchtesättigung herangezogen. Es werden maximal 90 % des Niederschlages zur Aufsättigung des Bodens verwendet. Auch bei sehr trockenen Böden bleiben somit mindestens 10 % des Niederschlages abflusswirksam.

Innerhalb einer Teilfläche wird die Bodengruppe für jede Landnutzung einzeln vorgegeben. Die Abflussbildung berücksichtigt mehrere Landnutzungsanteile je Teilfläche getrennt und fasst die Abflussanteile zusammen. Der bodenfeuchteabhängige CN-Wert wird in jedem Zeitschritt für jeden Landnutzungsanteil einzeln berechnet (Riedel, 2001).

Der Abfluss aus den Teilflächen beinhaltet die Prozesse Verluste aus Interzeption, Infiltration und Abflussverzögerungsspeicher, die Abflussbildung und den Basisabfluss. Jeder

Prozess wird als gleichförmig über ein Teileinzugsgebiet angenommen. Für jeden Anteil einer Teilfläche mit unterschiedlicher Landnutzung wird getrennt der effektive Niederschlag ermittelt. Dieser ist so lange Null, wie der aufsummierte Niederschlag eines Ereignisses unterhalb des aktuellen Anfangsverlustes liegt. Danach ergibt sich eine Aufteilung des effektiven Niederschlages in einen Anteil, der in das Grundwasser versickert, und einen Direktabflussanteil. Der Anteil des Direktabflusses ist abhängig von der aktuellen Speicherfüllung. Im Verlauf eines Niederschlagsereignisses füllt sich der Bodenspeicher und der Direktabflussanteil steigt. Die Niederschlagsanteile für die Abflusskomponenten ergeben sich aus der Summe der Niederschlagsanteile aller Landnutzungen.

Die weiteren Vorgänge wie Abflussbildung oder Fließgeschwindigkeit im Gerinne sind im Handbuch von Riedel (2001) detailliert beschrieben.

Über Parameter der Abflussbildung wie Bodenfeuchte, Abflusskonzentration und die Aufteilung des abflusswirksamen Niederschlages auf die drei Speicher Oberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss kann das Modell kalibriert werden. Gebietskennwerte können überarbeitet oder verifiziert werden. Fließgeschwindigkeit und Fließzeit können ebenso angepasst werden wie der Faktor für die Retention des Oberflächenabflusses.

Verschiedene Hochwasserereignisse konnten mit dem Modell nachgebildet werden. Exemplarisch ist die kalibrierte Abflussganglinie für ein Hochwasser am Pegel Guntershausen an der Fulda dargestellt (Abb. 89).

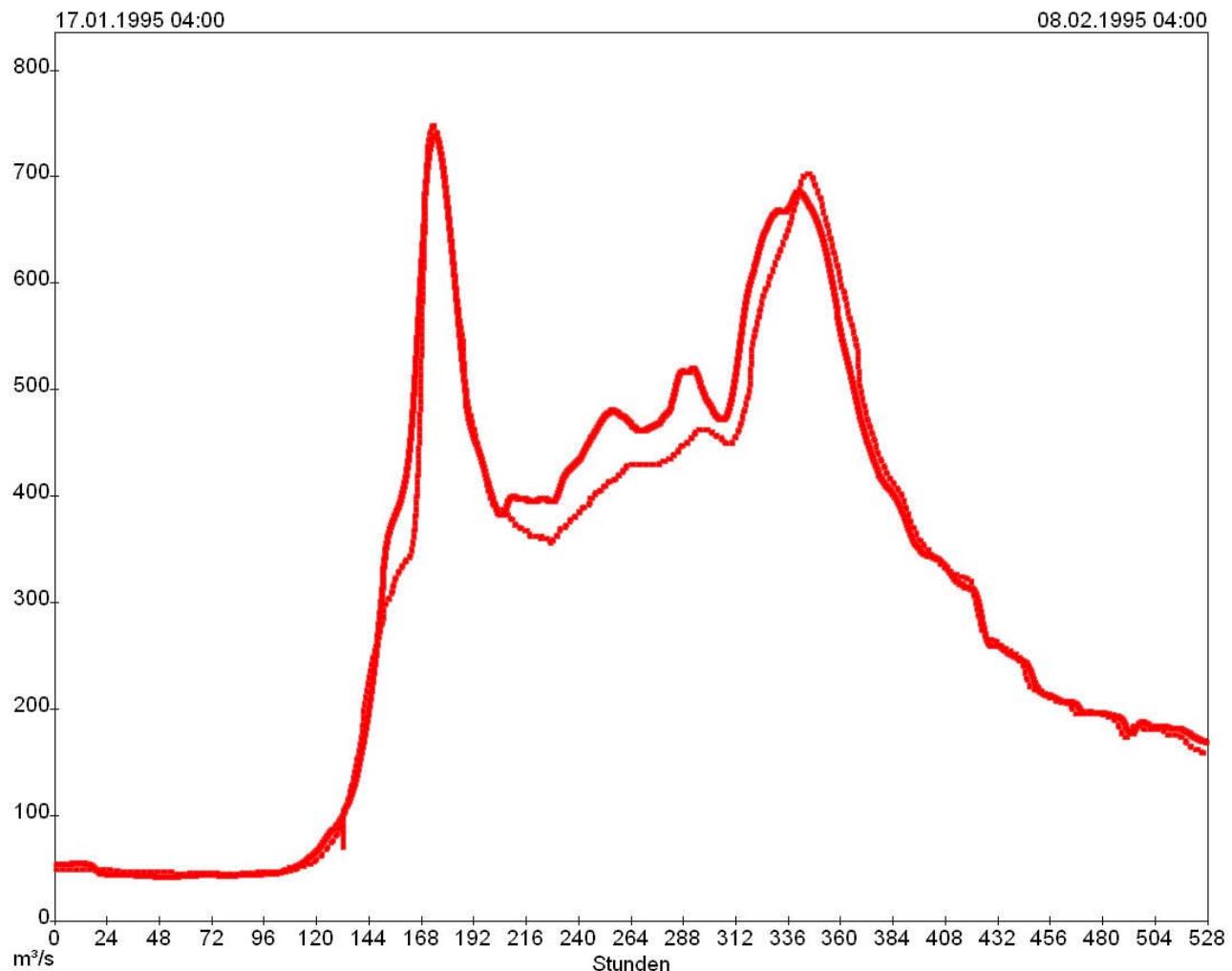


Abb. 89: Pegel Guntershausen (beobachtet: dünne Linie; berechnet: breite Linie) für die Ereignisse in 1995 (Meon et al., 2006)

7.2 Landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel

Betrachtet man im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel die unterschiedlichen Flächennutzungen nach CORINE Land Cover hat die Landwirtschaft einen Anteil von über 50 % (Abb. 90). Dieser Wert setzt sich aus Ackerland, Grünland und sogenannten komplexen Parzellen zusammen. Als komplexe Parzellen werden kleine Flächen mit verschiedenen einjährigen Kulturen, Weideland und Dauerkulturen bezeichnet.

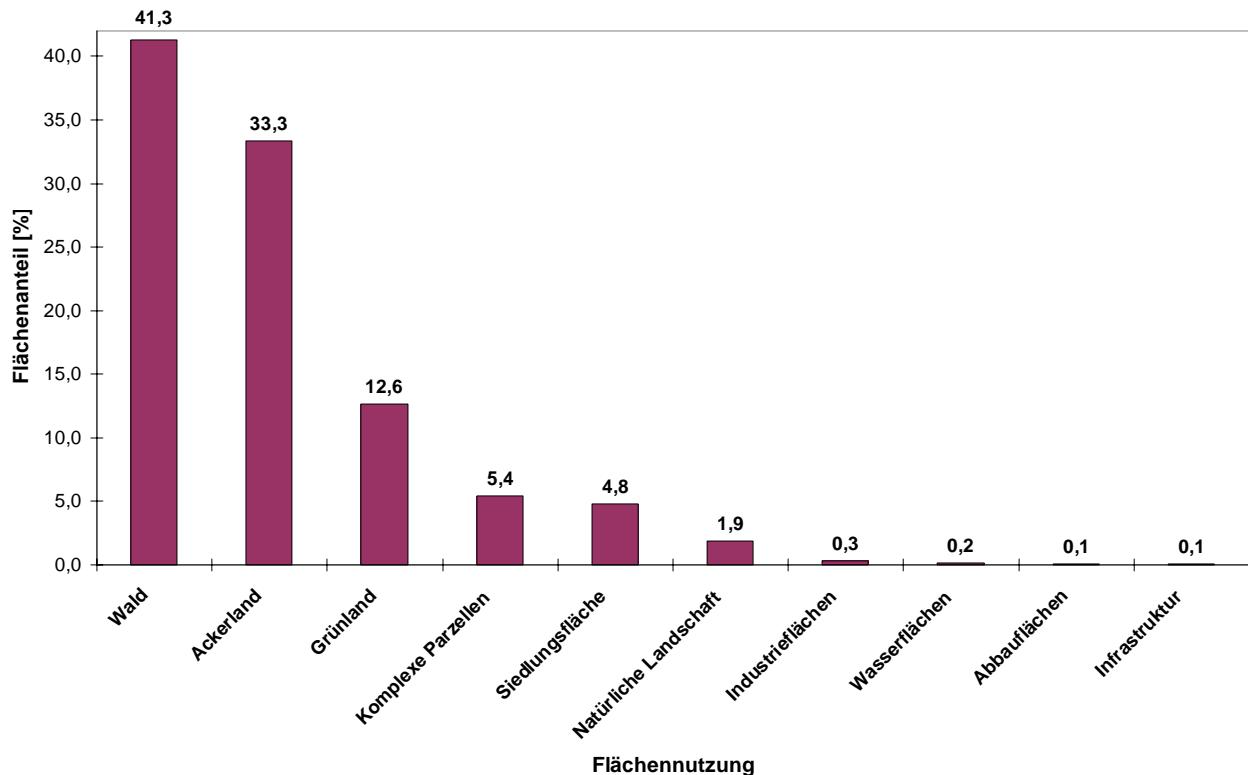


Abb. 90: Flächennutzung im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel (nach CORINE Land Cover)

7.2.1 Kriterium der Nutzungsänderung

Zu untersuchen ist, auf welchen landwirtschaftlich genutzten Flächen eine Retentionswirkung erzielt werden kann. Grünlandflächen scheiden aus den Betrachtungen aus. Ein Großteil der Grünlandflächen liegt im Auenbereich. Eine Umnutzung dieser Flächen widerspricht den Zielen des Gewässerschutzes.

Die Zuordnung der Flächen erfolgt über die Kartierung nach CORINE Land Cover. Digitale Landnutzungskarten wie CORINE Land Cover dienen der Ableitung von Landnutzungskennzahlen für die unterschiedlichen Landnutzungen einer Teilfläche. Da die Landnutzung innerhalb einer Teilfläche nicht homogen ist, können beliebig viele Landnutzungen angegeben werden. Für die Abschätzung der hydrologischen Wirkung im Modell werden lediglich die Ackerflächen betrachtet. Der Einfluss auf die Verformung der Hochwasserwellen im Einzugsgebiet soll dabei untersucht werden.

Eine optimale Retentionswirkung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen könnte man erreichen, wenn alle Ackerflächen konservierend bewirtschaftet würden. Nicht nur der störenden Erosionsgefahr könnte wirksam begegnet werden, auch der Rückhalt durch ein gesteigertes Infiltrationsvermögen ist nachgewiesen. Für die praktische Umsetzung ist eine ganzheitliche Änderung der Bodenbearbeitungsmethoden auf Ackerflächen derzeit noch

unrealistisch. Trotz aller Vorteile der konservierenden Bodenbearbeitung ist eine Anwendung nicht auf allen Flächen geeignet bzw. sinnvoll. Die Bodenqualität sowie sich ändernde Voraussetzungen in der Wachstumsphase der Pflanzen spielen dabei eine wichtige Rolle. Nachgewiesene Temperaturänderungen im Boden sowie die Gefahr der Pilzentwicklung durch die verwendete Mulchsaat sind nur zwei Beispiele dafür, dass die Umstellung auf eine konservierende Bodenbearbeitung auf zunächst weniger geeigneten Flächen unter fachlicher Beratung erfolgen sollte und nur langfristig umzusetzen ist.

Unter diesem Aspekt und der Berücksichtigung, dass nicht alle Landwirte trotz bestehender Förderprogramme eine geänderte Bodenbearbeitung auf Grund betrieblicher Strukturen durchführen würden, gilt es, zunächst Flächen abzugrenzen, auf denen eine Umwandlung sinnvoll erscheint.

Der größte Einfluss der Ackerflächen auf das Gewässersystem besteht im verstärkten Sediment- und Schwebstoffeintrag sowie dem Nährstoffeintrag mit der Gefahr der Eutrophierung stehender und fließender Gewässer. Bodenerosion ist ein natürlicher Prozess, der durch wind- oder wasserbedingten Abtrag von festen Bodenbestandteilen erfolgt, besonders wenn der Boden nicht durch Bewuchs geschützt oder die Hangneigung zu groß ist. Anthropogene Einwirkungen wie landwirtschaftliche Kulturmaßnahmen, Siedlungs- und Straßenbau können die Erosion fördern.

Untersuchte Erosionsschutzmaßnahmen speziell für den Ackerbau sind:

- die Vermeidung von langem Offenliegen des Bodens (z.B. Winterbegrünung, Untersaat mit Gräsern),
- die Anwendung von Mulch- oder Direktsaat,
- die Extensivierung der Bodenbearbeitung,
- die Umwandlung besonders steiler Äcker in Grünland,
- die Unterbindung von Maisbau in stark erosionsgefährdeten Lagen,
- ein bodenstabilisierender Zwischenfruchtanbau,
- die Anlage von Windschutzanlagen.

Mit derartigen Maßnahmen kann der Bodenabtrag reduziert werden (Kapitel 3.4). Mit dem Kriterium der Bodenerosion wurden die Ackerflächen im Einzugsgebiet bestimmt, die besonders gefährdet sind. Auf diesen Flächen werden anschließend Maßnahmen vorgeschlagen. Grundlage zur Festlegung dieser Flächen sind die Kartierungen der Flächen mit potenzieller Erosionsgefährdung in Hessen aus dem Jahr 1999 (Abb. 91, Hlug, 2005). Die Karten bewerten das gesamte Bundesland Hessen nach den natürlichen Standortfaktoren, die für die Erosionsgefahr der Flächen von Bedeutung sind.

Dies sind:

- Relief (Hangneigung),
- Boden (Gruppierung nach Tongehalt bzw. Bodenzahl der Reichsbodenschätzung),
- Niederschlag (Starkregenhäufigkeit = Anzahl der Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag).

Die Darstellung erfolgt in 6 Gefahrenstufen (E1 bis E6). Dabei definieren die unterschiedlichen Gefahrenstufen den Grad der Schutzbedürftigkeit des Bodens. Da im Folgenden nur Ackerflächen untersucht werden sollen, werden aus den gefährdeten Erosionsflächen lediglich die Flächen ausgewählt, auf denen Ackerbau betrieben wird (Abb. 92). Die Abstufung der Schutzbedürftigkeit dieser Flächen wird mittels empfohlener Maßnahmen bzw. Nutzungen der Flächen beschrieben. Die Einstufung in erosionsgefährdete Flächen liegt nur für den hessischen Bereich vor. Flächen im Einzugsgebiet der Fulda und Diemel die außerhalb von Hessen liegen, können mit dieser Methodik nicht beurteilt werden.

Daraus resultiert die nachfolgende Einteilung in potenzielle Gefährdungsklassen (Hlug, 2005):

E1 - Geringe Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Alle Formen und Intensitäten einer ordnungsgemäßen landwirtschaftlichen Nutzung sind möglich.

E2 - Geringe Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen sind notwendig. Beispielhaft sind hierfür die hangparallele Bewirtschaftung und vielseitigere Fruchfolgen, vor allem Zwischenfruchtbau genannt. Eine Verbesserung der Bodenstruktur (Humus- und Basenhaushalt) sollte angestrebt werden. Die Hanglängenbegrenzung wird bei ca. 200 m (z.B. Wege, Gräben) vorgeschlagen.

E3 - Mittlere Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Stärkere acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen sind notwendig. Zusätzliche Maßnahmen zur Beseitigung von Bodenverdichtungen und aufwendigere pflanzenbauliche Maßnahmen werden angestrebt, z.B. Fruchtwechsel mit bodenschützenden Kulturarten (Feldfutter) im Streifenbau (5 m bis 10 m Breite). Das Mulchverfahren wird vorgeschlagen und die Hanglängenbegrenzung liegt bei ca. 100 m.

E4 - Mittlere Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Zusätzlich zu acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen werden auch kulturtechnische Maßnahmen angestrebt. Vorgeschlagen wird ein verstärkter Streifenbau (ca. 10 m Streifenbreite) bodenschützender Kulturarten im Abstand von ca. 50 m sowie Maisanbau nur in Bodendeckern, z.B. Zwischenfrucht und Untersaat. Mulchverfahren sind notwendig. Die Hanglängenbegrenzung liegt bei ca. 50 m, realisierbar durch Streifenbau, Wegenetze mit Grabenführung, Wasserleitfurchen, Grün- und Gehölzstreifen, bewachsene Raine und Hangmulden unter andauernder Vegetationsdecke.

E5 - Hohe Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Eine permanente Vegetationsdecke der Flächen ist anzustreben. Der langjährige Feldfutterbau, die Grünlandnutzung (ggf. Ansaat) bzw. die Beweidung ist möglich.

E6 - Hohe Schutzbedürftigkeit des Bodens:

Eine permanente Vegetationsdecke ist anzustreben. Eine Beweidung ist eingeschränkt möglich. Optimal aus Sicht des Erosionsschutzes ist die extensive Grünlandnutzung bzw. eine Waldnutzung.

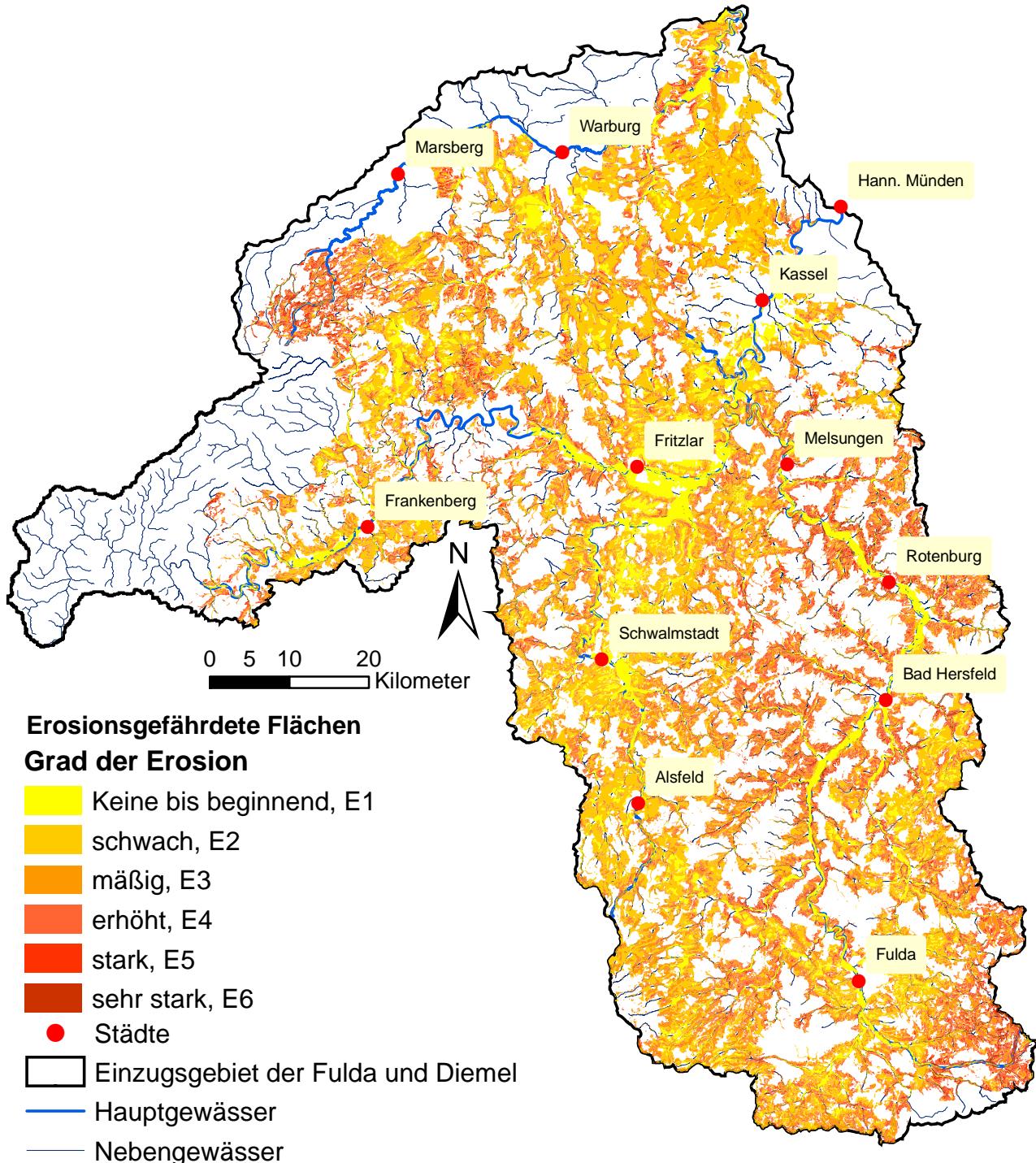


Abb. 91: Erosionsgefährdete Flächen im Einzugsgebiet der Fulda und Diemel (hessischer Teil) (Hlug, 2005)

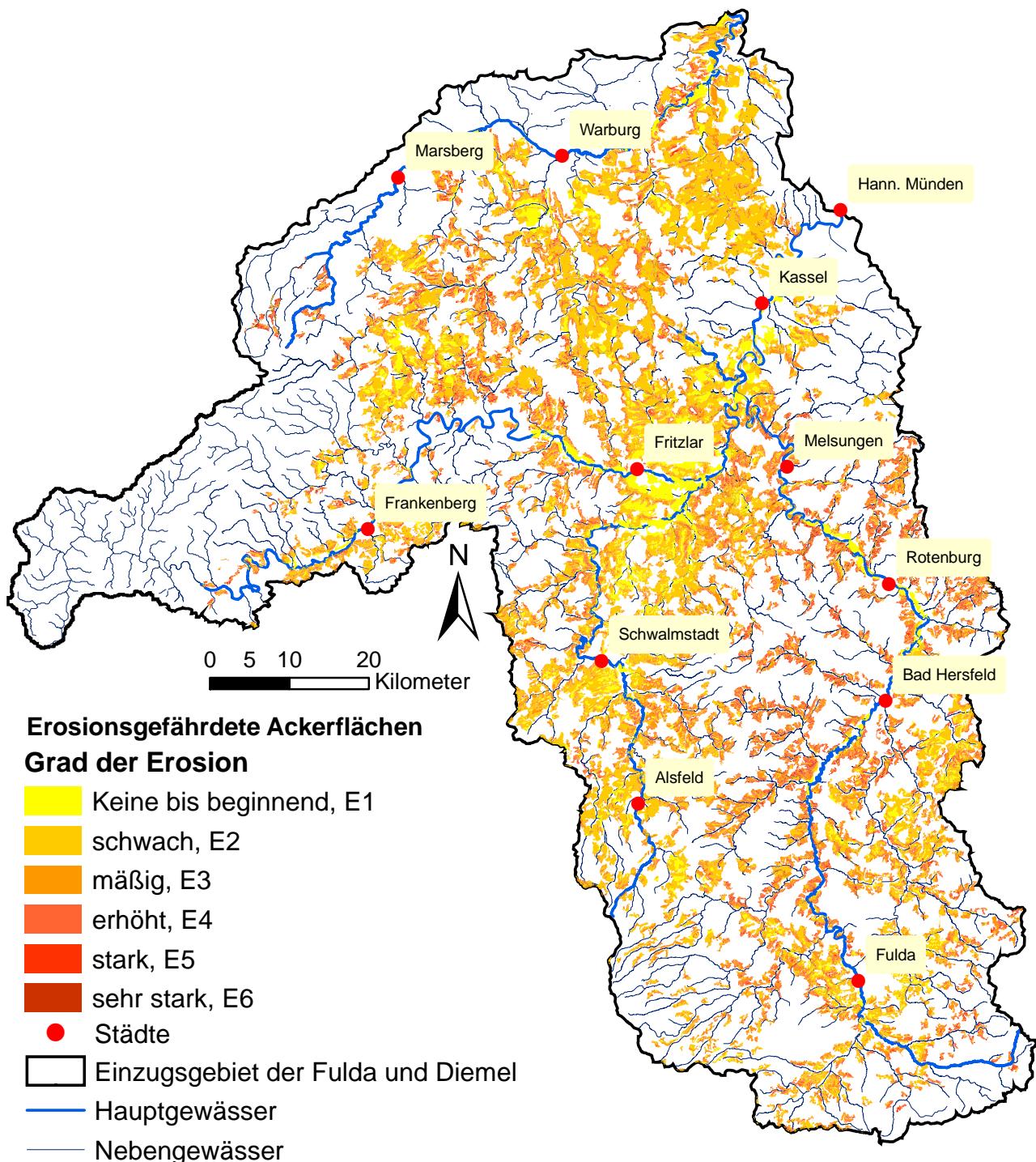


Abb. 92: Erosionsgefährdete Ackerflächen im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel (hesischer Teil)

Über das Entscheidungskriterium der Erosionsgefährdung berücksichtigt man alle ackerbaulich genutzten Flächen, auf denen es sinnvoll ist, die Bewirtschaftungsform zu ändern, um eine Reduzierung der Bodenerosion zu erreichen. Gleichzeitig mit der Reduzierung der Bodenerosion verringert sich der Oberflächenabfluss von diesen Flächen durch ein gesteigertes Infiltrationsvermögen.

Unter Berücksichtigung der Empfehlungen der Maßnahmen zur Reduzierung der Bodenerosionsgefährdung wird vorgeschlagen, alle Ackerflächen, die keine bzw. eine beginnende Erosionsgefährdung (E1) aufweisen, wie bisher konventionell zu bewirtschaften. Die in

die Klassen E2 bis E4 eingestuften Flächen sollten konservierend bewirtschaftet werden, um die Erosionsgefahr zu reduzieren. Für die festgestellten Ackerflächen der Gefährdungsklasse E5 und E6 ist eine Umwandlung in Grünland bzw. extensive Grünlandbewirtschaftung oder ganzjähriger Feldfutteranbau sinnvoll, wenn das Erosionsrisiko und die damit verbundenen Ernteeinbußen der Landwirte vermieden werden sollen. Dies ist jedoch nur sinnvoll, sofern dieser Flächenanteil im Einzugsgebiet nicht zu groß ist. Eine unkontrollierte weitere Zunahme des Grünlandanteils ist unter Umständen kritisch zu beurteilen, da der Bewirtschaftungsbedarf nicht mehr gegeben wäre.

Ebenfalls vorausgesetzt wurde, dass alle Ackerflächen, die in der HQ₁₀₀-Fläche liegen, sinnvollerweise in Grünland umgewandelt werden sollten. Die Ermittlung der HQ₁₀₀-Flächen erfolgte mittels einer GIS-basierten Abschätzung über das digitale Geländemodell und lag in digitaler Form vor (Röttcher et al., 2007a).

Aus diesen Annahmen resultiert die Nutzung der Ackerflächen für das hydrologische Modell. Daraus ergibt sich, dass von den ca. 290.000 Hektar Ackerland im Einzugsgebiet 68.000 Hektar konventionell und 194.000 Hektar konservierend bewirtschaftet werden sowie ca. 28.000 Hektar in Grünland umzuwandeln sind (Tab. 47).

Flächenumnutzung von Acker zu Grünland:	Umstellung auf konservierende Bodenbewirtschaftung (pfluglos):	weiterhin konventionelle Bodenbewirtschaftung:
<ul style="list-style-type: none"> - ca. 28.000 Hektar - Erosionsklassen 5 und 6 und Parzellen, die in der HQ₁₀₀-Fläche liegen 	<ul style="list-style-type: none"> - ca. 194.000 Hektar - Erosionsklassen 2 bis 4 	<ul style="list-style-type: none"> - ca. 68.000 Hektar - Erosionsklassen 1

Tab. 47: Änderung der Landnutzung auf den untersuchten Flächen

Abb. 93 zeigt die geänderten Bewirtschaftungsformen auf den Ackerflächen im Untersuchungsgebiet. Auffällig sind die dunkel markierten Flächen mit konventionellem Ackerbau am nördlichen Rand des Einzugsgebietes. Dabei handelt es sich um die Ackerflächen außerhalb von Hessen, die nicht mit dem Erosionskriterium bewertet werden konnten. Diese Flächen werden im hydrologischen Modell als konventionell bewirtschaftete Flächen abgebildet.

