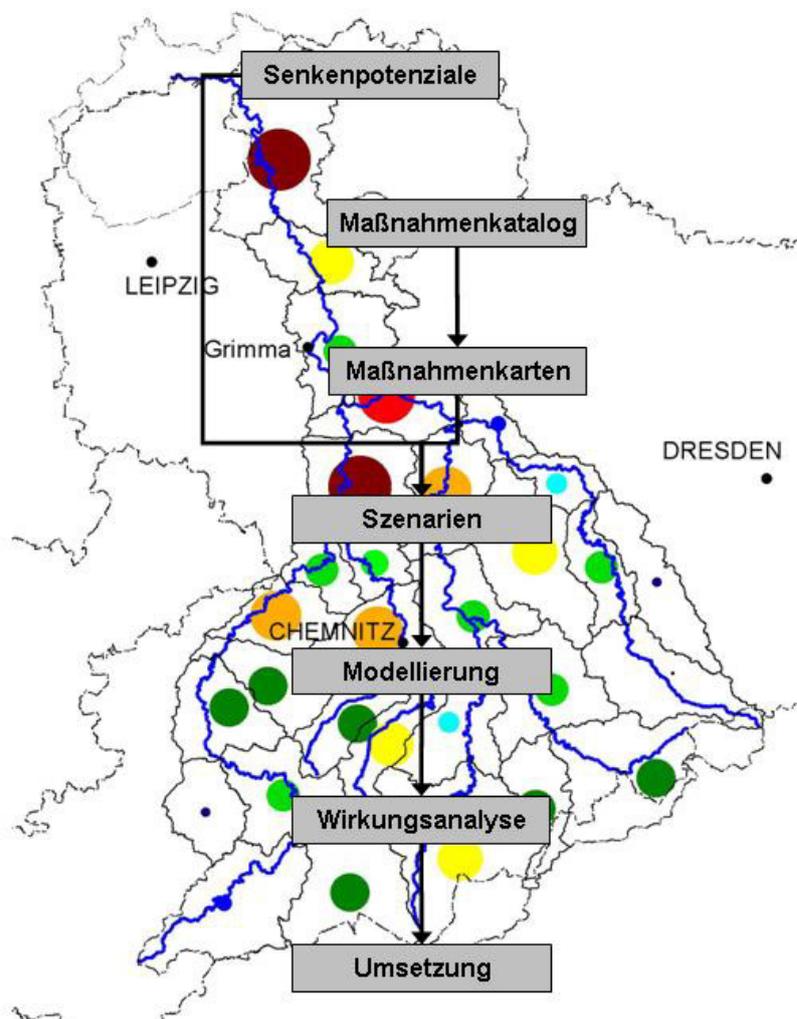


VORBEUGENDER, FLÄCHENHAFTER HOCHWASSERSCHUTZ AUF URBANEN UND ACKERBAULICH GENUTZTEN FLÄCHEN

Ein Konzept zur einzugsgebietsweiten Implementierung von
Bewirtschaftungsmaßnahmen



VORBEUGENDER, FLÄCHENHAFTER
HOCHWASSERSCHUTZ
AUF URBANEN UND ACKERBAULICH GENUTZTEN
FLÄCHEN

**Ein Konzept zur einzugsgebietsweiten Implementierung von
Bewirtschaftungsmaßnahmen**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Dr. Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl. Ing. Detlef Wilcke

geboren am 18. Februar 1970
in Osnabrück

2008

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Iwan
Referent: Prof. Dr.-Ing. Friedhelm Sieker
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel

Tag der Promotion: 18. April 2008

Vorwort, Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen von zwei von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekten mit den Titeln "Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße" (im Folgenden kurz DBU-Projekt-Neiße genannt) und „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen“ (im Folgenden kurz DBU-Projekt-Mulde genannt) [SIEKER et al. 2002b; SIEKER et al. 2007a].

Ich möchte an dieser Stelle meinen von Herzen kommenden Dank zum Ausdruck bringen:

- An Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Sieker für das mir entgegengebrachte Vertrauen, seine Ideen, Nachfragen, Kurskorrekturen und das Drängen auf Antworten und Ergebnisse.
- An den Vorsitzenden der Promotionskommission, Herrn Prof. Dr. Ing Gerhard Iwan und an den Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel, für die Übernahme dieser Aufgaben.
- An Herrn Dr. Olaf Nitzsche, Herrn Dr. Walter-Alexander Schmidt und Herrn Dr. Steffen Zacharias für die zahlreichen Diskussionen, die Informationen zur Landwirtschaft und zur Bodenkunde sowie die freundschaftliche Zusammenarbeit.
- An die Kollegen der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH insbesondere an Herrn Dr. Zhengyue Jin, für die erfolgreiche, gemeinsame Weiterentwicklung des Modells STORM sowie die Anwendung seines Modells FLEXT.
- An Angelika Ezzeldin
- und nicht zuletzt an meine Familie.

Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der vorbeugende, flächenhafte Hochwasserschutz. Er umfasst einen Teilbereich der Maßnahmen, die als dezentraler Hochwasserschutz bezeichnet werden. Gemeinsames Merkmal der hier betrachteten Maßnahmen ist, mehr Niederschlagswasser in den Boden zu infiltrieren als dies unter der momentanen Bewirtschaftung der Fall ist. Die Maßnahmen nehmen somit Einfluss auf den Prozess der Abflussbildung abseits des Gewässersystems.

These dieser Arbeit ist, dass während Hochwasser erzeugender Niederschlagsperioden Teile des Porenvolumens im Boden insbesondere aufgrund der momentanen Nutzung ungenutzt bleiben. Das Erschließen dieser Bodenspeicher führt zur Verringerung des Volumens der Hochwasserwelle und hat damit positive Auswirkungen auf den Hochwasserschutz.

Die Wirkung des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes ist schwierig zu quantifizieren, da sie von einer Reihe zeitlicher - und räumlicher Variablen abhängt. Dies mag ein Grund dafür sein, dass in der Vergangenheit diese Strategie des Hochwasserschutzes nicht in die Planungen einbezogen wurde.

Ziel dieser Arbeit war, ein Konzept zu entwickeln, das es erlaubt, die Potenziale und die zu erwartenden Wirkungen der Maßnahmen zu bestimmen, die den besagten Bodenspeicher während eines Hochwasserereignisses nutzen. Die verwendeten Ansätze wurden beispielhaft auf das Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen (ca. 6.200 km²) angewendet. In der Summe kann die hier vorgestellte schrittweise Methodik als Konzept aufgefasst werden, das wichtige Grundlagen für die einzugsgebietsweite Einführung des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes liefert und zudem vergleichsweise einfach auf andere Einzugsgebiete übertragen werden kann.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf den Grundgedanken des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes eingegangen und die Thesen dieser Arbeit formuliert. Darüber hinaus wird dargelegt, welche hydrologischen Prozesse die Hochwasserentstehung beeinflussen und welche Gründe für die Wahl der Meso- bis unteren Makroskala als Betrachtungsmaßstab sprechen. Der einleitende Teil der Arbeit endet mit der Beschreibung des Einzugsgebietes der Mulde und einer Vorstellung der verwendeten Datengrundlage.

Der erste Schritt des Konzeptes bestand darin, das Wasserrückhaltepotenzial der einzelnen Standorte des Einzugsgebietes nachzuweisen und zu quantifizieren. Hierzu wurden zwei Verfahren zur Standortbewertung miteinander verknüpft. Mit Hilfe des Wissensbasierten Systems FLAB wurden die Flächen entsprechend ihrem dominanten Abflussprozess klassifiziert. Diese qualitative Bewertung wurde um die Bestimmung des potenziellen Infiltrationsvermögens bei verschiedenen Niederschlägen und Bodenfeuchtebedingungen ergänzt. Das Ergebnis dieser Analyse war eine abgestufte Einteilung des Einzugsgebietes in geeignete und für den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz ungeeignete Standorte.

Parallel zur Potenzialanalyse des Wasserrückhaltepotenzials wurde in einem zweiten Schritt der Frage nachgegangen, wo sich die Umsetzungspotenziale für die Maßnahmen befinden, die die zuvor quantifizierten Bodenspeicher erschließen sollen. Hierzu wurde das Expertensystem FLEXT genutzt, das in der Lage ist, alle Flächen des Einzugsgebietes auf ihre Eignung zu überprüfen. Die Eignungsbedingungen wurden in Form von Entscheidungsmatrizen getrennt für landwirtschaftliche und urbane Flächen definiert.

Um die Wirkung eines zukünftigen vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes ermitteln zu können, wurden, basierend auf den durchgeführten Analysen, realitätsnahe Szenarien erstellt.

Der vierte Konzeptschritt stellt ein weiteres Kernstück dieser Arbeit dar. Basierend auf vorangegangenen Untersuchungen wurde das Modell STORM erweitert, parametrisiert und kalibriert. Das Ziel war, die Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes hydrologisch abbilden zu können. Mit dem aufgestellten Modell wurden die Szenarien berechnet und einem Referenzzustand gegenübergestellt.

Folgende Ergebnisse ergeben sich aus der skizzierten Methodik:

Das entwickelte Konzept hat sich als effektive und übertragbare Möglichkeit erwiesen, die Retentionsfunktion von Einzugsgebieten zu erfassen und Grundlagen zu generieren, die die Implementierung von Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes in bestehende Hochwasserschutzkonzepte erleichtert.

Die gewählten Modellansätze sowie die dazugehörigen Parametersätze sind geeignet, die unterschiedlichen Infiltrationsprozesse bei der konventionellen und der konservierenden Bodenbearbeitung abzubilden. Darüber hinaus zeigen die Berechnungsergebnisse, dass Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten eine positive Nebenwirkung auf die Rückhaltung Hochwasser verursachender Niederschläge haben können.

Das theoretische Wasserrückhaltepotenzial ist im Einzugsgebiet der Mulde örtlich höchst ungleichmäßig verteilt. Eine grobe Auswertung der Wasserrückhaltepotenzialkarte bestätigt, dass im Erzgebirgsraum aufgrund der geringen Bodenmächtigkeit und großen Niederschlagsintensitäten das relative Rückhaltepotenzial klein ist und somit generell von Hochwasserentstehungsgebiet gesprochen werden kann. Dagegen konzentrieren sich die hohen Anteile des Rückhaltepotenzials auf das vorgelagerte Lößhügelland und das Tiefland. In diesem Bereich des Mulde-Einzugsgebietes befinden sich analog zum Begriff der Hochwasserentstehungsgebiete die potentiellen Hochwasserminderungsgebiete. Über diese grobe Einschätzung der Speicherpotenziale hinaus muss betont werden, dass die räumliche Auflösung der Wasserrückhaltepotenzialkarte es ermöglicht, auch kleine Flächen mit Rückhaltepotenzial in vermeintlichen Hochwasserentstehungsgebieten zu identifizieren, welche von besonders hohem Wert für den Hochwasserschutz sind.

Die konservierende Bodenbearbeitung auf Ackerflächen und die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung (Mulden-Rigolen-Elemente) in Siedlungsgebieten sind in der Lage, Teile des Wasserrückhaltepotenzials in der Fläche im Vergleich zum Ist-Zustand zusätzlich zu aktivieren. So ergibt sich unter der Annahme, dass künftig 15 % der angeschlossenen Siedlungsflächen im Einzugsgebiet der Mulde dezentral bewirtschaftet werden, in Bezug auf die Hochwasser verursachenden Niederschlagsereignisse in den Jahren 1995 und 2002, ein zusätzlich nutzbares Rückhaltepotenzial von rd. 5,6 Mio. bzw. 4,7 Mio. m³. Die Umstellung von 20 % derzeit noch konventionell bearbeiteten Ackerflächen auf pfluglose Bearbeitung ergibt bei diesen Ereignissen ein zusätzlich aktiviertes Rückhaltevolumen von 5,2 bzw. 7,6 Mio. m³. Ein Vergleich dieser erzielbaren Volumina mit dem Gesamtvolumen der im Mulde-Einzugsgebiet vorhandenen Talsperrenvolumina zeigt, dass es sich um eine wasserwirtschaftlich durchaus relevante Größenordnung handelt.

Es wäre unklug, auf dieses Speicherpotenzial unter Acker- und Siedlungsflächen in Zukunft zu verzichten, insbesondere, wenn man bedenkt, dass die konservierende Bodenbearbeitung und die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung nicht nur der Minderung der Hochwasserabflüsse dienen, sondern auch andere Veranlassungen haben. So ist bis heute der Hochwasserschutz ein Nebeneffekt dieser Maßnahmen. Ein Umstand, der zwangsläufig positive Auswirkungen auf die Akzeptanz und die Finanzierung hat.

Die Wirkung auf die Spitzenabflüsse von extremen, überregionalen Hochwasserereignissen ist begrenzt. Das bedeutet, dass für einen ausreichenden Hochwasserschutz weiterhin auch konventionelle Hochwasserschutzmaßnahmen zur Anwendung kommen müssen. Allerdings sind die Speichervolumina, die durch Maßnahmen in der Fläche im Boden aktiviert werden können, so groß, dass sie erheblich dazu beitragen können, die Be- bzw. Überlastung von Hochwasserschutzbauwerken zu vermeiden oder zu vermindern.

Die Auswertung der Ergebnisse macht deutlich, dass die Bereitstellung von ausreichendem (möglichst vielem) Speichervolumen in Anlagen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung oder unter konservierend bearbeiteten Böden grundlegende Voraussetzung dafür ist, dass diese Maßnahmen sichtbare Auswirkung auf die Hochwasserabflüsse auch größerer Einzugsgebiete haben. Das bedeutet, dass auf möglichst vielen Flächen die Bewirtschaftung umgestellt werden sollte.

Schlagworte

Vorbeugender, flächenhafter Hochwasserschutz, Abflussbildung, hydrologische Modellierung, Expertensystem, dezentrale Regenwasserbewirtschaftung, konservierende Bodenbearbeitung, Wasserrückhaltepotenzial, Umsetzungspotenzial, Mulde, Sachsen

Summary

Subject of the present work is preventive flood protection through extensive basin-related measures. These measures represent one category of flood protection measures that are implemented on a decentralized level. Collective feature of the investigated measures in this dissertation is the enhancement of the water storage capacity of the soil in comparison with this capacity under current land use management. Consequently, these measures take influence on and moderate the generation of runoff deep inside the river basin, away from the water-system.

The thesis of this work is that portions of the porosity of soils are not being used during flood generating precipitation periods under current land-use management. Opening up these pore volumes leads to a diminution of the volume of the flood wave and affects flood protection positively.

The effect of preventive basin-related flood protection is difficult to quantify, since it depends on a number of temporal and spatial variables. This may be a reason that this particular strategy for flood protection has not been considered in flood prevention plans in the past.

The aim of this work was to develop a concept that allows to determine the potentials and the expected effects of the measures, which use the aforementioned ground storage during a flood event. The catchment of the river Mulde in Saxony (around 6.200 sq. km) functions as an example for the used approaches. Summarizing, the introduced step-by-step methodology can be seen as a concept that offers important foundations for a catchment-wide introduction of the preventive basin-related flood protection and can be transferred onto other catchments in a comparatively simple manner. The basic idea of the preventive basin-related flood protection is presented in the first part of the work and the theses of this work are formulated accordingly. In addition the hydrological processes predominantly influencing flood generation are explained as well as the considerations that speak for the choice of the meso- until lower macro-scale as the scale of observation. The introductory part of the work finishes with the description of the catchment of the river Mulde and a presentation of the data basis used.

The first step towards our envisaged concept was to prove and to quantify the water retention potential of the individual locations of the catchment. To this end, two approaches of location evaluation were combined. With the help of the knowledge-based system FLAB the locations were classified in accordance with their dominant runoff process. This qualitative evaluation was supplemented with a determination of the potential infiltration capacity under different precipitation- and soil moisture conditions. The result of this analysis was a graduated division of the catchment into more or less suitable and unsuitable locations for the preventive basin-related flood protection measures.

Parallel to the analysis of the potential for water retention, in a second step an answer to the question was pursued as to where the realization potential for accessing the ground storages with those measures can be found. For this purpose the expert system FLEXT was applied. FLEXT has the ability to check all locations of a catchment for their suitability in terms of realization potential. The suitability conditions are separately defined in form of decision-matrices for agricultural and urban areas.

In order to be able to determine the effect of a future preventive basin-related flood protection based on the analyses carried out, realistic scenarios were elaborated.

The fourth step in our concept represents another principal section of this work. Based on preceding examinations, the hydrological model STORM was customized, parameterized and calibrated. The aim of the use of STORM at this point in our work was to allow for the description of the effects of the measures of preventive basin-related flood protection hydrologically. The scenarios were calculated with a set up model and compared with a reference-scenario.

The following results can be derived from the sketched methodology:

The concept developed here proved to be an effective and transferable possibility to determine the retention capacity of catchments and to generate foundations that alleviate the implementation of measures of the preventive basin related flood protection into existing flood protection concepts.

The chosen model approaches as well as the appropriate set of parameters are suitable to simulate the different infiltration processes on conventional and conservational tilled fields. In addition the calculation results show that measures of decentralized storm water management in urban areas can have a positive side-effect on the retention capacity during flood generating precipitation periods.

The theoretical potential for water retention is distributed spatially in an extremely uneven manner in the catchment of the river Mulde. A gross evaluation of the map depicting the potential for water retention confirms that the relative retention potential is small in the Erz mountains areas. This is a result of the low thickness of soils and high precipitation intensities, which therefore can be generally identified as flood incurrence areas. The higher shares of the retention potential concentrate on the loess-areas under the Erz mountains region and on lowland parts of the catchment. The areas for a potential flood decrease are located in this area of the Mulde catchment. Regarding this rough assessment of the storage potentials, it must be emphasized that the spatial resolution of the maps depicting the water retention potential also enable the identification of small surfaces with retention potential in alleged flood formation areas, which are of especially high value for flood protection.

Both conservational tillage of field surfaces and the decentralized stormwater management (through the use of trough trench elements) in urban areas are capable of activating additional parts of the water retention potential in the surface in comparison to the as-it state. Referring to the flood generating precipitation events in the years 1995 and 2002 and under the assumption that 15 percent of the connected urban areas in the catchment of the river Mulde had been drained by decentralized stormwater elements, an additional retention potential of about 5.6 million or 4.7 million m³ respectively would have been activated. A changeover of 20 percent of presently still conventionally tilled field areas on ploughless treatment can activate an additional retention volume of 5.2 or 7.6 million m³ during these precipitation events. A comparison of this recoverable retention volume with the total volume of the reservoirs throughout the Mulde catchment shows that hydrologically it has a quite relevant magnitude.

It would be unwise to refrain from using this storage potential under agricultural and urban areas in future, especially if one considers that the conservational tillage and the decentralized stormwater management do not only lead to a decrease of the flood discharge, but also have other benefits. Today the flood protection is a side-effect of these measures. A circumstance that inevitably will have positive effects on the acceptance and the funding.

However, the effect on peak discharges of extreme supraregional flood events is restricted. This means that conventional flood protection measures can not be abandoned altogether to secure a sufficient flood protection. Nevertheless the storage volume that can be activated by measures in the catchment area is so large that it can contribute considerably to avoiding or decreasing an overload of flood protection constructions.

The evaluation of the results illustrates that the disposability of sufficient (or even better: much) storage volume in sites of decentralized stormwater management or conservational tilled soils is a basic condition to produce noticeable effect on the flood discharges of larger catchments. This means that the management should be converted on as many locations as possible.