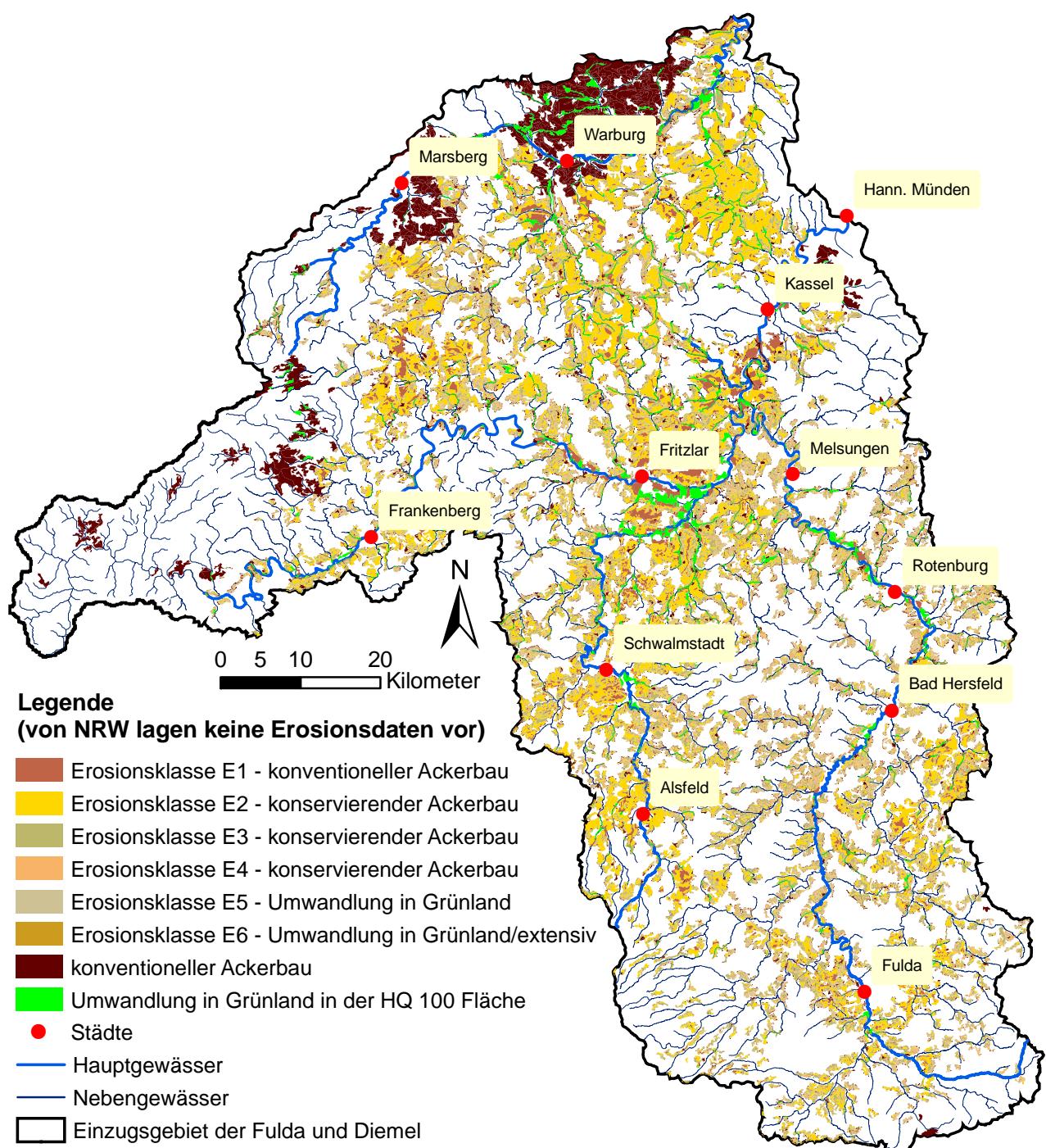


Abb. 93: Bewirtschaftung der Ackerflächen für die Abbildung im Flussgebietsmodell

Eine andere Methodik zur Identifizierung von Flächen, die mehr oder weniger stark zum Abflussprozess beitragen, wurde 2000 im Rahmen des EU-Projektes Interreg-IIc-IRMA "Schonende Bewirtschaftung von sensiblen Niederschlagsflächen und Bachauen" in Rheinland-Pfalz angewendet. Diese Methodik wurde 2005 unter Anwendung der verschiedenen Modelle im gesamten Bundesgebiet auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Ernstberger (2005) testete die Verfahren für Beispielgebiete, die von den jeweiligen Bundesländern vorgegeben wurden. Die Bewertung sensibler Flächen erfolgte unter Anwendung der Modelle SENSI MOD, ABAG und AUENMOD. Die Modelle zeigen nach Aussage des Bearbeiters auch bei schlechterer Datenlage noch die "hot spots" des jeweiligen Testgebietes. Ziel der Untersuchungen ist es, mehr oder weniger stark abflussbereite Flächen zu identifizie-

ren auf Grund von vorhandenen digitalen Daten und deren Verarbeitung. Es wird dabei eine Differenzierung von Flächen nach ihrer natürlich bedingten Neigung für verschiedene Abflussprozesse vorgenommen. Dadurch können diejenigen Prozesse und Gebiete herausgearbeitet werden, die bei Hochwasser wesentliche Abfluss- und Stoffaustagsbeiträge liefern.

Das Modell SENSI MOD berechnet in Abhängigkeit von Hangneigung, Bodenfaktoren und Landnutzung sowie Niederschlägen die Eigenschaften und die Bereitschaft der Flächen für

- den Sättigungsflächenabfluss,
- den Oberflächenabfluss,
- den Zwischenabfluss,
- eine schnelle Tiefensickerung.

Dabei wird die potenziell mögliche Abflussbereitschaft der Flächen auf Grund der Standorteigenschaften bestimmt. Die tatsächlich auftretende Abflussbereitschaft lässt sich nur in Verbindung mit detaillierten Bewirtschaftungsangaben ermitteln. Solche Daten liegen in der Regel nicht vor. Für die Modellanwendung werden Nutzungsdaten, Bodendaten und Hangneigungsdaten benötigt. Für die Auswertung der Landnutzung werden ATKIS-Daten verwendet. Die Hangneigungsdaten werden aus digitalen Höhenmodellen abgeleitet.

Der Bodenabtrag wird mit einem modifizierten ABAG-Ansatz berechnet. Der Einfluss der Bodenbedeckung (Ackerkulturen, Grünland) wird nicht berücksichtigt. Es wird unterstellt, dass es sich um Schwarzbrache flächen handelt. Damit weist die Erosionsberechnung die auf Grund von Hangneigung, Boden und Niederschlag mögliche potenzielle Erosion aus. Der Nutzen der Berechnung der potenziell möglichen Bodenerosion liegt darin, dass die Bereitschaft der Flächen zum Bodenabtrag auf Grund des Bodens, des Niederschlags und der Hangneigung ohne Nutzungsvorgaben berechnet wird. Damit können Flächen lokalisiert werden, die einer besonders bodenschonenden Bewirtschaftung bedürfen.

Für die Abschätzung der Retentionsleistung von Auenflächen wurde das Modell AUENMOD verwendet. Dies ist ein Ansatz, der sich lediglich auf die unmittelbaren Gewässerbereiche bezieht und nicht flächenhaft untersucht wird.

Die Anwendung dieser drei Verfahren wäre ebenfalls eine Methodik, abflussrelevante Flächen zu erfassen. Dennoch wurde die Erfassung auf Grundlage der Gefahrenstufenkarte Bodenerosion durch Wasser (HLUG, 2005) durchgeführt. Zum einen liegt die Gefahrenstufenkarte flächendeckend für das Land Hessen vor, wohingegen Ernstberger lediglich das 1.900 km² große Einzugsgebiet der Nidda in Hessen untersucht hat, des Weiteren wurde im hiesigen Entscheidungsalgorithmus mit der Datenbasis nach CORINE Land Cover gearbeitet. SENSI MOD beispielsweise nutzt ATKIS-Daten. Eine Bearbeitung mit ATKIS-Daten ist gegenüber den CORINE-Daten wesentlich zeitaufwendiger und benötigt sehr hohe Rechnerkapazitäten. Für eine erste Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen auf der Fläche, besonders bei solch großen Einzugsgebietsgrößen wie Fulda und Diemel (insgesamt 8.705 km²), ist die Wahl der CORINE Land Cover Daten ausreichend. Durch die in der Vergangenheit zunehmende Problematik der Erosion landwirtschaftlicher Nutzflächen sollten vor allem die gefährdeten Flächen untersucht und mit Maßnahmen geschützt werden.

In Kapitel 6.4 wurde die Wirkung verschiedener Maßnahmen der Landwirtschaft in einem kleinen Untersuchungsgebiet im Hinblick auf die hydrologische Wirkung, primär die Änderung der Abflussscheitel im Gerinne, im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse quantifiziert. Im Modell wurden verschiedene Maßnahmen im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden und Bodenbearbeitungsformen durch Variation der maßgeblichen Parameter untersucht.

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Untersuchung der Wirkung verschiedener Maßnahmen der Landwirtschaft im großflächigen Maßstab. Durch das Erosionskriterium wurden zunächst im betrachteten Einzugsgebiet der Fulda und Diemel die Ackerflächen lokalisiert, auf denen eine erhöhte Gefahr bzgl. der Bodenerosion besteht. Das Bestreben des Landwirts sollte es sein, diese Erosionsgefahr auf seinen betroffenen Flächen zu reduzieren, um den Bodenverlust und letztendlich auch den Ertragsverlust zu minimieren. Für die gefährdeten Flächen werden Maßnahmen hinsichtlich der zukünftigen Flächenbewirtschaftung vorgeschlagen. Maßnahmen sind die Bodenbearbeitung in konservierender Form bzw. die Umwandlung in Grünland. Im Modell werden diese Maßnahmen, anders als im Untersuchungsgebiet Frankenhausen, lediglich durch den CN-Wert berücksichtigt. Der CN-Wert fasst für unterschiedliche Bodengruppen die Änderung des Infiltrationsvermögens, resultierend aus den Maßnahmen auf der Fläche, in einer Kennzahl zusammen. Die Maßnahmen werden im Folgenden als „**Szenario Landwirtschaft**“ bezeichnet. Die Wirkung der CN-Wert-Änderung auf die Scheitelabflüsse der Teilflächen wird im Modell untersucht. Für das Szenario Landwirtschaft sind den betrachteten Teilflächen die jeweiligen Bodengruppen zuzuordnen sowie die Information über den CN-Wert, der sowohl Bodenart als auch Vegetation berücksichtigt. In der bodenkundlichen Übersichtskarte im Maßstab 1:50.000 für Hessen erfolgt die strukturierte Beschreibung des Bodens für diskrete Flächeneinheiten unter steter Beachtung der Bodennutzung bzw. Bodenbedeckung. Aus der Bodenkarte werden die vorliegenden Bodentypen abgegriffen und den Bodengruppen 1 bis 4 nach dem SCS-Verfahren zugeordnet. Dabei hat ein Boden mit der Bodengruppe 1 ein großes Versickerungsvermögen und die Bodengruppe 4 ein sehr geringes Versickerungsvermögen (Tab. 48). Hierbei sind feinere Klassifizierungen, z. B. 2,5 (mittleres bis geringes Versickerungsvermögen) möglich. Innerhalb einer Teilfläche wird die Bodengruppe für jede Landnutzung einzeln vorgegeben. Die Abflussbildung berücksichtigt mehrere Landnutzungsanteile je Teilfläche getrennt und fasst die Abflussanteile zusammen.

Boden-gruppe	Beschreibung	Naxos-Kenn-ziffer
A	Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbefeuchtung, z. B. tiefgründige Sand- und Kiesböden	1
B	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tief- bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z. B. Sandböden, Löss	2
C	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauender Schicht, z. B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm	3
D	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel	4

Tab. 48: Bodengruppen nach SCS und Typisierung (Maniak, 1997)

Aus der Landnutzung wird der CN-Wert für das SCS-Verfahren im N-A-Modell abgeleitet. Dieser bestimmt den maximalen Rückhalt im betrachteten Teilgebiet. Landnutzungen und Bodengruppen werden flächengenau verschnitten und den Teileinzugsgebieten zugeordnet. Für den Ist-Zustand wurden die programminternen CN-Werte für Ackerland und Wiese verwendet wie sie in Tab. 49 aufgeführt sind.

	CN-Werte für Bodengruppe			
Bewirtschaftung	1,0	2,0	3,0	4,0
Ackerland	62	71	78	81
Wiese	39	61	74	80

Tab. 49: Landnutzungs- und bodengruppenabhängige Curve Numbers (CN-Werte, Maniak, 1997) im Ist-Zustand

Mit den zuvor getroffenen Annahmen und Kriterien der Nutzungsänderung bzw. Bewirtschaftungsänderung der Ackerflächen werden die CN-Werte geändert, um die geänderten Infiltrationseigenschaften der konservierenden Bewirtschaftung bzw. der Grünlandnutzung zu berücksichtigen. Bei konservierender Bewirtschaftung wird angenommen, dass sich die CN-Werte um 2 reduzieren. Für in Grünland umgewandelte Ackerflächen wurden gegenüber den Grünlandwerten des Ist-Zustandes höhere CN-Werte angenommen. Es wurde berücksichtigt, dass besonders im Bereich der Überschwemmungsflächen die Beweidung der Grünflächen angestrebt wird. Aus Sicht des Gewässerschutzes (Nährstoffeintrag) ist eine extensive Grünlandbewirtschaftung bzw. Beweidung positiv zu sehen. Resultierend aus dem Viehtritt sind die Werte gegenüber der reinen Grünfuttergewinnung auf der Wiese jedoch deutlich erhöht. Die CN-Werte für die Zwischenbodengruppen (1,5; 2,5; 3,5; 4,5) wurden interpoliert (Tab. 50).

Bezeichnung	Bewirtschaftung	CN-Werte für Bodengruppe						
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
konventionell, E1	konventionell	62	67	71	75	78	80	81
E2, E3, E4	konservierend	60	65	69	73	76	78	79
E5, E6, Grünland in HQ ₁₀₀ -Fläche	Grünland	49	59	69	74	79	82	84

Tab. 50: Landnutzungs- und bodengruppenabhängige Curve Numbers (CN-Werte, Maniak, 1997) im Szenario Landwirtschaft

7.2.2 Kosten der Umsetzung

Neben dem Vorschlag einer flächenhaften Umsetzung stellt sich für die Landwirte die Frage der Rentabilität. Förderprogramme, die auf den Schutz und die Verbesserung der Umwelt sowie die Erhaltung des ländlichen Lebensraums ausgerichtet sind, sollen den Landwirten Anreize bieten, ihre Flächen bodenschonender zu bewirtschaften. In Hessen werden Förderprogramme durch die Festsetzungen des HMULV (2007) angeboten. Zur Abschätzung der Kosten für eine Realisierung der geänderten Bewirtschaftung auf den betroffenen Flächen werden die Zahlen des Hessischen Kulturlandschaftsprogrammes (HE-KUL) verwendet.

Das gesamte Einzugsgebiet von Fulda und Diemel umfasst eine Fläche von ca. 870.500 Hektar. Für die 290.000 Hektar Ackerland sieht das Szenario Landwirtschaft vor, 28.000 ha in Grünflächen umzuwandeln, für 194.000 Hektar wird eine konservierende Bodenbewirtschaftung vorgeschlagen und die restlichen 68.000 Hektar können weiterhin konventionell bewirtschaftet werden. Für die Nutzung von Flächen als extensives Grünland sieht die Förderung einen Betrag von 90 €/Hektar vor. Die Mulch- oder Direktsaat oder Mulchpflanzverfahren werden mit 60 €/Hektar gefördert. Somit würden bei vollständiger

Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen Förderkosten in Hessen für konservierend bearbeitete Flächen in Höhe von 11.640.000 €/a und 2.520.000 €/a für extensiv bewirtschaftetes Grünland anfallen. Diese Werte sind lediglich eine Schätzung anhand existierender Richtwerte. Für das jeweilige Bundesland kann dies unter Umständen eine erhebliche finanzielle Belastung bedeuten. Die Motivation einer Änderung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsform lediglich auf Grundlage staatlicher Subventionen ist nicht sinnvoll. Dringend erforderlich ist weiterhin die Informationspolitik über den positiven Nutzen einer konservierenden Bodenbearbeitung mit allen Möglichkeiten der finanziellen Entlastung für den praktizierenden Landwirt. Trotz der in Kapitel 2.4 genannten Probleme ist es grundsätzlich möglich, bei sorgfältiger, fachgerechter Beratung und Planung auf allen Ackerflächen eine konservierende Bodenbearbeitung anzuwenden. Aufgrund der Abhängigkeit der Flächenerträge von vielen lokalen Faktoren, beispielhaft werden die Bodenzahl und die Ackerzahl genannt, kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, ob der Flächenertrag auf konservierend bewirtschafteten Flächen gegenüber konventionell bewirtschafteten Flächen niedriger ausfällt. Durch die ständige Optimierung der Maschinen-technik und Bewirtschaftungsmethodik erzielen konservierend bewirtschaftete Flächen gegenüber der konventionellen Pflugbearbeitung oftmals jedoch keine Mindererträge. Die Tendenz der landwirtschaftlichen Betriebe, immer größere Flächen zu bewirtschaften, sorgt dafür, dass der Zeitfaktor eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes einnimmt. Durch die gestiegenen Energiekosten hat der Landwirt eine deutliche finanzielle Entlastung, wenn er seine Flächen schneller bewirtschaften kann und weniger Überfahrten mit Maschinen durchführen muss. Eine Umstellung lohnt sich, da die Investitionskosten für neue Maschinen oftmals nicht unmittelbar oder zwingend erforderlich sind. Im Laufe der Jahre kann in moderne Maschinen investiert werden. In Folge von Verschleiß fallen diese Kosten auch für konventionell wirtschaftende Betriebe an.

Von staatlicher Seite kann durch Vorgaben einer fachgerechten Landwirtschaft bzw. durch die Bindung von Direktzahlungen an Umweltstandards, wie im Cross Compliance gefordert, die Umsetzung weiter forciert werden.

7.3 Hydrologische Wirkung der Maßnahmen

Die in Kapitel 7.2.1 festgelegten Eingangskriterien bzgl. der Änderungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wurden in das Programm NAXOS implementiert und in Modellrechnungen die Abflüsse der statistischen Hochwasserereignisse HQ₂, HQ₁₀, HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ und HQ₂₀₀ ermittelt. Dabei wurden die Teilflächen des Fulda-Diemel-Einzugsgebietes im Hinblick auf die Änderung der Scheitelabflüsse ausgewertet und Beispielflächen auf charakteristische Eigenschaften bzgl. des Abflussverhaltens untersucht. Zusätzlich wurde die großflächige Wirkung auf die Wellenverformung im Gerinnesystem an Kontrollpunkten quantifiziert und Abflusslängsschnitte verschiedener Gewässer verglichen.

7.3.1 Scheitelabflüsse der Teilflächen

Die verschiedenen hessischen Flussgebiete sind in Teilgebiete bis zu einer mittleren Größe von 4 km² bis 5 km² unterteilt, somit werden im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel insgesamt 1.492 Teilflächen im Modell abgebildet. Die folgenden Abbildungen (Abb. 94 bis Abb. 99) zeigen zunächst die Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand des kalibrierten Flussgebietsmodells. Zu erkennen ist der Schwankungsbereich der Teilflächenabflüsse mit ihren Maxima an den Hauptgewässern im Einzugsgebiet, speziell an den größeren Gewässern wie Fulda, Diemel, Eder, Schwalm und Haune.