Keywords

Preventive basin-related flood protection, runoff generation, hydrological modelling, expert system, decentralized stormwater management, conservational tillage, water retention potential, realization potential, river Mulde catchment, Saxony

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung	1
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise, Gliederung der Arbeit	5
2	Problemdefinition und Stand der Forschung	8
2.1	Hydrologische Zusammenhänge und Einflüsse auf das Hochwasserabflussverhalten	8
2.2	Abflussbildung in unterschiedlichen Raumskalen	9
2.3	Einfluss der konventionellen Bewirtschaftung auf die Abflussbildung.....	14
2.3.1	Einfluss der konventionellen Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf die Hochwasserentstehung.....	14
2.3.2	Einfluss der konventionellen Bodenbearbeitung auf Ackerflächen auf die Hochwasserentstehung.....	18
2.4	Untersuchungen zum Hochwasserschutz in der Fläche	19
3	Einordnung des Themas	23
3.1	Grundgedanke des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes	23
3.2	Eigenschaften des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes	25
3.3	Wahl der Maßstabebene und die Konsequenzen für die Methodik.....	26
4	Das Untersuchungsgebiet, Bestandsaufnahme	28
4.1	Geographische Lage.....	28
4.1.1	Geographische Lage des Lungwitzbaches	29
4.2	Naturräumliche Gliederung	30
4.3	Topographie	31
4.4	Geologie.....	34
4.5	Böden.....	35
4.6	Vegetation	37
4.7	Landnutzung	38
4.7.1	Landnutzung im Einzugsgebiet des Lungwitzbaches	40
4.8	Klima	41
4.9	Gewässernetz, Hydrologie und Hochwasser	44
4.10	Synopse der Gebietsbeschreibung	47
5	Datengrundlage und Datenaufbereitung	49
5.1	Einführung und Werkzeuge.....	49
5.2	Raumbezogene Daten	50

5.2.1	Standortkundliche Daten, Bodendaten	50
5.2.2	Daten zur Landnutzung.....	53
5.2.3	Topographische- und orographische Daten.....	55
5.2.4	Hydrologisch-räumliche Gliederung	56
5.2.5	Daten zum Gewässersystem und Speicherbauwerken	59
5.2.6	Weitere flächenbezogene Daten.....	61
5.3	Zeitbezogene Daten.....	62
5.3.1	Meteorologische Daten	62
5.3.2	Hydrometrische Daten	66
5.4	Synopse der Datengrundlage	67
6	Bewertung des Wasserrückhaltepotenzials der Landschaft	68
6.1	Grundlagen	68
6.1.1	Ansätze zur Beschreibung der Retentionsfunktion und der Abflussprozesse in der Landschaft.....	69
6.1.2	Infiltrationsansätze	70
6.2	Lösungsansatz	71
6.2.1	Identifikation des dominanten Abflussprozesses	72
6.2.2	Quantifizierung des Infiltrationsprozesses	76
6.3	Ergebnisse	80
6.3.1	Ergebnisse der Identifikation des dominanten Abflussprozesses	81
6.3.2	Ergebnisse der Infiltrationspotenzialanalyse.....	85
6.3.3	Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse – Gesamtgebiet	85
6.3.4	Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse – Teilgebiete.....	89
6.3.5	Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse bezogen auf die aktuelle Landnutzung	94
6.4	Diskussion.....	95
7	Maßnahmen des Hochwasserschutzes in der Fläche	98
7.1	Vorstellung der betrachteten Maßnahmen.....	98
7.1.1	Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung als Hochwasserschutzmaßnahme	99
7.1.2	Die konservierende Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme.....	103
7.1.3	Weitere Maßnahmen, Maßnahmenkombinationen	110
7.2	Erstellung von Maßnahmenkarten	116
7.2.1	Lösungsansatz	116
7.2.2	Das Entscheidungshilfesystem FLEXT	118
7.2.3	Datenbank der Einflussparameter (Flächendatenbank).....	121
7.2.4	Entscheidungsmatrix für die Siedlungsflächen	123
7.2.5	Entscheidungsmatrix für die landwirtschaftlich genutzten Flächen.....	125

7.3	Ergebnisse	127
7.3.1	Ergebnis des Entscheidungsprozesses für die Siedlungsflächen	127
7.3.2	Ergebnis des Entscheidungsprozesses für die landwirtschaftlich genutzten Flächen	130
7.4	Diskussion	136
8	Szenarien	139
8.1	Referenz-Zustand (-Szenario).....	139
8.2	Szenario für die Siedlungsflächen.....	142
8.3	Szenario für die Ackerflächen	144
8.4	Weitere Szenarien und Kombinationen von Szenarien.....	148
8.5	Vorschlag zur Verbesserung der Szenarienerstellung aus hydrologischer Sicht	148
9	Hydrologische Modellierung	149
9.1	Modellauswahl	149
9.2	Modellkonzept	150
9.2.1	Kurzvorstellung des hydrologischen Modells STORM	150
9.2.2	Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells in STORM	151
9.3	Modellierung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung	154
9.4	Modellierung der konservierenden Bodenbearbeitung	155
9.4.1	Parametrisierung der Bodenarten	156
9.4.2	Makroporenfluss.....	164
9.4.3	Verschlämmung	166
9.4.4	Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells zur Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung.....	171
9.4.5	Ergebnisse der Testflächenbetrachtung	174
9.5	Erweiterungsvorschläge für das hydrologische Modell	178
10	Ergebnisse – hydrologische Auswirkungen der Bewirtschaftungsszenarien	179
10.1	Bestimmung des aktivierbaren Senkenpotenzials	180
10.1.1	Rückhaltevermögen dezentraler Bewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten	180
10.1.2	Rückhaltevermögen der konservierenden Bodenbearbeitung auf Ackerflächen.....	186
10.1.3	Weitergehende Betrachtungen zum Rückhaltevolumen	189
10.2	Hydrologische Auswirkungen auf das Gewässersystem	192
10.2.1	Referenzzustand – Kalibrierung und Validierung des Modells.....	192
10.2.2	Szenarien	194
10.3	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse	201

11	Hinweise zur Umsetzung	207
11.1	Einbindung in die wasserwirtschaftliche Planung	208
11.2	Werkzeuge der räumlichen Planung als Umsetzungsinstrument.....	209
11.3	Werkzeuge zur Maßnahmenumsetzung in der Siedlungswasserwirtschaft.....	210
11.4	Werkzeuge zur Maßnahmenumsetzung in der Landwirtschaft	211
11.5	Werkzeuge zu Maßnahmenumsetzung in der naturschutzfachlichen Planung	212
12	Schlussfolgerungen	213
12.1	Schlussfolgerungen aus hydrologischer Sicht	213
12.2	Schlussfolgerung mit Blick auf die Umsetzung	215
13	Ausblick	218
14	Literatur	220

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl der Hochwasserereignisse in Europa (links), Anzahl der Todesopfer während dieser Ereignisse (rechts) - Quelle: WHO in [EEA 2004].....	2
Abbildung 2:	Struktur dieser Arbeit.....	7
Abbildung 3:	Abflussbildungsprozesse der lokalen Skala [GERMANN 1981]	10
Abbildung 4:	Abflussbildungsprozesse in der Hangskala und ihre Einflussgrößen (nach [DUNNE 1978]).....	12
Abbildung 5:	Wasserbilanzgrößen auf der Hang-Skala (aus [ETZENBERG 1998] nach [DYCK & PESCHKE 1995]).....	13
Abbildung 6:	Veränderung des Wasserhaushaltes durch Urbanisierung [US-EPA 2005].....	15
Abbildung 7:	Veränderung des Abflussverhaltens durch Urbanisierung (schematisch) [US-EPA 2005].....	16
Abbildung 8:	Lage des Mulde-Einzugsgebietes	29
Abbildung 9:	Teileinzugsgebiete der Mulde und Lage des Lungwitzbaches.....	30
Abbildung 10:	Naturräume im Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen nach [MANNSFELD & RICHTER 1995] bzw. [HAASE & MANNSFELD 2002].....	31
Abbildung 11:	Höhenmodell und Gewässersystem der Mulde.....	32
Abbildung 12:	Mesorelief- Mosaiktypen nach [HAASE & MANNSFELD 2002].....	33
Abbildung 13:	Neigungsflächentypen nach [HAASE & MANNSFELD 2002].....	33
Abbildung 14:	Geologische Strukturtypenklassen nach [HAASE & MANNSFELD 2002].....	34
Abbildung 15:	Bodengesellschaften (Zusammenfassung von Bodentypen) nach [HAASE & MANNSFELD 2002].....	36
Abbildung 16:	Verteilung der Bodenartengruppen des Oberbodens (zusammenfasst im Untersuchungsgebiet (Bodenarten nach [AG BODENKUNDE 2005]).....	37
Abbildung 17:	Landnutzung des Untersuchungsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM).....	38
Abbildung 18:	Landnutzungsverteilung bezogen auf den Sächsischen Teil des Mulde-Einzugsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM).....	39
Abbildung 19:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Lungwitzbaches (Quelle: ATKIS Basis-DLM)	41
Abbildung 20:	Landnutzungsverteilung des Lungwitzbach Einzugsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM)	41
Abbildung 21:	Makroklimastufen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]	42
Abbildung 22:	mittlerer jährlicher Niederschlag nach [HAASE & MANNSFELD 2002], abgeleitet aus Daten des [HAD 1999].	43
Abbildung 23:	mittlere Jahrestemperatur nach [HAASE & MANNSFELD 2002], abgeleitet aus Daten des DWD.	43
Abbildung 24:	Verhältnis des Sommerniederschlages (Apr. – Sept.) zum Winterniederschlag (Okt. – März) – Quelle: DWD.....	44
Abbildung 25:	Grafische Darstellung der durchschnittlichen mittleren Abflüsse (MQ) ausgewählter Pegel [LFUG 2002a]	45

Abbildung 26:	Grafische Darstellung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MHQ) ausgewählter Pegel [LFUG 2002a]	46
Abbildung 27:	Eingrenzung des Untersuchungsgebietes.....	50
Abbildung 28:	Deutsches und US-amerikanisches Bodenartendiagramm [AG BODENKUNDE 1994] und [USDA 2006]	51
Abbildung 29:	Entwässerungszeiten der Teileinzugsgebiete der Mulde	56
Abbildung 30:	Teileinzugsgebiete des Gesamtuntersuchungsgebietes.....	57
Abbildung 31:	Teileinzugsgebiete und Gewässersystem des Lungwitzbaches	58
Abbildung 32:	Hydrologisches STORM-Ersatzsystem für den Lungwitzbach.....	58
Abbildung 33:	Hydrologisches STORM-Ersatzsystem das Einzugsgebiet der Mulde	59
Abbildung 34:	Darstellung der Teilgebiete mit und ohne Transportelement	60
Abbildung 35:	Ersatzgeometrien der Flussabschnitte	60
Abbildung 36:	Zuordnung der Niederschlagsdaten (a) sowie der Temperatur und Verdunstungsdaten (b) der Klimastationen zu den Teilgebieten	63
Abbildung 37:	Einfluss unterschiedlicher Zeitschritte auf die hydrologische Berechnung – dargestellt am Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Pegel Görlitz).....	64
Abbildung 38:	Fehlerhafte Niederschlagsdaten für die Station Fichtelberg für den Zeitraum 7. – 8. Aug. 1978.....	65
Abbildung 39:	Schema zur Ableitung des Wasserrückhaltepotenzials	72
Abbildung 40:	Struktur der Wissensbasierte System FLAB (WBS-FLAB) [ZIMMERMANN 1999].....	73
Abbildung 41:	Klassifikation der Abflusskomponenten im WBS-FLAB [SEIDLER 2005].....	75
Abbildung 42:	Eingabe- und Berechnungsmaske für das Green-Ampt-Modul nach [CHU & MARIÑO 2005] aufgestellt von S. Zacharias	77
Abbildung 43:	Bodenmächtigkeiten (links) und Hangneigungen (rechts) im Untersuchungsgebiet.....	81
Abbildung 44:	Verteilung der dominanten Abflussprozesse im Einzugsgebiet (aggregiert) (nach WBS FLAB).....	82
Abbildung 45:	Potenzielles Speichervermögen des Untersuchungsgebietes in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamtregentmengen - KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 3 Tage.....	83
Abbildung 46:	Theoretische Gesamtinfiltration für das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Regendauer und Vor-Regen-Entwässerung KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a.....	84
Abbildung 47:	Nicht infiltriertes Niederschlagsvolumen für das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Regendauer und Vor-Regen-Entwässerung KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a.....	84
Abbildung 48:	Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 60 Minuten	86

Abbildung 49:	Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 12 Stunden.....	87
Abbildung 50:	Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge - KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 3 Tage.....	88
Abbildung 51:	Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit und der Regencharakteristik für des gesamte Untersuchungsgebiet (Größe der Kreise in Relation zur Gesamtniederschlagsmenge).....	89
Abbildung 52:	„hydrologische Regionen“.....	90
Abbildung 53:	Anteile der Einzugsgebiets-Regionen an der Gesamtfläche und den Flächen mit Senkenpotenzial (Angaben in km ² und Prozent).....	91
Abbildung 54:	Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 1 h.....	92
Abbildung 55:	Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 12 h.....	93
Abbildung 56:	Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 72 h.....	94
Abbildung 57:	Anteile der Landnutzung an der Gesamtfläche und Senkenpotenzialfläche des Einzugsgebietes.....	95
Abbildung 58:	Beispiel für die räumliche Auflösung der Wasserrückhaltepotenzialkarte.....	96
Abbildung 59:	Definition der Bodenbearbeitungsverfahren [KTBL 1993].....	103
Abbildung 60	Infiltrationsverlaufs nach Umstellung der konventionellen Bodenbearbeitung (fette Linie) auf mehrjährig konservierende Verfahren auf Basis der Mediandifferenzen (dünne Linie) sowie der unteren und oberen Grenze des Konfidenzintervalls (gestrichelte Linien) für Böden im sächsischen Lößgebiet [ZIMMERLING 2003].....	108
Abbildung 61:	Gemessene Wasserretentionskurven konventionell und konservierend bearbeiteter Böden (Bodenart Ut4, Bodentiefe 20 cm - Messungen von ZACHARIAS [SIEKER et al. 2007a]).....	109
Abbildung 62:	Gemessene Bodenwassergehaltsganglinien konventionell und konservierend bearbeiteter Böden im Lößhügelland (Bodenart Ut4, Bodentiefe 20 cm - Messungen von ZACHARIAS [SIEKER et al. 2007a]).....	110
Abbildung 63:	Beispielhafte Jahreswasserbilanzen für verschiedene Regenwasserbewirtschaftungssysteme (100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b].....	111

Abbildung 64:	Beispielhafte Wasserbilanz verschiedener Regenwasserbewirtschaftungssysteme bei einem Starkregenereignis (Wiederkehrzeit 2 Jahre - 100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b].....	112
Abbildung 65:	Beispielhafte Wasserbilanz verschiedener Regenwasserbewirtschaftungssysteme bei einem Hochwasser erzeugenden Regen (100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b].....	113
Abbildung 66:	Lösungsansatz zur Erstellung der Maßnahmenkarten - [BANDERMANN 2006a].....	118
Abbildung 67:	Eingabemaske zur Definition von Entscheidungsregeln	119
Abbildung 68:	Prüfung des Entscheidungsprozesses an Beispielstandorten	119
Abbildung 69:	Struktur des Modells FLEXT.....	120
Abbildung 70:	Maßnahmenkarte für die Siedlungsflächen.....	128
Abbildung 71:	Maßnahmenkarte für die Siedlungsflächen – Ausschnitt nordöstlich der Stadt Chemnitz.....	129
Abbildung 72:	Prozentuale Verteilung der anwendbaren Bewirtschaftungsverfahren	129
Abbildung 73:	Fachplanerkarte für die konservierende Bodenbearbeitung	131
Abbildung 74:	Fachplanerkarte für Maßnahmen zur Schlaggliederung	132
Abbildung 75:	Fachplanerkarten zur Einführung der Konturnutzung	133
Abbildung 76:	Fachplanerkarte für Maßnahmen zur oberirdischen Speicherung.....	133
Abbildung 77:	Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für die konservierende Bodenbearbeitung	134
Abbildung 78:	Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für Maßnahmen zur Schlaggliederung.....	134
Abbildung 79:	Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte zur Einführung der Konturnutzung	135
Abbildung 80:	Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für Maßnahmen zur oberirdischen Speicherung.....	135
Abbildung 81:	Entwicklung der konservierenden Bodenbearbeitung in verschiedenen Einzugsgebieten der Ämter für Landwirtschaft (Quelle: Sächsischer Agrarbericht 1997 - 2004).....	140
Abbildung 82:	Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung in den Einzugsgebieten der Ämter für Landwirtschaft (AfL) im Jahr 2004 (Quelle: Sächsischer Agrarbericht 2004).....	141
Abbildung 83:	Angenommener Ist-Zustand der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Mulde im Jahr 2004	142
Abbildung 84:	Zukunftsszenario der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Mulde (plus 20 %).....	145
Abbildung 85:	Mittlere Konzentrationszeit der Teileinzugsgebiete der Mulde.....	148
Abbildung 86:	Kennlinien der Exfiltration; Bodenart Ut2; Feldkapazität: 35,8 % Wassergehalt; Gesamtporenvolumen: 41,3 % Wassergehalt; konservierende Bodenbearbeitung	153
Abbildung 87:	Schematisierte Darstellung des Bypass-Ansatzes, P = Niederschlag, I_{mat} = Infiltration in die Bodenmatrix, I_{mac} = Makroporenfluss, Perc = Perkolation in die zweite Bodenschicht	165
Abbildung 88:	Beispiel für eine verschlammte Ackerfläche.....	167

Abbildung 89:	Einfluss von Bodenbedeckung und Niederschlagsintensität auf die Verschlammungsfaktoren C_{cover} und C_p (modifiziert nach [NIEHOFF 2001]).....	170
Abbildung 90:	Ersatzsystem für die Kalibrierung der Modells STORM.....	172
Abbildung 91:	Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in mm) sowie die Niederschlagshöhe der Ereignisse an den Messstationen (als Säulen).....	175
Abbildung 92:	Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in Prozent der Bruttoniederschlagshöhe des jeweiligen Ereignisses – Bruttoniederschlag als Säulen).....	176
Abbildung 93:	Örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials im Einzugsgebiet der Mulde beim Hochwasser im August 2002	182
Abbildung 94:	Örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials im Einzugsgebiet der Mulde beim Hochwasser im September 1995.....	183
Abbildung 95:	Summe des aktivierbaren Senkenpotenzials (in Millionen m^3) auf ausgewählten Siedlungsgebieten der Mulde (87 km^2) im Verhältnis zum IST-Zustand bei verschiedenen Hochwasserereignissen	184
Abbildung 96:	Summe des aktivierbaren Senkenpotenzials (in Millionen m^3) auf ausgewählten Ackerflächen (350 km^2) im Verhältnis zum IST-Zustand verschiedener Hochwasserereignisse.....	185
Abbildung 97:	Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung; Ereignis August 2002	188
Abbildung 98:	Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung; Ereignis September 1995.....	188
Abbildung 99:	Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung und 15 % Abkopplung von Siedlungsflächen; Hochwasser August 2002.....	189
Abbildung 100:	Auswirkung der Annahme einer gleichmäßigen Überregnung am Beispiel des Senkenpotenzials beim Hochwasser Aug. 2002 bezogen auf das Szenario „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“	190
Abbildung 101:	Auswirkung der Annahme gleichmäßiger Bodenverhältnisse am Beispiel des Senkenpotenzials beim Hochwasser Aug. 2002 bezogen auf das Szenario „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“	191
Abbildung 102:	Gemessene und berechnete Abflussganglinie am Pegel Niederlungwitz während des Hochwassers im August 2002 (fette Linie: STORM-Berechnung; dünne Linie: gemessene Pegelganglinie).....	193
Abbildung 103:	Gemessene und berechnete Abflussganglinie am Pegel Golzern (unterhalb der Stadt Grimma) während des Hochwassers im August 2002 (fette Linie: STORM-Berechnung; dünne Linie: Pegelganglinie)	194
Abbildung 104:	Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung des Szenarios „20 % mehr konservierende Bodenbearbeitung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002.....	197

Abbildung 105:	Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „100 % konservierende bzw. 100 % konventionelle Bodenbearbeitung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002.....	198
Abbildung 106:	Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „15 % Abkopplung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002	199
Abbildung 107:	Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten des Lungwitzbaches und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „15 % Abkopplung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002.....	200
Abbildung 108:	Konzeptbausteine zur einzugsgebietsweiten Implementierung flächenhaften Hochwasserschutzmaßnahmen	217

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennwerte der 18 Bodengruppen	52
Tabelle 2:	Modellierungsparameter der Landnutzungs-klassen.....	55
Tabelle 3:	Spezifische Angaben zu den Transportelementen der Teilgebiete.....	61
Tabelle 4:	Kennwerte der verwendeten Niederschlagsstationen.....	65
Tabelle 5:	Kennwerte ausgewählter Pegel in Mulde-Einzugsgebiet.....	66
Tabelle 6:	Maßnahmenkatalog für die Siedlungsgebiete.....	99
Tabelle 7:	Wasserbilanz von Mulden-Rigolen-Elementen bei unterschiedlichen Starkregenereignissen (bezogen auf den effektiven Niederschlag).....	101
Tabelle 8:	Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Bestellverfahren	114
Tabelle 9:	Entscheidungsmatrix für die Siedlungsflächen.....	123
Tabelle 10:	Zusatzinformationen zum Entscheidungsprozess.....	124
Tabelle 11:	Entscheidungsmatrix für die landwirtschaftlichen Flächen.....	125
Tabelle 12:	Zusammenstellung der abgekoppelten Flächen für der Szenario 15 % Abkopplung.....	144
Tabelle 13:	Zusammenstellung der konservierend bearbeiteten Ackerflächen im IST-Zustand und beim Szenario plus 20 % (Flächen selektiert nach Senkenpotenzial) für die einzelnen Teileinzugsgebiete der Mulde.....	147
Tabelle 14:	Verteilung der Bodenklassen, bezogen auf die Gesamtfläche der geeigneten Ackerflächen (1.786 km ²) (A), bezogen auf die gezielt ausgewählten Ackerflächen des Szenarios „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“ (350 km ²) (B).....	147
Tabelle 15:	Verwendete Simulationsansätze	151
Tabelle 16:	Verwendete Simulationsansätze des Bodenwasserhaushalts.....	152
Tabelle 17:	Randbedingungen der Dimensionierung und Speichervolumina der Testflächen	155
Tabelle 18:	Eigenschaften der oberflächennahen Bodenschichten unter Berücksichtigung der Landnutzung – Annahmen für die Parametrisierung.....	157
Tabelle 19:	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und Wasserretentionsparameter der deutschen Bodenarten unter Berücksichtigung der Landnutzung und Bodenbearbeitung nach [ZACHARIAS & BOHNE 2007].....	159
Tabelle 20:	Jahresgang der Bedeckungsgrade und Interzeption	173
Tabelle 21:	Parameter der Landnutzung bzw. Bodenbearbeitung.....	173
Tabelle 22:	Bodenartenabhängige Parameter der Verschlämmung.....	174
Tabelle 23:	Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in mm) sowie die Niederschlagshöhe der Ereignisse an den Messstationen.....	177
Tabelle 24:	Niederschlagshöhen im Einzugsgebiet der Mulde und aktiviertes Senkenpotenzial bei Hochwasser verursachenden Niederschlägen.....	181
Tabelle 25:	Mittlere Abflussbeiwerte auf den betrachteten Flächen	187

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Das Naturereignis Hochwasser mit seinen Ursachen, seine Folgen und den Möglichkeiten, sich davor zu schützen, ist spätestens seit den Rheinhochwassern 1993/ 1995 in Deutschland und Europa von nahezu gleich bleibender Aktualität und Bedeutung.

Eine Vielzahl von Berichten und Veröffentlichungen widmen sich den Folgen von Hochwassern und der Frage, ob die Anzahl von Hochwasserereignissen zugenommen hat. Letzteres wird in der Regel im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels diskutiert. Es wird jedoch auch darauf verwiesen, dass gravierende Veränderungen der Landnutzung einen Beitrag zur Verschärfung der Hochwassergefahr in Mitteleuropa geleistet haben.

[ENGEL 1999] gibt einen Überblick über die Schäden infolge der Hochwasser am Rhein 1993 und 1995; das [LFUG 2004] hat das Hochwasser im August 2002 dokumentiert und macht detaillierte Angaben zu den katastrophalen Schäden im Elbeeinzugsgebiet. Neben dem Osterzgebirge war das Einzugsgebiet der Mulde vom „Elbhochwasser 2002“ besonders stark betroffen (siehe auch [HELFRICHT & HELFRICHT 2002]). Dieses Einzugsgebiet bestehend aus den Flussgebieten der Freiburger-, Zwickauer- sowie Vereinigten Mulde ist Gegenstand der Untersuchungen.

Die European Environment Agency [EEA 2004] verweist in ihrem Bericht zu den Auswirkungen des Klimawandels in Europa auf einen eindeutigen Anstieg der Hochwasserereignisse in den vergangenen Dekaden. Gleichzeitig wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Todesopfer durch Hochwasser abgenommen haben, was auf verbesserte Hochwasservorhersagesysteme zurückzuführen ist (siehe Abbildung 1). [CASPARY 2001] gibt an, dass im Einzugsgebiet des Rheins die Winterniederschläge zunehmen und die rein regendominierten Hochwasserereignisse in Zukunft zunehmen werden und bezieht sich dabei auf die Assessment Reports des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Das Sächsische Staatministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) bestätigt diese Einschätzung in seinem Bericht zum Klimawandel in Sachsen [SMUL 2005b] und weist darauf hin, dass mit einer steigenden Anzahl von Sommertagen mit extremen Niederschlägen zu rechnen ist.

[VAN DER PLOEG et al. 2001] beschreiben die Veränderung der Landnutzung in Deutschland in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (siehe auch [HAD 1999]). Sie stellen die These auf, dass durch die Zunahme von Siedlungsflächen (um ca. 5 % bezogen auf die Gesamtfläche) und durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion (Flurbereinigung, Dränung und Mechanisierung) die Abflussbereitschaft der Einzugsgebiete zugenommen hat (siehe auch [HAD 1999]).

Neben den hydrologischen Auswirkungen einer stetigen Zunahme urbaner Flächen ist hiermit ein zweiter Prozess verbunden, der bei der Diskussion um die Notwendigkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen nicht unerwähnt bleiben darf. Mit zunehmender Urbanisierung kommt es zwangsläufig zu einem Anwachsen der Schadenspotenziale. Zum einen kommt es bei der Suche nach attraktiven Baugebieten immer wieder zur Aufstellung von Bebauungsplänen in potenziellen Überschwemmungsgebieten, zum anderen wachsen in Bestandsgebieten die vom Hochwasser bedrohten Werte [HERZHOFF 1998]. Im Vergleich zum Schadenspotenzial land- und forstwirtschaftlicher Flächen erhöht sich das Schadenspotenzial durch die Bebauung überschwemmungsgefährdeter Flächen je nach Berechnungsansatz um das 150- bis 450-fache [IKSR 2001], [RICHMANN et al. 2006].

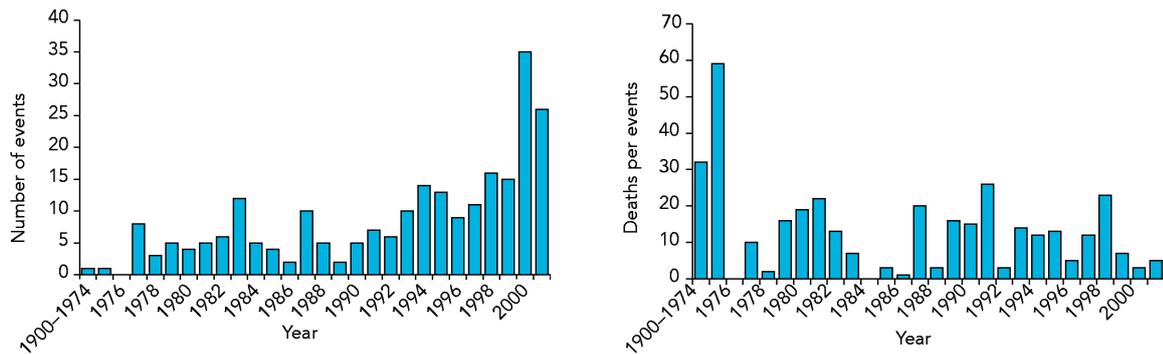


Abbildung 1: Anzahl der Hochwasserereignisse in Europa (links), Anzahl der Todesopfer während dieser Ereignisse (rechts) - Quelle: WHO in [EEA 2004]

Ein befürchteter Klimawandel, anhaltende Landnutzungsveränderungen und steigende Schadenpotenziale machen deutlich, warum es sich lohnt, über Konzepte zur Ergänzung des bestehenden Hochwasserschutzes nachzudenken.

Die Bundesregierung hat mit einem „5-Punkte-Programm“ auf das Hochwasser im Einzugsgebiet der Elbe im Jahre 2002 reagiert und sich darin zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes verpflichtet. Das Programm sieht unter anderem vor, den Flüssen mehr Raum zu geben und Hochwasser dezentral zurückzuhalten. Im „Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“ (Hochwasserschutzgesetz), dass am 10. Mai 2005 in Kraft trat, werden die Länder zur Ausweisung von Überschwemmungsgebieten und zur Aufstellung von Hochwasserschutzplänen verpflichtet, jedoch ist der Gedanke des dezentralen Hochwasserrückhalts auf den Flächen der Einzugsgebiete nicht mehr enthalten.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) nahm ebenfalls das Elbehochwasser 2002 zum Anlass, um auf die verschiedenen Instrumente des Hochwasserschutzes hinzuweisen und Handlungsempfehlungen zu geben [LAWA 2003] und greift dabei ihre eigenen Leitsätze auf, die sie bereits 1995 (nach dem Rheinhochwasser im Januar 1995) formulierte [LAWA 1995]. Die LAWA betont, dass eine ganzheitliche Hochwasserschutzstrategie neben dem technischen Hochwasserschutz und der Hochwasservorsorge einen Schwerpunkt auf das Hochwasserflächenmanagement legen muss. Das Flächenmanagement beschränkt sich nach Ansicht der LAWA nicht auf die Festsetzung von Überschwemmungsflächen sondern muss auch den natürlichen Rückhalt des Bodens beinhalten. Die LAWA schlägt vor, die Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts in den Bewirtschaftungsplänen nach EU-Wasserrahmenrichtlinie zu berücksichtigen.

Der Freistaat Sachsen, als am stärksten vom Elbhochwasser betroffenes Bundesland, hat besonders schnell reagiert und bereits vor Inkrafttreten des Hochwasserschutzgesetzes (s. o.) dessen Vorgaben in Landesrecht umgesetzt. Darüber hinaus ist der Freistaat den Leitlinien der LAWA insofern gefolgt, als dass die Neufassung des Sächsischen Wassergesetzes neben der Erstellung von Hochwasserschutzkonzepten auch das Ausweisen von so genannten Hochwasserentstehungsgebieten verlangt. In diesen Gebieten sind Veränderungen der Landnutzung nur noch genehmigungsfähig, wenn „das Wasserversickerungs- oder das Wasserrückhaltevermögen durch das Vorhaben nicht beeinträchtigt oder [...] angemessen kompensiert wird“ (§100b, Abs. 4 [SÄCHSWG 2004]).

Hinter den genannten Hinweisen, Leitlinien und Gesetzen zum dezentralen Rückhalt steht die Einsicht, dass eine Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes nicht nur dem Naturschutz, der Landwirtschaft und der Grundwasserneubildung dient, sondern auch ein Gewinn für den Hochwasserschutz ist. Diese Auffassung kann als eine These dieser Arbeit angesehen werden. Es könnte aber auch vermutet werden, dass die Einsicht der Tatsache geschuldet wird, dass der technische Hochwasserschutz als zurzeit gängige Lösung vor dem Hintergrund der oben erwähnten Hochwasserereignisse und Klimaprozesse an seine

ökonomischen und praktischen Grenzen stößt und somit eine Auseinandersetzung mit Alternativen zwangsläufig stattfinden muss.

Im Zuge dessen stellt sich die Frage, mit welchen Maßnahmen der Landschaftswasserhaushalt verbessert werden kann, wo diese Maßnahmen eine besonders große Wirkung entfalten und wie groß diese Wirkung bezogen auf verschiedene Punkte im Einzugsgebiet und bezogen auf Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit sind. Diesen Fragen widmet sich die vorliegende Arbeit.

1.2 Zielsetzung

Die Definition der Ziele dieser Arbeit ergibt sich aus der Frage, warum in der Vergangenheit der dezentrale Rückhalt auf den Flächen der Teileinzugsgebiete wohl positive Erwähnung findet, aber in den Hochwasserschutzkonzepten die Maßnahmen zu vorbeugenden, flächenhaften Wasserrückhalt nicht berücksichtigt werden.

- Es ist zu vermuten, dass die Wirkung dezentraler Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss bei Planern und Entscheidungsträgern nach wie vor als zu vage eingeschätzt wird. Dies lässt sich begründen mit den fehlenden Erfahrungen und Referenzprojekten zum einen und der Komplexität der Einflussgröße, die die Wirkung beeinflussen, zum anderen.
- Noch schwerer wiegt möglicherweise der Umstand, dass für die Aufstellung von Strategien zur Planung und Umsetzung dezentraler, flächenhafter Hochwasserschutzmaßnahmen dem Planer keine transparente und allgemein anerkannte Methodik zur Verfügung steht. Mit anderen Worten, es fehlt eine übertragbare Vorgehensweise, die zu einer möglichen Planungsvariante führt. Somit kann auch die Wirkung dieser Variante nicht quantifiziert werden.

Die Ziele der Arbeit widmen sich somit der Wirkungsanalyse sowie der strukturierten Umsetzung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen in der Fläche.

1) Eine These dieser Arbeit ist, dass es in den Einzugsgebieten auch bei Hochwasser verursachenden Niederschlagsereignissen bisher ungenutzte Rückhaltepotenziale in Form ungesättigter Böden gibt, die durch geeignete Maßnahmen für einen die Hochwasserabflüsse verringernden Wasserrückhalt nutzbar gemacht werden können.

Vielfach wird die Auffassung vertreten, dass bei extremen, Hochwasser verursachenden Niederschlägen die Speicherfähigkeit des Bodens ausgeschöpft ist. Beobachtungen während Hochwasserereignisse weisen jedoch darauf hin, dass dies nur für die Teile des Einzugsgebietes gilt, die während des Hochwassers zu so genannten Sättigungsflächen werden oder bereits vorher gesättigt sind. Andere Teile des Einzugsgebietes tragen zum Hochwasser bei, weil ihre Infiltrationskapazität überschritten wird. Diesem Horton'schen Oberflächenabfluss wird im Verhältnis zum Sättigungsflächenabfluss in den humiden Gebieten der gemäßigten Breiten geringe Bedeutung beigemessen, da als Referenz die überregionalen Hochwasser betrachtet werden, die durch lang andauernde Niederschläge mit geringer Intensität verursacht werden. Aus Untersuchungen zum Bodenabtrag infolge von Wassererosion geht jedoch hervor, dass auf verschlammten oder verdichteten Böden bereits bei geringen Niederschlagsintensitäten Horton'scher Oberflächenabfluss entsteht. Für versiegelte Flächen gilt der Horton'sche Abfluss ohnehin als dominierende Wasserbilanzkomponente. Somit müssen die Aussagen, dass bei Hochwasser die Böden gesättigt sind und dass der Horton'sche Oberflächenabfluss kaum zur Hochwasserentstehung beiträgt, flächendifferenziert getroffen werden und werden als pauschale einzugsgebietsweite Feststellungen bezweifelt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die räumliche Verteilung der Rückhaltepotenziale der Böden in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften und der Teilsättigung infolge vorausgegangener Niederschläge zu quantifizieren. Nicht zuletzt soll auf diese Weise eine wichtige Grundlage für einen verbesserten Wirkungsnachweis geschaffen werden.

2) Die zweite These ergibt sich aus der bereits erwähnten Beobachtung, dass ein Teil der Flusseinzugsgebiete aufgrund ihrer Landnutzung über das natürliche Maß hinaus zu „Horton’schem Oberflächenabfluss“ neigt. Damit verschiebt sich die Wasserbilanz zugunsten des Abflusses im Gewässer und es entstehen bereits bei niedrigen Niederschlagsintensitäten Hochwasser verschärfende schnelle Abflusskomponenten. Dies gilt insbesondere für urbane und ackerbaulich genutzte Flächen. Aus diesem Grund wurden die Maßnahmen in Siedlungsgebieten und auf ackerbaulichen Flächen in den Mittelpunkt gerückt. Die eigentliche Arbeitsthese geht davon aus, dass in der siedlungswasserwirtschaftlichen und ackerbaulichen Praxis Maßnahmen oder Bewirtschaftungstechniken zur Verfügung stehen, die den Horton’schen Oberflächenabfluss verringern und die Ausnutzung des Rückhaltepotenzials des Bodens gegenüber dem Ist-Zustand signifikant erhöhen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Wirkung infiltrationsfördernder Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Siedlungsflächen und Ackerflächen bei Hochwasser erzeugenden Niederschlägen zu untersuchen und beispielhaft für das Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen anhand von Umsetzungsszenarien die hydrologischen Auswirkungen auf das Gewässersystem darzustellen.

3) Eine weitere These dieser Arbeit ist, dass die Umsetzung der betrachteten, wasserrückhaltenden Maßnahmen, auch ohne die Hochwasser vermindernde Wirkung sinnvoll ist. Aus vorhergehenden Untersuchungen ist bekannt, dass es besonders im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft und im Bereich der Landwirtschaft Probleme gibt, die sich gemeinsam mit dem Problem der Hochwasserminderung durch Nutzung des Speicherpotentials ungesättigter Böden lösen lassen. Diese synergetischen Eigenschaften sind Ansatzpunkte für die Finanzierung und die Akzeptanz dieser Maßnahmen. [OSTROWSKI 2002] verwendet den Begriff des NIMBY-Effektes („oh yes, but Not In My BackYard“) und vertritt die Meinung, dass eine integrale Sichtweise aus Ökologie und Hochwasserschutz in der Lage ist, die fehlende Solidarität zwischen den Anrainern der Ober- und Unterläufe zu überwinden.

Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft besteht aus ökonomischen und ökologischen Gründen ein Interesse daran, die Ableitung des Regenwassers über Kanalnetze zu vermeiden oder zu verringern und stattdessen durch dezentrale Bewirtschaftungsmaßnahmen mit vollständiger oder partieller Versickerung zu ersetzen. Im Bereich der Landwirtschaft besteht unter anderem das Problem der Wassererosion der Böden durch Starkniederschläge, das nur durch Verminderung der Oberflächenabflüsse zu vermeiden oder zu mindern ist.

Ziel der Arbeit ist es, diese Synergien kurz aufzuzeigen und bei der Ermittlung der Umsetzungspotenziale sowie der Festlegung von Szenarien zu berücksichtigen.

4) Nicht zuletzt ist diese Arbeit von der Zielvorstellung geprägt, eine auf beliebige Einzugsgebiete übertragbare Methodik zu entwickeln. Daraus ergibt sich, dass alle Schritte des Konzeptes für die Maßstabebene eines Flusseinzugsgebietes entwickelt wurden und gezielt auf flächendeckende, breitenverfügbare Daten zurückgegriffen wurde. Diese Zielsetzung hat Auswirkung auf die Methodik zur Identifikation des Speicherpotenzials, die Methodik zur Bestimmung der Umsetzungspotenziale und auf die Parametrisierung der Maßnahmen zur Erschließung des Speichers unter Ackerflächen und Siedlungsflächen.

Hinter den beiden zuletzt genannten Kernpunkten dieser Arbeit steht die Forderung, auf möglichst großer Fläche im Verhältnis zum Gesamteinzugsgebiet dezentrale Maßnahmen umzusetzen, um auch bei Hochwassern großer Jährlichkeit Abfluss vermindernde Wirkungen zu erzielen (siehe u.a. [DWA 2006]). Diese Anforderung verlangt nach einzugsgebietsweiten, integrierten Planungskonzepten, die in der Lage sind, die Potenziale eines Einzugsgebietes aufzuzeigen. Gleichzeitig bedarf es in der Praxis anerkannter und ökonomisch vorteilhafter Lösungen.

In der Summe soll ein Konzept vorgestellt werden, das die Einführung des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes auf Siedlungsflächen und Äckern ermöglicht. Diese

Arbeit soll dazu beitragen, dass das Hochwasser-Flächenmanagement, bislang begrenzt auf die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten, sich zu einem Flächenmanagement inklusive Bewirtschaftungsmanagement entwickelt und damit seiner Definition im Sinne der [LAWA 2003] gerecht wird.

1.3 Vorgehensweise, Gliederung der Arbeit

Aus den formulierten Zielen, sowie den Eigenschaften des flächenhaften, vorbeugenden Hochwasserschutzes (siehe in Kapitel 3.2) ergeben sich folgende Fragenstellungen:

- Wo befinden sich die Wasserrückhaltepotenziale des Bodens?
- Wo sind die Umsetzungspotenziale für Maßnahmen zur Vermeidung von Horton'schem Oberflächenabfluss?
- Welche Wirkung ergibt sich aus einer flächenhaften Umsetzung auf geeigneten Standorten?

Die Beantwortung dieser Fragen bildet die Kernpunkte des Konzepts zur einzugsgebietsweiten Implementierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (siehe Abbildung 2). Gleichzeitig ist Abbildung 2 zu entnehmen, in welchen Kapiteln dieser Arbeit die einzelnen Bausteine des Konzeptes behandelt werden. Des Weiteren wird auf eine Auswahl von vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten verwiesen, die als Grundlagen dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sind.

Bevor in Kapitel 6 mit der Analyse des Wasserrückhaltepotenzials begonnen wird, erfolgt in den Kapitel 2 und 3 eine Problemdefinition sowie eine Einordnung des Themas.

In Kapitel 4 wird das Untersuchungsgebiet bezüglich seiner naturräumlichen und anthropogenen Eigenschaften beschrieben. Anhand dessen lassen sich bereits erste Schlüsse zu den Potenzialen des Mulde-Einzugsgebietes in Sachsen ableiten.

In Kapitel 5 wird auf die verfügbare und verwendete Datengrundlage eingegangen und erläutert, welche Schritte zur Datenaufbereitung durchgeführt wurden. Damit wird in diesem Kapitel die Basis für die sich anschließenden Konzeptbausteine beschrieben.

Kapitel 6 enthält einen Schlüsselbaustein des vorgestellten Konzeptes. Mit der räumlich differenzierten und hoch aufgelösten Bestimmung des Wasserrückhaltepotenzials werden zum einen die Handlungsoptionen im Sinne des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes identifiziert. Zum anderen bildet es die Grundlage zur Bestimmung der Umsetzungspotenziale. Nicht zuletzt ist die korrekte Bestimmung der dominanten Abflussprozesse eine Voraussetzung für die Wirkungsanalyse. Eine Grundlage für dieses Kapitel stammt von der Arbeitsgruppe um Prof. Peschke vom Internationalen Hochschulinstitut (IHI) Zittau, der mit seinen Mitarbeitern das Wissensbasierte System FLAB zur Identifikation von Flächen gleicher dominanter Abflussprozesse entwickelte.

Parallel zur Analyse des Wasserrückhaltepotenzials erfolgt die Analyse der Umsetzungspotenziale von Maßnahmen in Siedlungsgebieten und auf Ackerflächen. Während beim Wasserrückhaltepotenzial ausschließlich der natürliche Zustand betrachtet wird und somit die unbeeinflussten Standorteigenschaften zugrunde gelegt werden, sind in Kapitel 7 auch die Informationen zur aktuellen Nutzung und Bewirtschaftung von Interesse. Zur einzugsgebietsweiten Ausweisung der Umsetzungspotenziale wurde das Expertensystem FLEXT verwendet, das im Rahmen der Dissertation von Herrn Z. Jin entstanden ist [JIN et al. 2005].