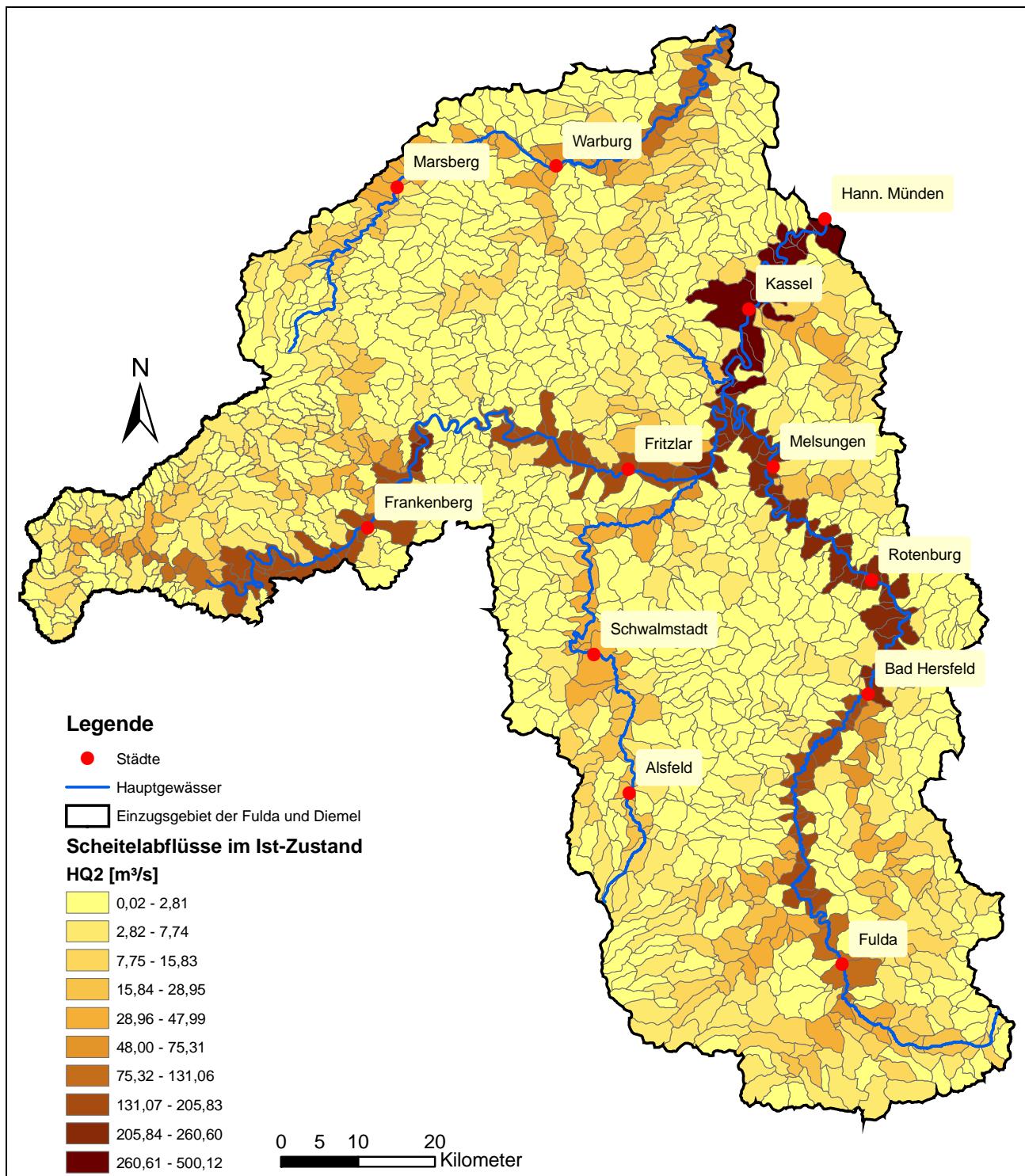


Abb. 94: HQ₂ Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

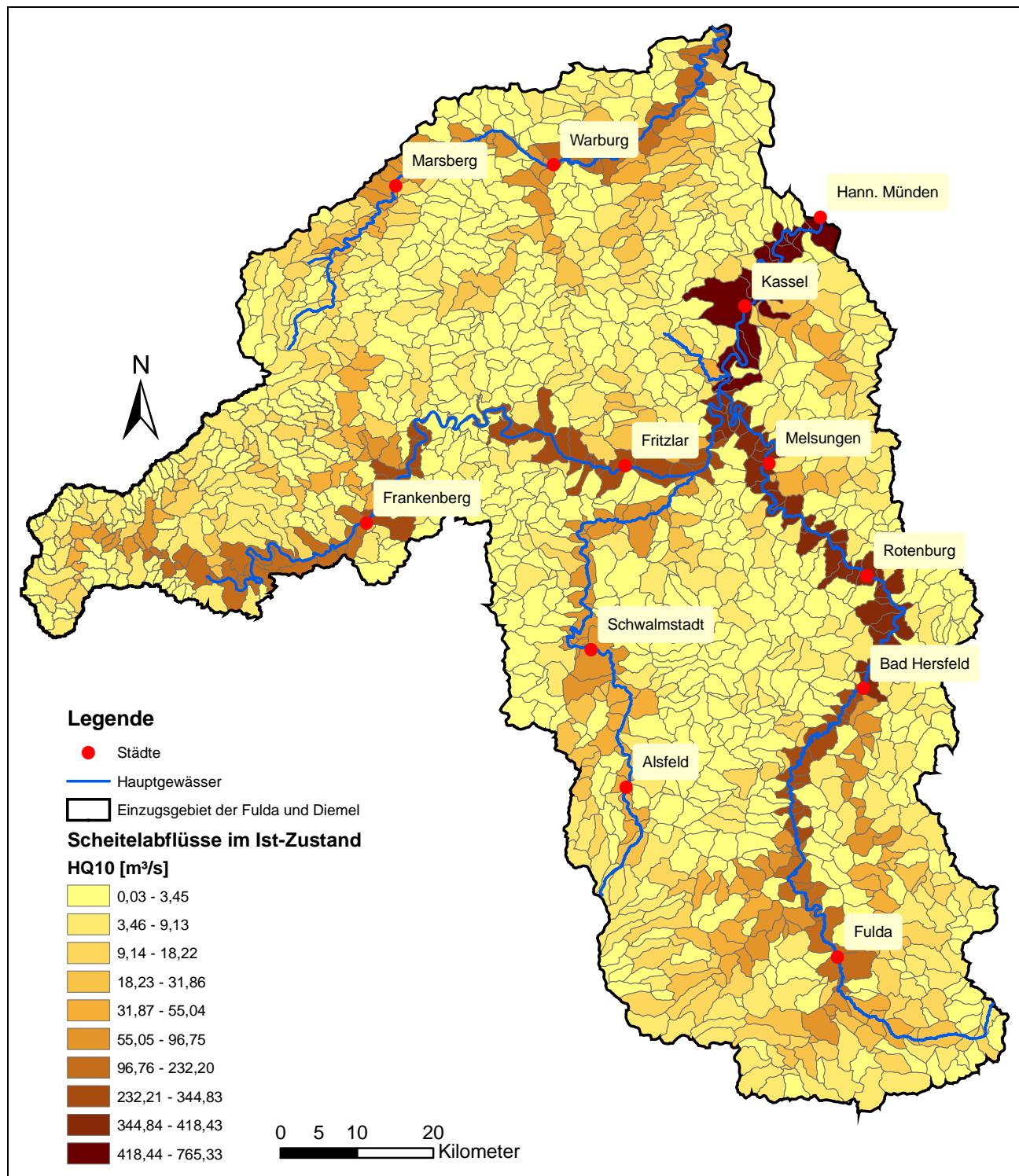


Abb. 95: HQ_{10} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

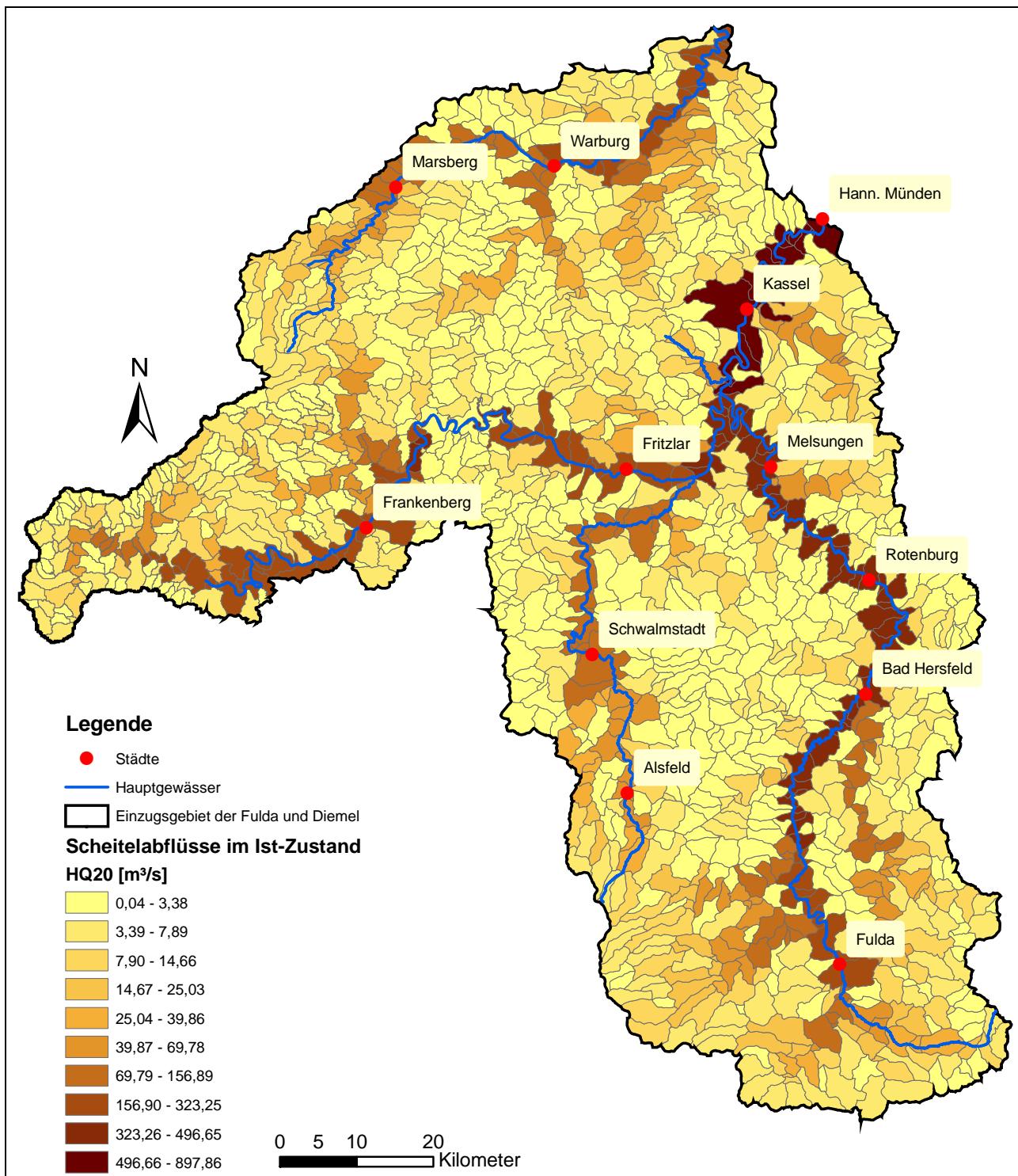


Abb. 96: HQ₂₀ Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

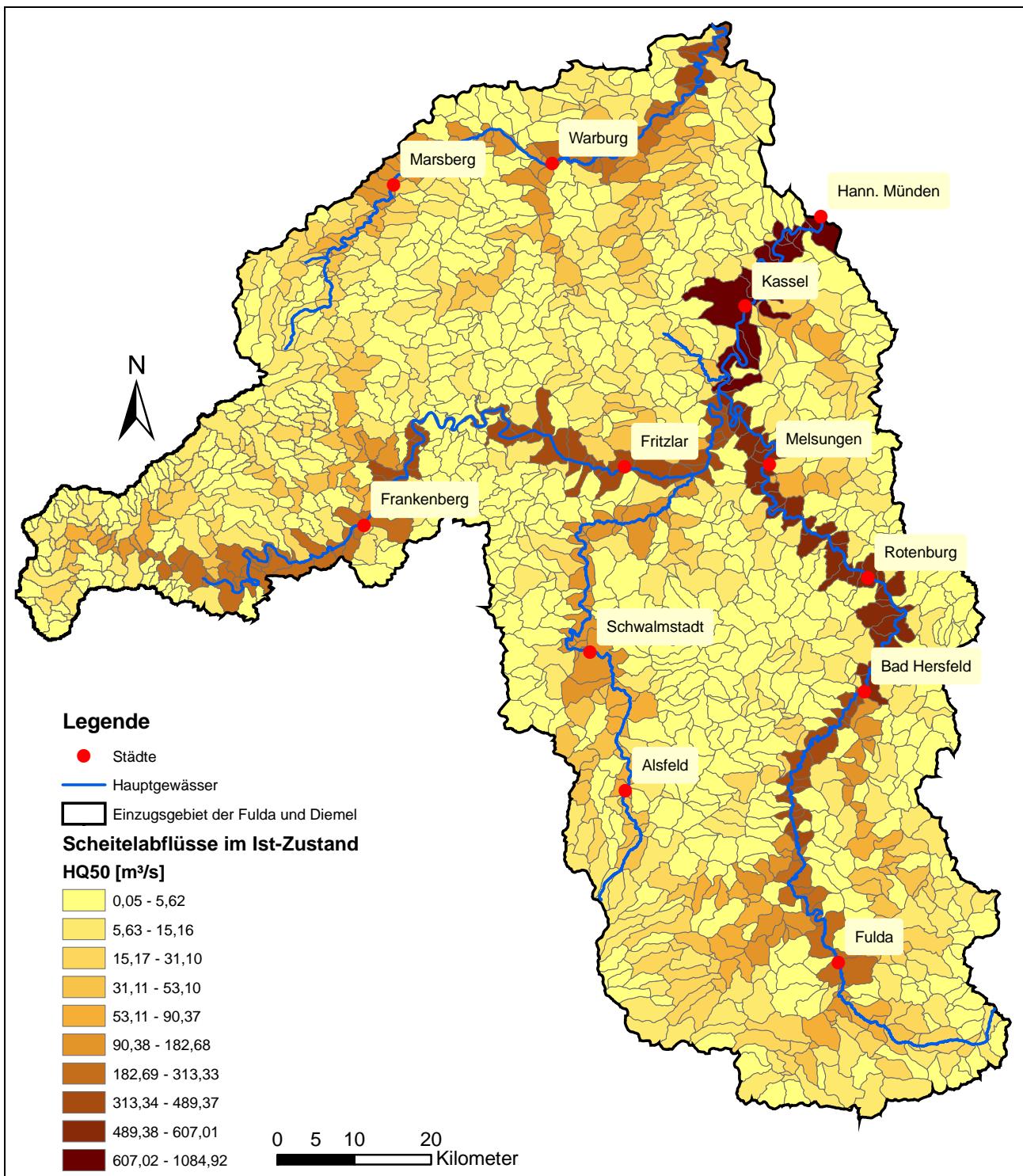


Abb. 97: HQ_{50} Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

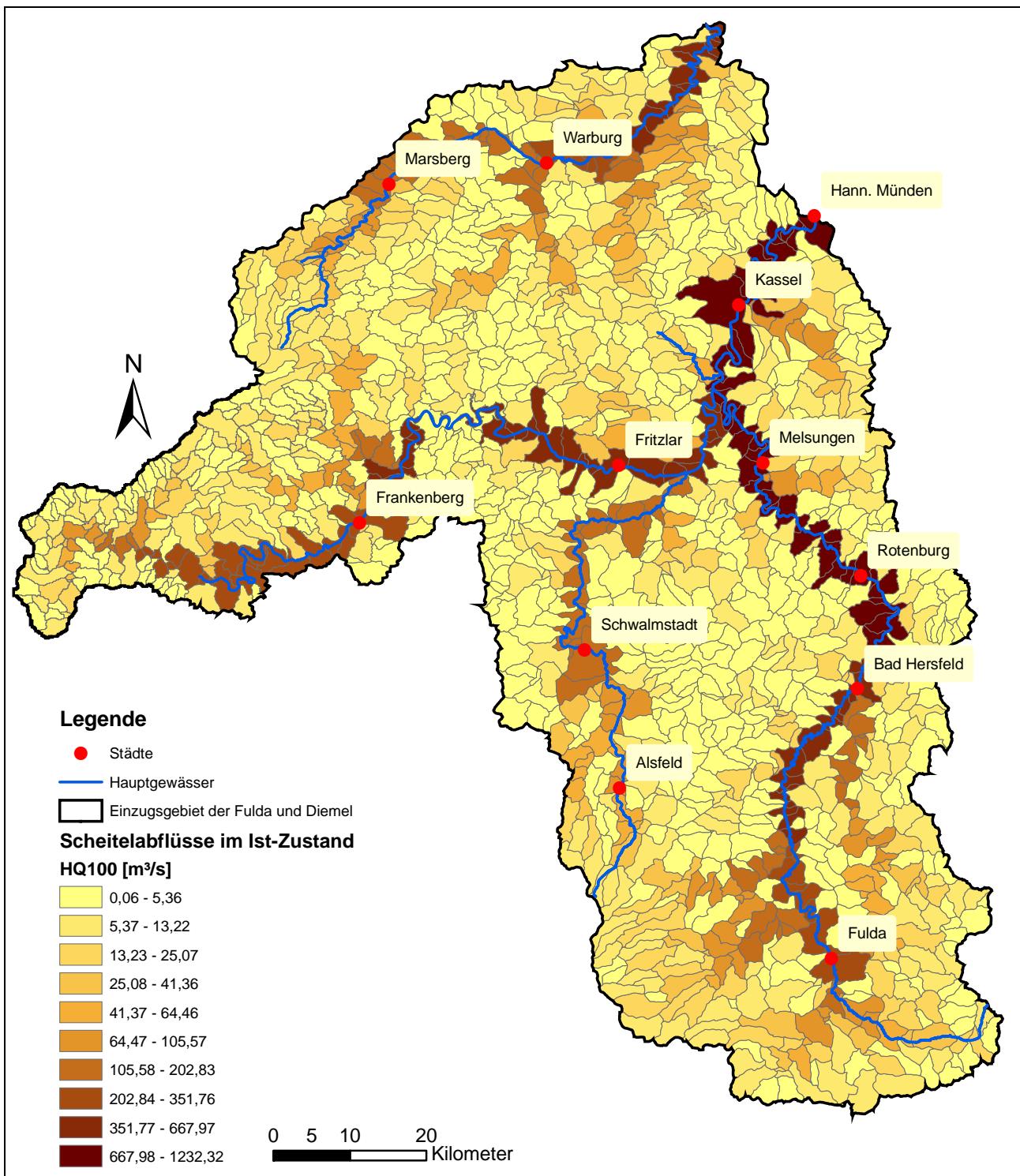


Abb. 98: HQ₁₀₀ Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

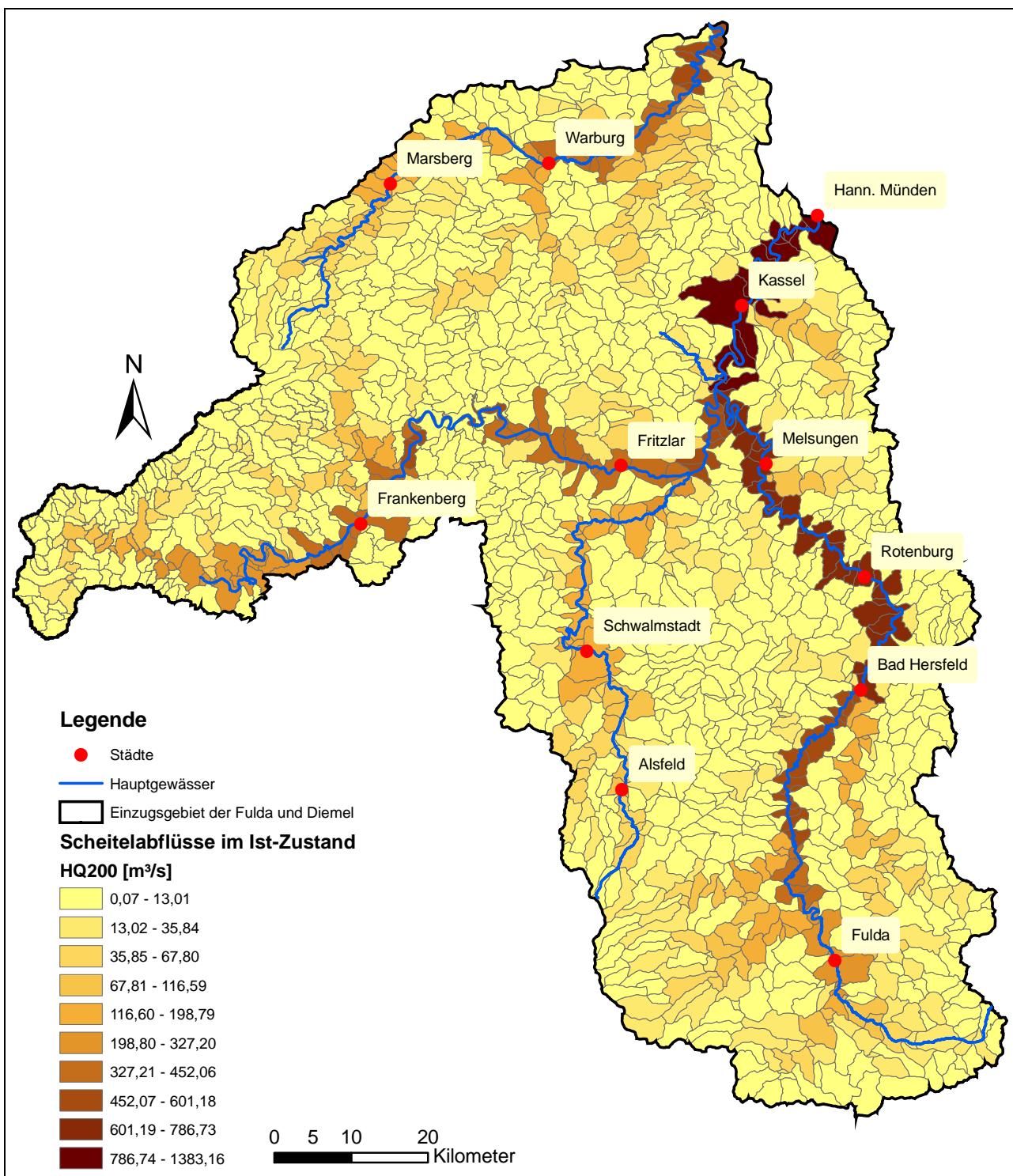


Abb. 99: HQ₂₀₀ Scheitelabflüsse der Teilflächen im Ist-Zustand

Mit den Annahmen, die in Kapitel 7.2.1 getätigt wurden, ergeben sich die folgenden Veränderungen der Teilflächenabflüsse für Hochwässer unterschiedlicher Wiederkehrzeit (Abb. 100 bis Abb. 105). Diese Änderungen werden in % angegeben. Die relative Darstellung wird vorgezogen, da durch die Angabe der Änderungen in m³/s kein direkter Bezug gegeben ist. Die Hochwasser-Längsschnitte der Hauptgewässer Fulda, Diemel, Eder, Schwalm und Haune werden in Kapitel 7.3.3 ausgewertet.

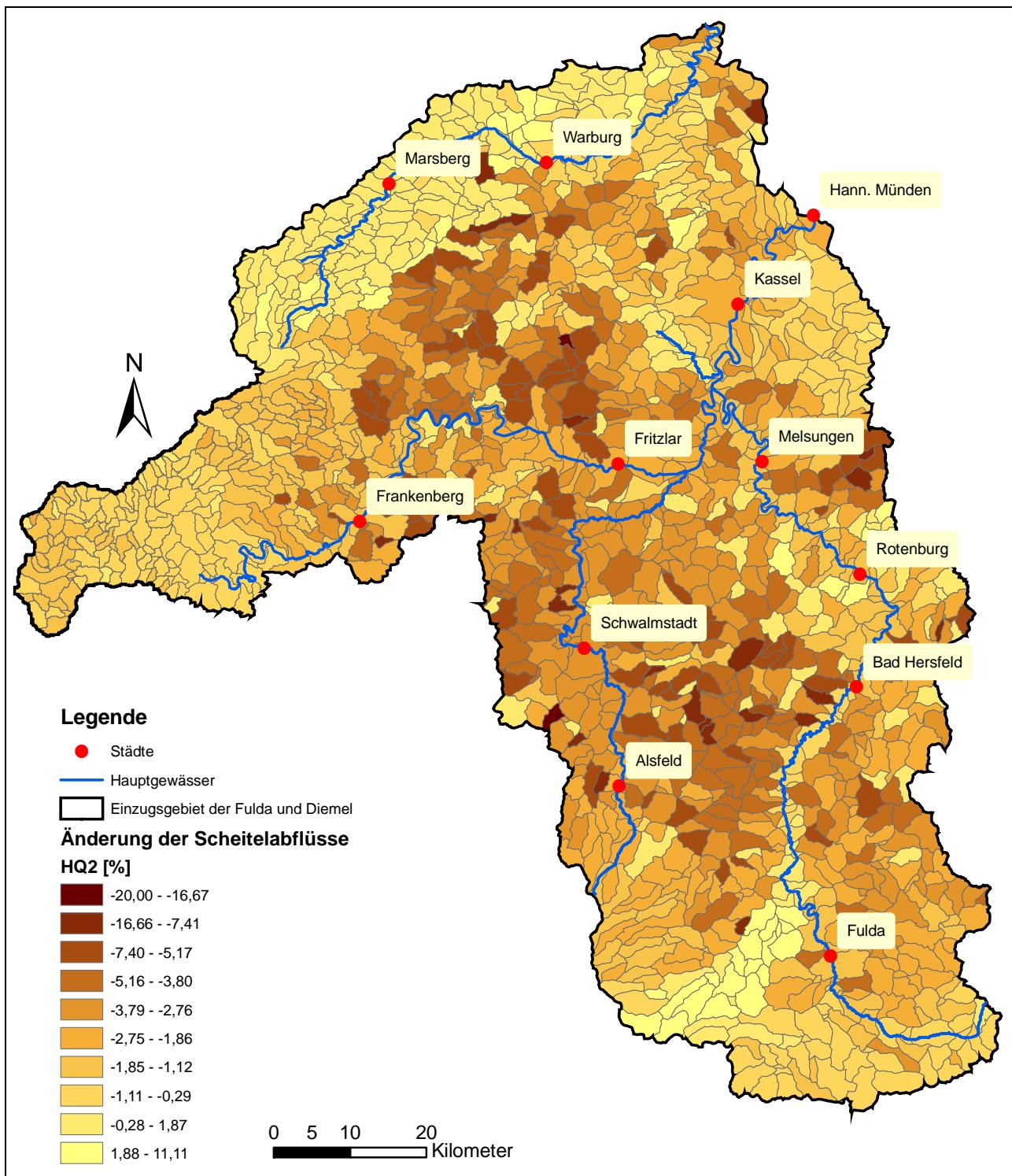


Abb. 100: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₂ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

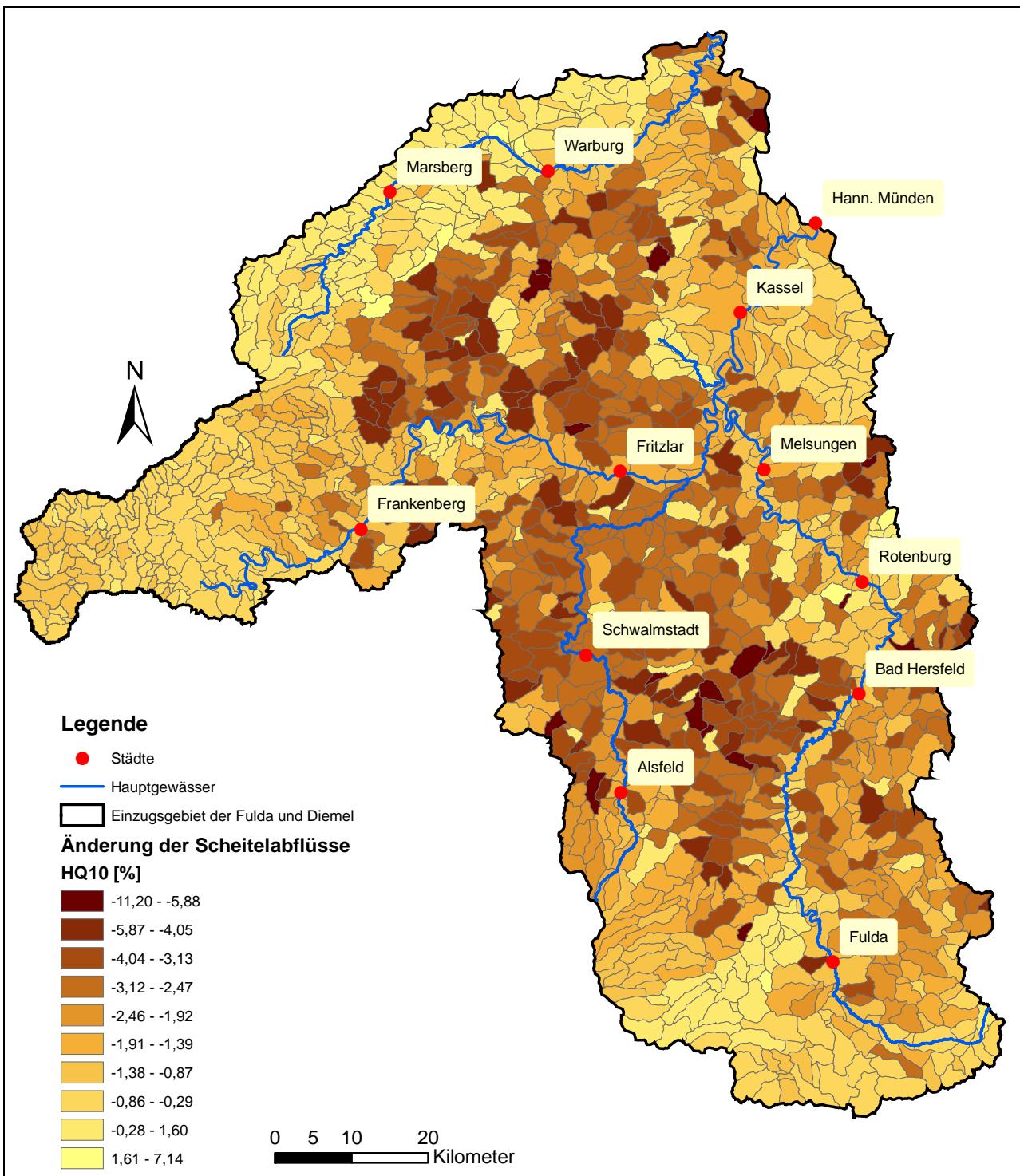


Abb. 101: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₁₀ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

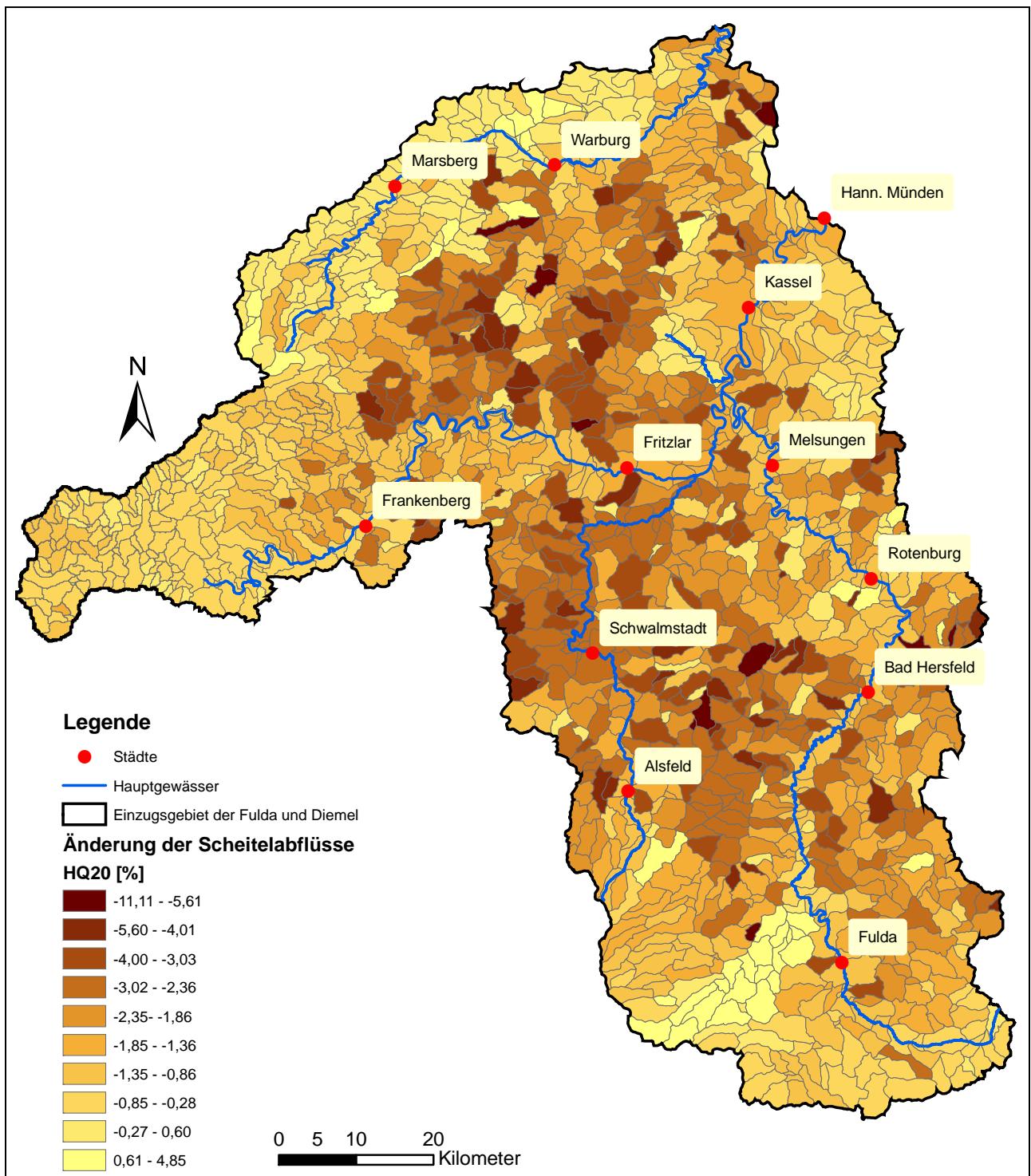


Abb. 102: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₂₀ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

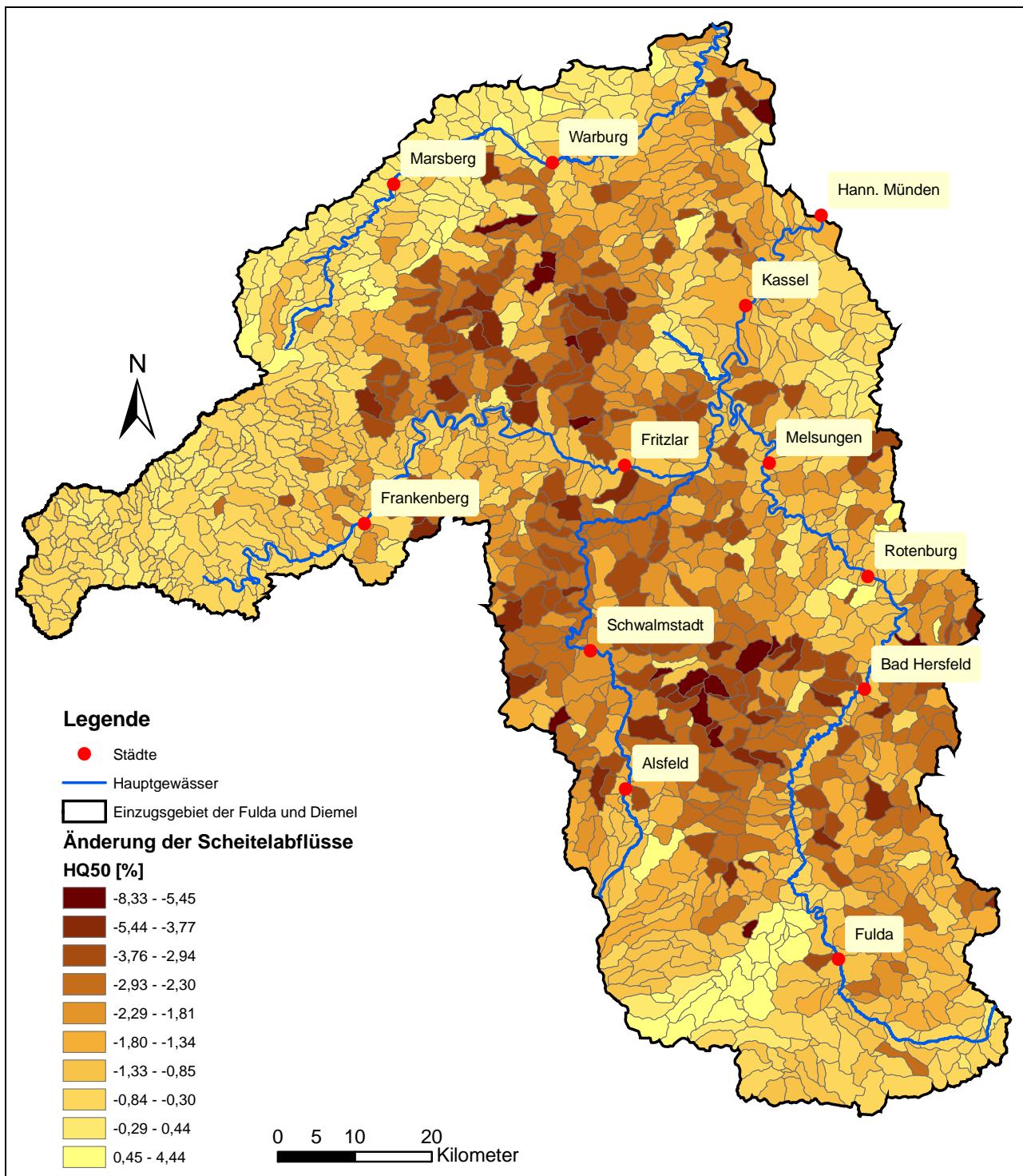


Abb. 103: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₅₀ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

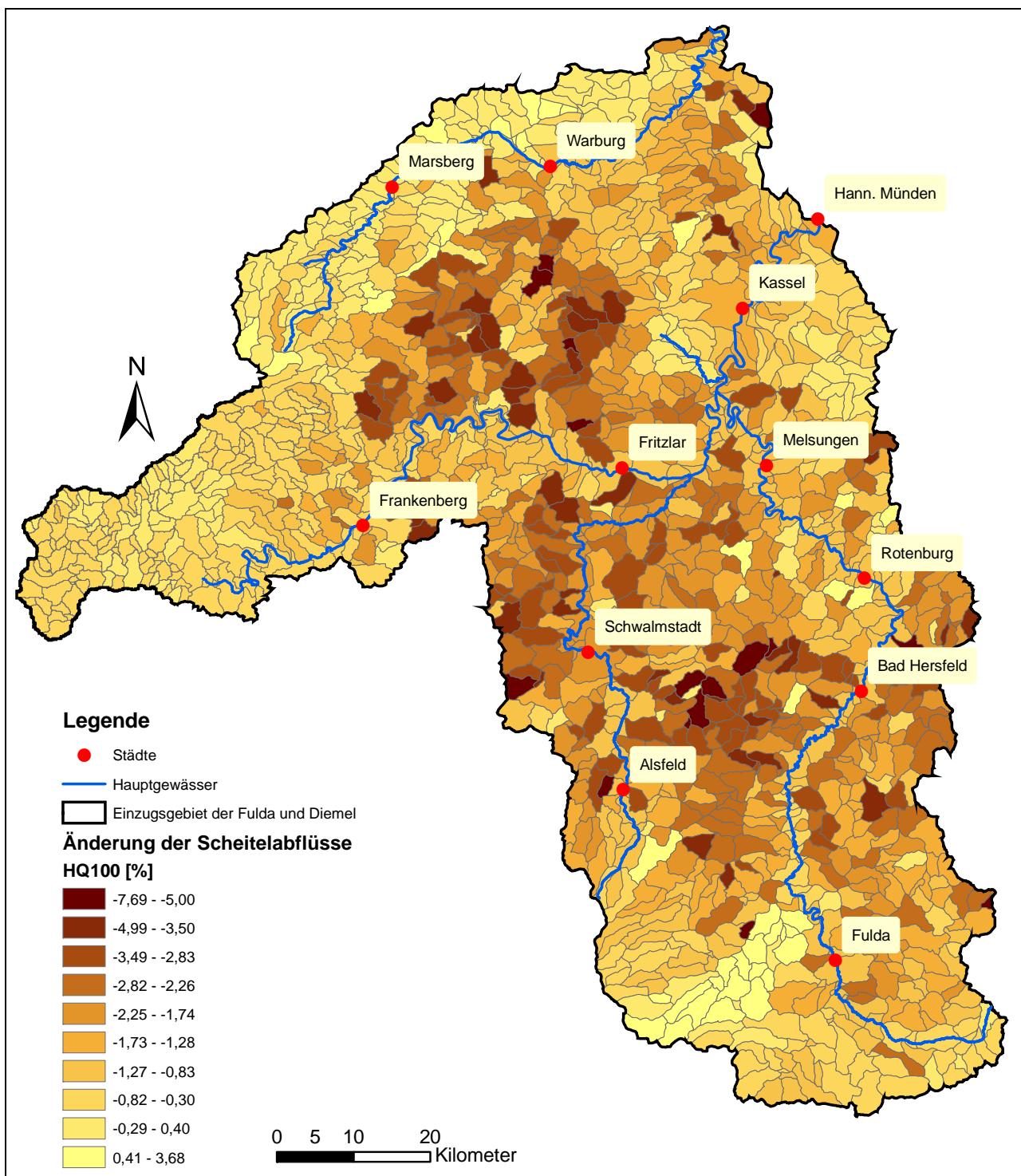


Abb. 104: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₁₀₀ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

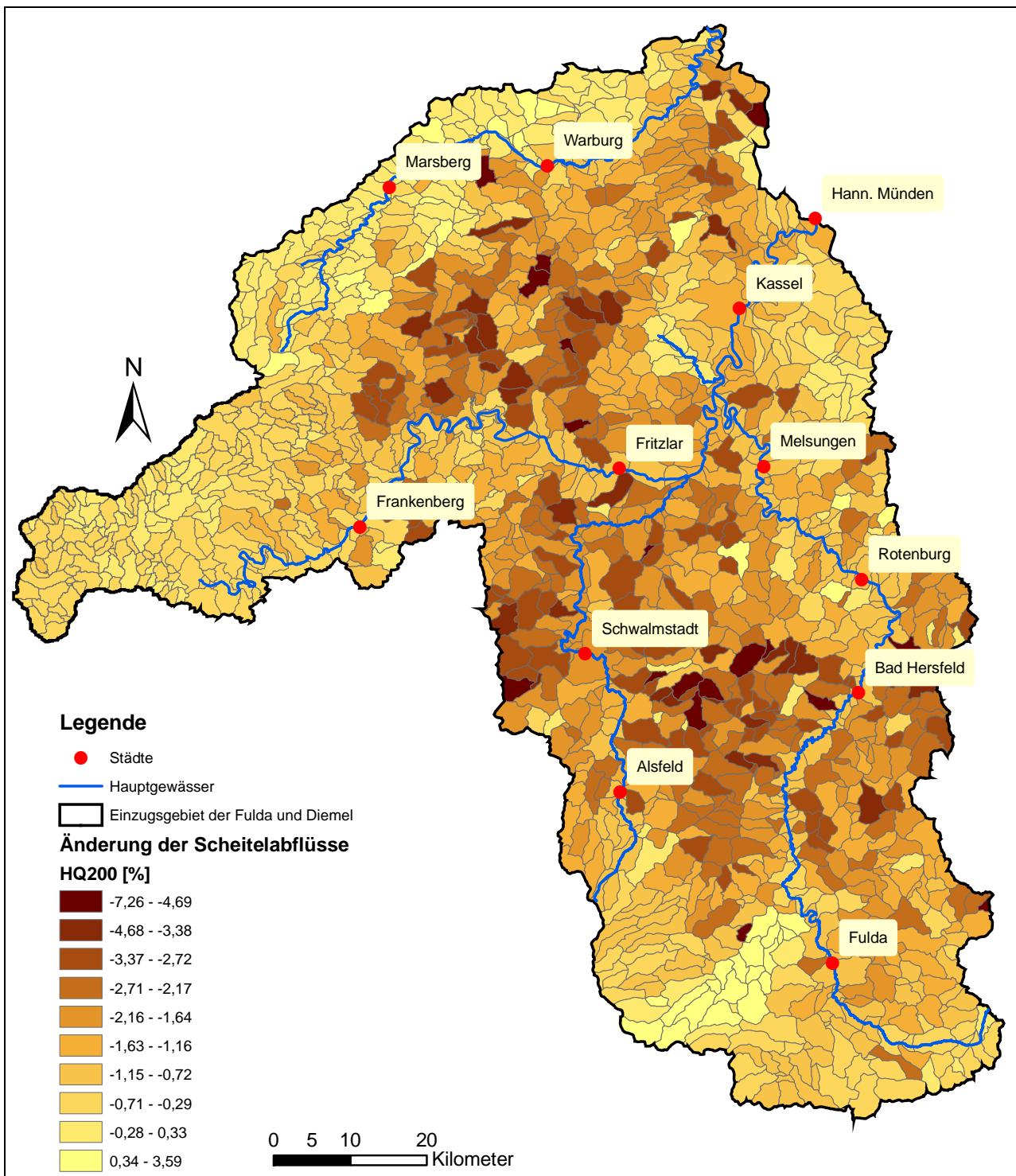


Abb. 105: Änderung der Scheitelabflüsse eines HQ₂₀₀ im Szenario Landwirtschaft (nach Änderung der Bodenbearbeitung) in [%]

Die Abb. 100 bis Abb. 105 zeigen, dass größere Abflussreduzierungen vor allem auf Teilflächen der kleineren Nebengewässer auftreten, wohingegen die aufsummierte Wirkung in den Hauptgewässern geringer ist. Unverändert bzgl. der Scheitelveränderung bleiben Teilflächen bei ungünstiger Wellenüberlagerung bzw. die Teilflächen, beispielsweise im Bereich Nordrhein-Westfalen, auf denen keine geänderte Nutzung vorgesehen ist.

Um den Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsgröße der betrachteten Teilflächen und dem Scheitelabfluss aufzuzeigen, wurden für einzelne Gewässer Regressionsuntersuchungen durchgeführt (Röttcher et al., 2007). Eine Beziehung für das gesamte Einzugsgebiet abzuleiten ist nicht zweckmäßig, da keine eindeutige Abhängigkeit besteht. Die unterschiedlichen Funktionen (linear oder polynomisch) sind auf die Talform, gerade im Unterlauf bei wachsender Einzugsgebietsgröße des jeweiligen Gewässers, zurückzuführen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Änderung der Scheitelreduzierung einer Teilfläche nicht zwangsläufig durch Maßnahmen auf der betrachteten Teilfläche zustande kommen muss, sondern auch durch den Input einer Teilfläche von oberstrom erfolgen kann. Eine eindeutige Aussage über die Wirkung der Maßnahmen in einem Teileinzugsgebiet bzgl. einer geänderten Bodenbewirtschaftung lässt sich nur treffen, wenn für jede Teilfläche eine detaillierte Abflussbilanzierung durchgeführt wird. Anders als in Kapitel 6 sollen hier die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Wirkung einzugsgebietsbezogen bzw. großflächig betrachtet werden.

Am Teilflächenauslass einzelner Gewässer des Untersuchungsgebietes ergeben sich maximale Scheitelreduzierungen von 20 % für ein HQ_2 bis 7,26 % für ein HQ_{200} sowie Scheitelerhöhungen von maximal 11,11 % für ein HQ_2 bis 3,59 % für ein HQ_{200} (Tab. 51). Die Effektivität lässt bei Hochwässern steigender Jährlichkeit nach, was auch zu erwarten ist.

Scheitelerhöhungen ergeben sich beispielweise durch die Umwandlung in Grünland und Nutzung als Weideland. Durch Grünlandextensivierung verschlechtern sich unter Umständen (abhängig vom Boden) die Infiltrationseigenschaften der Böden gegenüber einer vorherigen Nutzung als Folge von Viehtritt durch Beweidung. Auffällig ist dies vor allem bei Böden der Bodengruppe 3 und 4 (Maniak, 1997).

Weitere Gründe können zudem aus der Nutzung resultierende, zeitlich versetzte, ungünstige Abflussüberlagerungen einzelner Flächen sein.

statistisches Hochwasserereignis HQ_x	maximale Scheitelreduzierung [%]	maximale Scheitelerhöhung [%]
HQ_2	20,00	11,11
HQ_5	11,11	7,14
HQ_{20}	11,11	4,85
HQ_{50}	8,33	4,44
HQ_{100}	7,69	3,68
HQ_{200}	7,26	3,59

Tab. 51: Maximale Scheitelreduzierungen und –erhöhungen auf Teilflächen im Szenario Landwirtschaft [%]

Aus der Betrachtung der geänderten Abflussscheitel einer Teilfläche ergibt sich keine Aussage über die Wirkung des Szenarios Landwirtschaft auf die untersuchte Teilfläche direkt. Dazu ist eine Abflussbilanzierung mit allen oberstrom gelegenen Teilflächen nötig. Es ist lediglich möglich, den geänderten Flächenanteil der von oberstrom entwässernden Teilflächen zu ermitteln und die aufsummierte Wirkung der Maßnahme in diesem Gebiet abzuschätzen.

Im Folgenden sollen einige Teilflächen genauer betrachtet werden. Die Teilflächen liegen an den Haupt- und Nebengewässern des betrachteten Einzugsgebietes von Fulda und Diemel. Abb. 106 zeigt die genaue Lage der betrachteten Teilflächen im Gewässernetz des Einzugsgebietes. Alle oberstrom dieser Teilflächen liegenden Teileinzugsgebiete werden aufsummiert und die hydrologische Wirkung am betrachteten Teilflächenauslass bewertet.

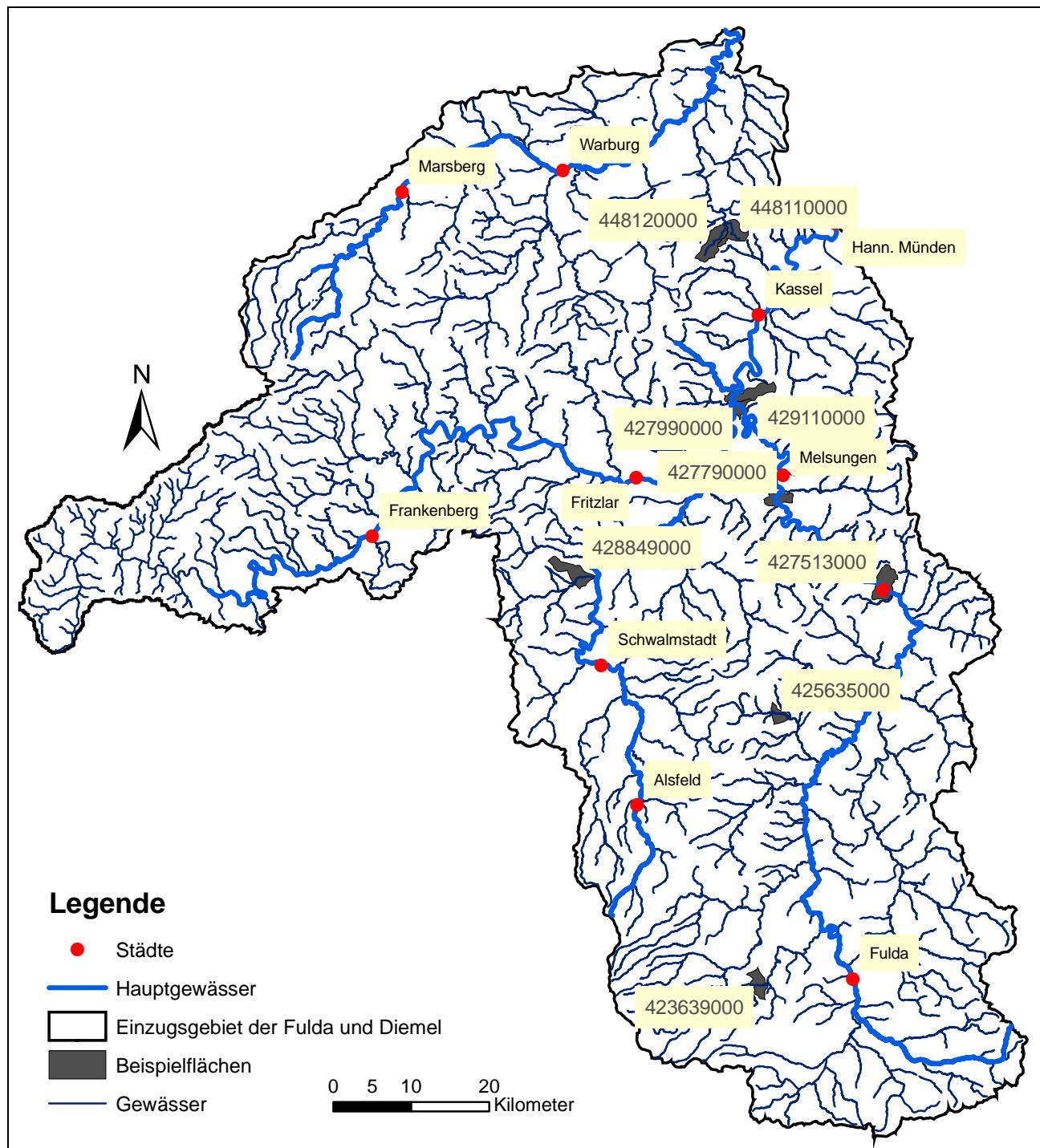


Abb. 106: Lage der betrachteten Teilflächen

Tab. 52 und Tab. 53 listen für die betrachteten Teilflächen die jeweils angeschlossene Gesamtfläche, die im Szenario Landwirtschaft umgewandelte Fläche sowie die Anteile der verschiedenen Flächennutzungen auf.

Teilflächennummer	angeschlossene Fläche [ha]	umgewandelte Fläche [ha]	umgewandelte Fläche [%]
429110000	636.437	162.413	26
427990000	299.665	71.968	24
427790000	273.638	66.440	24
427513000	252.330	60.241	24
423639000	11.445	1.859	16
428849000	9.359	2.811	30
425635000	4.562	1.274	28
448120000	904	575	64
448110000	610	491	80

Tab. 52: Angeschlossene Gesamtfläche und im Szenario Landwirtschaft umgewandelter Flächenanteil für die jeweils betrachtete Teilfläche

Teilflächennummer	konventionell [ha]	konservierend [ha]	ext. Grünland [ha]
429110000	33.287	142.506	19.907
427990000	9.204	61.635	10.333
427790000	8.418	57.039	9.401
427513000	7.452	52.681	7.560
423639000	174	1.794	65
428849000	351	2.646	165
425635000	80	1.045	229
448120000	54	532	43
448110000	13	457	34

Tab. 53: Anteilige Bewirtschaftung der jeweils angeschlossenen Gesamtfläche für die betrachteten Teilflächen

Bzgl. der Veränderungen der Scheitelabflüsse auf den untersuchten Teilflächen ergeben sich die folgenden Ergebnisse (Abb. 107).

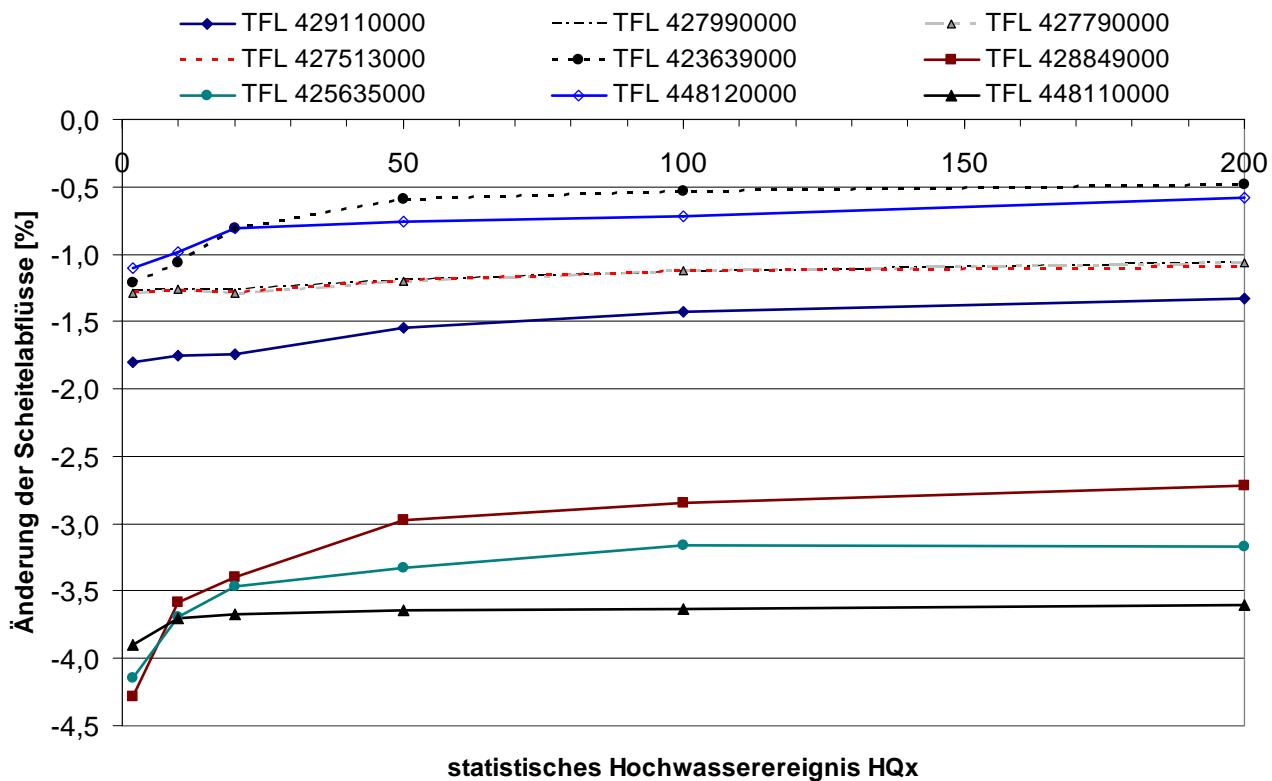


Abb. 107: Hydrologische Wirkung des Szenarios Landwirtschaft an verschiedenen Teilflächenauslässen im Einzugsgebiet

Die Teilflächen **448110000** und **448120000** im Einzugsgebiet der Diemel zeigen unterschiedlich hohe Scheiteländerungen. Etwa für 80 % der Teilfläche 448110000 wurden Änderungen der Bewirtschaftungsform vorgeschlagen. Durch das gute Versickerungsvermögen der anstehenden Böden ergeben sich Scheitelreduzierungen von 3,9 % für ein HQ_2 und selbst 3,6 % für ein HQ_{200} . Die Wirkung durch eine geänderte Bewirtschaftungsform auf 64 % der Fläche im Einzugsgebiet des Jungfernaches (Teilfläche 448120000) fällt hingegen weniger deutlich aus. Dies liegt daran, dass in dieser Teilfläche ein größerer Anteil entlang des Gewässers in Grünland umgewandelt wurde und für die Bodengruppe 3 das Infiltrationsverhalten gegenüber der vorherigen Ackernutzung geringer ist. Somit ergeben sich lediglich Scheitelreduzierungen von 1,1 % für ein HQ_2 und 0,6 % für ein HQ_{200} .

Auf Teilfläche **425635000** ist die Scheitelreduzierung deutlich sichtbar. Für etwa 23 % der Teilfläche wurde eine konservierende Bewirtschaftung vorgeschlagen, 5 % sollten als extensives Grünland bewirtschaftet werden. Die Flächen können überwiegend den Bodengruppen 1,5 bis 2,5 zugeordnet werden, das heißt, sie besitzen ein mittleres bis großes Versickerungsvermögen. Dadurch ergeben sich Scheitelreduzierungen von 4,2 % für ein HQ_2 und 3,2 % für ein HQ_{200} .

Ähnlich positiv ist die abflussreduzierende Wirkung am Teilflächenauslass der Teilfläche **428849000**. Hier werden 30 % der oberstrom liegenden Flächen für eine geänderte Bewirtschaftung vorgeschlagen. Überwiegend können die Böden den Bodengruppen 2 bis 2,5 zugeordnet werden. Durch den hohen Anteil der konservierenden Flächenbewirtschaftung können Scheitelreduzierungen zwischen 4,3 % für ein HQ_2 und 2,7 % für ein HQ_{200} erreicht werden.

Die hydrologische Wirkung auf Teilfläche **423639000** ist marginal, da lediglich ein geringer Prozentsatz der Fläche (16 %) umgewandelt wird. In Verbindung mit den Bodengruppen 2,5 bis 3 der angrenzenden Teilflächen ergeben sich lediglich Scheitelreduzierungen zwischen 1,2 % für ein HQ_2 und 0,5 % für ein HQ_{200} .

Die Teilflächen **427513000** (Pegel Rotenburg), **427790000**, **427990000** und **429110000** (Pegel Guntershausen) liegen an unterschiedlichen Stationen der Fulda und bündeln die Abflüsse der oberstrom liegenden Einzugsgebiete. In den angeschlossenen Flächen oberstrom werden etwa gleiche Flächenanteile (ca. 24 %) zur geänderten Bewirtschaftung vorgeschlagen. Es wird deutlich, dass an den 4 Gebietsauslässen die abflussreduzierende Wirkung gegenüber den zuvor betrachteten Flächen gering ist. Für große Einzugsgebiete ist eine Wirkung kaum noch sichtbar. Scheitelreduzierungen zwischen 1,3 % für ein HQ₂ und 1,1 % für ein HQ₂₀₀ bzw. maximal 1,8 % für ein HQ₂ und 1,3 % für ein HQ₂₀₀ zeigen keinen großen Einfluss durch das Szenario Landwirtschaft.

Durch die Betrachtung der Beispieldänen sollte die Wirksamkeit und das Abflussverhalten am jeweiligen Gebietsauslass im Verhältnis zur Maßnahme auf den angeschlossenen Teilflächen oberstrom untersucht werden. Die Wirkung einer konservierenden Bodenbearbeitung ist positiv für den Wasserrückhalt auf der Fläche, zeigt jedoch auf die Scheitelabflüsse, vor allem großer Gewässer, lediglich eine geringe Wirkung.

7.3.2 Wellenverformung

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Scheitelabflüsse der Teilflächen des untersuchten Einzugsgebietes ausgewertet. Aus Sicht des Hochwasserschutzes ist zudem der Verlauf der Abflussganglinie von Bedeutung.

Nach Umsetzung des Szenarios Landwirtschaft wurde die Wirkung der geänderten Flächenbewirtschaftung bzw. Bodenbearbeitung auf die Wellenverformung am jeweiligen Gebietsauslass der zuvor betrachteten Beispieldänen grafisch ausgewertet (Abb. 108 bis Abb. 114). Dargestellt ist jeweils das HQ₁₀₀ für einen fiktiven Zeitraum im Jahr 2004.