Aus den beiden Standortanalysen (zum Wasserrückhaltepotenzial und zu dem Umsetzungsmöglichkeiten) lassen sich im Anschluss realitätsnahe Szenarien entwickeln, die teilweise in anderen Einzugsgebieten bereits als erklärtes Planungsziel definiert wurden ([BECKER et al. 2005] - siehe Kapitel 8).

Bevor die aufgestellten Szenarien auf ihre hydrologische Wirkung überprüft werden können, wird in Kapitel 9 dargelegt, welche Parametrisierungen und welche Modifikationen an dem

Modell STORM [IPS 2006] vorgenommen wurden, um die veränderten Bewirtschaftungsformen abbilden zu können. Hierbei wurde insbesondere auf Vorarbeiten aufgebaut die [NIEHOFF 2001] im Rahmen des LAHoR-Projektes erarbeitet hat. Mit Blick auf die durch die konservierende Bodenbearbeitung ausgelösten Prozesse sowie deren Parametrisierung wurde auf die Messungen von [ZIMMERLING 2003] sowie die Literaturoberprüfung von [AKKERMANN 2004] aufgebaut. Die Abbildung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung sowie dessen Wirkung wurde verglichen mit Angaben aus [SIEKER 2001b] und [ZIMMERMAN 2005].

Für eine exakte modelltechnische Abbildung eines Hochwasserereignisses müssen die Wirkungskomplexe Abflussbildung, Abflusskonzentration und Abflusstransport betrachtet werden. Diese Arbeit setzt ihren Schwerpunkt auf die Abflussbildung und geht im Rahmen der Wirkungsanalyse nur vereinfacht auf die Konzentration und den Transport von Hochwasserabflüssen ein. Die Ergebnisse der Modellierung in Kapitel 10 repräsentieren die Wirkungsanalyse am Beispiel des Einzugsgebietes der Mulde in Sachsen.

Das Konzept in Abbildung 2 sieht vor, dass sich der Wirkungsanalyse die Umsetzung konkreter Maßnahmen anschließen könnte. Dies stellt jedoch einen Ausblick dar, da der Einstieg in den lokalen Planungsprozess den Sprung auf die lokale Maßstabsebene voraussetzt und an dieser Stelle die Grenze der hier vorgestellten Arbeit gezogen wurde. In Kapitel 11 werden daher nur einige Hinweise und Verknüpfungen zu den an der Umsetzung beteiligten Fachdisziplinen aufgezeigt.

Die Arbeit setzt somit eine Klammer um die Arbeiten von [PESCHKE et al. 1999a], [JIN et al. 2005], [NIEHOFF 2001], [ZIMMERLING 2003] und [ZIMMERMAN 2005] und schlägt vor, wie sich aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeiten ein Konzept des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes formen lässt.

In Kapitel 12 in Abbildung 108 wird das Konzept dieser Arbeit noch einmal verwendet und um eine Reihe von Informationen ergänzt, denen an dieser Stelle noch nicht vorgegriffen werden soll.

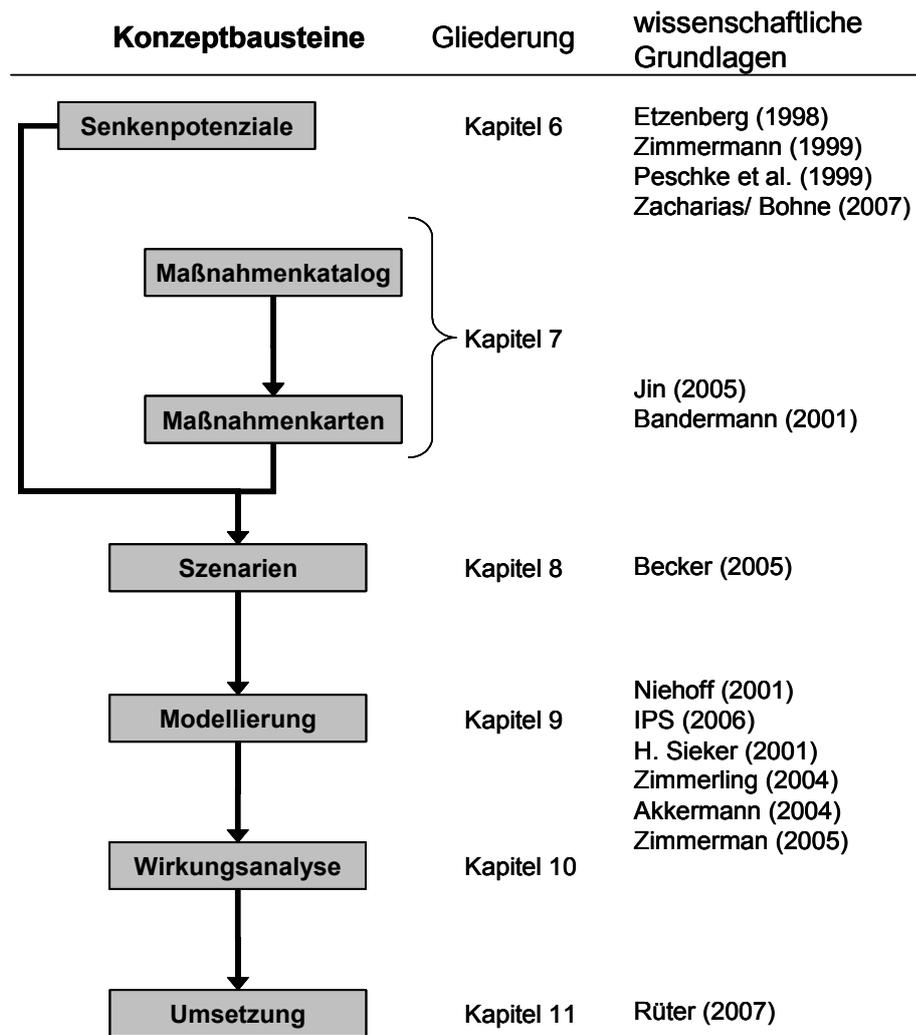


Abbildung 2: Struktur dieser Arbeit

2 Problemdefinition und Stand der Forschung

2.1 Hydrologische Zusammenhänge und Einflüsse auf das Hochwasserabflussverhalten

Das Phänomen Hochwasser ist ein zeitlich und räumlich variabler Prozess, der primär durch außergewöhnlich große Niederschläge ausgelöst wird und Teil des natürlichen Wasserkreislaufes ist. Der zeitliche Verlauf eines Hochwassers an einem bestimmten Punkt im Gewässersystem lässt sich mit Hilfe von Abflussganglinien beschreiben. Zusätzlich kann die Fortpflanzung des Hochwasserscheitels entlang der Gewässerachse anhand eines Zeit-Flusskilometer-Diagramms dargestellt werden.

Die Einflussfaktoren, die das Volumen und die zeitliche Verteilung einer Hochwasserwelle steuern, beschreiben in ihrer Summe die Speichereigenschaften eines Einzugsgebietes und legen fest, wie der Niederschlag zu Abflusswellen transformiert wird [KLEEBERG & ROTHER 1996].

Die Einflussfaktoren lassen sich in drei Gruppen gliedern [NIEHOFF 2001], [DYCK & PESCHKE 1995], [HERRMANN 1992]. Neben den Eigenschaften des Niederschlages, zu denen hier auch die Schneeschmelze gezählt wird, lassen sich Gebietsparameter und Anfangsbedingungen unterscheiden. Die Anfangsbedingungen definieren die Füllstände der einzelnen Speicher. Hierzu gehören der Interzeptionsspeicher, der oberirdische Muldenspeicher und der Bodenspeicher. Auf letzterem liegt das besondere Augenmerk dieser Arbeit. Die Gebietseigenschaften leiten sich aus der Landnutzung, der Topographie, der Geologie und dem Boden des Einzugsgebietes ab. Darüber hinaus sind als Untergruppe der Gebietseigenschaften die Merkmale des Gewässernetzes mit seinen natürlichen und künstlichen Speichern zu nennen.

Die Komplexität des Hochwasserentstehungsprozesses resultiert aus der Tatsache, dass die aus den Gebietseigenschaften abgeleiteten Speichereigenschaften der Landschaft räumlich inhomogen sind. Bei den Anfangsbedingungen und Niederschlagsverhältnissen kommt zur räumlichen die zeitliche Variabilität hinzu. Wie bereits in Kapitel 1.2 angesprochen, fällt es vor diesem Hintergrund schwer, allgemeingültige Aussagen zur Hochwasserentstehung zu treffen.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses die Bedeutung der Eigenschaften der Einzugsgebietsflächen gegenüber den Eigenschaften des Gewässersystems geringer wird. Dahinter steht die Erkenntnis, dass mit zunehmendem Füllstand der oben genannten Speicher die Wahrscheinlichkeit der Hochwasserentstehung zunimmt und bei Überlastung aller Speicher die Flächen des Einzugsgebiete keinen entscheidenden Einfluss mehr auf den Abflussprozess nehmen können [DWA 2006]. Insbesondere die Sättigung des Bodenspeichers wird in diesem Zusammenhang hervorgehoben, da der Boden je nach Standort eine Kapazität zwischen 100 und 300 mm Niederschlag hat und somit eine oft unterschätzte Rolle bei der Hochwasserentstehung bzw. -vermeidung spielt [LAWA 2000]. Hieraus wird die Aussage abgeleitet, dass extreme Hochwasser nur bei hohen, flächendeckenden Vorbodenfeuchten entstehen können [KLEEBERG & ROTHER 1996]. Des Weiteren wird hieraus gefolgert, dass bei extremen Ereignissen anthropogene Veränderung wie Versiegelung und Oberflächenverschlammung die Hochwassersituation gegenüber einem „natürlichen“ Zustand immer weniger verschärfen. Eine konsequente Weiterentwicklung dieses Gedankens führt zu der Aussage, dass infiltrationsfördernde Maßnahmen nur Hochwasserereignisse kleiner bis mittlerer Wiederkehrzeit beeinflussen können und These 1) in Kapitel 1.2 zumindest für große Ereignisse nicht zutrifft.

Des Weiteren wird als Gesetzmäßigkeit formuliert, dass mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes ebenfalls die Bedeutung der Gebietseigenschaften gegenüber den

Eigenschaften des Gewässersystems abnimmt. Dies ist nachvollziehbar, wenn bedacht wird, dass der Anteil der Fließprozesse im Gewässer im Verhältnis zu den Prozessen auf den Flächen mit der Einzugsgebietsgröße zunimmt [BEVEN 1991]. Erkennbar ist dieser Effekt an dem Einfluss eines Speicherbauwerkes auf die von ihm bewirkte Wasserstandsänderung mit zunehmendem Abstand des Beobachtungspunktes (Pegels) vom Speicherbauwerk [OSTROWSKI 2002]. Die Bedeutung des Speichers wird im zunehmenden Abstand immer geringer, weil sich durch Translation, Retention und Wellenüberlagerungen die Abflussreduktion auf einen immer größeren Zeitraum (oder immer längeren Teil der Hochwasserwelle) verteilt. Was für den Speicher oder die Talsperre gilt, bezieht sich auch auf die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen oder Änderungen der Bewirtschaftung.

Beide hier erläuterten allgemeinen Aussagen zur Hochwasserentstehung relativieren die Erwartungen an den vorbeugenden flächenhaften Hochwasserschutz. Es besteht daher die Aufgabe, sich mit diesen hydrologischen Zusammenhängen auseinanderzusetzen und sie in der Diskussion der Ergebnisse zu beachten (siehe Kapitel 10.3 und 12.1).

2.2 Abflussbildung in unterschiedlichen Raumskalen

Grundsätzlich muss bei der Hochwasserentstehung zwischen den Prozessen auf den Flächen eines Einzugsgebietes und den Prozessen im Fließgewässersystem unterschieden werden. Während die Prozesse auf der Fläche dem Begriff der Abflussbildung zugeordnet werden, sind die Prozesse im Gewässer Teil der Abflusskonzentration. Eine eindeutige räumliche Zuordnung der Vorgänge kann allerdings nicht erfolgen. So beginnt der Konzentrationsprozess der verschiedenen Abflusskomponenten bekanntlich bereits in und auf den Teilflächen. Diese Arbeit setzt ihren Schwerpunkt auf die Abflussbildung und geht im Rahmen der Wirkungsanalyse nur vereinfacht auf die Konzentration und den Transport von Hochwasserabflüssen ein.

Der Begriff der Abflussbildung umfasst alle hydrologischen Prozesse, die in ihrer Summe den Abfluss in den Fließgewässern bilden [BRONSTERT 2005a]. Die Betrachtung der Abflussbildung ist geprägt von der Beschreibung der verschiedenen Teilprozesse bzw. den räumlich und zeitlich variablen Einflussfaktoren, die die Prozesse beeinflussen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Untersuchungen durchgeführt, die eine neue oder modifizierte Beschreibung der Abflussbildungsprozesse zuließen. Vielmehr wurden die wissenschaftlichen Vorarbeiten zu diesem Thema ausgewertet und genutzt, um Aussagen zum Wasserabfluss bzw. -rückhaltepotenzial von Einzugsgebieten in Hochwassersituationen treffen zu können (siehe Kapitel 6).

Einen sehr guten Überblick über die Prozesse der Abflussbildung geben u. a. [BRONSTERT 2005a], [MENDEL 2000], [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997] und [NIEHOFF 2001].

Übereinstimmend wird darauf verwiesen, dass es notwendig und zielführend ist, die Teilprozesse der Abflussbildung bestimmten Raumskalen zuzuordnen [BECKER 1986].

Der Abflussbildungsprozess beginnt auf der lokalen Skala in einer Größenordnung von wenigen Quadratmetern. Die Fließprozesse der lokalen Skala finden in und auf einem Bodensegment statt, das so klein gewählt wird, dass zunächst Einflüsse der Topographie ausgeblendet sind (siehe Abbildung 3). Betrachtet werden auf dieser Maßstabsebene insbesondere vertikale Prozesse. Auf dieser Ebene sind die Eigenschaften des Bodens dominierend. Die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche, die hydraulische Leitfähigkeit der Matrix sowie das Wasserspeichervermögen sind Parameter, die die Fließprozesse maßgeblich steuern. Zur Parametrisierung dieser Bodeneigenschaften wird das Porensystem des Bodens in verschiedene Kategorien eingeteilt. [BEVEN & GERMANN 1982] unterscheiden zwischen den Mikroporen der Bodenmatrix und den Makroporen. Die Mikroporen werden unterteilt in Fein-, Mittel- und Grobporen. Diese Einteilung wird dazu verwendet, die Matriceigenschaften einer bestimmten Bodenart zuzuweisen und darauf aufbauend Aussagen zur Leitfähigkeit und zum Wasserhaltvermögen zu treffen. In einem Bodensegment, das frei von Makroporen ist, kann der Fließprozess im Boden mit Hilfe der

Richards-Gleichung physikalisch-begründet abgebildet werden. In der Regel sind jedoch in jedem natürlichen Bodensegment Makroporen zu finden, so dass zu den langsamen Fließprozessen der Matrix schnelle, häufig turbulente, Fließprozesse hinzukommen.

Die Parametrisierung des Makroporenflusses ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Neben der Dichte der Makroporen und dem Durchmesser der Makroporen fällt es schwer, die Durchgängigkeit sowie die Durchlässigkeit der Makroporenwandung einzuschätzen. [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997] verweisen darauf, dass keine eindeutige Definition für Makroporen existiert (siehe auch [SCHNEIDER 1999]).

Die Infiltration an der Bodenoberfläche speist die Fließprozesse in die Mikro- und Makroporen. Gesteuert wird der Eintritt des Wassers in den Boden von der Beschaffenheit der Oberfläche. Auf natürlichen Flächen (ohne anthropogenen Einfluss) leitet sich die Infiltrationskapazität in die Mikroporen aus der Bodenart und dessen Lagerungsdichte ab. Die aktuelle Infiltrationsrate in der Bodenmatrix ergibt sich aus der bodenabhängigen hydraulischen Leitfähigkeit und dem hydraulischen Gradienten. Mit zunehmendem Wassergehalt der Bodenmatrix sinkt der hydraulische Gradient und die Infiltrationsrate nähert sich asymptotisch der gesättigten Leitfähigkeit (k_f) an. Dieser Prozess verläuft entsprechend der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen (p_f -Kurven) der Böden im hohen Maße unlinear (siehe [DUNNE 1978] oder [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992]). Es wird davon ausgegangen, dass die Infiltration in die Makroporen dann eintritt, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate überschreitet und sich frei bewegliches Wasser auf der Oberfläche bildet. Da Makroporen keine maßgeblichen Kapillarkräfte aufweisen, kann erst bei Überlastung der Matrixinfiltration Makroporenfluss entstehen. Erst wenn der Bestandsniederschlag sowohl die Matrix- als auch die Makroporeninfiltrationsrate übersteigt entsteht Oberflächenabfluss, der dann die Grenzen des betrachteten Bodensegments lateral verlässt.

Bezüglich detaillierterer Darstellungen und Definitionen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. [BEVEN & GERMANN 1980; GERMANN 1981; BEVEN & GERMANN 1982]; [CHEN & WAGENET 1992], [ZUIDEMA 1985], [BRONSTERT 1994], [BRONSTERT 2005a]).

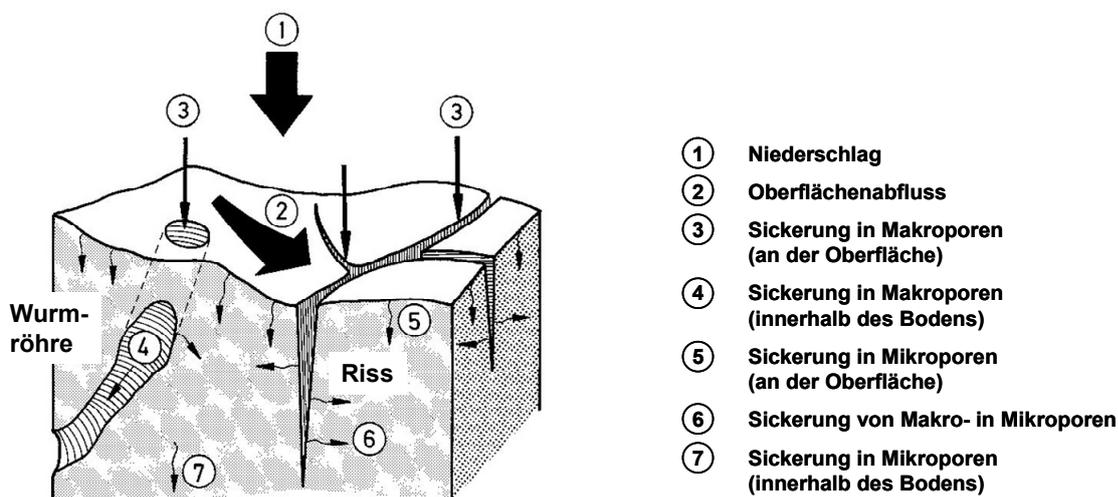


Abbildung 3: Abflussbildungsprozesse der lokalen Skala [GERMANN 1981]

Den Prozessen auf Standortebene schließen sich sowohl zeitlich als auch räumlich die Prozesse auf der Hangskala an (siehe Abbildung 5). Die Raumeinheiten dieser Skala werden auch als Hydrotope oder Elementarflächen bezeichnet und haben nach [BECKER 1986] eine Größenordnung von wenigen Hektar. Auf dieser Maßstabebene werden die lateralen Fließprozesse beschrieben. Diese Prozesse werden von der Heterogenität der Standorteigenschaften und der Topographie bestimmt. Die Variabilität der Einflussfaktoren

führt dazu, dass die verschiedenen Abflusskomponenten nicht voneinander getrennt ablaufen sondern sich stark gegenseitig beeinflussen oder ineinander übergehen.

[DUNNE 1978] unterscheidet zwei Formen des Oberflächenabflusses:

- Es entsteht Oberflächenabfluss, wenn die aktuelle Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Oberbodens übertrifft. Dieser Prozess wird als Infiltrationsüberschuss oder Horton'scher Oberflächenabfluss [HORTON 1933] bezeichnet. Der Abflussprozess entspricht der klassischen Modellvorstellung der Abflussbildung. [MERZ & BRONSTERT 2005] und [DUNNE 1978] weisen aber darauf hin, dass auf bewachsenen Flächen in humiden Gebieten Horton'scher Oberflächenabfluss sehr selten zu beobachten ist, da die Niederschlagskapazität die Summe aus Infiltrationskapazität der Matrix und der Makroporen nicht erreicht [BURT 1987]. Nichtsdestotrotz kann der Horton'sche Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss, der gut an seiner sehr schnellen Reaktionszeit zu identifizieren ist, einen signifikanten Abflussanteil beitragen, wenn zumeist durch anthropogenen Einfluss, Verschlammungen, Bodenverdichtungen oder Versiegelungen die Infiltrationskapazität eingeschränkt ist.
- Die zweite Form des Oberflächenabflusses unversiegelter Flächen wird als Sättigungsoberflächenabfluss (oder Oberflächenabfluss infolge Sättigungsüberschuss oder einfach Sättigungsabfluss) bezeichnet ([BRONSTERT 1994], [UHLENBROOK 2005], [GUTKNECHT 1996]). Dieser Abfluss setzt sich zusammen aus Niederschlag, der auf gesättigte Böden fällt (Direktniederschlag) und dem so genannten „return flow“ [MUSGRAVE & HOLTAN 1964], der sich aus bereits infiltriertem Wasser bildet, das nach kurzem lateralen Abfluss wieder aus der Erdoberfläche austritt. [DUNNE 1978] bezeichnet diese Form der Abflussbildung als den dominierenden Prozess in humiden Gebieten. Aus diesem Grund wird auch von „Dunneschem Oberflächenabfluss“ gesprochen. Nach [UHLENBROOK 2005] ist Sättigungsabfluss insbesondere bei konkaven Hangprofilen und ausgedehnten Talböden von Bedeutung.

Neben dem Oberflächenabflusses nennt [DUNNE 1978] den Zwischenabfluss (Interflow, hypodermischer Abfluss oder subsurface runoff) als weitere Hochwasser bildende Abflusskomponente. [HEWLETT & NUTTER 1970] in [DUNNE 1978] fassen das Zusammenspiel zwischen Oberflächenabfluss infolge von Sättigungsüberschuss und Zwischenabfluss in dem Konzept der „Variablen Beitragsflächen“ (Variable source area concept) zusammen (siehe Abbildung 4), in dem der Hortonabfluss nur am Rande vorkommt. Verschiedene Modellansätze folgen der Prozessvorstellung von DUNNE und berücksichtigen diesen Abflussbildungsprozess als einzige Oberflächenabflusskomponente (TOPMODEL von [BEVEN et al. 1984], [BEVEN et al. 1995] – Modellansatz des Topografischen Indices in [BEVEN & KIRKBY 1979]).

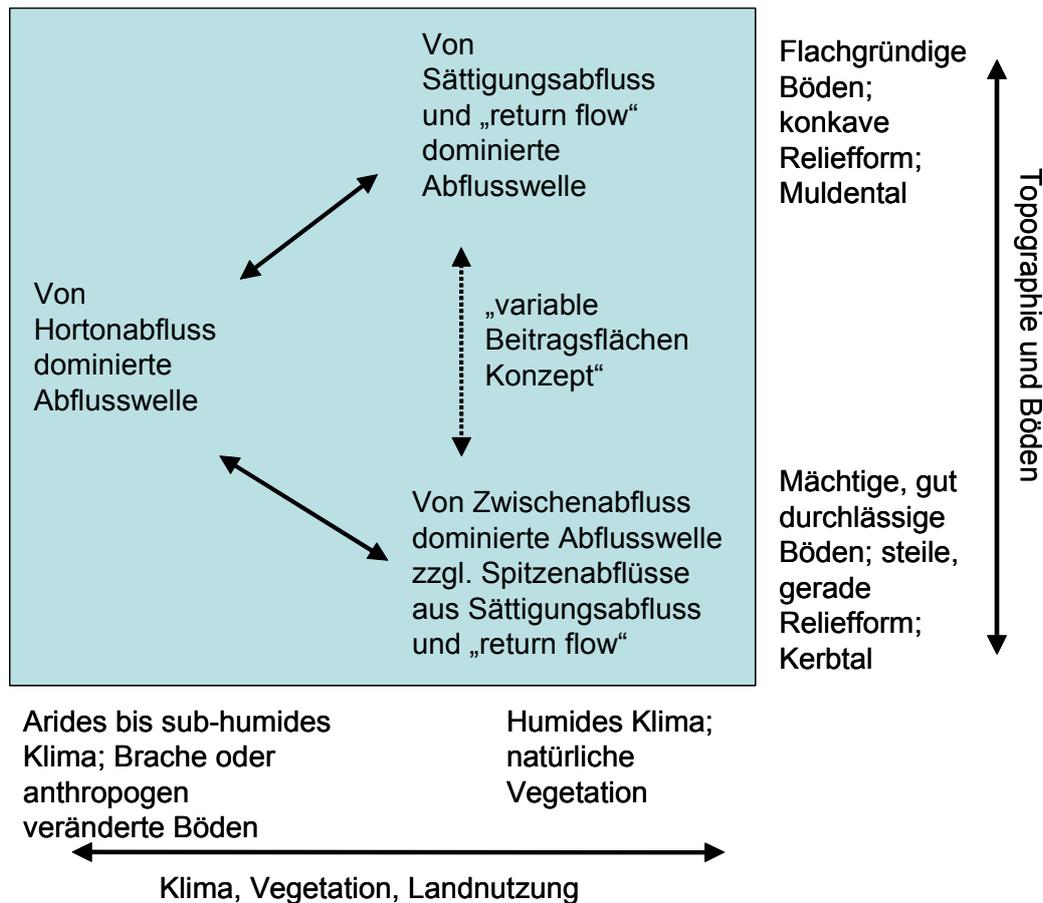


Abbildung 4: Abflussbildungsprozesse in der Hangskala und ihre Einflussgrößen (nach [DUNNE 1978])

[RODE & WENK 2005] untergliedern den Zwischenabfluss in den langsamen Interflow (Matrixinterflow) und den schnellen Interflow.

- Der langsame Interflow ist Teil des unterirdischen Abflusses. Es stammt aus vorfluterfernen Bereichen und nutzt die Bodenmatrix als Fließweg. Die Verzögerung dieses Abflussprozesses ist aufgrund der kürzeren Wege geringer als beim Grundwasser (oder Basisabfluss). Trotzdem ist die Retention so groß, dass langsamer Interflow kaum zur Hochwasserbildung beitragen kann.
- Der schnelle Interflow dagegen kann zum prägenden Abflussprozess bei der Direktabflussbildung werden [SCHWARZE 2005]. Der schnelle Interflow tritt in nichtkapillaren hangparallelen (preferentiellen oder diffusen) Fließwegen auf [ZUIDEMA 1985], [DEMUTH & HILTPOLD 1993]. [PESCHKE et al. 1999a] nennen als Einflussfaktoren die Schichtung des Bodens (geschichtet Böden mit Stauhorizonten), die Hangneigung und die Gewässernähe. Bevorzugt werden schnelle Interflowprozesse in Mittelgebirgslagen mit flachgründigen Böden beobachtet (siehe Abbildung 4).

Seit den sechziger Jahren wurden zahlreiche Felduntersuchungen zum Prozessverständnis und der Quantifizierung der Abflüsse auf der Hangskala durchgeführt. [PEARCE et al. 1986], [ANDERSON & BURT 1990] und [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997] geben einen Überblick über die Literatur. Nahezu alle genannten Studien leiten ihre Ergebnisse aus Ganglinienseparationen mit Hilfe von natürlichen Tracern ab. Um den teilweise dominierenden Anteil von Vorereigniswasser (oder „altem Wasser“) in der Hochwasserwelle erklären zu können wurden von [BUTTLE 1994] und [UHLENBROOK 1999] neben dem schnellen Makroporenfluss Prozesse wie Groundwater ridging und Piston-Flow (oder translatory flow [HEWLETT & HIBBERT 1967]) mitbetrachtet. Das Groundwater ridging (also

das kurzfristige Entstehen von „Grundwasserbergen“) hat insbesondere in gewässernahen Bereichen während Schneeschmelzereignissen Auswirkungen auf Hochwasserereignisse. Der Piston-Flow tritt nach Angaben von [ESHLEMAN et al. 1993] vor allem in kleinen Einzugsgebieten mit mächtigen Grundwasserleitern und hohen Flurabständen auf. Unter diesen Bedingungen erfolgt ein schneller Grundwasseranstieg und das „alte Wasser“ wird vergleichsweise schnell in die mächtige gesättigte Bodenmatrix in Richtung Gewässer „gedrückt“.

[ANDERSON & BURT 1990] stellten anhand von Dreiecksdiagrammen anschaulich dar, wie sich die Einflussgrößen Bodenmächtigkeit, hydraulische Leitfähigkeit, Vegetation und Hangprofil auf schnelle Abflussprozesse (Hortonabfluss, Sättigungsabfluss und schneller Interflow) auswirken. Sie kommen dabei zu vergleichbaren Einschätzungen wie [DUNNE 1978] (siehe Abbildung 4).

Es bleibt festzuhalten, dass bestimmte Gebietseigenschaften zu verstärktem Auftreten von Sättigungsabfluss sowie unterirdischen Fließprozessen führen. Allerdings wird mehrfach in der Literatur hervorgehoben, dass eine Quantifizierung oft schwierig und nur indirekt möglich ist ([UHLENBROOK 2005], [KIRNBAUER & STEIDL 1995], [KIRNBAUER et al. 1996], [PESCHKE et al. 1999c], [PESCHKE et al. 1999a]). Des Weiteren fällt beim Studium der Berichte zu Traceruntersuchungen auf, dass häufig sehr kleine und sehr steile Untersuchungsgebiete mit geringmächtigen, durchlässigen Böden beobachtet wurden, so dass die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf größere Einzugsgebiete mit flachen Einzugsgebietenbereichen nicht unproblematisch erscheint ([PEARCE et al. 1986] 34° mittlere Hangneigung, Aeo < 4 ha, [UHLENBROOK 1999] und [MEHLHORN & LEIBUNDGUT 1999] 17,5° mittlere Hangneigung Aeo = 40 km², [KREIN 2000] Aeo = 3 bzw. 35 km²).

Auch wenn die Ganglinienseparation vielleicht das einzige verlässliche Instrument zur Verbesserung des Prozessverständnisses darstellt, warnen [ANDERSON & BURT 1990] und [UHLENBROOK 1999] davor, die Prozesse in und auf den Hängen allzu sehr als unabhängig voneinander ablaufende Fließvorgänge zu interpretieren. Vielmehr sind diese Prozesse in der Realität eng miteinander verwoben und dies zudem mit hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität.

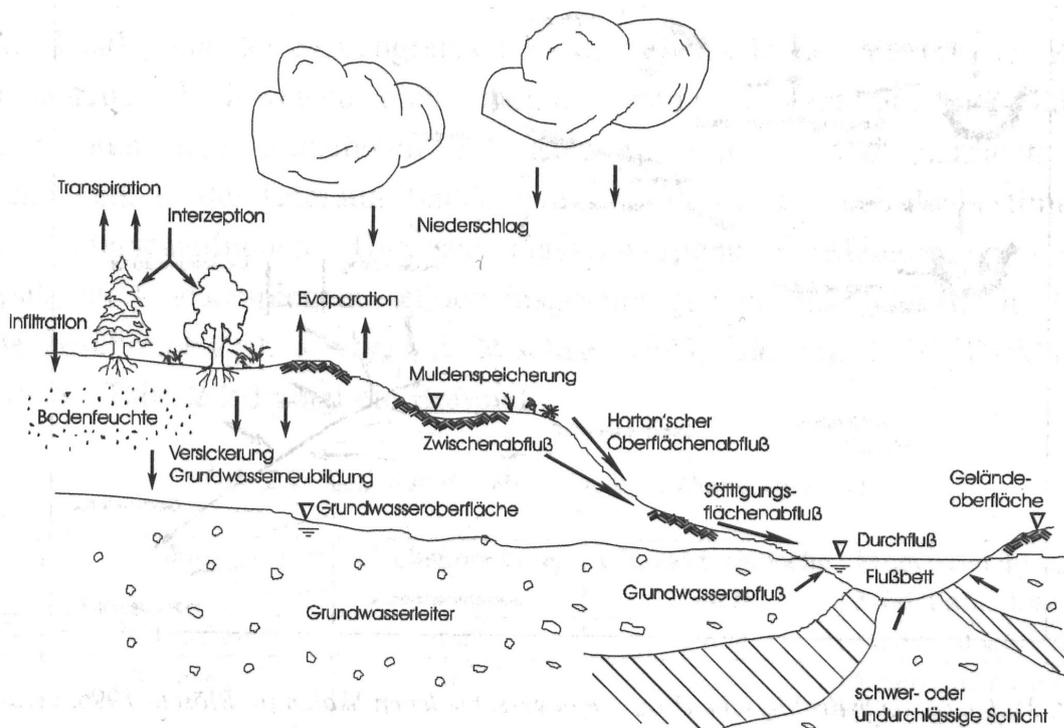


Abbildung 5: Wasserbilanzgrößen auf der Hang-Skala (aus [ETZENBERG 1998] nach [DYCK & PESCHKE 1995])

Der Hangskala schließt sich nach der Einteilung von [BECKER 1986] die Einzugsgebietsskala an. Auf dieser Zeit- und Raumskala kommen zu den oberflächennahen Abflussprozessen die Prozesse im Grundwasserleiter hinzu. Das Grundwasser kann maßgeblich zur Entstehung von Hochwasser beitragen (siehe u.a. [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997], [KREIN 2000], [WITTENBERG et al. 2005]).

Ein gravierender Unterschied zu den untergeordneten Prozessebenen ist, dass die Bedeutung der zeitlichen und räumlichen Variabilität der verschiedenen Einflussgrößen zunimmt (siehe Kapitel 2.1). Dies gilt insbesondere für den Niederschlag und die Bodenfeuchte. Auf der Einzugsgebietsebene setzt sich der Abflusskonzentrationsprozess fort, der auf der Hangskala begonnen hat. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die Abflussbildung durch anthropogene Maßnahmen beeinflusst wird. [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997] verweisen auf den Einfluss von Gewässerausbau und Wegenetzen, die die Konzentration des Abflusses beschleunigen. Darüber hinaus werden auf der Einzugsgebietsebene die hydraulischen Prozesse des Gewässersystems immer bedeutender und die Gebietseigenschaften treten dahinter zurück [BEVEN 1991] (siehe Kapitel 2.1).

2.3 Einfluss der konventionellen Bewirtschaftung auf die Abflussbildung

Die Konzentration auf die Siedlungsgebiete und die Ackerflächen (siehe Kapitel 1.2) setzt voraus, dass diese Bereiche der Landschaft einen signifikanten Anteil an der Hochwasserentstehung bzw. -verschärfung haben. Im Folgenden soll dargestellt werden, wie die Bedeutung dieser Landnutzungen auf das Hochwassergeschehen eingeschätzt werden muss.

2.3.1 Einfluss der konventionellen Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf die Hochwasserentstehung

2.3.1.1 Urbanisierung

Die Flächenversiegelung hat seit den 50er Jahren massiv zugenommen. Bestehende Siedlungsgebiete werden verdichtet und gleichzeitig Außenbereiche immer stärker ausgedehnt. Diese Entwicklung ist nicht nur weltweit z. B. in den so genannten Megacities ein Problem, sondern auch in Deutschland zu beobachten. Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland 1997 noch 11,7 % wird bis 2010 ein Anstieg auf 13,4 % erwartet [BBR 2001]. Es kann davon ausgegangen werden, dass von den derzeit 4,6 Mio. Hektar (12,8%) Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland ungefähr die Hälfte, d.h. ca. 2,3 Mio. Hektar (6,4 %), versiegelt ist und davon wiederum ca. 50% überbaut ist [UBA 2004].

Auch wenn sich der Anstieg der Urbanisierung leicht abgeschwächt hat, beträgt der durchschnittliche Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland ca. 93 Hektar pro Tag. Dabei entfällt der größte Anteil mit rund 80 % auf Siedlungserweiterungen. Nur ca. 20% sind auf neue Verkehrsflächen zurückzuführen. Da knapp die Hälfte des Wachstums der Verkehrsflächen auf den Bau von Erschließungsstraßen für neue Siedlungsgebiete zurückzuführen ist, verursacht das Wachstum der Siedlungsflächen direkt oder indirekt rund 90 Prozent der gesamten Flächeninanspruchnahme [UBA 2004].

Dieses Ausmaß der Urbanisierung führt zwangsläufig zu einer Änderung des Wasserhaushaltes. Die (Teil-)Versiegelung einer Fläche bewirkt, dass bei Niederschlägen höhere Oberflächenabflüsse entstehen, sowohl hinsichtlich des Abflussvolumens als auch bezüglich der Abflussspitzen. Gleichzeitig werden Grundwasserneubildung und Verdunstung reduziert (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Veränderung des Wasserhaushaltes durch Urbanisierung [US-EPA 2005]

Auch wenn seitens der Politik Einigkeit in dem Ziel besteht, den Flächenverbrauch in Deutschland deutlich auf 30 ha pro Tag im Jahr 2020 [BBR 2001] zu reduzieren, so wird der Anteil der versiegelten Fläche in Deutschland dennoch weiter ansteigen. Selbstverständlich müssen auch diese zusätzlichen Siedlungs- und Verkehrsflächen ordnungsgemäß entwässert werden.

2.3.1.2 Konventionelle Regenwasserableitung

Bislang wurde das auf Siedlungs- und Verkehrsfläche anfallende Regenwasser über ein Kanalnetz möglichst schnell und vollständig „entsorgt“. Die hydrologischen Folgen dieser Praxis sind in der Vergangenheit in einer Reihe von Untersuchungen beschrieben worden. Im Folgenden soll eine Auswahl dieser Quellen kurz genannt werden.

[HARMS 1986] nennt die generellen Auswirkungen der Versiegelung und den damit einhergehenden Ausbau der Entwässerungssysteme (siehe auch [BRONSTERT et al. 2005] und Abbildung 7):

- Erhöhung des Scheitelabflusses infolge der geringen Verzögerung und Speicherung auf versiegelten Flächen. [BRONSTERT et al. 2005] erwähnen, dass auch Kanalnetze eine Rückhaltefunktion besitzen, dass diese jedoch bei größeren oder lang anhaltenden Niederschlägen schnell erschöpft ist.
- Vergrößerung des Abflussvolumens infolge fehlenden Bewuchs- oder Interzeptionsspeichers sowie dem Verschließen des Bodenspeichers (siehe auch [KLEEBERG & ROTHER 1996]).

- Zeitliche Vorverlagerung der Wellenscheitel aufgrund beschleunigter Abflusskonzentrationsprozesse an der versiegelten Oberfläche und sehr schnellem Abflusstransport im Kanalnetz. [VISCHER 1993] merkt an, dass die Versiegelung nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung des Scheitelabflusses führen muss (siehe auch [KOEHLER 1992], [BRONSTERT 2003]).
- Der Abfluss wird zu einem Großteil aus direkt abfließendem Ereigniswasser gespeist. Andere Abflusskomponenten insbesondere unterirdische Fließprozesse verlieren an Bedeutung (siehe [BUTTLE 1994]).

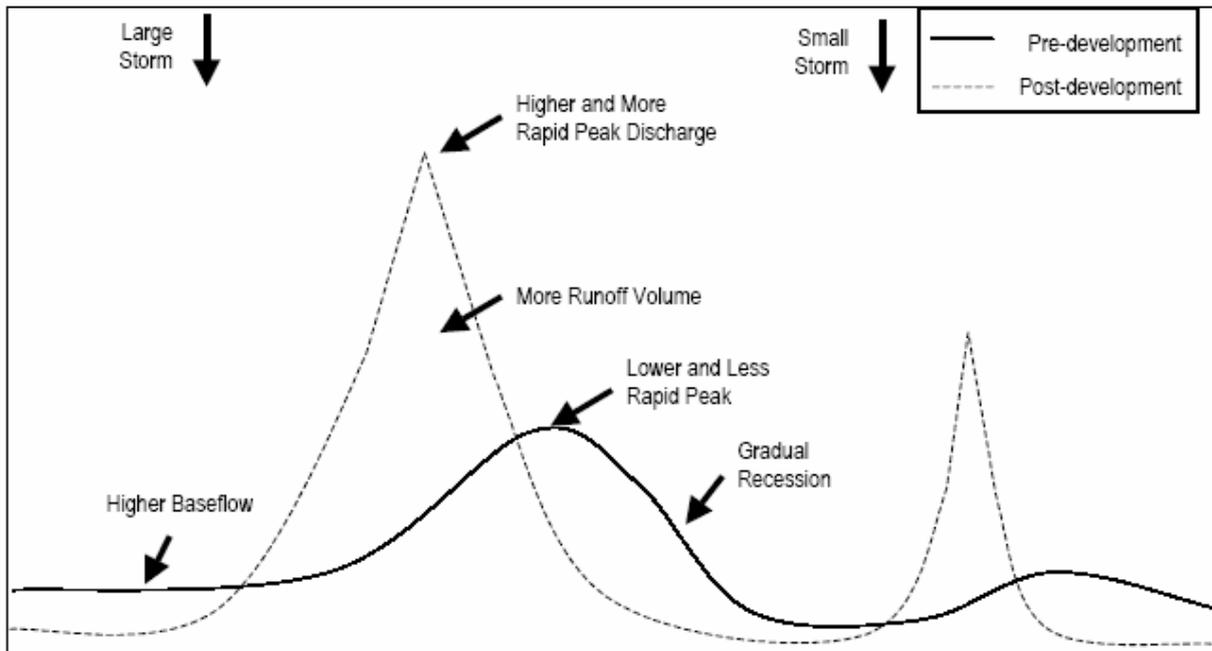


Abbildung 7: Veränderung des Abflussverhaltens durch Urbanisierung (schematisch) [US-EPA 2005]

Die Auswertung von Pegelaufzeichnungen bestätigen genannte Auswirkungen: An dem Fluss Panke (A_{e0} ca. 100 km²), die den nordöstlichen Teil des Berliner Stadtgebietes entwässert, wurden Wasserstandsänderungen von 2,30 m in 15 Minuten beobachtet [WASSMANN et al. 1997]. An der Emscher ist eine Zunahme der Hochwasserabflussspitzen infolge von Versiegelung und Regenwasserableitung erkennbar ([BOLD & SPENGLER 2006], [BECKER et al. 2002]). [NIRUPAMA & SIMONOVIC 2004] kommen für das Einzugsgebiet des Upper Thames River (Ontario, Kanada, 3482 km²) zu dem Schluss, dass sich aufgrund der Zunahme der Versiegelung von 18% in 1970 auf 35,6% in 2000 die Hochwasserabflüsse deutlich erhöht haben. [KOEHLER 1992] hat mit Hilfe von Modellrechnungen (Modell FDMOD) die Auswirkung der Versiegelung (12,9 % Siedlungs- und Verkehrsflächen - Stand 1985) im Einzugsgebiet des Oberrheins untersucht und kommt zu dem Ergebnis, dass sich je nach Niederschlagscharakteristik die Scheitelabflüsse gegenüber des „natürlichen Zustands“ um 8 -12% erhöht haben (siehe auch [LAWA 2000]). KOEHLER weist darauf hin, dass die Scheiteländerungen bei kleinen und mittleren Niederschlagsereignissen besonders groß sind. Des Weiteren bestätigen seine Berechnungsergebnisse, dass mit der Größe des Einzugsgebietes die Landnutzungsänderung geringeren Einfluss auf die Hochwasserabflüsse hat (vgl. Kapitel 2.1). [KLEEBERG & ROTHER 1996] geben an, dass die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen am Mittelrhein seit 1950 eine Erhöhung der Hochwasserstände um 15 – 20 cm bewirkt. Die ATV-DVWK-Arbeitsgruppe „Hochwasser“ gibt in ihrem Bericht zur Ursache-Wirkungsbeziehung von Hochwasserereignissen an, dass eine Erhöhung der Siedlungsflächen zulasten des Waldanteils eine Erhöhung der Scheitelabflüsse um 6 bis 20 % hervorruft [ATV-DVWK 2003].