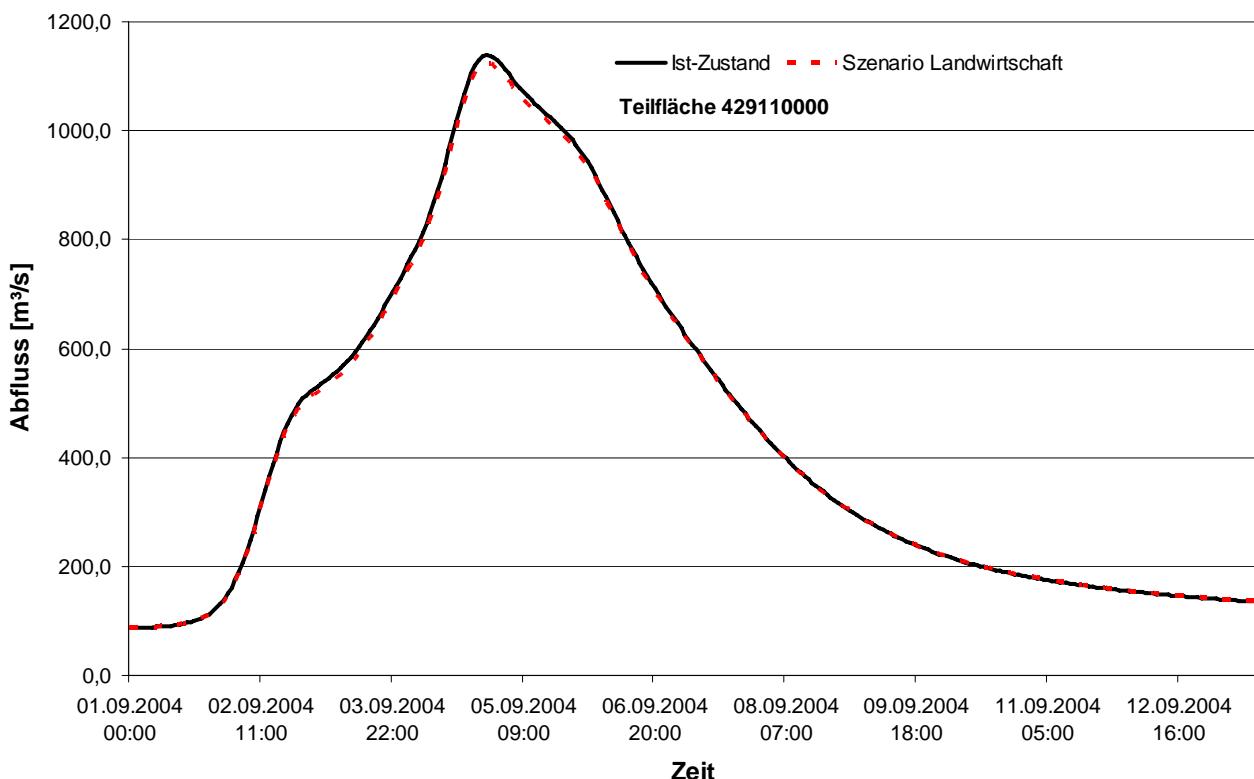


Abb. 108: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 429110000 (an der Fulda)

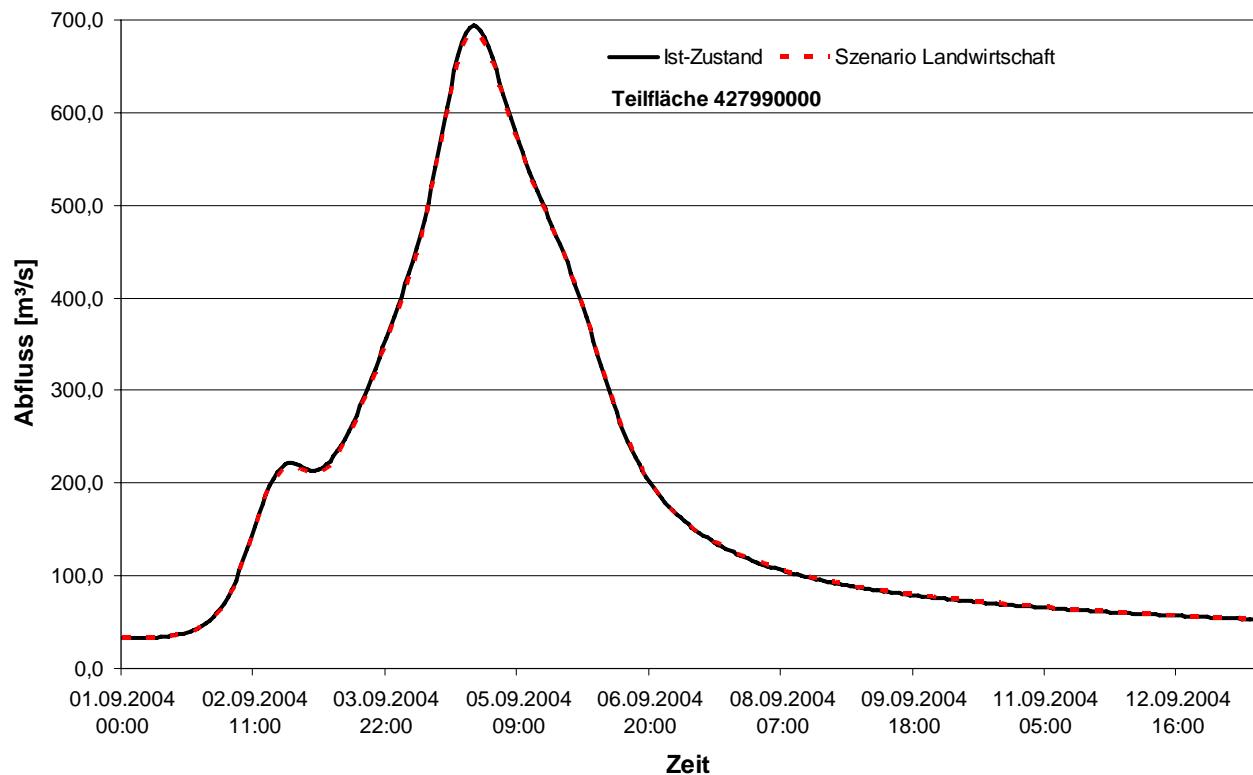


Abb. 109: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427990000 (an der Fulda)

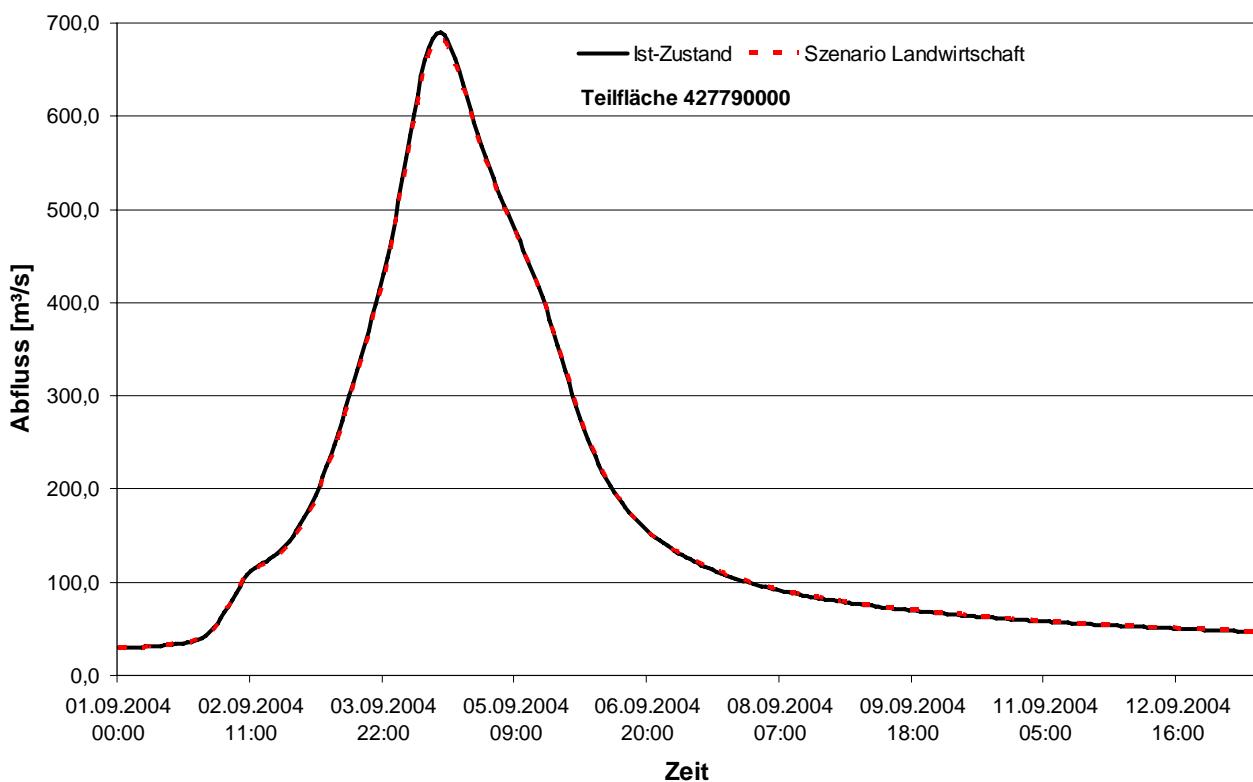


Abb. 110: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427790000 (an der Fulda)

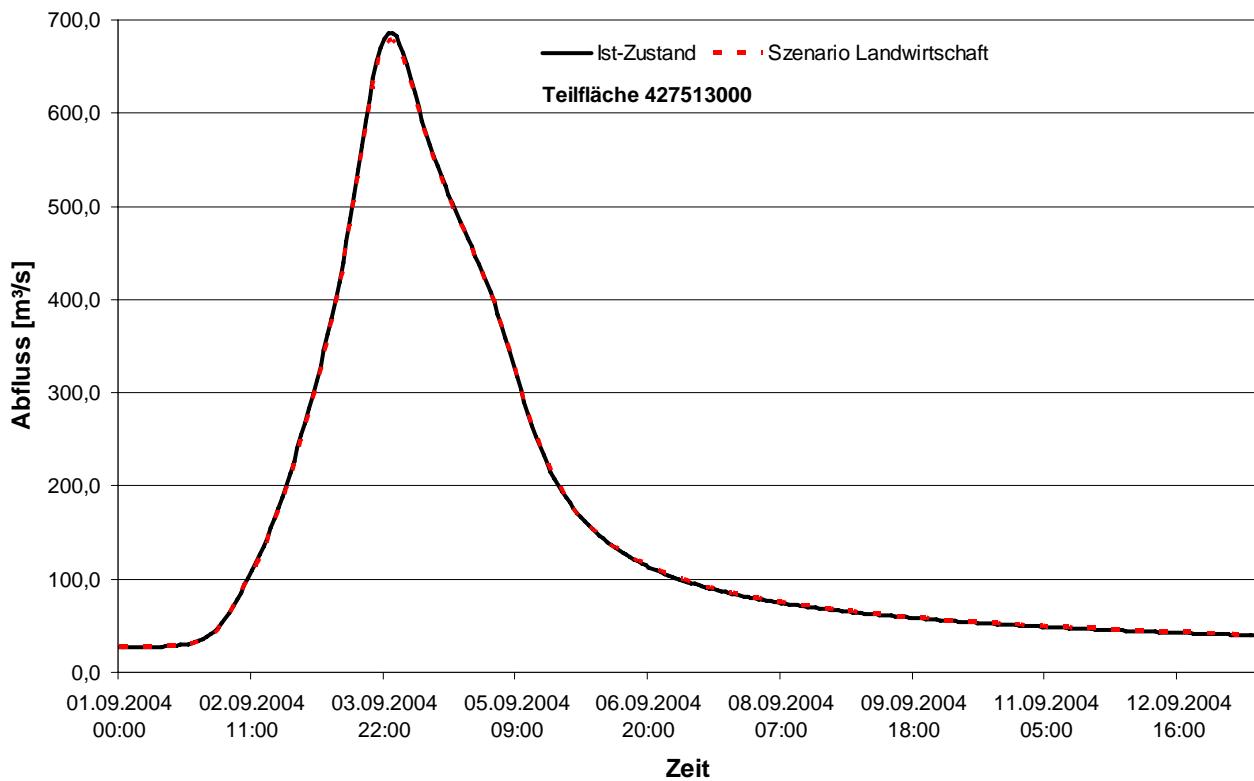


Abb. 111: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 427513000 (an der Fulda)

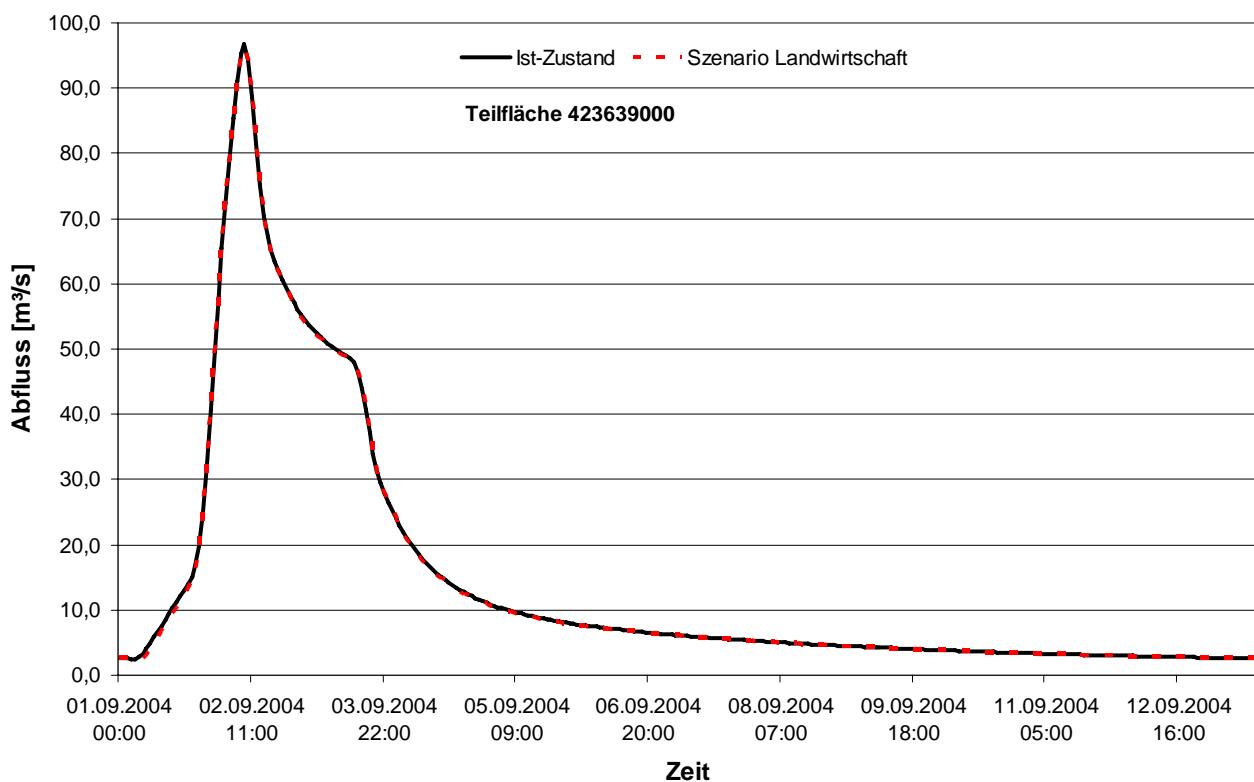


Abb. 112: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 423639000 (an der Lüder)

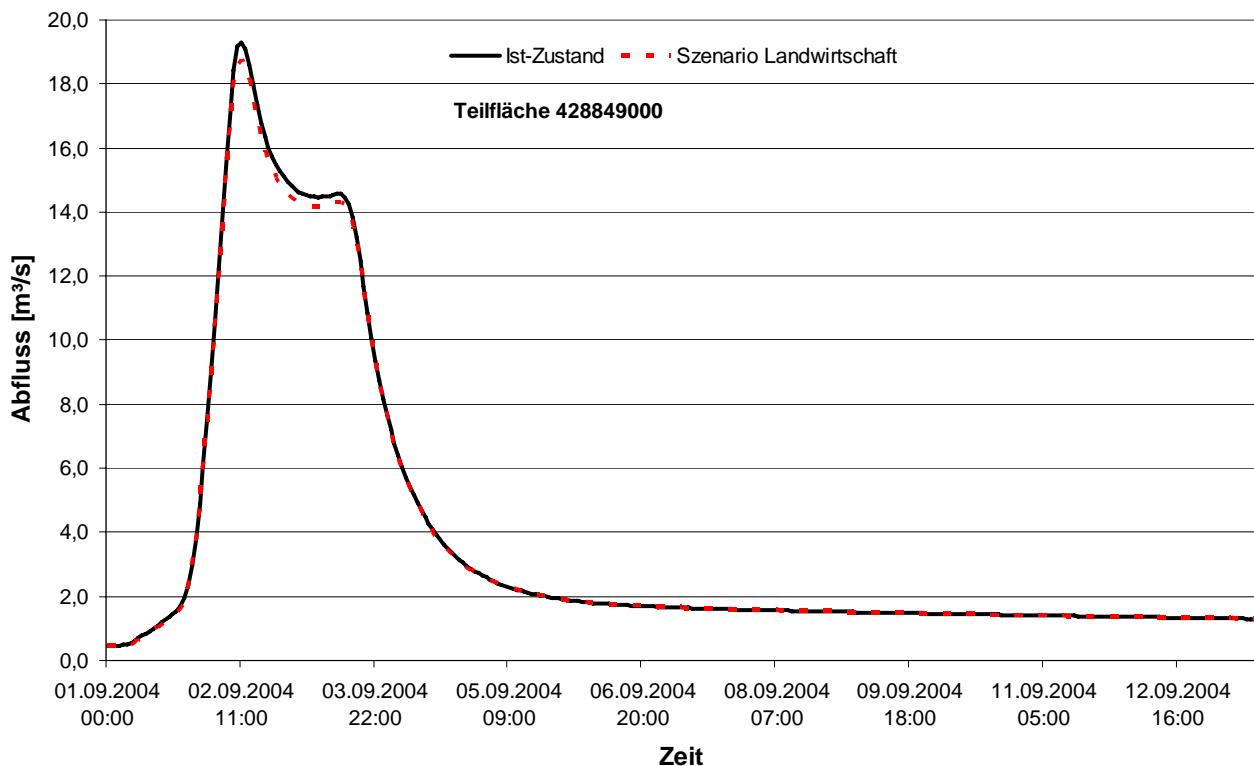


Abb. 113: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 428849000 (an der Gilsa)

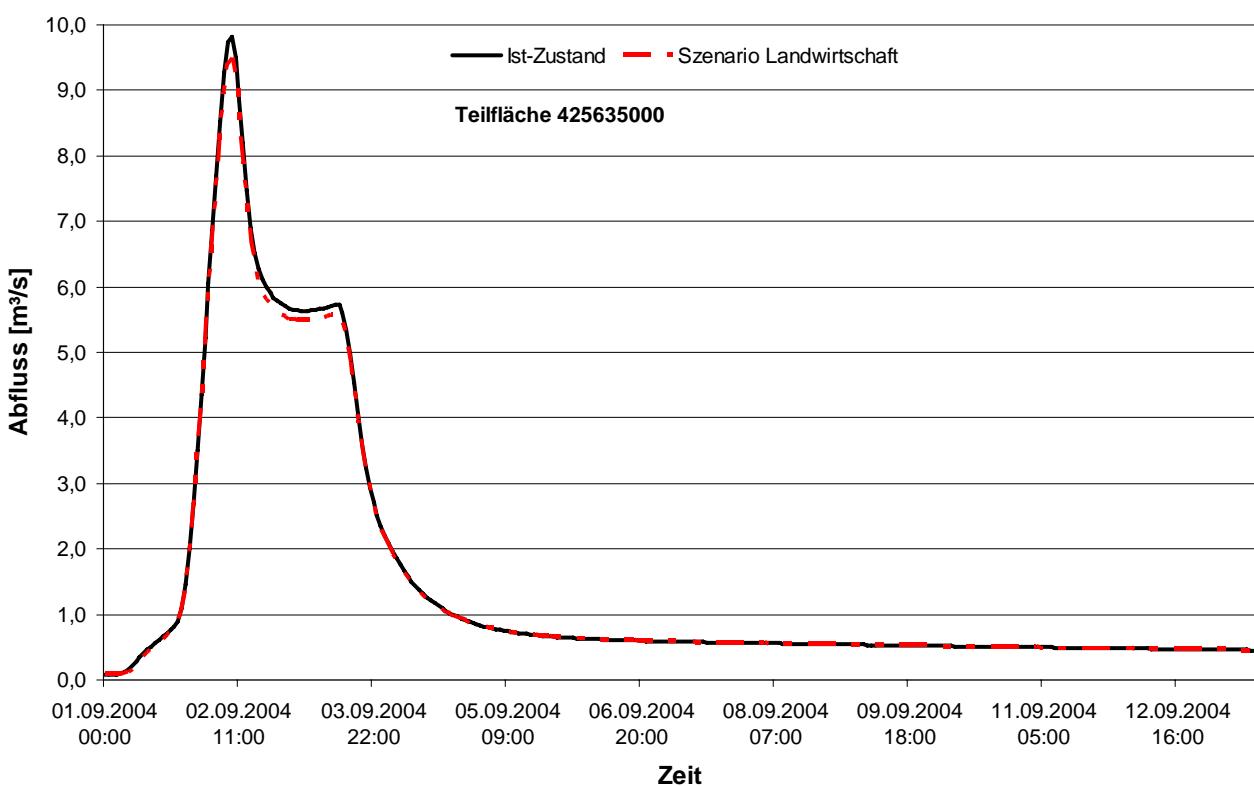


Abb. 114: Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 425635000 (an der Aula)

Der Hochwasserrückhalt wird auch als Retention bezeichnet. Unter Retention versteht man die Verzögerung und Abminderung einer Hochwasserwelle. Sie wird nach DIN 4049, Teil 1 als „Abflusshemmung und –verzögerung durch natürliche Gegebenheiten oder künstliche Maßnahmen“ definiert. In den Abb. 108 bis Abb. 114 ist zu erkennen, dass gegenüber der Wirkung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen, wie beispielsweise Rückhaltebecken, die Wirkung einer geänderten Bodenbearbeitung auf die Verformung der Hochwasserwellen eher gering ist. Für ein HQ₁₀₀ können in allen Fällen lediglich geringe Scheitelreduzierungen und keine nennenswerten Verformungen der Wellen beobachtet werden. Die Ganglinien weisen eine Scheitelreduzierung zwischen 0,6 % und 3,7 % auf. Erreicht wird eine Scheitelabminderung ΔQ , jedoch keine merkliche Scheitelverschiebung Δt sowie keine deutliche Änderung der Abflussfülle.

Für die Teilflächen **448110000** und **448120000** wurden die Ganglinien eines HQ₂, HQ₁₀, HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ und HQ₂₀₀ untersucht. Auf den Teilflächen wurden 80 % bzw. 64 % der Fläche bzgl. der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsform als konservierend bzw. in Grünland umgewandelt modelliert. Teilfläche **448110000** reagierte mit Scheitelreduzierungen von 3,9 % (HQ₂) bis 3,6 % (HQ₂₀₀) positiv auf diese Maßnahmen (Abb. 115). Der überwiegende Teil der betrachteten Teilfläche wird derzeit landwirtschaftlich genutzt, sodass die vorgeschlagenen Maßnahmen zur konservierenden Bodenbearbeitung sinnvoll sind und vermutlich leicht umzusetzen sein werden.

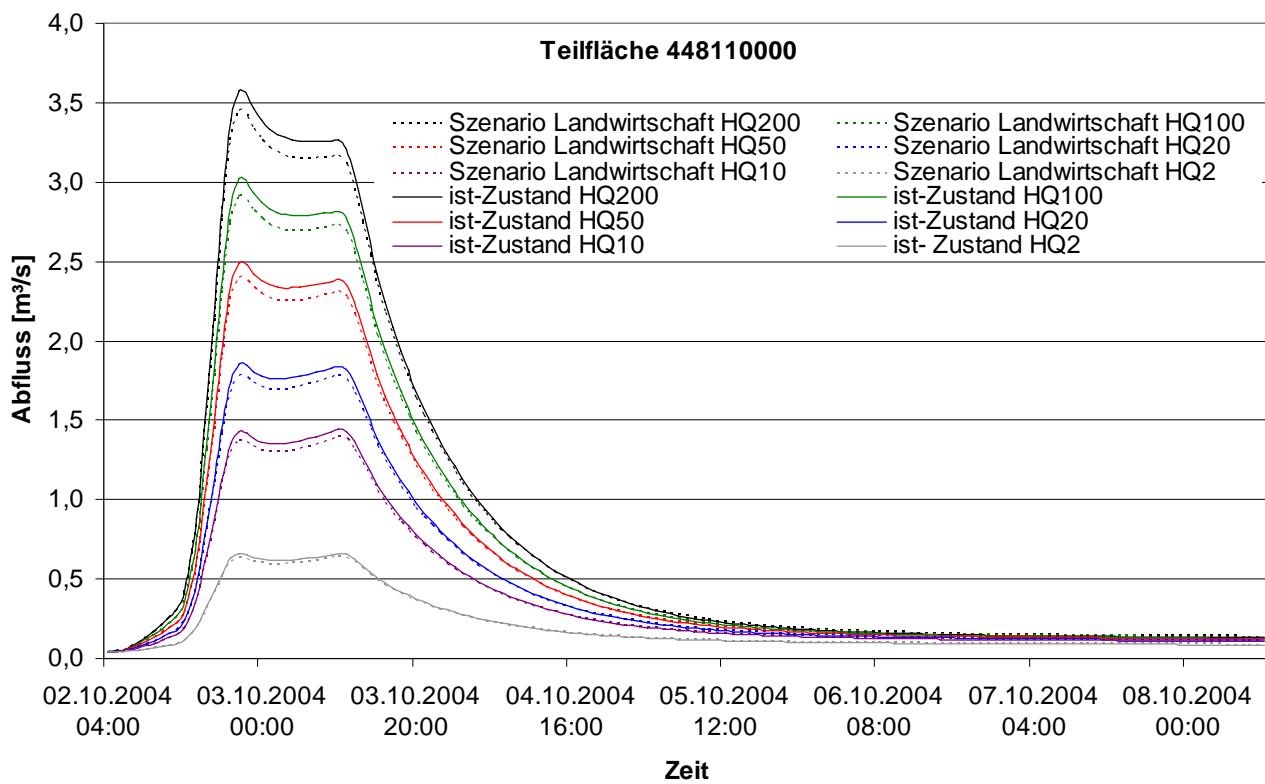


Abb. 115: Abflussganglinie verschiedener statistischer Hochwässer im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 448110000 (an der Esse)

Aus den in Kapitel 7.3.1 genannten Gründen ergeben sich im Einzugsgebiet des Jungfernaches (Teilfläche **448120000**) lediglich Scheitelreduzierungen von 1,1 % für ein HQ₂ und 0,6 % für ein HQ₂₀₀ (Abb. 116).

Das in Kapitel 6.1.1 untersuchte Einzugsgebiet mit Teilflächen des Jungfernaches ist etwa 1,4 km² kleiner als die Teilfläche 448120000. Dennoch ergaben sich mit NASIM für den Ist-Zustand höhere Scheitelwerte für die statistischen Hochwässer als im Modell NAXOS.

In NAXOS lag für die Teilfläche 448120000 kein Kontrollpegel vor. Das N-A-Modell wurde bezogen auf den nächstliegenden Pegel unterstrom kalibriert. Die kritische Regendauer für die Teilfläche 448120000 wurde mit 120 Minuten angesetzt und ist damit größer als der in Kapitel 6.4 angenommene 60-minütige Niederschlag für das dortige Untersuchungsgebiet. Daraus ergeben sich der geänderte Verlauf der Abflussganglinie und der geringere Hochwasserscheitel.

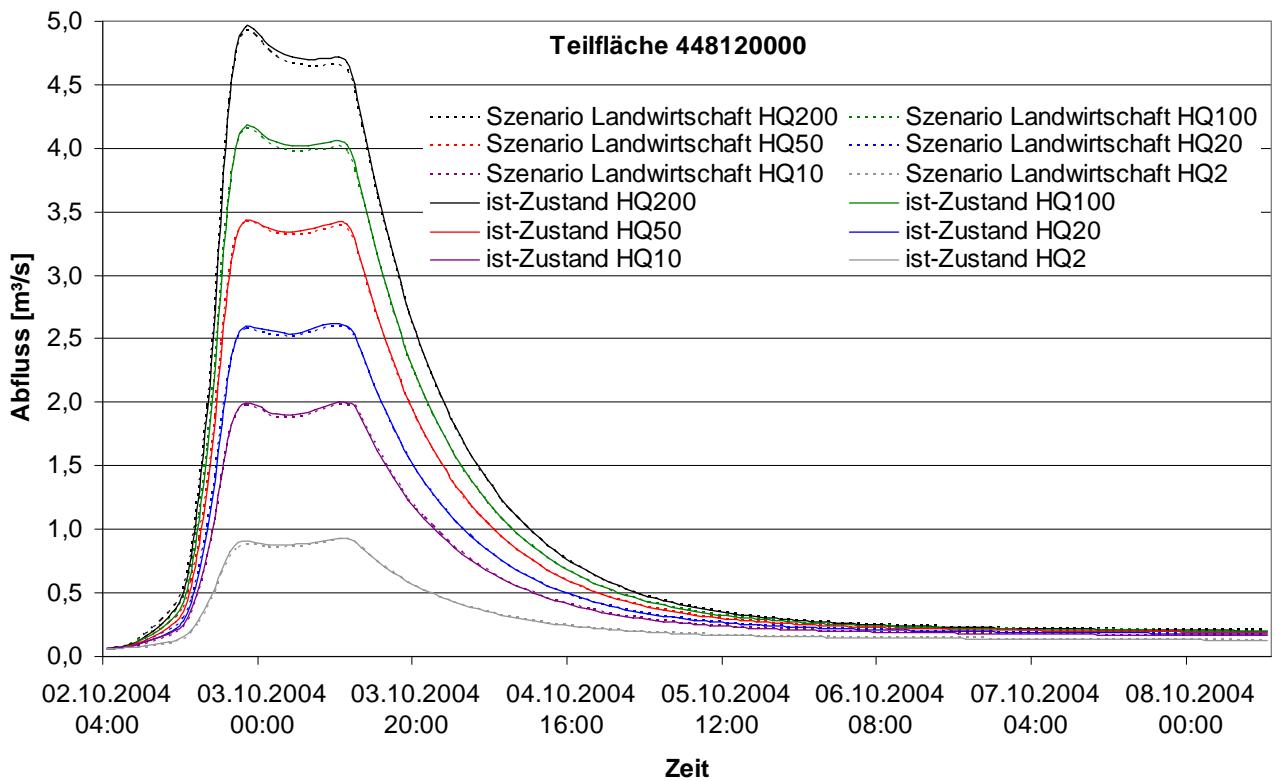


Abb. 116: Abflussganglinie verschiedener statistischer Hochwässer im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft am Auslass der Teilfläche 448120000 (Jungfernach)

Die Änderung hinsichtlich einer günstigeren oder ungünstigeren Überlagerung der Abflusswellen im Einzugsgebiet von Fulda und Diemel ist nach Umsetzung von Maßnahmen einer geänderten Flächenbewirtschaftung nicht zu erwarten, da die Scheitelabminderungen und Scheitelverzögerungen sowie die Änderungen der Abflussfülle lediglich sehr gering sind.