Weitere Angaben zum Einfluss der Bebauung auf die Abflüsse in Gewässern können den Arbeiten von [WITTENBERG 1974], [SARTOR 1998], [HERZHOFF 1998], [SARTOR 2001] oder [BRONSTERT et al. 1999] entnommen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der negative Effekt der Urbanisierung in kleineren Einzugsgebieten mit hohem Siedlungsanteil in jedem Fall zu einer Erhöhung der Hochwasserabflussspitzen führt.

Ob Versiegelung und Regenwasserableitung auch einen relevanten Einfluss auf die Hochwasserabflüsse in größeren Einzugsgebieten wie z.B. dem Rheineinzugsgebiet haben wird dagegen nach wie vor kontrovers diskutiert. Durch Auswertungen von Pegelaufzeichnungen können die Effekte der Urbanisierung nicht eindeutig ermittelt werden, selbst wenn eine generelle Zunahme der Abflüsse festgestellt werden sollte. Zu viele Effekte wie z.B. Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse, Bau von Speichern, Begradigungen, etc. kommen als Erklärung in Betracht und können durch statistische Analysen alleine nicht separiert werden. Insofern wird ein messtechnischer Nachweis nicht zu erbringen sein.

Der Arbeitsbericht der DWA Arbeitsgruppe „Dezentraler Hochwasserschutz“ wertet eine Reihe von Modellrechnungen aus, die in den letzten Jahren zu dieser Fragestellung durchgeführt wurden [DWA 2006]. Die Arbeitsgruppe kommt wie [BRONSTERT et al. 2005] zu dem Schluss, dass bislang zu wenige quantitative Untersuchungen zu dieser Fragestellung vorliegen.

Es kann festgehalten werden, dass folgende Gegebenheiten die Abflussverschärfung beeinflussen (siehe [VERWORN & HARMS 1984]):

- Größe der Siedlungsflächen im Verhältnis zum Gesamtgebiet
- Anteil der undurchlässigen oder überbauten Flächen in den Siedlungsgebieten
- Boden- und geohydrologische Verhältnisse (Abflussbereitschaft des Einzugsgebietes)
- Lage der Siedlungsgebiete im Einzugsgebiet
- Typ des Niederschlagsereignisses, Niederschlagsverteilung und Jährlichkeit

Die Aufzählung macht deutlich, dass die Wirkung der Urbanisierung nicht alleine aus dem Flächenanteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen abgeleitet werden kann. Aus den genannten Einflussgrößen ergibt sich vielmehr die Notwendigkeit, jedes Einzugsgebiet mit seinen spezifischen Merkmalen separat zu betrachten.

Bezogen auf das Abflussvolumen zeigen einfache Überlegungen zur Wasserbilanz, dass die Wirkung von versiegelten Flächen auch deutlich über den Flächenanteil hinausgehen kann. Versiegelte Flächen weisen während Perioden mit Hochwasser erzeugenden Niederschlägen Abflussbeiwerte von nahezu 100% auf – unabhängig von der Niederschlagsintensität (vgl. Abbildung 63 - Abbildung 65). Mittlere Abflussbeiwerte von seltenen Hochwasserereignissen in großen Einzugsgebieten liegen dagegen meist in der Größenordnung von 50% [ENGEL 1999]. Der Anteil der Abflüsse von versiegelten Flächen an einer Hochwasserwelle liegt damit in der Regel fast doppelt so hoch wie der Flächenanteil. Bei einem mittleren Versiegelungsgrad in Deutschland von 6,5 % wären dies 12,9 % des Abflussvolumens [DWA 2006].

Mit Blick auf Maßnahmen zur Abminderung des Einflusses der Urbanisierung weisen [BRONSTERT 2005b] wie auch die [DWA 2006] darauf hin, dass nur die hydrologischen Effekte beeinflusst werden können, die zuvor durch die Versiegelung und ungedrosselte Ableitung in unerwünschter Weise entstanden sind. Dabei wird vereinfachend und fälschlicherweise davon ausgegangen, dass die ins Auge gefassten Bewirtschaftungsmaßnahmen den natürlichen Zustand wiederherstellen. Dieser Gedanke wird in der Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit wieder aufgegriffen (siehe Kapitel 10.3).

Weitere Nachteile der direkten, ungedrosselten Ableitung, unabhängig von ihrer Hochwasser verschärfenden Wirkung liegen darin, dass das Niederschlagswasser dem natürlichen Wasserkreislauf verloren geht. Groß dimensionierte Kanäle sind nötig, um für wenige

Stunden im Jahr das Wasser eines starken Regens ableiten zu können. Beim Mischsystem werden die abgeleiteten Wassermengen teilweise in Rückhalte- und Überlaufbecken zwischengespeichert. Diese Beckenvolumina sind jedoch vielen Niederschlagsereignissen nicht gewachsen, und so werden regelmäßig große Abflussspitzen ungereinigten Mischwassers in die Gewässer geleitet. Große Mengen mehr oder weniger verschmutzten Regenwassers senken den Wirkungsgrad der Kläranlagen. Beim Trennsystem werden durch zwei Kanalsysteme die Abwasserströme nach Schmutzwasser und Regenwasser getrennt abgeleitet. Allerdings kann das Regenwasser nicht mehr verdunsten oder versickern, sondern wird mit seinen Inhaltsstoffen von Dach- und Straßenflächen unmittelbar in Bäche und Flüsse eingeleitet [SOMMER 2007].

Unabhängig von seiner Bedeutung für das Hochwassergeschehen kann festgehalten werden, dass das Prinzip, Niederschlagswasser so schnell wie möglich aus bebauten Gebieten abzuleiten, aus wasserwirtschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Gründen zunehmend in Frage zu stellen ist. Der Anschluss versiegelter Flächen an die Kanalisation sollte daher auch in besiedelten Bereichen nur auf die Fälle beschränkt bleiben, in denen eine stärkere Verschmutzung des Niederschlagswassers oder fehlende Bewirtschaftungsmöglichkeiten es unvermeidbar machen.

2.3.2 Einfluss der konventionellen Bodenbearbeitung auf Ackerflächen auf die Hochwasserentstehung

Bereits in der Einleitung (Kapitel 1.1) wurde darauf hingewiesen, dass durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion die Abflussbereitschaft der landwirtschaftlichen Nutzflächen insbesondere der Ackerflächen zugenommen hat (siehe hierzu [VAN DER PLOEG et al. 2001] und [ZIMMERLING 2003]). Diese Veränderung des Abflussverhaltens ist von besonderer Bedeutung, da Ackerland mit durchschnittlich ca. 35 % die dominierende Landnutzung in Deutschland darstellt [HAD 1999] – vgl. Abbildung 18). [AUERSWALD 2002] stellt unter Berücksichtigung der Bodennutzungsanteile dar, dass Getreide- und Hackfrüchteleflächen die Hauptquellen für den gesamten Oberflächenabfluss in Deutschland sind.

Im Mittelpunkt der intensiven Landwirtschaft steht in dieser Arbeit die konventionelle Bodenbearbeitung mit dem Pflug, die bis heute in den meisten Teilen der Landwirtschaft das gängige Verfahren darstellt.

Wesentliches Kennzeichen der Bodenbearbeitung mit dem Pflug (im Folgenden konventionelle Bodenbearbeitung genannte) ist die Lockerung und Wendung des Bodens auf Krumentiefe (bis 30 cm Bodentiefe). Dadurch wird die Aussaat einer Kultur vorbereitet bzw. nach deren Ernte für die Folgefrucht günstige Aussaat- und Keimbedingungen in Form eines feinkrümeligen Saatbetts geschaffen. Ziel dieser Eingriffe in das Bodengefüge ist es auch, Wildpflanzen bzw. „Unkräuter“ zu beseitigen, die mit den Kulturpflanzen um Wasser, Nährstoffe und Licht konkurrieren. Neben der damit verbundenen Nährstoffmobilisierung werden beim Pflügen organische Reststoffe und Unkraut in den Boden eingearbeitet. Pflugarbeit hinterlässt eine reststofffreie, vegetationslose Ackeroberfläche als Voraussetzung für die störungsfreie Aussaat der Folgefrucht mit herkömmlicher Drilltechnik ([KTBL 1998] - siehe auch Abbildung 59).

Neben dem Vorteil der weitgehend störungsfreien Bestellung von Feldfrüchten ist das Pflügen jedoch auch mit ökologischen Problemen verbunden. An erster Stelle, ist hier die durch die Bodenbearbeitung mit dem Pflug erheblich gesteigerte Bodenerosionsgefährdung durch Wasser und Wind zu nennen. Die Oberflächen gepflügter Böden sind nach der Saatbettbereitung bis zum Aufwuchs einer Pflanzendecke schutzlos den Einwirkungen von Wind und Wasser ausgesetzt. So zerstören auf der Bodenoberfläche aufschlagende Wassertropfen die Bodenaggregate. Dies hat die infiltrationshemmende Verschlammung der Bodenoberfläche zur Folge. Auf verschlammten Böden kann nur noch sehr wenig Wasser versickern und fließt deshalb auf geneigten Ackerflächen hangabwärts, wobei es Bodenteilchen mitreißt. Hinzu kommt, dass die konventionelle Bodenbearbeitung das

Makroporensystem des Bodens, das sich durch Wurzeln, Regenwürmer und Risse im Boden auf natürlichem Wege ausbildet, regelmäßig zerstört wird.

[BEISECKER 1994] und [ROTH et al. 1995] beschreiben den Prozess der Verschlämmung der Bodenoberfläche und zeigen auf, welche Auswirkungen auf die Abflussbildung zu erwarten sind. Übereinstimmend wird dargestellt, dass die Verschlammungsneigung bei Böden mit hohem Schluffgehalt (z.B. Lößböden) besonders groß ist.

Der von [FELDWISCH et al. 2002] vorgestellte Überblick über die verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungen zeigt, dass die Bodenbearbeitung bei weitem nicht die einzige landwirtschaftliche Maßnahme ist, die Auswirkung auf die Abflussbildung bzw. Abflusskonzentration bei Starkniederschlägen hat (siehe auch [FELDWISCH 1999]).

[VAN DER PLOEG et al. 2001] führen neben den Arten der Bodenbearbeitung weitere Entwicklungen in der Landwirtschaft an, die eine Verringerung der Speicherfunktion der Landschaft zur Folge haben. Sie weisen darauf hin, dass die Anzahl leistungsstarker und damit schwererer Schlepper nach dem 2. Weltkrieg stetig gestiegen ist und die damit verbundenen Achslasten zu irreversiblen Verdichtungen der Böden führen kann. [HORN 1999] stellt heraus, dass durch die Belastung der Böden über die Eigenstabilität hinaus nicht nur ein Verlust von Porenvolumen und Infiltrationsfähigkeit sondern auch Ertragseinbußen einhergehen.

Die mit der Intensivierung der Landwirtschaft verbundene Flurbereinigung wird für ein beschleunigtes Abflussverhalten verantwortlich gemacht. [BRONSTERT et al. 1995] kommen im Rahmen ihrer Literaturrecherche zu dem Ergebnis, dass mit der wirksamen Abflusslänge die Fließgeschwindigkeit zunimmt, jedoch keine Erhöhung des Abflussvolumens festzustellen war. Vielmehr betonen sie den großen Einfluss der Dränagen sowie den landwirtschaftlichen Wegebau auf die Hochwassercharakteristik kleiner Einzugsgebiete. [VAN DER PLOEG & SIEKER 2000] beleuchten die in der Vergangenheit praktizierte Bemessung von Dränagen und vermuten, dass eine Extensivierung der Dränung die Hochwasserabflüsse verringern würde.

Auch wenn die Auswirkungen der Landwirtschaft auf das Hochwassergeschehen insbesondere auf der Einzugsgebietsskala noch unzureichend untersucht sind [BRONSTERT et al. 1995], weisen eine Reihe von Vorarbeiten auf dem Hangmaßstab darauf hin, dass die ackerbauliche Nutzung das Entstehen schneller Abflussprozesse befördert [AUERSWALD 2002]. Des Weiteren nimmt das Volumen der Abflusswelle zu, weil die konventionelle Bodenbearbeitung das potenzielle Speichervermögen der Böden, durch Verdichtung, Oberflächenverschlämmung oder Zerstörung von Makroporen reduziert.

Mit Blick auf die im Folgenden vorgestellten infiltrationsfördernden Maßnahmen in der Landwirtschaft ist zu beachten, dass das aktuelle Speichervermögen unter Ackerflächen von den Wassergehalten zu Beginn des Hochwasserereignisses abhängt. In [DWA 2006] sind beispielhaft die verfügbaren spezifischen Speichervolumina eines mitteltonigen Schluffs (Ut3) angegeben. Die Werte schwanken je nach Anfangsfeuchte zwischen 60.000 und 260.000 m³/km². Als Maximalwassergehalt wurde die Feldkapazität festgelegt, da höhere Wassergehalte nicht dauerhaft im Boden gespeichert werden können.

2.4 Untersuchungen zum Hochwasserschutz in der Fläche

Auf der Suche nach Literaturhinweisen und vorangegangenen Untersuchungen muss beachtet werden, dass der vorbeugende, flächenhafte Hochwasserschutz keinesfalls mit dem dezentralen Hochwasserschutz gleichzusetzen ist.

Die DWA-Arbeitsgruppe „Dezentraler Hochwasserschutz“ [DWA 2006] stellt klar, dass hierzu

- Maßnahmen zur Vermeidung des Oberflächenabflusses in der Fläche
- Maßnahmen zu Retention am Gewässer

- und Maßnahmen zum Rückhalt in kleinen Speicherräumen zählen [MEULENBERG et al. 2004].

Zur Wirkung, Verortung und Planung von so genannten Kleinspeichern kann auf eine große Zahl von Forschungsarbeit verwiesen werden. Hier muss insbesondere auf die Arbeiten von [RÖTTCHER & TÖNSMANN 1999] und [ASSMANN et al. 1999], [ASSMANN & GÜNDRA 1999], [ASSMANN 2001] hingewiesen werden.

Die Untersuchungen zu Maßnahmen in der Fläche teilen sich entsprechend den wichtigsten Landnutzungen in

- Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft
- Bewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten
- und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Forstflächen auf.

Vielfach ist in diesem Zusammenhang vom Einfluss der Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung auf das Hochwassergeschehen die Rede.

Eine viel beachtete Untersuchung und wichtige Grundlage für diese Arbeit ist das von BRONSTERT geleitete LAHoR-Projekt ([BRONSTERT 2003], [NIEHOFF 2001], [KATZENMAIER et al. 2001]).

Im LAHoR-Projekt wurden die Landnutzungsänderungen, Versiegelung, Flächenstilllegung, Aufforstung, Sturmschäden, konservierende Bodenbearbeitung (Mulchsaat) und dezentrale Regenwasserbewirtschaftung (Niederschlagsversickerung) am Beispiel von drei Teileinzugsgebieten im Rheineinzugsgebiet untersucht.

BRONSTERT und NIEHOFF kommen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- a. Der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung ist bei konvektiven Niederschlägen (z.B. Gewitter) größer, als bei lang andauernden Niederschlägen (advektive Niederschläge).
- b. Je größer das Niederschlagsvolumen, desto geringer der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- c. Je trockener das Gebiet (Boden und Oberflächen), desto größer der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- d. Weder die Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses noch die Jährlichkeit der Niederschläge ist dazu geeignet, den Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung einzuschätzen. Dabei wird auf die räumliche Heterogenität der Gebietseigenschaften, der Vorfeuchte und der Niederschläge hingewiesen.
- e. In kleinen Einzugsgebieten können konvektive wie advektive Niederschläge zu Hochwassern führen. Dagegen werden Hochwasser in großen Einzugsgebieten von großräumigen und lang andauernden (advektiven) Niederschlägen teilweise in Kombination mit Schneeschmelze hervorgerufen.
- f. Katastrophale Hochwasser in großen Flüssen sind nicht zwangsläufig die Folge extremer Abflüsse in dessen Zuflüssen und den dazu gehörigen Teilgebieten, sondern können auch das Ergebnis ungünstiger Überlagerungen sein.
- g. Aus methodischer Sicht wird die große Bedeutung von Messdaten betont. Hiermit sind insbesondere räumlich hochaufgelöste physiographische Gebietsdaten, raum-zeitlich hochaufgelöste meteorologische Daten und Abflussdaten gemeint.

Trotz der getroffenen Aussagen warnt NIEHOFF vor Pauschalaussagen zur Wirkung von Maßnahmen in der Fläche und lehnt die generelle Schlussfolgerung, dass die Landnutzung auf große Hochwasser in großen Einzugsgebieten keinen Einfluss hat, ab.

Ein weiteres wichtiges Forschungsvorhaben, das sich u.a. mit Maßnahmen in der Fläche und dessen Wirkung auf das Hochwassergeschehen auseinander gesetzt hat, ist das DEFLOOD-Projekt unter der Leitung von [KRAHE et al. 2004].

Das DEFLOOD-Projekt hatte zum Ziel, eine Methodik zur Analyse des Einflusses dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen in großen Einzugsgebieten am Beispiel des Rheins zu entwickeln. Die Schlussfolgerungen dieses Projektes beziehen sich in erster Linie auf die Methodik zur Wirkungsanalyse dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen. Die generierten Berechnungsergebnisse erlauben es aber auch, Schlussfolgerungen zur Wirkung der Maßnahmen zu treffen.

Aus methodischer Sicht sind folgende Schlussfolgerungen hervorzuheben:

- a. Für die Darstellung der Wirkung lokaler und regionaler Maßnahmen ist eine Modellkette notwendig. Die eingesetzten Modelle müssen in ihrer Kompliziertheit den Prozessen der jeweiligen Maßstabsebenen entsprechen. Hierzu werden Vorschläge geeigneter Modelle gemacht.
- b. Es wird empfohlen standardisierte Niederschlagszenarien und Anfangsbedingungen zu wählen, um auf diese Weise für jedes Teilgebiet einen Referenzzustand zu generieren. Hierzu wurden verschiedene Verfahren zur statistischen und stochastischen Generierung von Referenzzuständen angewendet.
- c. Es wird ebenfalls betont, dass hydro-geomorphologische Daten für das Einzugsgebiet zur Verfügung stehen müssen.

Mit Blick auf die Wirkung dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen kommt das DEFLOOD-Projekt zu folgenden Aussagen:

- a. Eine wirkungsvolle Beeinflussung der Hochwasserentstehung durch dezentrale Hochwasserrückhaltemaßnahmen setzt eine großflächige Umsetzung dieser Maßnahmen im Einzugsgebiet voraus.
- b. Landnutzungsänderungen führen nur dort zu quantifizierbaren Abflussreduktionen, wo dominante schnelle Abflussprozesse in langsame Abflussprozesse überführt werden können. Aus diesem Grund ist es wichtig, über detaillierte Kenntnisse zur räumlichen Verteilung der verschiedenen Typen der Abflussbildung zu verfügen. Zur räumlich differenzierten Identifikation der dominanten Abflussprozesse wurde eine Methodik angewendet, die u.a. vom NAEF (ETH Zürich) entwickelt wurde (siehe Kapitel 6.1.1 und 6.2.1).
- c. Die Wirkung dezentraler Maßnahmen nimmt mit zunehmender Dauer der Niederschlagsereignisse und Größe des Hochwasserscheitels ab.
- d. Extreme Hochwasserereignisse können durch die ungünstige Überlagerung mäßiger Hochwasser aus den Nebengewässern verursacht werden. In großen Flusssystemen gewinnt die Überlagerung der Hochwasserscheitel gegenüber der Rückhaltung an Bedeutung.

Die Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf den Hochwasserabfluss wurde von [ZIMMERMAN 2005] untersucht (siehe auch [SIEKER et al. 2002a], [SIEKER 2006], [SIEKER et al. 2005a] oder [SIEKER et al. 2004] – vgl. Kapitel 7.1.1). [ZIMMERMAN 2005] kommt zu dem Ergebnis, dass die Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen auf das Hochwassergeschehen nicht direkt von der Größe des Einzugsgebietes und der Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses abhängt. Basierend auf Langzeitsimulationen für das Einzugsgebiet der Glems kommt ZIMMERMAN zu dem Schluss, dass die ungleichmäßige Überregnung und die räumliche Verteilung der Maßnahmen von entscheidender Bedeutung für die Beeinflussung des Hochwasserabflusses sind.

Parallel zu dieser Arbeit wird unter der Leitung von SCHÜLER im WaReLa-Projekt (EU-INTERREG-III b-NWE-Programm) Fragen des Wasserrückhalts durch angepasste

Landnutzung nachgegangen [SCHÜLER 2006]. Neben Landnutzungsänderungen auf Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie in der Land- und Forstwirtschaft bezieht das Projekt auch Kleinrückhalte an Bächen und in Auen in ihre Szenarien mit ein. Zur Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung, Landschaftsstrukturen und Geofaktoren auf die Hochwasserentstehung wurden kleine bis mittlere Einzugsgebiete im Saarland, in Rheinland-Pfalz sowie in Luxemburg ausgewählt. Ein Ziel des Projektes ist der Aufbau eines Entscheidungssystems für Hochwasservorsorge- und Hochwasserrückhaltepotenziale in der Raumplanung. Von besonderem Interesse ist, dass auch in diesem Forschungsvorhaben davon ausgegangen wird, dass ein Bewirtschaftungskonzept die möglichen Wasserrückhaltepotenziale des Bodens berücksichtigen muss. Zur flächendifferenzierten Herleitung der so genannten Abflusssensitivität (Wasserrückhaltepotenzial – siehe Kapitel 6) kommt ein Expertensystem zum Einsatz, das wiederum auf Arbeiten von NAEF und SCHERRER basiert (siehe hat [NAEF 2000; WEILER et al. 2000; NAEF et al. 2002; SCHERRER & NAEF 2003; SCHMOCKER-FACKEL et al. 2006]).

Nicht zuletzt soll an dieser Stelle noch einmal darauf verwiesen werden, dass die vorliegende Arbeit im Rahmen von zwei von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekten entstanden ist. Das Projekt "Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße" wurde im Februar 2002 abgeschlossen [SIEKER et al. 2002b]. Der Abschlussbericht zum Nachfolgeprojekt „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen“ [SIEKER et al. 2007a] wurde 2007 fertig gestellt. Auf die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Forschungsprojekte soll hier nicht eingegangen werden, da sie zumindest teilweise Teil dieser Arbeit sind.

Eine Reihe weiterer Forschungsergebnisse und praktischer Umsetzungsbeispiele zu allen Bereichen des dezentralen Hochwasserschutzes ist in [DWA 2006] bzw. [RÖTTCHER et al. 2006; RÖTTCHER et al. 2007] zusammengetragen.

3 Einordnung des Themas

In Kapitel 1.2 wurden die Ziele der vorliegenden Arbeit formuliert. Ohne die dort genannten Punkte im Einzelnen noch einmal wiederholen zu wollen, soll nun nach erfolgter Darstellung der fachlichen Grundlagen und erster wissenschaftlicher Diskussion eine erweiterte Abgrenzung und Definition des gewählten Themas erfolgen.

3.1 Grundgedanke des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes

Der Ursprungsgedanke, der dieser Arbeit zugrunde liegt, ist, den Niederschlag dort zu bewirtschaften, wo er auf die Oberfläche fällt und ihn von dort aus in tiefere Bodenzonen oder über die Verdunstung an die Atmosphäre abzugeben. Da der Niederschlag ein diskontinuierlicher Prozess ist, der in seiner Intensität die Prozessgeschwindigkeiten der Versickerung und Verdunstung weit überschreitet sind Zwischenspeicher notwendig, die dazu beitragen können, die Prozesse des Wasserkreislaufes auf der Fläche zu verstetigen.

Ein Zwischenspeicher, der hierzu auf allen terrestrischen Standorten genutzt wird, ist der Boden [KLEEBERG & ROTHER 1996]. Eine weitere Festlegung dieser Arbeit ist es, insbesondere diesen Speicher durch Maßnahmen in der Fläche zu nutzen.

Die Konzentration auf Maßnahmen in der Fläche bedeutet eine nicht unerhebliche Einschränkung der Eingriffsmöglichkeiten auf den Prozess der Hochwasserentstehung. In Kapitel 2.2 wurde dargelegt, welche unterschiedlichen Abflussbildungsprozesse an der Entstehung von Abflüssen im Gewässer und speziell an der Hochwasserentstehung beteiligt sind. Die räumliche Festlegung auf die Landoberflächen als potenziellen Ort für Maßnahmen bedeutet, dass nur die in Kapitel 2.2 genannten Prozesse beeinflusst werden können, die von den Eigenschaften der Bodenoberflächen gesteuert werden [BRONSTERT 2005b].

Konkret sind dies die Abflussbildung infolge Infiltrationsüberschuss (Horton'scher Oberflächenabfluss) und im begrenzten Maße die Erschließung des Bodens als Zwischenspeicher. Andere in Kapitel 2.2 genannten Prozesse, wie der Sättigungsabfluss und der natürlich bedingte Zwischenabfluss sind von Standort- und Gebietsparametern abhängig, die das Abflussregime eines Einzugsgebietes prägen und vom Menschen durch seine Nutzung der Landoberfläche nicht veränderbar sind. Eine Ausnahme bilden Zwischenabflüsse, die durch anthropogene Nutzung und dadurch induzierte Bodenverdichtung entstanden sind. Dieser Abflussbildungsprozess kann, obwohl er nicht an der Oberfläche auftritt, durch veränderte Bewirtschaftung der Oberfläche beeinflusst werden [SCHRADER 1999], [ZIMMERLING 2003]. In jedem Fall bleibt es Aufgabe des Menschen die Standort- und Gebietsparameter zu analysieren, um die Potenziale der Landschaft zu erkennen und ggf. zu nutzen.

Aus dem gewählten Ansatz ergibt sich somit, dass die hier vorliegende Arbeit sich auf den Horton'schen Oberflächenabfluss bzw. auf die Vermeidung des Oberflächenabflusses infolge Infiltrationsüberschuss sowie die Erschließung der Bodenspeichers konzentriert.

Die Wirkung dieses Ansatzes zur Verminderung des Hochwasserabflusses ist somit zunächst von zwei grundsätzlichen Fragen bestimmt.

- Hat die schnelle Abflusskomponente infolge Horton'schen Oberflächenabflusses im betrachteten Einzugsgebiet einen signifikanten Einfluss auf die Hochwasserentstehung?
- Steht während eines Hochwassers in Teilen des Einzugsgebietes noch Bodenspeichervolumen zur Verfügung, das als Zwischenspeicher erschlossen werden könnte?

Die Annahmen, die als vorläufige Antworten auf diese Fragen dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden, bejahen diese Fragen und sind als Thesen 1) und 2) in Kapitel 1.2 bereits vorweggenommen worden.

Es wurde bereits in Kapitel 1.2 betont, dass in natürlichen Einzugsgebieten i.d.R. die Infiltrationskapazität der Böden in Kombination mit ihren Makroporen ausreicht, um die Niederschläge in humiden Gebieten aufzunehmen und somit keine Horton'scher Oberflächenabfluss auftritt. Von besonderer Bedeutung für den hier verfolgten Hochwasserminderungsansatz ist deshalb die Feststellung, dass dies nur dann Gültigkeit hat, wenn nicht anthropogene Veränderungen der Bodeneigenschaften oder die aktuelle Form der Bewirtschaftung die Infiltration hemmen oder sogar verhindern ([BRONSTERT 1994; BRONSTERT 2005a], [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997], [UHLENBROOK 1999], [MERZ & BÁRDOSSY 1998]). Hieraus ergibt sich die zwingende Festlegung auf die Siedlungsflächen und die Ackerflächen [AUERSWALD 2002]. Diese Landnutzungen müssen sich den Vorwurf gefallen lassen, dass sie weit über das natürliche Maß hinaus Horton'schen Oberflächenabfluss generieren, wenn sie auf konventionelle Weise bewirtschaftet werden (siehe Kapitel 2.3).

Es ist unbestritten, dass die Versiegelung von Siedlungsflächen zu einer Verschiebung der Abflussprozesse hin zu Horton'schem Oberflächenabfluss führt (siehe Kapitel 2.3.1). Gleiches gilt für verschlammungsanfällige, zur Bodenverdichtung neigende, ackerbaulich genutzte Flächen (siehe Kapitel 2.3.2). Ein eindeutiger Hinweis auf die Veränderung des Abflussregimes auf ackerbaulichen Flächen ist das Auftreten von Wassererosion (siehe Kapitel 7.1.2), die nur mit der Schleppekraft oberflächlich abfließenden Niederschlags einhergehen kann [FELDWISCH et al. 2002]. Mehr noch, die im Folgenden betrachteten Maßnahmen zur veränderten Bewirtschaftung (siehe Kapitel 7) haben ihre Entwicklung und teilweise beachtliche Verbreitung nicht zuletzt dem Wunsch zu verdanken, den negativen Folgen des verstärkten Horton'schen Oberflächenabfluss entgegenzuwirken. In Siedlungsgebieten soll durch die Umstellung auf dezentrale Regenwasserbewirtschaftung ein weiterer Ausbau der Kanalnetze vermieden werden, der nicht zuletzt aufgrund von hydraulischen Überlastungen notwendig wird. In der Landwirtschaft wird die konservierende Bodenbearbeitung angewendet, um den Boden besser vor Wassererosion zu schützen.

Das Umsetzungspotenzial des hier verfolgten Ansatzes zur Hochwasserverminderung liegt somit in der aktuellen Landnutzungsverteilung (siehe Kapitel 4.7), genauer gesagt in den Anteilen der konventionellen Bewirtschaftung im Ist-Zustand. Aus der konventionellen Bewirtschaftung ergeben sich der Oberflächenabfluss und der ungenutzte Bodenspeicher, der in Zukunft vermieden bzw. wieder genutzt werden sollte.

Nun müssen diese Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht zwangsläufig eine Entschärfung der Hochwasserentstehung mit sich bringen, da die Vermeidung des Horton'schen Oberflächenabflusses auch zu einem Verstärken anderer schneller Abflussprozesse führen kann. Aus dieser Überlegung ergibt sich die Aufgabe, die dominanten Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet zu identifizieren, bevor er als mögliche Fläche für die Umsetzung flächenhafter Hochwasserschutzmaßnahmen vorgeschlagen werden kann (siehe Kapitel 6).

Der aus dem Ursprungsgedanken entwickelte Ansatz geht damit einen Schritt weiter als vorangegangene Projekte, die sich mit dem vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz beschäftigen (siehe Kapitel 2.4). Aus der Analyse zu den relevanten Prozessen der Abflussbildung (im Ist-Zustand) wird im Allgemeinen die Schlussfolgerung gezogen, sich auf die Flächen mit schnellen Abflussreaktionen zu konzentrieren [MEULENBERG et al. 2004], [SCHÜLER 2006], da auf diesen Standorten durch geeignete Bewirtschaftungsänderung eine quantifizierbare Reduktion des Horton'schen Oberflächenabflusses erreicht werden kann. Diese Handlungsempfehlung greift jedoch zu kurz, weil sie das potenzielle Speichervermögen des Bodens im natürlichen Zustand nicht berücksichtigt. Im Extremfall wird dann aus dem Horton'schen Oberflächenabfluss ein etwas verzögerter aber immer noch rascher Zwischenabfluss. Die Wirkung einer veränderten Bewirtschaftung ergibt sich aus der Betrachtung der veränderten Prozesse und unter Beachtung des Wasserspeichervermögens [BRONSTERT 2005b].

3.2 Eigenschaften des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes

In Kapitel 2.4 wurde bereits darauf hingewiesen, dass vorbeugender, flächenhafter Hochwasserschutz ein Teil des dezentralen Hochwasserschutzes ist, mit diesem Begriff aber nicht gleichgesetzt werden kann.

Die Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes zeichnen sich im Allgemeinen dadurch aus [DWA 2006],

- dass die Eingriffe in den Naturhaushalt und das Abflussregime durch die Einzelmaßnahmen gering sind oder die natürlichen Verhältnisse zumindest teilweise wiederherstellen,
- dass die Wirkung der Einzelmaßnahme häufig klein ist aber bei flächenhafter Umsetzung ansteigt,
- dass die Einzelmaßnahmen vergleichsweise wenig Herstellungs- und Wartungsaufwand bzw. Kosten verursachen und schrittweise umgesetzt werden können.

Für den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz gilt darüber hinaus,

- dass er bereits die Hochwasserentstehung beeinflusst und nicht erst auf die ablaufende Welle im Gewässer Einfluss nimmt. Ziel ist es, den Niederschlag so lang wie möglich in der Landschaft zu halten,
- dass die Abflussfülle der Hochwasserwelle aufgrund der Versickerung und der erhöhten Evapotranspiration dauerhaft reduziert wird und erst mit dem Basisabfluss dem Gewässer teilweise zufließt. Sie bewirken somit eine tatsächliche Hochwasserreduktion und nicht „nur“ eine Scheitelreduktion zu Lasten einer verlängerten Einstaudauer des Gewässers,
- dass es sich um eine integrierte Form des Hochwasserschutzes handelt, dessen Umsetzung von Beteiligten verschiedener Fachdisziplinen übernommen werden muss (siehe auch [ASSMANN 2001]).

Für die Form des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes, wie er in dieser Arbeit betrachtet wird, gilt speziell,

- dass sie sich auf die Verminderung negativer anthropogener Einflüsse auf die Abflussbildung konzentriert und nicht die Beeinflussung des natürlichen Phänomens Hochwasser zum Ziel hat. Deshalb liegt der Schwerpunkt auf den Siedlungsgebieten und den Ackerflächen (siehe Kapitel 3.1).
- dass als Maximalziel der hier betrachteten Maßnahmen nicht die Rückführung zum „natürlichen Zustand“ definiert wird. Vielmehr soll untersucht werden, ob die betrachteten Maßnahmen in ihrer Hochwasser mindernden Wirkung das Abflussverhalten natürlicher Flächen übertreffen können. So könnte durch den intensiven Einfluss des Menschen auf die Landschaft aus dem momentanen Malus für die Hochwasserentstehung ein Bonus werden.

Die [LAWA 2003] hat in ihren Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz eine Hochwasserstrategie vorgestellt, die aus den Säulen Hochwasserflächenmanagement, Technischer Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge besteht. Dem Maßnahmenkatalog, der sich daraus ableiten lässt muss nichts hinzugefügt werden. Auch das hier vorgestellte Konzept des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes ist darin enthalten. In Kapitel 3.1 ist bereits deutlich geworden, welcher Teil des „Hochwasser-Flächenmanagements“ und welcher Teil des „Natürlichen Rückhaltes“ hier betrachtet werden.

Interessant und wichtig zu betonen ist, dass die drei Bausteine der empfohlenen Strategie in den Leitlinien von 1995 [LAWA 1995] noch als getrennte Strategien bezeichnet wurden. Es ist konsequent und richtig, das Nebeneinander der verschiedenen Maßnahmen zum Hochwasserschutz (auch verbal) aufzulösen. Auch wenn in dieser Arbeit nur ein Teil des

Hochwasserschutzes betrachtet wird, soll kein Zweifel daran bestehen, dass der hier betrachtete Baustein nicht als Allheilmittel verstanden wird oder als dieses verstanden werden soll. Diese Arbeit soll vielmehr dazu beitragen, die Wirkung einer veränderten Bewirtschaftung aufzuzeigen, Methoden zur gezielten Umsetzung flächenhafter Maßnahmen bereitzustellen und auf diese Weise die Grenzen und Möglichkeit dieser Form des Hochwasserschutzes (beispielhaft) zu verdeutlichen.

Natürliche Abflussbildungsprozesse wie Sättigungsflächenabfluss, Groundwater ridging, oder Piston flow (siehe Kapitel 2.2) sind Komponenten des Abflussregimes, denen sich das Gewässersystem anpassen muss. Wenn diesbezüglich Defizite vorliegen, beispielsweise durch die Einengung von Fließquerschnitten oder den Verlust von Überflutungsbereichen, so muss auch mit Hilfe dezentraler Maßnahmen ([RÖTTCHER & TÖNSMANN 1999] und [ASSMANN et al. 1999]) der Versuch unternommen werden, die negativen Auswirkung zu minimieren. Dieser Aspekt soll nur erwähnt werden, ist aber nicht Teil dieser Arbeit

Zusammenfassend sind für den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz, so wie er die in dieser Arbeit definiert ist, folgende Merkmale charakterisierend:

- Verstärkte Nutzung der ungesättigten Bodenzone als Hochwasserspeicher.
- Wirtschaftliche Erschließung des Bodens durch Änderung der Bewirtschaftung statt Landnutzungsänderung.

3.3 Wahl der Maßstabsebene und die Konsequenzen für die Methodik

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine auf beliebige Einzugsgebiete übertragbare Methodik zur einzugsgebietsweiten Implementierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zu entwickeln. Diese Zielsetzung, die in vielen wasserwirtschaftlichen Richtlinien (z.B. EU-Wasserrahmenrichtlinie) wieder zu finden ist, ist nicht dem Zeitgeist oder einem hehren Anspruch geschuldet, sondern leitet sich aus der These ab, dass die Wirkung flächenhafter Bewirtschaftungsmaßnahmen mit der großräumigen Umsetzung steigt (siehe [MEULENBERG et al. 2004] oder [DWA 2006]).

Um dies zu erreichen, bedarf es großräumiger Analysen. Nur auf diese Weise ist es möglich, die Wasserrückhaltepotenziale der Böden eines Einzugsgebietes zu bewerten und sicherzustellen, dass für die Umsetzung von Maßnahmen besonders geeignete Standorte ausgewählt werden (siehe Kapitel 6 und 7.2). Die großräumige Betrachtung eröffnet auch die Chance, möglichst viele Umsetzungspotenziale für eine veränderte Bewirtschaftung zu identifizieren. Die Bewertung jeder Fläche nach einheitlichem und objektivem Schema kann dazu genutzt werden, langfristige Strategien aufzubauen und so dazu beitragen, dass es langfristig zu einem Paradigmenwechsel in der Bewirtschaftung urbaner und ackerbaulich genutzter Flächen kommt. Nicht zuletzt können nur bei großräumiger Betrachtung Umsetzungsszenarien für ein Flusseinzugsgebiet aufgestellt werden und anhand dessen die überregionale Wirkung flächenhafter Maßnahmen untersucht werden.

Die genannten Gründe zeigen, wie wichtig eine einzugsgebietsweite Betrachtung ist. Es darf jedoch nicht verschwiegen werden, dass die Wahl der oberen Mesoskala als „Beobachtungsmaßstab“ (nach [BECKER 1986]) auch methodische Konsequenzen und Einschränkungen mit sich bringt.

Bereits in Kapitel 2.2 wurde deutlich, dass die Prozesse und Einflussfaktoren der Hochwasserentstehung einen räumlichen und über die Prozessgeschwindigkeit auch zeitlichen Bezug haben. [BLÖSCHL & SIVAPALAN 1995] erklären, dass nicht nur die hydrologischen Prozesse sondern auch deren Beobachtung und Modellierung charakteristische Raum- und Zeitskalen zugeordnet werden müssen. Da die natürlich gegebene Maßstabsebene der betrachteten Prozesse und der gewählte Beobachtungsmaßstab feststehen, können hieraus Folgerungen für die Methodik und Anforderungen an den Modellmaßstab abgeleitet werden.

1. Die Festlegung auf die obere Mesoskala hat zur Folge, dass bestimmte Prozesse der Abflussbildung nicht abgebildet werden können. So ist es nicht möglich, den Einfluss linienförmiger Elemente (z.B. Wirtschaftswege) oder gliedernder Maßnahmen (z.B. Hecken) auf die Abflussbildung im Modell zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7).
2. Die Maßstabsebene gibt vor, welche Ansprüche an die räumliche Diskretisierung (Auflösung) der Datengrundlage (Bodenkarte, Landnutzung) zu stellen sind (siehe Kapitel 5).
3. Die Maßstabsebene legt fest, welche Prozesse und welche Detailliertheit das Modell, seine Modellansätze und das aufgestellte Ersatzsystem haben müssen (siehe Kapitel 9).
4. Des Weiteren muss sich die Prozesskenntnis und die Parametrisierung der Modellansätze dem Modellierungsmaßstab anpassen (Kapitel 9.2; 9.3). Stammen die Prozesskenntnisse oder die Beobachtungen aus einem kleineren Maßstabsbereich, so muss eine Informationsübertragung (upscaling) stattfinden.
5. Das Übertragen von Beobachtungen aus einem Skalenbereich in einen anderen muss mit besonderer Vorsicht vorgenommen werden, um nicht zu Fehleinschätzungen zu gelangen. So muss nicht zuletzt bei der Bewertung der Simulationsergebnisse der räumliche Bezug berücksichtigt werden (Kapitel 10.3).