7.3.3 Abflusslängsschnitte verschiedener Gewässer

Relevant für die Bewertung der Effektivität der Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen ist die Wirkung im Gewässerlängsschnitt. Diesbezüglich wurden die 5 Gewässer Fulda, Diemel, Eder, Schwalm und Haune mit unterschiedlicher Einzugsgebietsgröße und räumlicher Lage untersucht. Die Abflusslängsschnitte der Hochwässer verschiedener Wiederkehrintervalle zeigen dabei die Wirkung des Szenarios Landwirtschaft in einzelnen Gewässernetzen (Abb. 117, Abb. 119, Abb. 121, Abb. 123, Abb. 125).

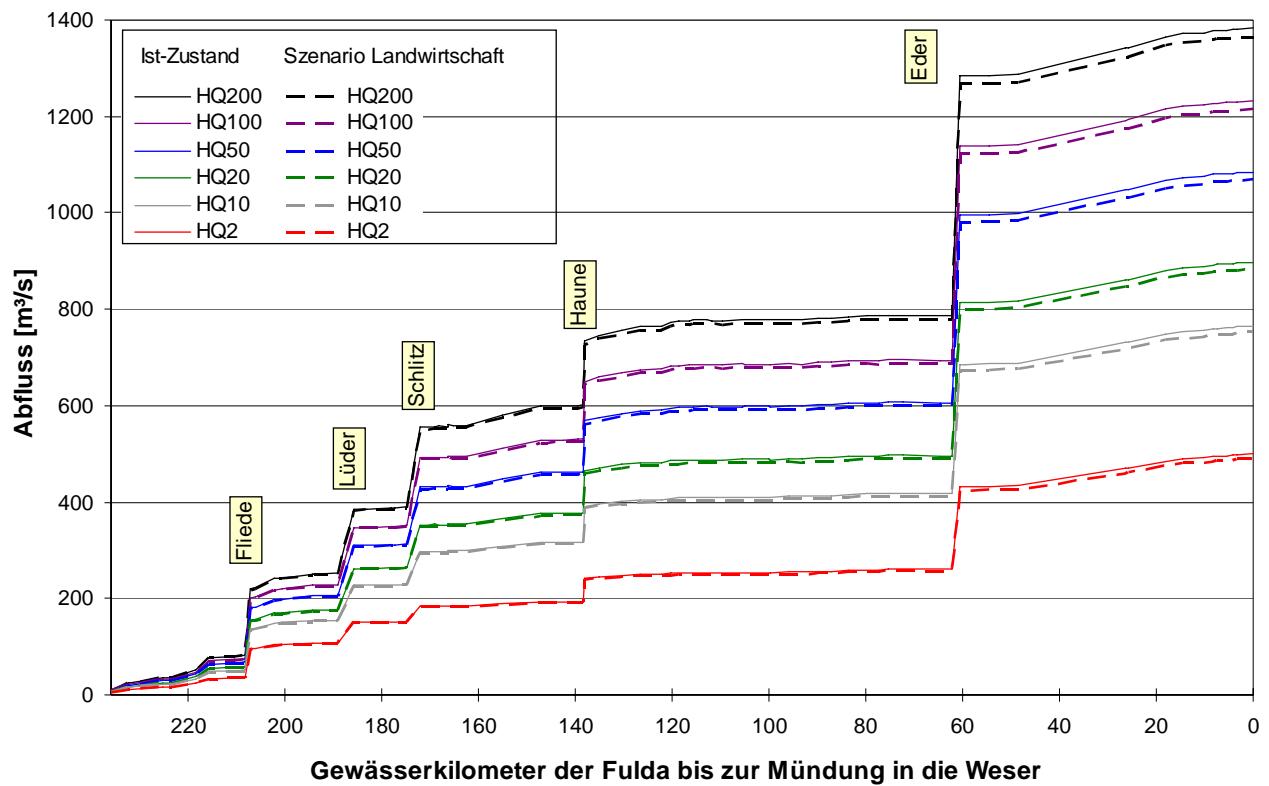


Abb. 117: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Fulda im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft

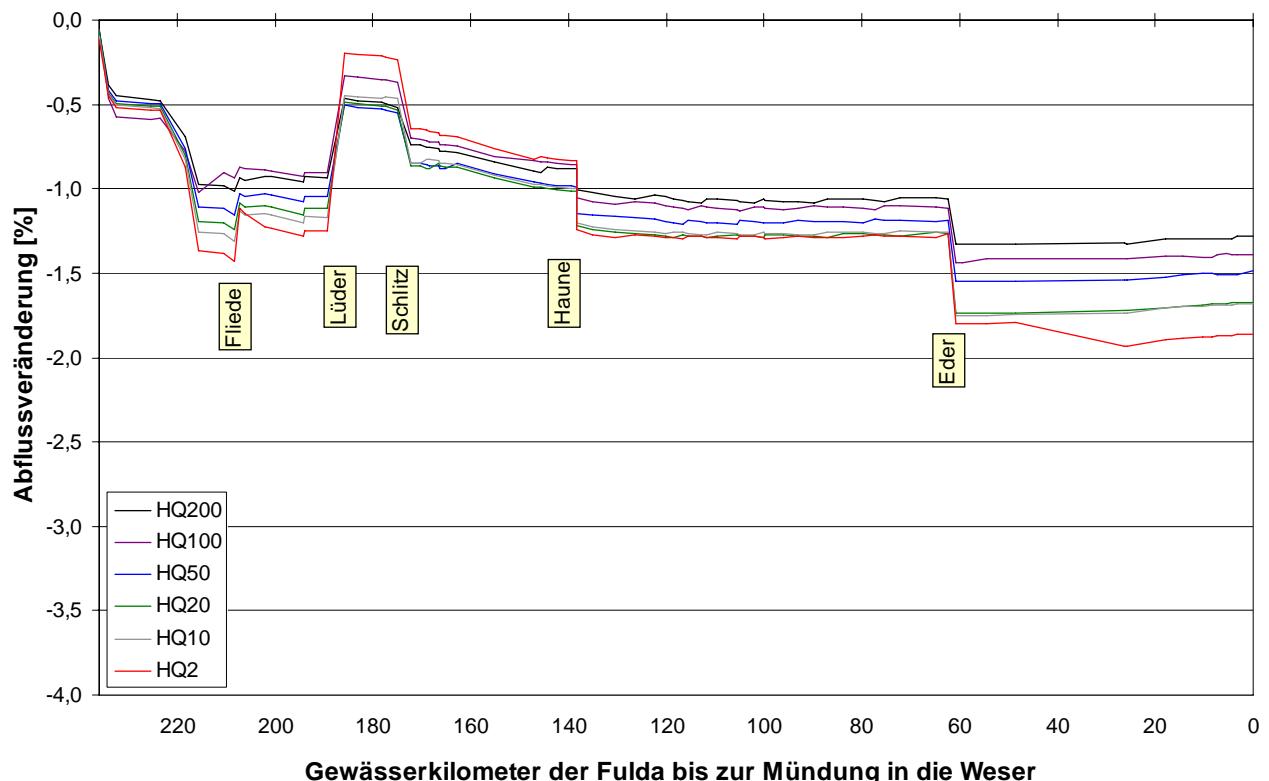


Abb. 118: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Fulda im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand

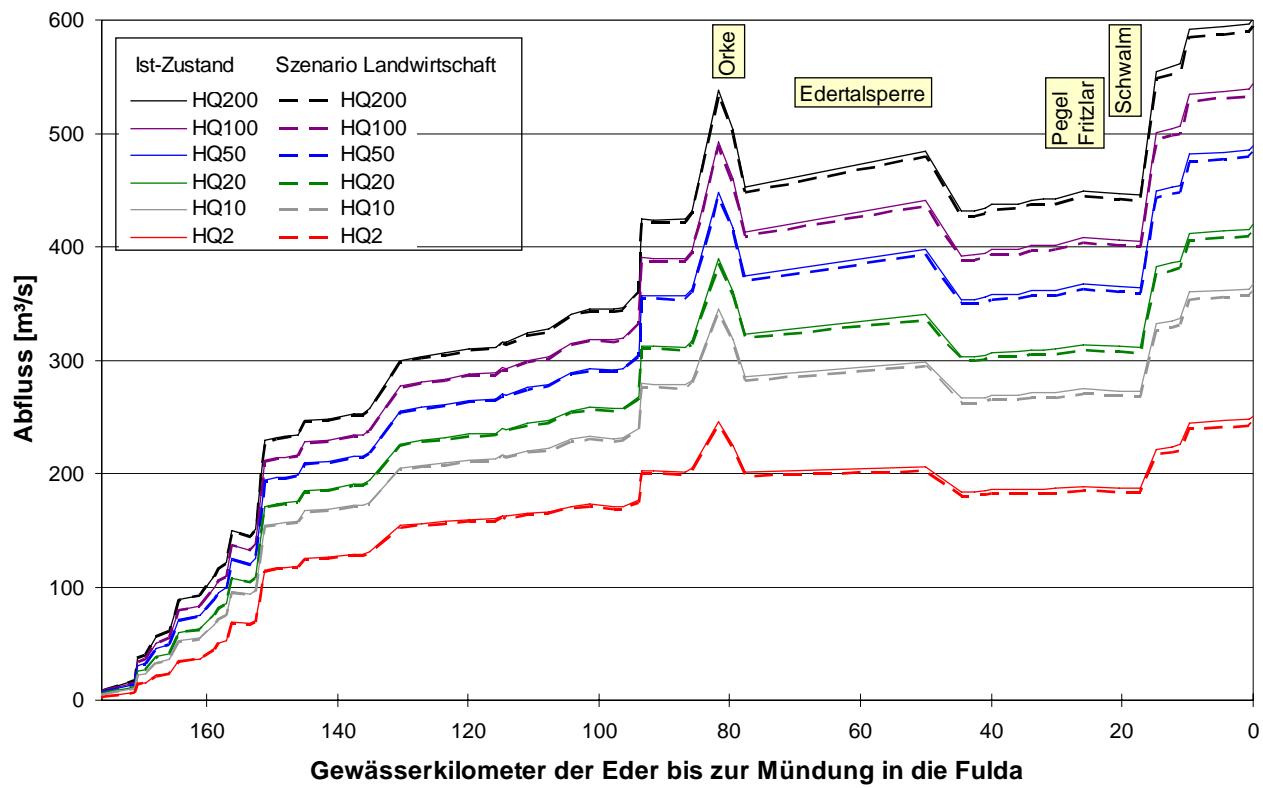


Abb. 119: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Eder im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft

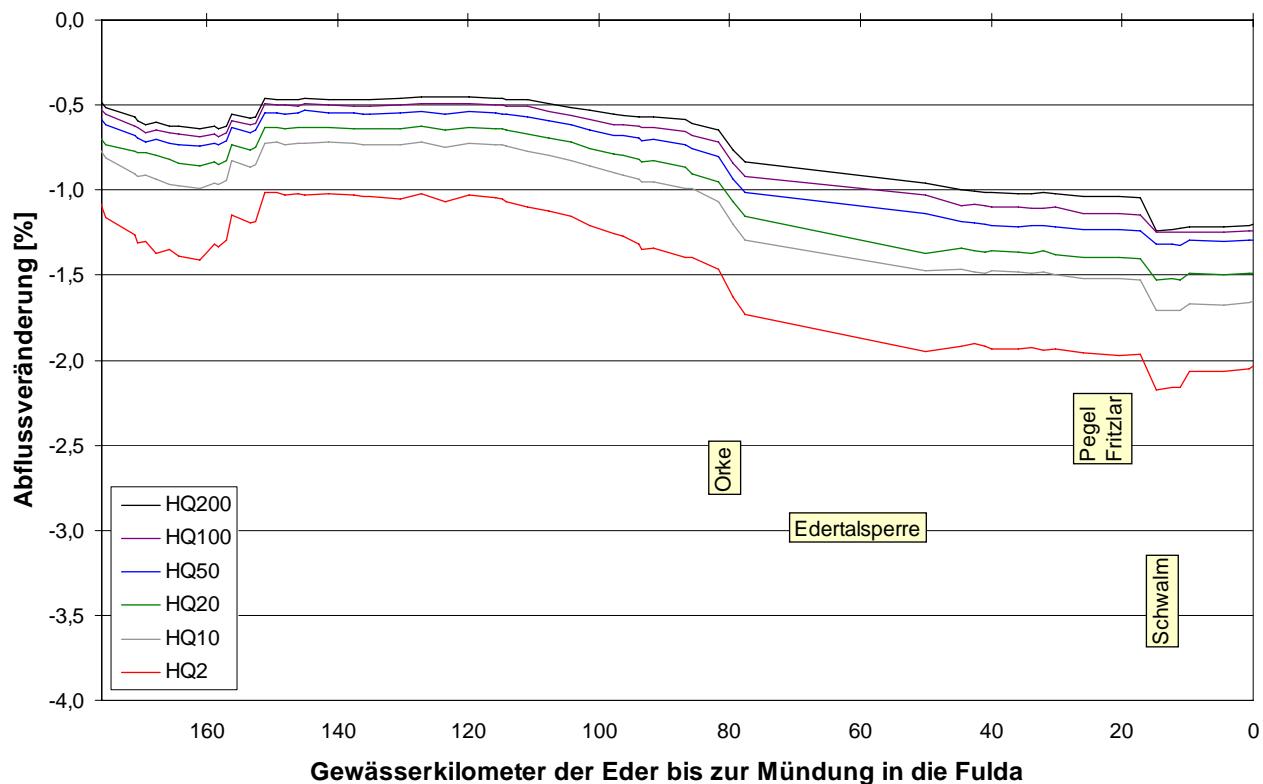


Abb. 120: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Eder im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand

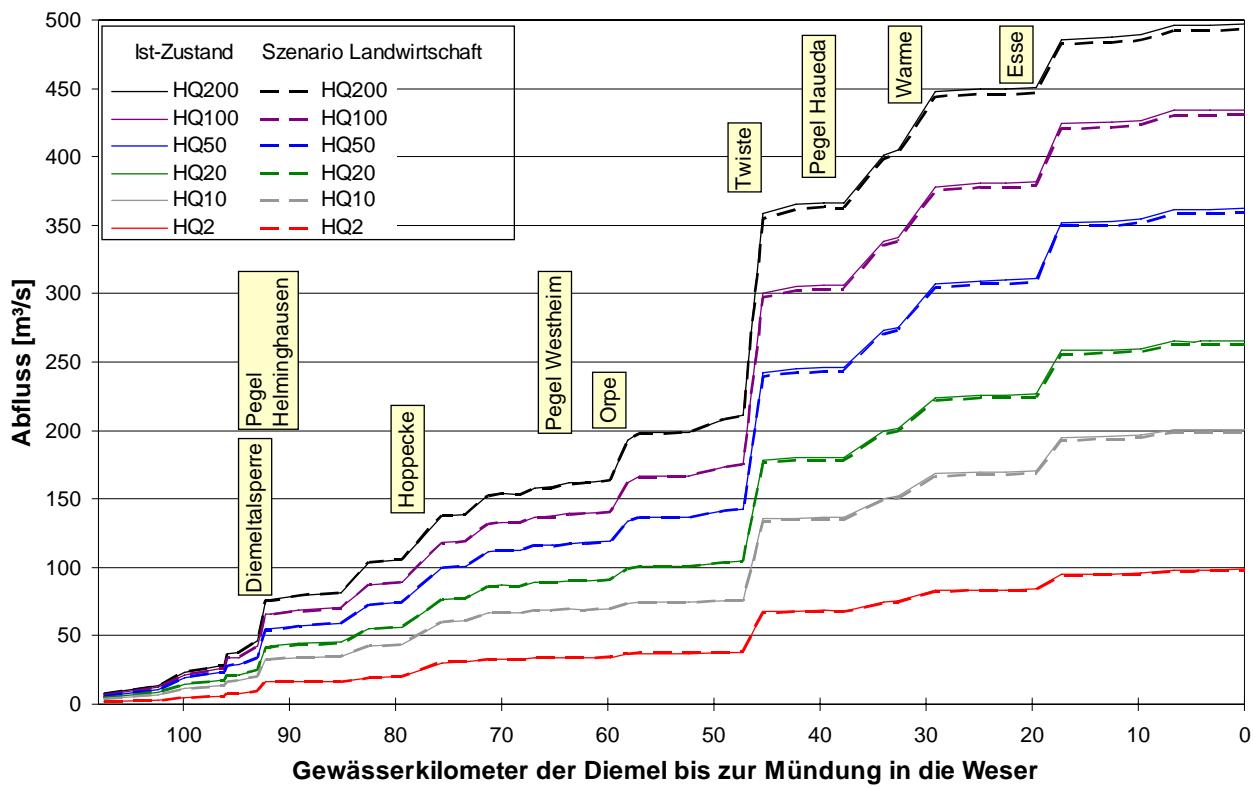


Abb. 121: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Diemel im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft

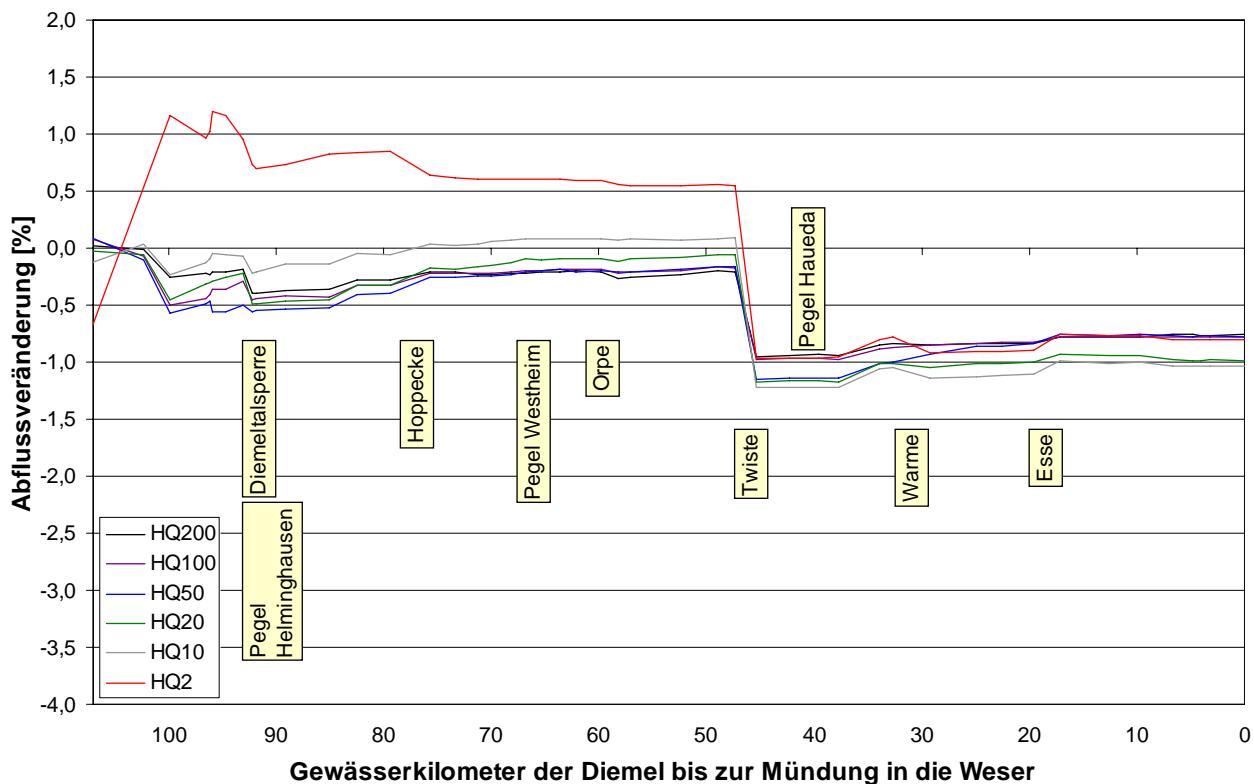


Abb. 122: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Diemel im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand

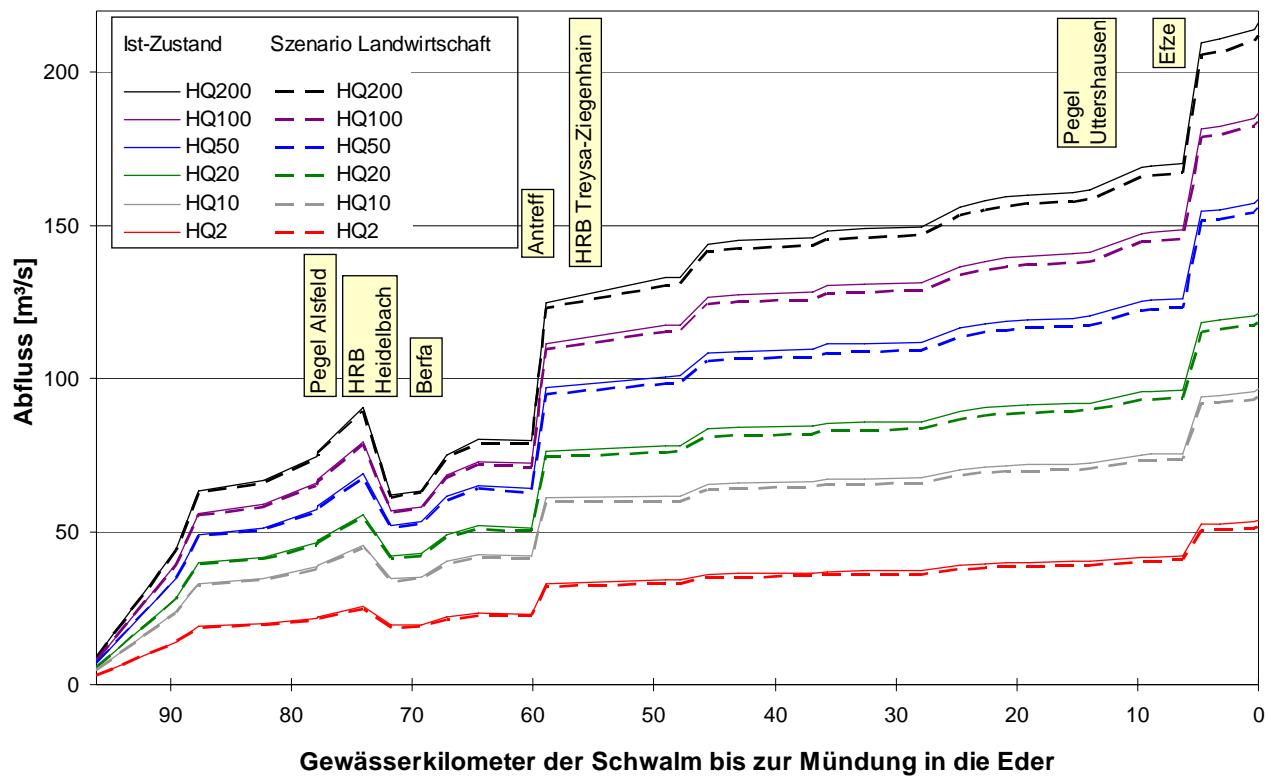


Abb. 123: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Schwalm im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft

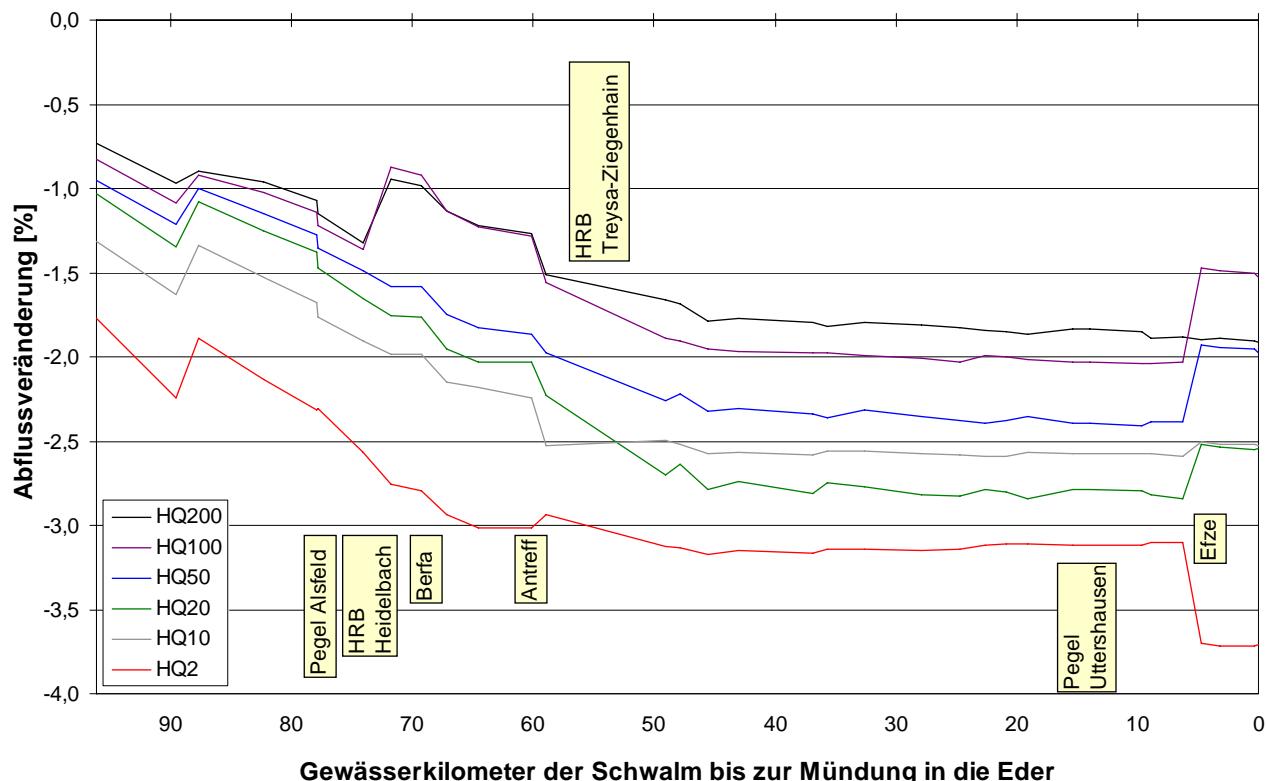


Abb. 124: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Schwalm im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand

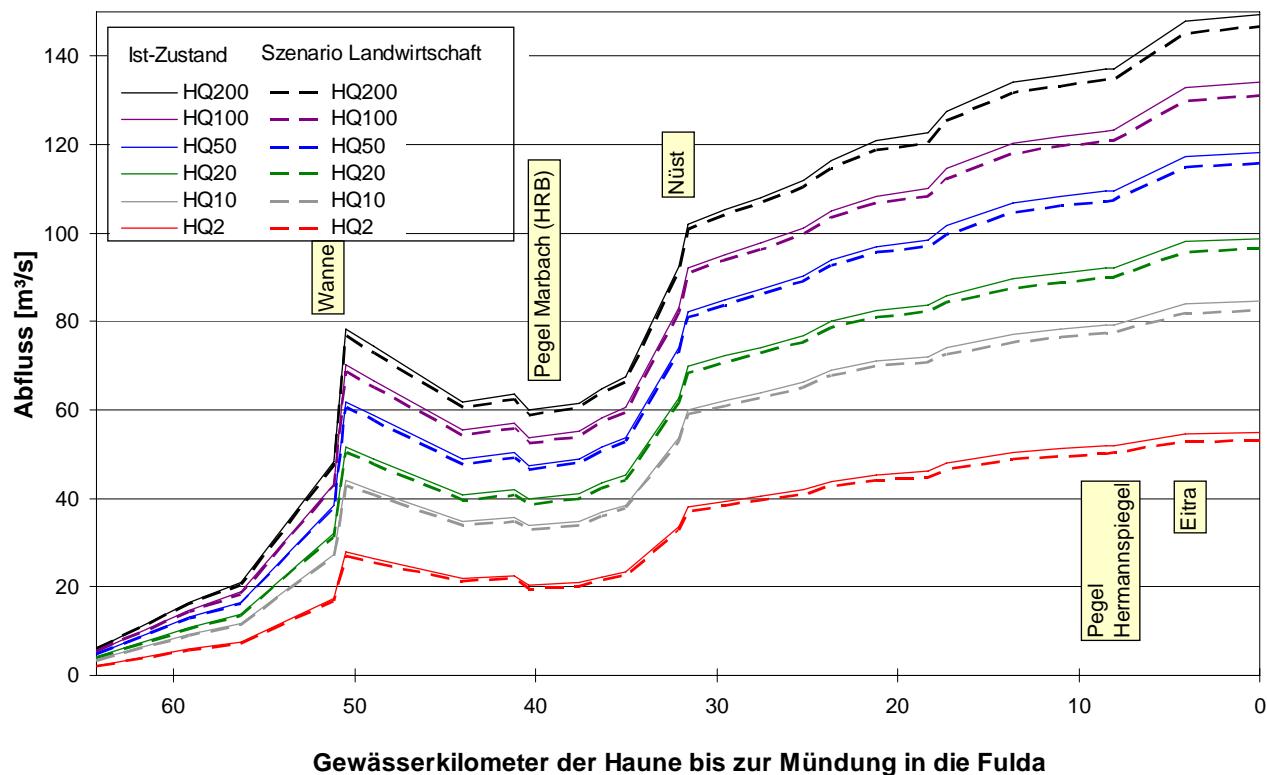


Abb. 125: Abflusslängsschnitt verschiedener statistischer Hochwässer der Haune im Ist-Zustand und im Szenario Landwirtschaft

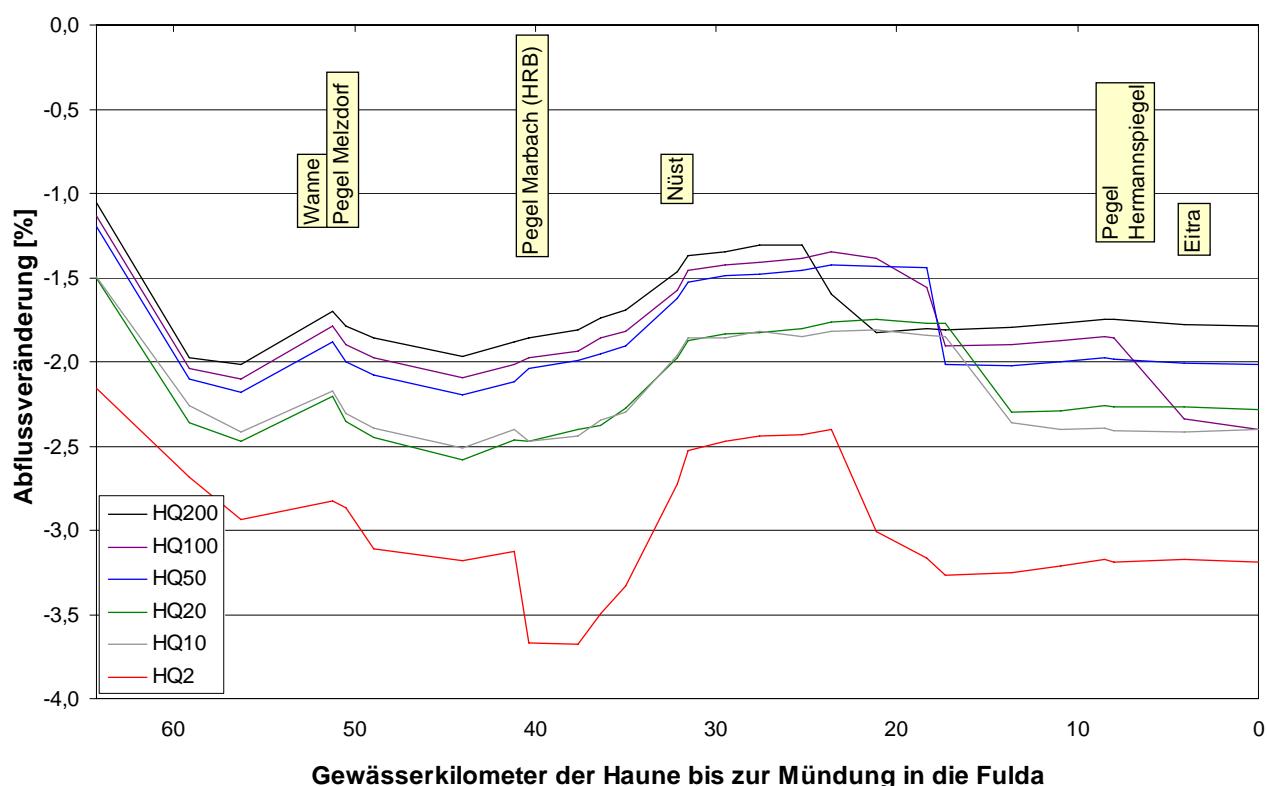


Abb. 126: Abflussveränderungen verschiedener statistischer Hochwässer im Längsschnitt der Haune im Szenario Landwirtschaft gegenüber dem Ist-Zustand

Einzugsgebiet	Einzugsgebietsgröße [ha]	Anteil Ackerland [%]	konservierend bewirtschaftetes Ackerland [%]	in Grünland umgewandeltes Ackerland [%]	gesamte umgewandelte Fläche [%]
Fulda	694.545	30	22	3	25
Eder	336.926	34	24	3	27
Diemel	175.998	46	25	4	29
Schwalm	130.383	43	33	3	36
Haune	50.772	34	27	3	30

Tab. 54: Anteil der konservierend bearbeiteten bzw. in Grünland umgewandelten Flächen im Einzugsgebiet verschiedener Gewässer

Betrachtet man die Abflussveränderungen durch eine geänderte Bodenbearbeitung ist zu erkennen, dass sich für Fulda, Eder, Schwalm und Haune positive Veränderungen in Form von Abflussreduzierungen ergeben. Entlang der Schwalm (Abb. 124) haben die Maßnahmen kontinuierlich steigend über den gesamten Längsschnitt Abflussreduzierungen zur Folge. Prozentual sind die Reduzierungen gegenüber dem Ist-Zustand bei Hochwässern kleinerer Wiederkehrintervalle am größten. Im Maximum liegen sie an der Schwalm bei 3,7 % (HQ_2). Im Einzugsgebiet der Schwalm wurden gleichzeitig für den größten Flächenanteil (36 %) derzeit konventionell bewirtschafteter Ackerflächen Maßnahmen in Form von konservierender Bodenbearbeitung oder die Umwandlung in Grünland vorgeschlagen (Tab. 54).

Ähnliches ist entlang der Fulda (Abb. 118) und Eder (Abb. 120) zu beobachten. Die Abflussreduzierungen betragen im Maximum 1,9 % (HQ_2) bei allerdings lediglich 25 % umgewandelter Fläche im Einzugsgebiet der Fulda und 2,2 % (HQ_2) im Längsschnitt der Eder. Sprünge in der Abflussveränderung ergeben sich unter Umständen dann, wenn ein Nebengewässer zufließt und die Maßnahmen in diesem Gebiet sogar eine Abflusserhöhung zur Folge haben.

Der Effekt des Szenarios Landwirtschaft ist entlang der Haune (Abb. 126) am deutlichsten zu erkennen. Die abflussreduzierende Wirkung liegt im Maximum bei ca. 3,7 % (HQ_2).

Eine Abflussverschärfung ist für ein HQ_2 im oberen Bereich der Diemel zu erkennen (Abb. 122). Insgesamt zeigt das Szenario entlang der Diemel die geringste Wirkung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entstehung von Oberflächenabfluss wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, unter anderem durch den Zustand landwirtschaftlicher Nutzflächen hinsichtlich der Wasseraufnahme und der Infiltrationsleistung. Werden diese Eigenschaften gestört, beispielsweise durch Bodenverdichtung und Oberflächenverschlammung, führt dies zu einem schnelleren Abfließen des Niederschlagwassers.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die komplexen Zusammenhänge von Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und den daraus resultierenden Veränderungen der Bodenmatrix beschrieben und die Wirkung auf den Entstehungsprozess von Oberflächenabfluss aufgezeigt. Verschiedene Maßnahmen wurden in Modellen auf unterschiedlicher Skalengröße abgebildet und deren Wirkung auf die Änderung der Abflüsse im Gerinne für Mittelgebirgsregionen untersucht.

Für das Beispiel der *Mesoskala* wurde ein Teilgebiet des im nordhessischen gelegenen Jungfernaches, ein Gewässer im Einzugsgebiet der Diemel, berücksichtigt. Das Untersuchungsgebiet hat eine Größe von 7,6 km² und ist durch überwiegend landwirtschaftliche Flächennutzung geprägt. Ein geringer Flächenanteil wird seit 1998 durch die Universität Kassel nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus bewirtschaftet, die übrigen Flächen unterliegen der konventionellen Bewirtschaftungsmethodik. In einer mehrjährigen Messphase wurden Niederschlagsdaten und Abflussdaten des Untersuchungsgebietes aufgezeichnet und ausgewertet. Für das mit dem Programm NASIM erstellte N-A-Modell standen sowohl hydrologische Eingangsdaten als auch aktuelle Daten der tatsächlichen Flächennutzung zur Verfügung. Das Untersuchungsgebiet wurde im Modell mit der aufgezeichneten Niederschlagsreihe überregnet und die berechneten Abflüsse am Gebietsauslass mit den gemessenen Pegeldaten verglichen. Die Beurteilung der Güte der Modellpassung erfolgte durch die Modelleffizienz nach Nash. Sehr gute bis zufriedenstellende Gütwerte ermöglichten die Verwendung des erstellten Modells zur Beurteilung der festgelegten Szenarien auf den betrachteten Flächen. Untersucht wurden die Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung, des ökologischen Landbaus, unterschiedlicher Vegetation und sonstiger Maßnahmen auf die Bodenmatrix und die daraus resultierende Wirkung auf die Abflussscheitel am Gebietsauslass. Der Monat Mai wurde als fiktiver Modellzeitraum gewählt.

Der Einfluss des **ökologischen Landbaus** wurde im Modell durch die Änderung der k_f -Werte abgebildet. Die maximale Infiltrationsrate wurde diesbezüglich angepasst. Die Ergebnisse basieren auf gemessenen erhöhten k_f -Werten im Bewirtschaftungsbereich der Staatsdomäne Frankenhausen. Eindeutige Aussagen über den ökologischen Landbau als Ursache dieser Wasserleitfähigkeitserhöhung sind mittels Langzeitstudien zu belegen. Durch die positive Entwicklung der Bodenmatrix konnte eine Scheitelreduzierung von ca. 3 % bei einem HQ_{0,5} berechnet werden. Die abflussreduzierende Wirkung nimmt bei Ereignissen mit größer werdendem Wiederkehrintervall ab und ist bei einem HQ₁₀₀ kaum noch sichtbar. Da lediglich ca. 1,1 km² des untersuchten Gebietes, das entspricht etwa 14 % der Gesamtfläche, ökologisch bewirtschaftet werden, würde sich die abflussreduzierende Wirkung bei flächiger Umsetzung erhöhen.

In zahlreichen Untersuchungen wird belegt, dass die **konservierende Bodenbearbeitung** eine infiltrationsfördernde Wirkung auf die Bodenmatrix ausübt. Für das betrachtete Untersuchungsgebiet in Frankenhausen wurde im NA-Modell stufenweise die maximale Infiltrationsrate geändert und die k_f -Werte angepasst. Die Steigerung der maximalen Infiltrationsrate erfolgte zwischen 5 % und maximal 75 %. Die maximale Steigerung um 75 %, die jedoch lediglich unter optimalen Bedingungen erzielt wurde (Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung über einen langen Zeitraum) und an die geologischen und boden-

physikalischen Voraussetzungen sowie weitere oftmals lokal stark variierende Faktoren gekoppelt ist, ergibt sich aus Literaturwerten. Bei Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung ist für einen Großteil der Böden eine Erhöhung der maximalen Infiltrationsrate um 20 % bis 30 % kurz nach Umstellung der Bodenbearbeitung als realistisch anzusehen. Daraus resultieren Scheitelreduzierungen von ca. 7,5 % bzw. 10,5 %. Im untersuchten Gebiet erzielen infiltrationsfördernde Maßnahmen im Rahmen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung eine sichtbare Wirkung hinsichtlich der Abflussreduzierung, jedoch lediglich bei flächiger Umsetzung (100 % Flächenanteil). Somit handelt es sich dabei um ein Extremsszenario, welches in der Praxis nur schwer umsetzbar ist. Das heißt die tatsächlichen Abflussreduzierungen sowie die hydrologische Wirkung in den Gewässernetzen sind geringer. In Abhängigkeit der Topografie kann unter Umständen der Zwischenabfluss einen großen Teil des infiltrierenden Wassers ableiten. Im Untersuchungsgebiet wird der Interflow bei steigender maximaler Infiltrationsrate jedoch nicht maßgeblich beeinflusst. Durch die Gefällesituation im Untersuchungsgebiet haben die wesentlich langsamer verlaufende Auffüllung der Bodenwasservorräte und die Versickerung ins Grundwasser eine stärkere Bedeutung gegenüber dem Interflow.

Die Wirkung der **Vegetation** auf die Abflussbildung wurde im Modell über die Änderung der Interzeption und der Wurzelgröße, in Abhängigkeit verschiedener Kulturen, untersucht. Die Wurzelgröße zeigte eine untergeordnete Rolle hinsichtlich der abflussreduzierenden Wirkung. Der positive Einfluss verschiedener Hackfrüchte auf die Abflussreduzierung wird in der Literatur von zahlreichen Autoren bestätigt. Der Grund sind die höheren Interzeptionsleistungen der Hackfrüchte gegenüber anderen Feldfrüchten. Die Kartoffelkultur zeigte in den Modellierungen eine sichtbare Abflussreduzierung für Hochwässer geringer Jährlichkeit (Scheitelreduzierung ca. 23 % für ein HQ_{0,5}). Dies ist jedoch nur in Verbindung mit Maßnahmen zum Erosionsschutz realistisch. Für seltene Hochwasserereignisse (HQ₁₀₀) ist die scheitelreduzierende Wirkung mit 1,6 % nur noch gering.

Eine Waldkultur reduziert bei Überflutungen im Vorland die Fließgeschwindigkeiten, bei gleichzeitigem Anstieg der Wasserstände. Das hohe Interzeptionsvermögen, vor allem von Laubwäldern, wirkt sich zudem auf den Abflussprozess aus. Für Hochwässer geringer Jährlichkeit resultiert daraus ein nicht zu vernachlässigendes Rückhaltepotenzial. Hohe Waldflächenanteile mindern den Oberflächenabfluss so stark, dass sich dies selbst in der Ganglinie eines HQ₁₀₀ durch die Reduzierung des Hochwasserscheitels um ca. 10 % bemerkbar macht. Bezogen auf die Abflussfülle ergibt sich dabei eine Reduzierung um 11 %. Großflächige Umwandlungen in Wald- und Forstkulturen zum vorbeugenden Hochwasserschutz sind jedoch nur schwierig zu realisieren und lediglich als lokale Maßnahme umsetzbar. Ähnlich wie bei Hackfrüchten sind, trotz der hohen Interzeptionsleistung, großflächige Monokulturen nicht wünschenswert und nicht praxisnah.

Neben der Interzeptionsleistung hat die Vegetation ihre positive Wirkung in der Abflussentstehung darin, dass Fließgeschwindigkeiten reduziert werden und sich die Welle verformt. Im Modell wurde die erhöhte Flächenrauheit durch eine Änderung des k_{St}-Wertes berücksichtigt. Es konnten dabei lediglich geringe Scheitelreduzierungen von etwa 2 % für Hochwässer verschiedener Jährlichkeit beobachtet werden. Dies liegt vor allem an der eingeschränkten Modellierbarkeit. Im hiesigen Beispiel wurde die Oberflächenrauheit im gesamten Untersuchungsgebiet einheitlich verändert. Stark abflussverzögernde Landschaftsstrukturelemente (Hecken, Raine, Feldgehölze und zusammenhängende Uferrandstreifen) können in den meisten N-A-Modellen nur unzureichend abgebildet werden. Zwar ist der Einfluss einer geänderten Oberflächenrauheit im Untersuchungsgebiet auf den Scheitelabfluss gering, zu erwähnen ist jedoch die Scheitelverschiebung um durchschnittlich 15 Minuten. Vor allem für Einzugsgebiete mit schneller Abflusskonzentration ist diese Beobachtung positiv zu bewerten.

Der Verlauf von Wegen und vor allem Entwässerungsgräben sollte nicht in Hangrichtung sondern isohypsenparallel erfolgen. Die Fließzeiten für den Oberflächenabfluss werden dadurch verlängert. Die Entwässerung über Wegseitengräben erfolgt im Idealfall nicht direkt zum nächsten Gewässer sondern die Abflüsse können auf geeigneten Flächen versickern oder in Kleinretentionen zwischengespeichert werden. Im Modell wurden **Feldspeicher** durch eine geänderte Topografie im Gelände abgebildet. Unter Berücksichtigung der Fließvektoren und Höhenlinien wurde dazu in jedem Teilgebiet eine Abflussmulde ins Gelände modelliert. Durch die lokale Änderung der Topografie ändern sich das Geländemodell und damit die Zeitflächenfunktion für das Untersuchungsgebiet. Die Abflussmulden umfassen Flächen von ca. 0,8 bis 2,6 ha (insgesamt ca. 1 % der Gesamtfläche) bei einer Tiefe von etwa 0,5 m. Eine Umsetzung im Gelände ist nur sinnvoll, wenn die Abflussmulden weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden können, beispielsweise als extensives Grünland, und wenn der abgetragene Boden vor Ort wieder verwendet werden kann. Die Wirksamkeit von Feldspeichern oder Abflussmulden ist sehr stark abhängig von den topografischen Begebenheiten im Gewässereinzugsgebiet. Im modellierten Untersuchungsgebiet konnten Scheitelreduzierungen von maximal 2 % berechnet werden. In Relation zur Flächengröße und zum Erstellungsaufwand der Abflussmulden ist dies als Retentionsmaßnahme für die Praxis eher ungeeignet. Eine günstige Positionierung der Abflussmulden in den Hauptfließpfad ist Voraussetzung für eine sichtbare Wirkung und nicht überall möglich, vor allem nicht in Regionen mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung.

Über den Einfluss von **Dränagen** auf die Hochwasserentstehung im Untersuchungsgebiet ist keine eindeutige Aussage möglich. Im Modell können Dränagen nicht abgebildet werden. Es wurden somit lediglich die Laufzeiten zweier benachbarter Pegel bzgl. der Abflusspeaks verglichen. Ein deutlicher zeitlicher Nachlauf der Dränagen gegenüber dem Abfluss im Vorfluter war dabei nicht zu erkennen, das heißt die Dränagen führen das Bodenwasser nicht stark zeitverzögert ab, was auf Böden mit einer guten Infiltrationsleistung schließen lässt.

Für den Bereich der *Makroskala* wurden die Einzugsgebiete von Fulda (6.945 km²) und Diemel (1.760 km²) untersucht. Für die Betrachtungen lag die Annahme zu Grunde, dass das Retentionsvermögen der landwirtschaftlichen Nutzflächen vor allem durch eine erhöhte Infiltrationsleistung, etwa durch die Minimierung der Bodenverdichtung, der Verschlammung und der Bodenerosion gesteigert werden kann und gleichzeitig der Anteil des schnell abflusswirksamen Oberflächenabflusses verringert wird. Für Flächen mit hohem Erosionsrisiko wurden Änderungen der landwirtschaftlichen Nutzung und der Bodenbearbeitung vorgeschlagen. Im Modell wurde die Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung und die Umwandlung von Ackerland in Grünland vereinfacht durch die Veränderung der CN-Werte erfasst. Das Kriterium einer geänderten Nutzung erfolgte in Abhängigkeit der Erosionsgefahr. Darüber hinaus wurden Ackerflächen in der Überschwemmungsfläche des HQ₁₀₀ aus der intensiven Nutzung genommen. Aus Sicht des Boden- und Gewässerschutzes sind diese Kriterien sinnvoll. Im 8.705 km² großen Einzugsgebiet der Fulda und Diemel wurden im Szenario Landwirtschaft von den 290.000 Hektar Ackerland ca. 194.000 Hektar konservierend bearbeitet und 28.000 Hektar in Grünland umgewandelt.

Die statistischen Hochwassereignisse HQ₂, HQ₁₀, HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ und HQ₂₀₀ wurden berechnet und hinsichtlich der Ergebnisse ausgewertet. Dabei wurde eine einzugsgebietsbezogene Bewertung der Wirkung von Maßnahmen auf die Abflusslängsschnitte der Hauptgewässer Fulda, Diemel, Eder, Schwalm und Haune vorgenommen.

Eine Abflussverschärfung ist für ein HQ₂ im oberen Bereich der Diemel zu erkennen. Die Abflussreduzierungen entlang der Fulda und Eder verlaufen relativ gleichmäßig und betragen im Maximum 1,9 % für ein HQ₂ im Einzugsgebiet der Fulda und 2,2 % für ein HQ₂ der Eder. Betrachtet man die Abflussveränderungen im Gewässerlängsschnitt der Schwalm,

sind kontinuierlich steigend über den gesamten Längsschnitt Abflussreduzierungen zu beobachten. Prozentual sind die Reduzierungen gegenüber dem Ist-Zustand bei Hochwassern kleinerer Wiederkehrintervalle am größten. Im Maximum liegen sie bei 3,7 % für ein HQ₂ und 1,9 % für ein HQ₂₀₀. Der Effekt der Maßnahmen ist entlang der Haune am deutlichsten zu erkennen. Für fast alle Gewässerabschnitte zeigt sich eine abflussreduzierende Wirkung, im Maximum bei 3,7 % für ein HQ₂ liegend.

Die berechnete hydrologische Wirkung erscheint somit lediglich gering. Zu berücksichtigen ist, dass hierbei keine flächige Umsetzung einer konservierenden Bodenbearbeitung zugrunde gelegt wurde. Ein höherer Flächenanteil mit konservierender Bodenbearbeitung ergibt eine höhere Retentionswirkung auf der Fläche. Die beobachteten maximalen Scheitelreduzierungen liegen im realistischen Bereich. Die Veränderung der CN-Werte erfolgte sehr konservativ, da eine Erhöhung der Infiltrationsrate schwierig in diesem Parameter auszudrücken ist. Zudem stellt sich die verbesserte Infiltrationsleistung durch konservierende Bodenbearbeitung, in Abhängigkeit der Böden, unter Umständen erst nach mehreren Jahren ein. Somit dürfte die scheitelreduzierende Wirkung in der Realität zunehmen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich eine geänderte Bodenbearbeitung sowohl positiv auf die Verbesserung der Retentionseigenschaften als auch auf den Bodenschutz auswirkt. Bei ungünstiger Konstellation beteiligter Faktoren können die Effekte jedoch so gering sein, dass der Nutzen für den Hochwasserschutz verschwindend gering ist. Hochwasserereignisse können nicht verhindert werden, jedoch sollten die positiven Effekte einer angepassten Bodenbearbeitung in Konzepte zum Hochwasserschutz integriert werden. Unter dem Aspekt einer nachhaltigen Landwirtschaft wird die konservierende Bodenbearbeitung in Zukunft eine noch stärkere Rolle einnehmen und mit Hinblick auf die erosionshemmende Wirkung als gute fachliche Praxis von den Landwirten angestrebt werden. Die positiven Effekte für den Hochwasserschutz dürften somit in Zukunft automatisch mit eingebracht werden. Mit Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung (mit Mulchsaaat) wird die Erosionsgefahr durch Verschlammung gehemmt und die Infiltrationsleistung erhöht. Der Erosionsschutz ist die Voraussetzung, um die weiteren positiven Eigenschaften, durch die Wahl spezieller landwirtschaftlicher Kulturen mit erhöhter Interzeptionsleistung, zu nutzen. Die positiven Wirkungen addieren sich auf und zeigen so in ihrer Gesamtheit einen sichtbaren Einfluss.

Im Vergleich zu anderen Maßnahmen des Hochwasserschutzes ist der Einfluss auf die Verformung der Hochwasserwelle jedoch gering. In kleinen Einzugsgebieten können Änderungen der Bodenbearbeitung und –bewirtschaftung lokal stark abflussreduzierend wirken. Für große Einzugsgebiete ist der Einfluss auf den Hochwasserschutz gering. Zu berücksichtigen ist zudem, dass das Wasseraufnahmevermögen der Böden jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Für Böden in den Wintermonaten ist die abflussreduzierende Wirkung fast völlig zu vernachlässigen. Für langanhaltende und großflächige Niederschläge in Verbindung mit hohem Bodenfeuchtegehalt ist der Einfluss der Landnutzung und Landbewirtschaftung ebenfalls marginal.

Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete nur auf Basis einer vergleichbaren Landnutzungsverteilung ist nicht möglich. Dies ist streng genommen nur bei Gebieten mit vergleichbarer physiografischer Ausstattung (Landnutzung, Boden, Hydrogeologie, ...) und ähnlichen hochwasserauslösenden Niederschlägen möglich. Vereinzelt lässt sich aus der Gebietscharakteristik ohne Modelleinsatz bewerten, unter welchen Voraussetzungen eine geänderte Bodenbearbeitung hochwasserhemmend wirkt. Dabei sind der Niederschlags-typ, die Infiltrationseigenschaften und die Eigenschaften des Untergrundes die wichtigsten Indikatoren. Die in den Einzugsgebieten beobachtete Bodenerosion ist beispielsweise ein deutliches Indiz für Oberflächenabfluss. Die Zuhilfenahme von Bodenerosionskarten ist

somit eine Möglichkeit im Vorfeld bereits primär geeignete Flächen für den Wasserrückhalt zu erkennen.

Ein Modell kann lediglich die wesentlichen Prozesse abstrahiert beschreiben. Für große Einzugsgebiete der Makroskala sind die Unsicherheiten dementsprechend schwierig abzuschätzen und Ergebnisse diesbezüglich kritisch zu hinterfragen. Selbst bei guter Datenbasis im kleinräumigen Maßstab und sehr genauer Kenntnis über die hydrologischen Verhältnisse, können diese meist aufgrund der Gebietsheterogenität nicht ohne Weiteres auf die Gesamtfläche des Einzugsgebiets bzw. anderer Einzugsgebiete übertragen werden.

Eine Optimierung der hydrologischen Modellierung kann durch eine verbesserte, höher aufgelöste Datenbasis geschaffen werden. Sowohl aktualisierte meteorologische Daten als auch hydrologische Daten und die effektive Datenhaltung und –verarbeitung (GIS) sorgen dafür, dass die Modelle den natürlichen Begebenheiten noch genauer angepasst werden können.

Zur Ansprache einzelner landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsflächen kommt den digitalen Schlagkarten oder Feldblockdaten in Zukunft eine bedeutende Rolle zu. Ihre Aufgabe ist es, die tatsächlichen Verhältnisse der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung möglichst aktuell wieder zu spiegeln. Sobald die bundesweite Erhebung abgeschlossen ist, ist dadurch eine flächendetaillierte Darstellung im hydrologischen Modell realisierbar.

Es besteht weiterhin die Möglichkeit, die Geländetopografie in den Modellen besser abzubilden. Die derzeitige Messtechnik ermöglicht, dass mittels Laserscanning Gelände Höhenpunkte im Abstand von 1 m erfasst werden, bei einer Höhengenauigkeit von +/- 0,15 bis 0,40 m. Diese DGM 2 Daten liegen jedoch nur für Teilgebiete vor. Eine flächendeckende Datenverarbeitung dieser hochaufgelösten Geländedaten für große Einzugsgebiete ist derzeit noch nicht möglich bzw. sehr zeitaufwendig. Mit Hilfe von neuen leistungsstarken Rechnersystemen würde sich die Qualität der Modelle, beispielsweise bzgl. der Zeitflächenfunktion, deutlich erhöhen.

Das Vorhandensein von Makroporen sowie deren Kontinuität weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. Anhand von Bodenkarten Informationen über die Verteilung von präferenziellen Fließwegen abzuleiten, ist nicht möglich und selbst die messtechnische Erfassung bereitet nach wie vor Schwierigkeiten. Im Modell ist die Berücksichtigung für größere Einzugsgebiete somit immer mit großen Unsicherheiten verbunden.

Neben der Verbesserung der Datenbasis wird in den Modellen selbst noch Entwicklungsbedarf gesehen. Viele hydrologische Modelle berücksichtigen zwar die Bodendaten, jedoch keine Informationen zu Geomorphologie und Gesteinsuntergrund. Gleiches gilt für die Berücksichtigung der Erosionsprozesse. In den meisten Modellen wird dies nicht direkt, sondern durch Hilfsgrößen erfasst. Zur Verbesserung der Qualität der Ergebnisse sollten Erosionsmodelle, N-A-Modelle, Wasserhaushaltsmodelle und HN-Modelle gekoppelt werden bzw. sich einen gegenseitigen Input geben.

9 Schrifttum und Unterlagen

- Ackermann, M., 2004: Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserschutz. Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover.
- Agrar-Beratung-Service (ABS), 2006: Konservierende Bodenbearbeitung - ein Beitrag zur natürlichen Bodenfruchtbarkeit; http://www.abs.at/kons_bodenbea.htm, v. 16.10.-2006.
- Assmann, A., und Gündra, H., 1999: Die Bedeutung integrierter Planungsverfahren für die Umsetzung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 43, S. 160-164.
- ATKIS, 2004: Amtlich topografisch-kartografisches Informationssystem (ATKIS) des hessischen Landesvermessungsamtes, digitale Daten, Stand 2004.
- ATV-DWK (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.), 2001: A 138, Fachausschuss ES-4 „Beurteilung und Behandlung des Regenwasserabflusses: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V. (GFA), Hennef.
- Auerswald, K. und Haider, J., 1996: "Runoff curve numbers for small grain under German cropping conditions." J. Environ. Mag. (Heft 47), S. 223-228.
- Auerswald, K. und Kainz, M., 2003: Vergleich der Erosionswirksamkeit des konventionellen und des organischen Landbaus. In: Freyer, B. (Hrsg.) (2003): Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau 2003 in Wien. Dr. Köster, Berlin, S. 197-200.
- Auerswald, K., 2004: Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen. 8-jährige Erfahrungen aus dem FAM-Experiment. Lehrstuhl für Grünlandlehre, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München. Ingolstadt, 18. Mai 2004.
- Baumgartner, A. und Liebscher, H.-J., 1996: Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. In: Lehrbuch der Hydrologie Band 1, 2. Auflage, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Beerbaum, S., 2003: Konzeption zur Vermeidung von Bodenerosion und weiterer Bodenverdichtung. In Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung – Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung. Gemeinsame Fachveranstaltung der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB e.V.), des Umweltbundesamtes /UBA) und der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Oktober, 2003, Braunschweig, S. 123-131.
- Betson, R.P., 1964: What is watershed runoff? - Journal of Geophysical Research, 69 (8), S. 1541-1552.
- Billen, N. und Lambert, B., 2006: Landwirtschaftliche Maßnahmen zum Hochwasserschutz. Beitrag zur Abschlusspräsentation in Schwaigern. AMEWAM-Projekt. <http://www.uni-hohenheim.de/amewam/deutsch/home1.htm>, v. 01.08.2006.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2002: 5-Punkte-Programm der Bundesregierung: Arbeitsschritte zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes; Stand: 15. September 2002.
- Bornebusch, M., 2006: Hydraulische und hydrologische Modellsimulationen als Planungswerkzeug für Hochwasserschutzmaßnahmen. 1. Alumni Erfahrungsaustausch des Alumnivereins alfa.net Sektion Bau; FH Absolventen berichten aus der Praxis; Fh Aachen.

- Brandt, M., Fricke, Th., Wildhagen, H., Spatz, G., 2002: Natürliche Grundlagen – Geologie, Böden. In: Godt, J., P. Röhrg, Th. V. Elsen, D. Bruns und J. Heß, 2002: Gesamtbericht zum Entwicklungs- und Erprobungsvorhaben des Bundesamtes für Naturschutz „Die Integration von Naturschutzziehen in den ökologischen Landbau am Beispiel der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen – Voruntersuchung“, Selbstverlag, Kassel und Witzenhausen.
- Brandt, M., Heß, J., Finckh, M., Jörgensen, R., Kölsch, E., Saucke, H., Schenck z. Schweinsberg-Mickan, M., Schüler, C.n und Otto, M., 2003: Systeme reduzierter Bodenbearbeitung im Ökologischen Landbau. Bericht, Fachgebiet Bodenkunde und Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau, Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften.
- Brandt, M., Wildhagen, H., 2004: Bodenprofile der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen. Standortsituation Exkursionspunkte, Universität Kassel, Fachbereich 11, Fachgebiet Bodenkunde, Kassel.
- Brechtel, H-M., 1984: Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Mülldeponien. Müllhandbuch, Hrsg: Hösel/Schenkel/Schnurer, Nr.4623, Ergänzungslieferung 5/84.
- Bronstert, A., 2005: Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 13.05. Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA – Hennef, 2005.
- Brunotte, J., Duttmann, R., 2001: Verfahrenstechnische Strategien zur Minderung von Oberflächenabfluss und Bodenerosion. Heft 381, S. 67-81.
- Buchner, W., 2003: Bodengefüge im Rahmen der Fruchtfolge stabilisieren. In Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung – Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung. Gemeinsame Fachveranstaltung der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB e.V.), des Umweltbundesamtes (UBA) und der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Oktober, 2003, Braunschweig, S. 36-45.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2001: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bonn.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2004: Direktzahlungen-Verpflichtungengesetz (DirektZahlVerpfLG). Bonn.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2007: http://www.bmelv.de/DE/04-Landwirtschaft/OekologischerLandbau/EG-Oeko_Verordnung_Folgerecht.html, v. 14.01.2007.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2004: Erosionsgefährdete Flächen in Deutschland. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?-nodeId=2899>, v. 11.10.2004.
- Carter, M.R., Angers, D.A. & Topp, G.C., 1999: "Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate.", Soil Sci. (Heft 164), S. 101-110.
- Deutscher Bundestag, 2004: Antworten geladener Sachverständiger sowie Institute und Verbände auf den Fragenkatalog der Fraktionen zu der öffentlichen Anhörung am 21. Juni 2004 zu dem Gesetzentwurf zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes, Drucksache 15/3168. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- DIN 1185, 1973: Regelung des Bodenwasser-Haushaltes durch Rohrdränung, Rohrlose Dränung und Unterbodenmelioration. Blatt 1, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.

- DIN 4044, 1980: Hydromechanik im Wasserbau, Begriffe. – Berlin.
- DIN 4048 T1, 1987: Wasserbau. Begriffe. Stauanlagen. – Berlin.
- DIN 4049, 1979: Teil 1 Hydrologie, Begriffe, quantitativ. – Berlin.
- DIN 4049, 1994: Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. – Berlin.
- DIN 19559, 1983: Teil 2: Durchflussmessung von Abwasser in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen, Venturi-Kanäle, Beuth-Verlag.
- DIN 19700-12, 2004: „Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken“; Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Disse, M., 2004: Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Universität der Bundeswehr München. Vorlesungsskript 2004.
- Doleschel, P. Heißenhuber, A., 1991: Externe Kosten der Bodenerosion. Bayrisches Landwirtschaftliches Jahrbuch, 68. Jahrgang, H. 2/91; Kastner Verlag; Wolnzach S. 187-209.
- DWD, 1997: Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Kostra-Atlas). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- DWD, 2000: Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Kostra-Atlas). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- DWD, 2005: KOSTRA-DWD-2000. Starkniederschlagshöhen für Deutschland; Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000) – Grundlagenbericht. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2005a: Amtliches Gutachten über die flugklimatologischen Verhältnisse am zukünftigen Verkehrsflughafen Kassel-Calden. Offenbach.
- DVWK, 1982: Bodenkundliche Grunduntersuchung im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil II, Ermittlung von Standortkennwerten mit Hilfe der Grundansprache der Böden, DVWK-Regel 116, Bonn.
- DVWK, 1984: Anleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 113.
- DVWK (Hrsg.) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 238. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser.
- DVWK, 1999: Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss – Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze; Materialien 7/1999 .
- Edwards, W.M., Norton, L.D. & Redmont, C.E., 1988: “Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil.”, Soil Sci. Soc. Am. J. (Heft 52), S. 483-487.
- Eggelsmann, R., 1981: Dränanleitung. Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- Emmerich, K.-H., 2005: Klimafolgen und Bodenschutz – Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Boden-Erosion und Kohlenstoffgehalt im Boden. Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen. Dezernat I 1, INKLIM 2012, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Ernstberger, 2005: Nachhaltiger, vorbeugender Hochwasserschutz durch schonende Flächenbewirtschaftung und die Wiederherstellung von Bach- und Flussauen. Büro für Umweltbewertung und Geoökologie, Gießen. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Projekt 08.03.
- Fabis, J., 1995: Retentionsleistung von Uferrandstreifen im Mittelgebirgsraum. Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie, Band 2. Gießen: Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung.

- Fenner, S., 1997: Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160, S. 157-164.
- Friedrich, G., und Franken, H., 2003: Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz – Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL.
- Frielinghaus, M., Petelkau, H., und Seidel, K., 2001: Die Grundzüge des Schadverdichtungs-Gefährdungs-Konzeptes (SVGK) und ein Anwendungsbeispiel. Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn. Dezember 2001.
- GKB (Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V.), 2006: <http://www.gkb-ev.de>, v. 16.11.2006.
- Gödeke, S. 2007: Berechnung von Grundwasserneubildung und Verdunstung auf Basis eines digitalen Geländemodells. TU Bergakademie Freiberg - Department for Geology, unveröffentlicht. <http://www.geo.tu-freiberg.de/~merkel/Goedike.PDF> v. 31.10. 2007.
- Godt, J., Elsen, Th. v., Röhrlig, P., Bruns, D. und Heß, J., 2002: E+E-Vorhaben „Die Integration von Naturschutzz Zielen in den Ökologischen Landbau – am Beispiel der Hessischen Staatsdomäne Frankenhäusen – Voruntersuchung“. Gesamtbericht FB 11 Ökologische Agrarwissenschaften und FB 13 Stadtplanung Landschaftsplanung, Universität Kassel. Selbstverlag, Kassel und Witzenhausen.
- Gottardi, S, Fricke, T. und Wachendorf, M., 2003: Quantitative Untersuchung des Einflusses verschiedener Standortfaktoren auf das Vorkommen von Weißklee in einem ökologisch bewirtschafteten Grünlandbestand. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau in der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., 2003: 47. Jahrestagung vom 28. bis 30. August 2003 in Braunschweig. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Von-Sieboldstraße 8, 37075 Göttingen. Band 5, S. 71 – 74.
- Govers, G., 1991: A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation. Catena 18: S. 91-111.
- Graßl, H., 1997: Brisante Mischung – Böden und globaler Wandel. In: Kümmerer, K./ Schneider, M./ Held, M. (Hrsg.): Bodenlos – Zum nachhaltigen Umgang mit Böden. Politische Ökologie 15, Sonderheft 10. München: ökom, S. 12-16.
- Hartge, K.H. und Horn, R., 1999: Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.
- Heisler, C., Rogastik, H., Brunotte, J. und Joschko, M., 1998: "Konservierende Bodenbearbeitung und biologische Aktivität.", Landbauforschung Völkenrode (Heft 4), S. 199-212.
- Hentschel, A., 2004: Fließgewässerentwicklung und Landwirtschaft – Möglichkeiten der Konfliktlösung. Band 139 der Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, S.52-56.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hlug), 2002: Digitale Bodenflächendaten von Hessen. Stand: 01.06.2002, Wiesbaden.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hlug), 2005: Umweltatlas Hessen, Bodenkundliche Übersichtskarte, Wiesbaden.

- Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten (HMULV), 2007: Hessisches Kulturlandschaftsprogramm (HEKUL). Wiesbaden.
- Hessische/Niedersächsische Allgemeine (HNA), 2007: Wenn der Himmel wütet. Walkmühlenweg 2, Schwalmstadt. 14.06.2007.
- Horn, R., 2001: Die Verformung von Böden – Ursachen und Folgen für eine nachhaltige Landnutzung. Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn. Dezember 2001.
- Hoyningen-Huene, J. v., 1983: Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin (DVWK-Schrift Nr. 57).
- Hydrotec GmbH, 2003: Datensätze N-A-Modell Diemel, Aachen.
- Hydrotec GmbH, 2004: Niederschlag-Abfluss-Modell; NASIM, Version 3.3.1, Aachen.
- Itter, A. v., 2000: Beziehungen zwischen dem Bodenwasserhaushalt und der Stickstoffdynamik von landwirtschaftlich genutzten Pseudogleyen. Dissertation, Fakultät XVII Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum, Dezember 2000.
- Joschko, M., Brunotte, J. Rogasik, H., Frielinghaus, M., 1995: Mulchsaat, Regenwürmer und Bodengefüge. In: KTBL: Einführung von Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis. S. 163-173.
- Jürging, P., 2004: Historie und Perspektiven der Fließgewässerentwicklung aus naturschutzfachlicher Sicht. Band 139 der Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, S.19-33.
- Kölbl, A., 2006: Vorlesung zur Bodenhydrologie. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Entwicklung, Landnutzung und Umwelt. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenkunde.
- Krause, S. und Bronstert, A., 2003: Gekoppelte Modellierung von Abflussbildung und Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktionen in einem Flachlandeinzugsgebiet an der Unteren Havel.- In: 6. Workshop zur hydrologischen Modellierung. University Press Kassel.
- Kreitmayer, J., 2004: Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen aus der Sicht der Landwirtschaft. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. http://www.lfl-bayern.de/iab/kulturlandschaft/08086/linkurl_0_3_0_2-.pdf, v. 05.05. 2004.
- Landesanstalt für Pflanzenbau (LAP), 2002: Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung. Nr. 3 (2. Auflage) Bodenkultur. Verringerung von Oberflächenabfluss und Bodenerosion. Rheinstetten, Juli 2002.
- Landesanstalt für Pflanzenbau (LAP), 2002 a: Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung. Nr. 25 Ackerbau, Bodenschutz, Grünland. Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. Rheinstetten, Dezember 2002.
- Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG), 2004: Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Bodenverdichtung. Güstrow.
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), 2005: Landwirtschaft in Hessen, PDF-Datei; http://www.llh-hessen.de/presse/pdf/Landwirtschaft%20in%20Hessen_8_EU-%20Agrarreform05.pdf, v. 19.9.2005.
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), 2007: Pilotprojekt Umstellung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zur Verminderung des erosiven Nährstoffeintrages in den Antrift-Stausee. Kassel.

- Landwirtschaftlich, Gärtnerische Fakultät Berlin, 2006: Grundsätze der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung, 2006: <http://www.agrar.hu-berlin.de/>, v. 10.08.2006.
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2007: Bodenbearbeitungsverfahren. <http://www.lk-wl.de/fachangebot/ackerbau/boden/bodenbearbeitungsverfahren.htm>. 01.01.2007.
- LAWA - Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1995: Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Eigenverlag Stuttgart.
- Lütke Entrup, N., Schneider, M., 2003: Fruchfolgegestaltung und konservierende Bodenbearbeitung – Lösungsansätze für den zukunftsorientierten Getreideanbau. Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest.
- Maniak, U., 1997: Hydrologie und Wasserwirtschaft: eine Einführung für Ingenieure. Springer Verlag, Berlin.
- Meon, G., Maniak, U. und Bittner, R., 2006: Umweltverträglicher Hochwasserschutz für die Einzugsgebiete von Fulda und Diemel. Teil 3, Hydrologie. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig. Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), Wiesbaden.
- Michel, J., 2004: Erosionsanfälligkeit ökologisch bewirtschafteter Ackerflächen im sächsischen Lößhügelland. Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig, Inst. für Geographie und der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Pflanzliche Erzeugung (unveröffentlicht).
- Monsanto, 2006: Konservierende Bodenbearbeitung. Monsanto Agrar Deutschland GmbH, Düsseldorf. http://www.dekalb.de/mais/mais_boden.html, v. 20.11.2006.
- Müller, S., 2006: 1-D-Wasserspiegellagenberechnung am Jungfernbach im Bereich der Staatsdomäne Frankenhausen. Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel.
- Niedersächsisches Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und Senator für Wirtschaft und Häfen der Freien Hansestadt Bremen (2006): Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen für das Niedersächsische/Bremer Agrar-Umweltprogramm (NAU/BAU) vom 31.10.2006, Hannover.
- Niehoff, D., 2001: Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Potsdam-Institut für Klimaforschung e. V. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Potsdam.
- Patt, H., 2001: Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Poesen, J., 1984: The influence of slope angle and Hortonian overland flow volume. Z. Geomorph. 49: S. 117-131.
- Prasuhn, V., 1991: Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. Physiogeographica: Basler Beiträge zur Physiogeographie. Basel: Geographisches Institut.
- Richter, M., 2006: Hochwasserschutz durch Biobauern. http://www.greenpeace.de/themen/landwirtschaft/nachrichten/artikel/hochwasserschutz_durch_bio_bauern/, v. 31.3.2006, Berlin.
- Riedel, G., 2001: Modellbeschreibung des N-A-Modells NAXOS, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig.
- Robinson, M., Rider, E. L., Ward, R. C., 1985: Influence on streamflow of field drainage in a small agricultural catchment. Agricultural Water Management. Amsterdam; New York, Elsevier Scientific Publishing Co., 10, S. 145-158.

- Rogasik, H., 2004: Humus und Bodenphysik. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg.
- Rogasik, H., Onasch, I., Tomanova, O. und Koch, H.-J., 2005: Bodenphysikalische Eigenarten bei langjähriger konservierender Bodenbearbeitung und ihr Einfluss auf Zukerrübenwachstum und –ertrag. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 17, S.46-47, September 2005, Stuttgart.
- Rosner, J., 2005: Moderne Bodenbearbeitungsmethoden und Erosionsschutz. Amt der NÖ Landesregierung Abt. Landwirtschaftliche Bildung, Tulln.
- Röttcher, K., Theobald, S., 2007: Umweltverträglicher Hochwasserschutz für die Einzugsgebiete von Fulda und Diemel – Handbuch; Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel. Herausgeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), Wiesbaden.
- Röttcher, K., Theobald, S., 2007a: Umweltverträglicher Hochwasserschutz für die Einzugsgebiete von Fulda und Diemel – Rahmenplanung; Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel. Herausgeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), Wiesbaden.
- RP-Kassel, 2004: Richtwerte zur Ermittlung von Aufwuchsschäden an landwirtschaftlichen Kulturen, Schätztabellen. Regierungspräsidium Kassel.
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL), 2005: Umweltgerechte Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Anleitung zur Nutzung des Förderprogramms. April 2005, Dresden.
- Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2006: Infodienst 03/06 für Beratung und Schule der Sächsischen Agrarverwaltung. Dresden.
- Schack-Kirchner, H., 2005: Skript zur Vorlesung Bodenerosion. Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, Universität Freiburg.
- Schätzl, R., Hoffmann, H., 2003: Ermittlung wirtschaftlicher Nachteile für die Landwirtschaft durch Schaffung von Retentionsraum; Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, H.2 S. 52-58.
- Scheffer/Schachtschabel, 2002: Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg-Berlin.
- Schlösser, B., 2007: Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Projektarbeit 3, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel.
- Schmidt, J., Michael, M. & Schmidt, W.A., 1996: "Parameterkatalog Sachsen. Anwendung. Erosion 2D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser II, S. 63-157".
- Schmidt, W., Stahl, H., Nitzsche, O., Zimmerling, B., Krück, S., Zimmermann, M. und Richter, W. 2001: Konservierende Bodenbearbeitung – die zentrale Maßnahme eines vorsorgenden und nachhaltigen Bodenschutzes. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 96,791-792, 2001.
- Schmidt, W., Zimmerling, B., Nitzsche, O., Zacharias, S., 2006: Möglichkeiten der Hochwasserminderung in der Landwirtschaft. Dezentraler Hochwasserschutz. Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. Hydrologische Wissenschaften, Fachgemeinschaft der DWA, S. 33-44.
- Schöniger, M., 1990: Beitrag zur Abflussbildung und Grundwasserneubildung im paläozoischen Festgestein (Lange Bramke, Oberharz).- Landschaftsökologie und Umweltforschung, H. 18, Braunschweig.
- Schroeder, D., 1992: Bodenkunde in Stichworten. 5. erw. Auflage.

- Schwertmann U., Vogl W., Kainz M., 1987: Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrages und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Auflage Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Sieker, F., 2002: Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße - Endbericht. Universität Hannover.
- Statistisches Bundesamt, 2006: Datenreport 2006, PDF-Datei; <http://www.destatis.de/-shop>, v. 27.12.2006.
- Stahl, H., Schmidt, W. und U. Gierke, 2001: Beratung zur guten fachlichen Praxis zum Schutz des Bodengefüges – Ansätze, Strategien, offene Fragen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung, Teil 2 Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen – Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Dezember 2001.
- Tebrügge, F., 2000: Visionen für die Direktsaat und ihr Beitrag zum Boden-, Wasser- und Klimaschutz. Institut für Landtechnik, Justus-Liebig Universität, Gießen.
- Terrestris, 2006: Simulation der Bodenerosion anhand von Computermodellen. http://www.terrestris.de/hp/de/con_modellierung.php, v. 26.09.2006.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 2004: Böden. www.tlug-jena.de/-contentfrs/fach_04/wanderausst_boden/wa191104.pdf, v. 12.08.2004.
- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, 2007: Programm zur Förderung von umweltgerechter Landwirtschaft, Erhaltung der Kulturlandschaft, Naturschutz und Landschaftspflege in Thüringen, KULAP 2007, Erfurt.
- Trac Technik LBVG mbH, 2005: http://www.tractechnik.de/new/frame_start.htm, v. 18.04.2005.
- Trojan, M.D. & Linden, D.R., 1998: "Macroporosity and hydraulic properties of earthwormaffected soils as influenced by tillage and residue management.", Soil Sci. Soc. Am. J. (Heft 62), S. 1687-1692.
- Umweltbundesamt (UBA), 2000: Corine Land Cover 2000 – Bodenbedeckungsdaten für Deutschland. Leitung durch das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Dessau.
- Umweltbundesamt (UBA), 2001: Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Potsdam. <http://www.umweltbundesamt.de/wasser/veroeffentlich/download/29724508/2grundlagen.pdf>, v. 16.10.2007.
- Umweltbundesamt (UBA), 2002: "Abflussbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen.", Wasser & Boden (Heft 49), S. 13-22.
- Umweltbundesamt (UBA), 2003: Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung - Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung. Gemeinsame Fachveranstaltung der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB e.V.), des Umweltbundesamtes (UBA) und der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig 27. - 28. Oktober 2003.
- Unger, H.-J., 2004: Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft <http://www.lfl-bayern.de/iab/kulturlandschaft/08086/index.php>, v. 12.06.2004.
- Volkart, P., Kaufmann, P., 2001: Durchflussmessungen auf Abwasserreinigungsanlagen: Dokumentation – Kontrolle, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Amt für Umwelt des Kantons Solothurn.
- Wasserverband Schwalm, 1984: Vereinbarung zwischen den Kreisbauernverbänden Ziegenhain und Alsfeld und dem Wasserverband Schwalm. Homberg, 1984.

- WBGU, 1993: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen (Hrsg.): Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Jahresgutachten 1993. Bonn: Economica.
- Westfälisch-Lippischer Landwirtschaftsverband e.V. (WLV), 2006: <http://www.bauernhof-net/lexikon/pfl.htm>, v. 10.06.2006.
- Wetjen, F. A., 1982: Kombinierte Drainung auf einem Auen-Gley. Dissertation. Göttingen, 1982.
- Wichtmann, W., 1994: Stoffeintrag aus landwirtschaftlichen Dränflächen in Fließgewässer (Messung und Simulation). Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie der Christian-Albrechts-Universität Kiel. Verlag Shaker, Aachen.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A. und Sokollek, V., 1992: Landschaftswasserhaushalt. Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- World Habitat Society GmbH, 2006: Bodenerosion in der Bundesrepublik ist nicht zu unterschätzen. <http://openpr.de/news/56445/Bodenerosion-in-der-Bundesrepublik-ist-nicht-zu-unterschaetzen.html>, v. 22.11.2006.
- Zucker, L. A., Brown, L. C., 1998: Aggricultal drainage: Water quality impacts and subsurface drainage studies in the Midwest. Ohio State University Extension Bulletin. S. 1-40.
- Zuidema, P.K., 1985: Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen.- Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 79, ETH Zürich.

Publikationen des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft

Reihe: Kasseler Wasserbau - Mitteilungen

- Heft 1/1993 Wasserkraftnutzung mit Niederdruck-Anlagen
Tönsmann, F.
- Heft 2/1995 Hochwasserschutz
Tönsmann, F. *vergriffen*
- Heft 3/1995 Antike und mittelalterliche Wasserversorgung in Mitteleuropa
Hoffmann, A.
- Heft 4/1995 Zur Geschichte der Wasserstraßen insbesondere in Nordhessen
Tönsmann, F. *vergriffen*
- Heft 5/2005 Hessische Lebensbilder zur Kulturgeschichte des Wassers - Ein biografisches Handbuch 1350 - 1950
Hoffmann, A.
- Heft 6/1996 Sanierung und Renaturierung von Fließgewässern - Grundlagen und Praxis
Tönsmann, F.
- Heft 7/1996 Geschichte der Wasserkraftnutzung
Tönsmann, F. *vergriffen*
- Heft 8/1999 Entwicklung eines tiefengemittelten morphodynamischen Fließgewässermodells – ein Beitrag zur zweidimensionalen numerischen Simulation bettildender Prozesse
Marburger, M.
- Heft 9/2000 River Flood Defence
Tönsmann, F. und M. Koch
- Heft 10/2000 Modell zur Regulierung des Sauerstoffhaushaltes in Fließgewässern durch Wasserkraftanlagen
Rösch, T.
- Heft 11/2001 Hochwasserschutz für kleine Einzugsgebiete im Mittelgebirge am Beispiel der Bauna
Röttcher, K.
- Heft 12/2001 Wasserwirtschaft im Wandel - Festschrift zum 60. Geburtstag von Frank Tönsmann
Hoffmann, A.

- | | |
|--------------|--|
| Heft 13/2002 | Bestimmung effektiver hydraulischer Parameter in heterogenen porösen Medien
Flörke, M. |
| Heft 14/2004 | Integrierte Wasserbewirtschaftung
Tönsmann, F. und Kasimierz Banasik |
| Heft 15/2004 | Wasser für Kassel – zur Geschichte der Wasserversorgung der Stadt und ihrer Region
Hoffmann, A. und Achim Richter |
| Heft 16/2004 | Bestimmung der Retentionspotenziale naturnaher Maßnahmen in Gewässer und Aue mit hydraulischen Methoden
Bauer, C. |
| Heft 17/2009 | Beitrag unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft zur Reduzierung des Hochwasserabflusses
Weiβ, A. |

Reihe: Forschungsberichte und Materialien (ab 2005 nicht mehr fortgeführt)

Band 1/1993	Hochwasserschutz im Lossetal - Vergleichende Umweltverträglichkeitsuntersuchung Tönsmann, F.	vergriffen
Band 2/1994	Sauerstoffeintrag in Wasserkraftanlagen am Beispiel der Twistesee-Anlage Scheffler, M.	vergriffen
Band 3/1995	Studie zum Hochwasserschutz an der Bauna Tönsmann, F.	vergriffen
Band 4/1995	Der Kanal des Landgrafen Karl in topographischen Karten Röttcher, K.	vergriffen
Band 5/1996	Rahmenplan eines gebietsbezogenen Renaturierungskonzeptes für die Losse Schmidt, Th. und F. Tönsmann	vergriffen
Band 6/1997	Sauerstoffanreicherung in Wasserkraftanlagen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten – Verfahrensweise und Empfehlungen (inkl. Diskette mit Meßdaten) Rösch, Th. und F. Tönsmann	
Band 7/2000	Der Kanal des Landgrafen Karl Röttcher, K., J. Tonner und F. Tönsmann	vergriffen
Band 8/1999	Umsetzung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen am Beispiel der Bauna (incl. CD mit Klimadaten) Röttcher, K. und F. Tönsmann	vergriffen
Band 9/1999	Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn Projektbeschreibung Lang, T., F. Tönsmann	
Band 10/2000	Umweltgerechte Reaktivierung der Wasserkraftkaskade an der Mahlgera Sauerwein, B. und F. Tönsmann	vergriffen
Band 11/2000	Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn F. Tönsmann	
Band 12/2000	Internationales Symposium Hochwasserschutz, Beiträge des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Gh Kassel Tönsmann, F. und M. Koch	vergriffen

- Band 13/2000 International Symposium on Flood Defence
Tönsmann, F. and M. Koch
- Band 14/2001 Schwebstoffmessungen zur Prognose morphologischer Änderungen in einem Mittelgebirgsfließgewässer
Sobirey, A.
- Band 15/2002 Wasser zum Waschen und Baden, die sanitäre Bedeutung des Wassers im Wandel der Zeit Tagungsband zum 9. Kasseler Technikgeschichtlichen Kolloquium im Juli 2001
Hoffmann, A.
- Band 17/2002 Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn, Handbuch *)
Lang, T. und F. Tönsmann
- Band 18/2003 Gezähmte Flüsse – besiegte Natur, Gewässerkultur in Geschichte und Gegenwart, Tagungsband zum 10. Kasseler Technikgeschichtlichen Kolloquium im Juli 2002
Hoffmann, A.

Bestellungen an: Kassel University Press
Diagonale 10
34127 Kassel
Tel.: (0561)804-2159
Fax: (0561)804-3429
e-mail: geschaeftsfuehrung@upress.uni-kassel.de

*) Der Band 17 wird nicht im Buchhandel vertrieben. Kostenlose Exemplare können beim Regierungspräsidium Gießen, Dezernat II 31.3, Landgraf-Philipp-Platz 3-7, 35390 Gießen, angefordert werden.