4 Das Untersuchungsgebiet, Bestandsaufnahme

Als Anwendungsgebiet für die in den folgenden Kapiteln vorgestellte Methodik wurde der sächsische Teil des Einzugsgebietes der Mulde ausgewählt. Die hier vorgestellten Informationen zum Einzugsgebiet der Mulde dienen dazu, die Randbedingungen der Untersuchungsergebnisse einordnen zu können und eine Einschätzung der Übertragbarkeit der Ergebnisse und Folgerungen zu ermöglichen.

Für die Beschreibung des Muldeinzugsgebietes kann auf eine Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen verwiesen werden, die die naturräumliche Charakterisierung zum Ziel hatten oder ebenfalls die Mulde bzw. die Elbe als Untersuchungsgebiet genutzt haben [HAASE & MANNSFELD 2002], [LANGE 2005], [HIRT 2003], [KUNKEL & WENDLAND 2004].

Zur der geeigneten, auch digital verfügbaren Informationsgrundlage zur Präsentation und Charakterisierung des Einzugsgebietes, zählt das unter der Leitung von Prof. Haase und Prof. Mannsfeld erstellte Informationssystem „Naturräume Sachsens...“ [HAASE & MANNSFELD 2002], das das Muldeinzugsgebiet in 476 Kartierungseinheiten, so genannte Mikrogeochoren, untergliedert. Die Klassifikation der Standortmosaik baut auf eine Reihe von Vorarbeiten auf, z. B. [HAASE & RICHTER 1965], [HAASE et al. 1991], [MANNSFELD & RICHTER 1995], [BERNHARDT et al. 1986]. Die räumliche Gliederung fand auf der Basis der klassifizierten Merkmale Geologie, Boden, Relief, Wasserhaushalt, Klima, Vegetation und Flächennutzung statt und gibt einen differenzierten Überblick über die naturräumliche Ausstattung des Einzugsgebietes. Aufbauend auf dieser Dokumentation der Naturraumstruktur und Nutzungssituation wurden weitergehende Bestimmungen zur Landschaftsfunktion durchgeführt [RÖDER & BEYER 2002], auf die u.a. in Kapitel 6 näher eingegangen wird.

4.1 Geographische Lage

Die Mulde ist nach der Saale der zweitgrößte Nebenfluss der Elbe. Das Einzugsgebiet liegt zu einem Großteil im Freistaat Sachsen (siehe Abbildung 8). Die südlichsten Teile des Einzugsgebietes befinden sich auf tschechischem Staatsgebiet. Im Norden des Einzugsgebietes zwischen der Stadt Bad Dübener Heide und dem Muldestausee überschreitet die Mulde die Landesgrenze nach Sachsen-Anhalt und mündet bei Dessau in die Elbe. Nur wenige Hektar des Einzugsgebietes der Zwickauer Mulde liegen im Land Thüringen.

Die südliche Grenze bildet der Kamm des Erzgebirges. Hier befinden sich ca. 380 km² (5%) des Einzugsgebietes in Tschechien. Im Osten und Norden grenzen die Wasserscheiden kleinerer Elbzuflüsse wie die Weißeritz, die Triebisch, der Ketznerbach, die Jahna, die Döllnitz, die Dahle und der Schwarze Graben das Mulde-Einzugsgebiet ein. Im Westen bilden die Einzugsgebiete der Weißen Elster und im weiteren Verlauf der Saale die Grenze. Die größten Städte im Einzugsgebiet sind Chemnitz, Zwickau, Freiberg und Dessau (siehe Abbildung 11).

Das gesamte Flusseinzugsgebiet der Mulde umfasst 7.403 km², davon entfallen auf die Freiburger Mulde 2983 km², auf die Zwickauer Mulde 2361 km² und 2.059 km² auf die Vereinigte Mulde. Nennenswerte Untereinzugsgebiete der Freiburger Mulde sind die Zschopau (1.847 km²), die Flöha (760 km²) und die Striegis (283 km²) sowie die Chemnitz (532 km²) als Teileinzugsgebiet der Zwickauer Mulde. Die maximalen Ausdehnungen betragen ca. 170 km in Nord-Süd und 95 km in Ost-West Richtung [BEUGE et al. 1999].

Administrativ ist das Untersuchungsgebiet Teil der sächsischen Regierungspräsidien Chemnitz und Leipzig. Für den Betrieb von Stauanlagen sowie den Hochwasserschutz und Gewässerausbau an Gewässern I. Ordnung hat der Freistaat Sachsen im Geschäftsbereich der Sächsischen Staatsministerin für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) die Landestalsperrenverwaltung (LTV) als Staatsbetrieb gegründet.

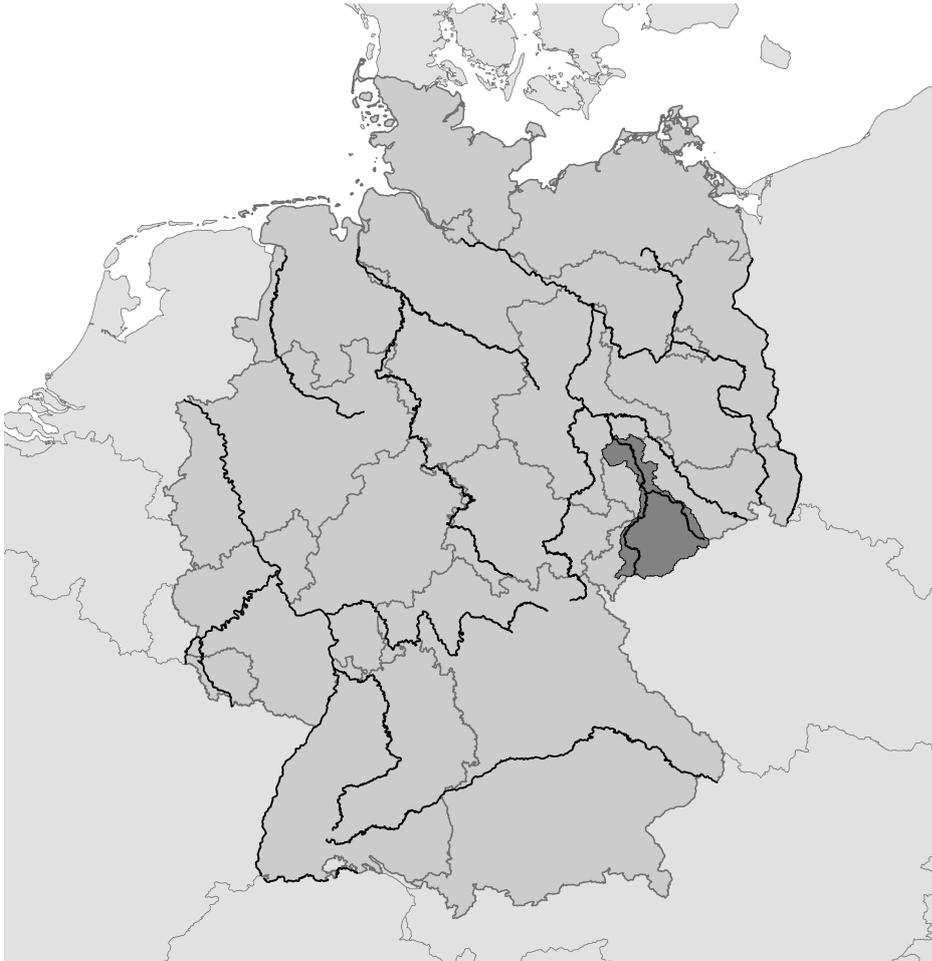


Abbildung 8: Lage des Mulde-Einzugsgebietes

4.1.1 Geographische Lage des Lungwitzbaches

In den Kapiteln 9 und 10 werden u.a. Ergebnisse des Lungwitzbaches vorgestellt. Aus diesem Grund soll das Teileinzugsgebiet kurz separat vorgestellt werden.

Der Lungwitzbach ist ein Nebenfluss der Zwickauer Mulde und hat sein Einzugsgebiet im südwestlichen Teil des Muldegebietes, siehe Abbildung 9. Die Quellen des Lungwitzbaches liegen beim Ort Ursprung in einer Höhe von 385 m bis 395 m über NN. Der Lungwitzbach fließt in westliche Richtung, nimmt als größere Nebenflüsse den Hegebach sowie den Rödlitzbach auf und mündet bei Glauchau in die Zwickauer Mulde. Der Lungwitzbach überwindet auf seiner Länge von etwa 24 km einen Höhenunterschied von rund 160 m, was einem Durchschnittsgefälle von 0,7 % entspricht. Das Einzugsgebiet des Lungwitzbaches umfasst eine Fläche von etwa 143 km².

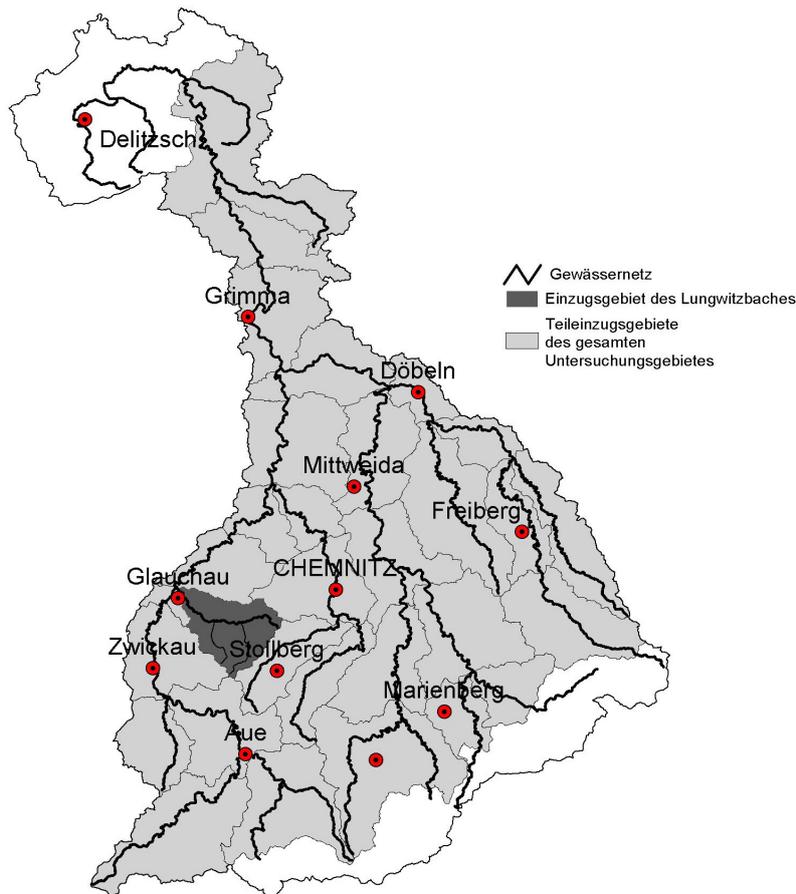


Abbildung 9: Teileinzugsgebiete der Mulde und Lage des Lungwitzbaches

4.2 Naturräumliche Gliederung

Das Untersuchungsgebiet hat Anteile an drei bedeutenden „mitteleuropäischen Naturregionen“ [MANNSFELD & RICHTER 1995]. Den flächenmäßig geringsten Anteil nimmt das lössfreie Tiefland im äußersten Norden ein. Große Teile gehören dem Lössgürtel an und der Süden lässt sich dem Mittelgebirge zuordnen (siehe Abbildung 10).

In Abhängigkeit von den Einflussgrößen Geologie, Boden, Relief, Wasserhaushalt, Klima, Vegetation und Flächennutzung lässt sich das Einzugsgebiet der Mulde in verschiedene Naturraumeinheiten einteilen. In [HAASE & MANNSFELD 2002] werden die Naturraumeinheiten höheren Ranges (Makrogeochoren) vorgestellt, die aus den bereits erwähnten Mikrogeochoren abgeleitet wurden. In Abbildung 10 sind namentlich neun Naturräume großräumiger Kategorie dargestellt. Von Süden nach Norden schließt sich an die Naturräume des Erzgebirges das Erzgebirgsbecken und das Sächsische Lösshügelland an. Im Norden befindet sich der Naturraum Düben-Dahlener-Heide.

[HIRT 2003] beschreibt detailliert die hier genannten Naturräume bezüglich ihrer Geologie, Substrate, Bodentypen und klimatischen Eigenschaften. Die Differenzierung des Einzugsgebietes in Naturräume könnte dazu dienen, erste qualitative Einschätzungen bezüglich ihrer Abflussbildung, ihrer Bedeutung für die Hochwasserentstehung und insbesondere in Bezug auf Wasserrückhaltevermögen zu treffen. Während sich im Nordsächsischen Platten- und Hügelland und Mittelsächsischen Lösshügelland die Bodentypen und Substrate sehr gut für eine vermehrte Speicherung von Niederschlagswasser im Boden eignen, sind die Böden des Mulde-Lösshügellandes, Erzgebirgsvorlandes und Erzgebirges hierzu nur eingeschränkt in der Lage. Auf der anderen Seite lassen die Jahresniederschlagsmengen erwarten, dass insbesondere in den höheren

Lagen des Untersuchungsgebietes eine vermehrte Speicherung wünschenswert wäre und in tiefer gelegenen Naturräumen eine vermehrte Speicherung aufgrund der niedrigen Jahresniederschlagsmengen nicht notwendig ist.

Die folgende differenzierte Methodik zur Ermittlung des aktivierbaren Speicherpotenzials wird Teile dieser qualitativen Beurteilung bestätigen. Es wird aber auch deutlich werden, dass die räumlichen Auflösung und das Heranziehen von Jahresmittelwerten für eine gezielte Identifikation der Speicherpotenziale der Landschaft während eines Hochwasserereignisses nicht ausreichen.

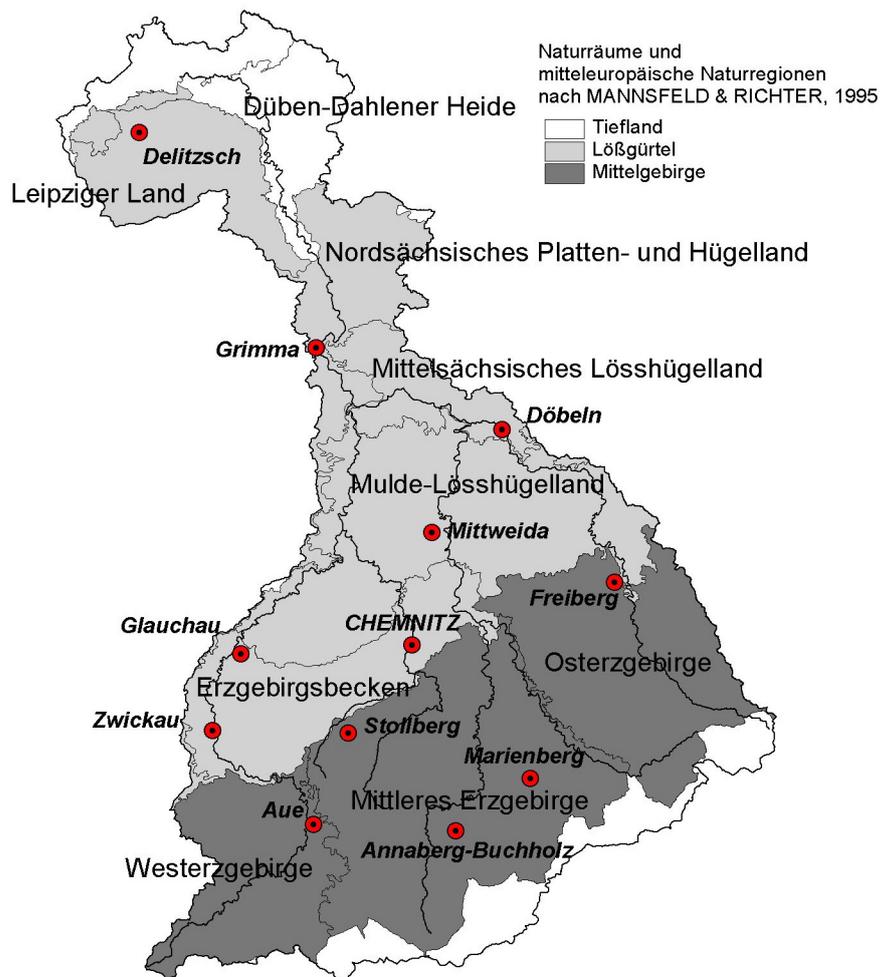


Abbildung 10: Naturräume im Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen nach [MANNSFELD & RICHTER 1995] bzw. [HAASE & MANNSFELD 2002]

4.3 Topographie

Die Abbildung 11 gibt einem Überblick über die Höhenstufen des Einzugsgebietes und das Gewässersystem der Mulde. Die Landoberfläche steigt von Norden nach Süden zum Erzgebirge an. Der Klinovec mit 1.244m, der Fichtelberg mit 1.214m und der Auersberg mit 1.019m sind die größten Erhebungen im Einzugsgebiet.

Zur weitergehenden topografischen Bewertung des Einzugsgebietes sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 die Neigungsgruppen sowie die Mesorelief-Mosaiktypen der verschiedenen Naturräume (Mikrogeochoren) dargestellt [HAASE & MANNSFELD 2002].

Im Norden des Einzugsgebietes liegen die Dübener Heide sowie das Nordsächsische Platten- und Hügelland im Altmoränengebiet. In diesem Landschaftsraum sind, bedingt durch

periglaziale Überprägungen, die Reliefunterschiede großräumig ausgeglichen worden. Es dominieren wellige, weiche und eintönige Oberflächenformen und Hangneigungen unter 1° .

Im Mittelsächsischen Lößhügelland ist die Landschaft durch 20-50 m eingesenkte Dellsysteme geprägt, die Hangneigungen über 2° erreichen. Die Plateauflächen des Mulde-Lößhügellandes werden von stark eingetieften Tälern unterbrochen mit Hangneigung über 5° [HIRT 2003], [KUNKEL & WENDLAND 2004]. Der Übergang des Altmoränengebietes zur den Mittelgebirgsregionen des Erzgebirges verläuft auf der Höhenstufe zwischen 200 und 300 Meter.

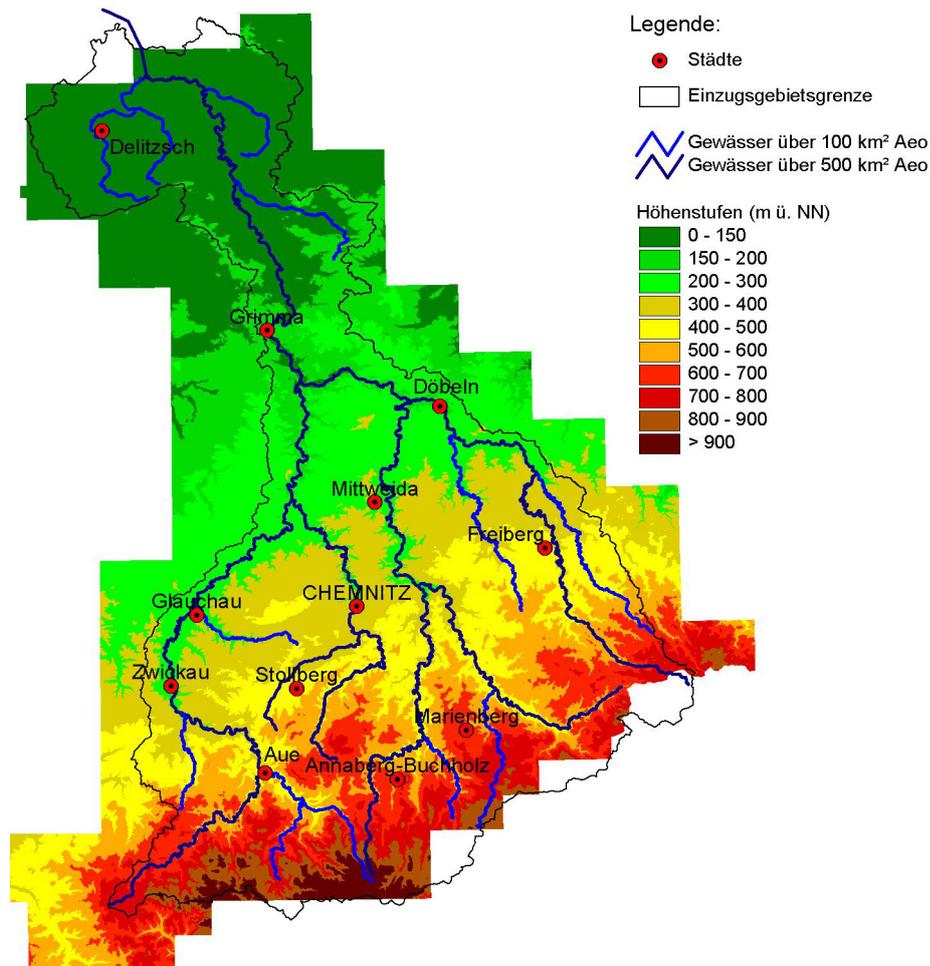


Abbildung 11: Höhenmodell und Gewässersystem der Mulde

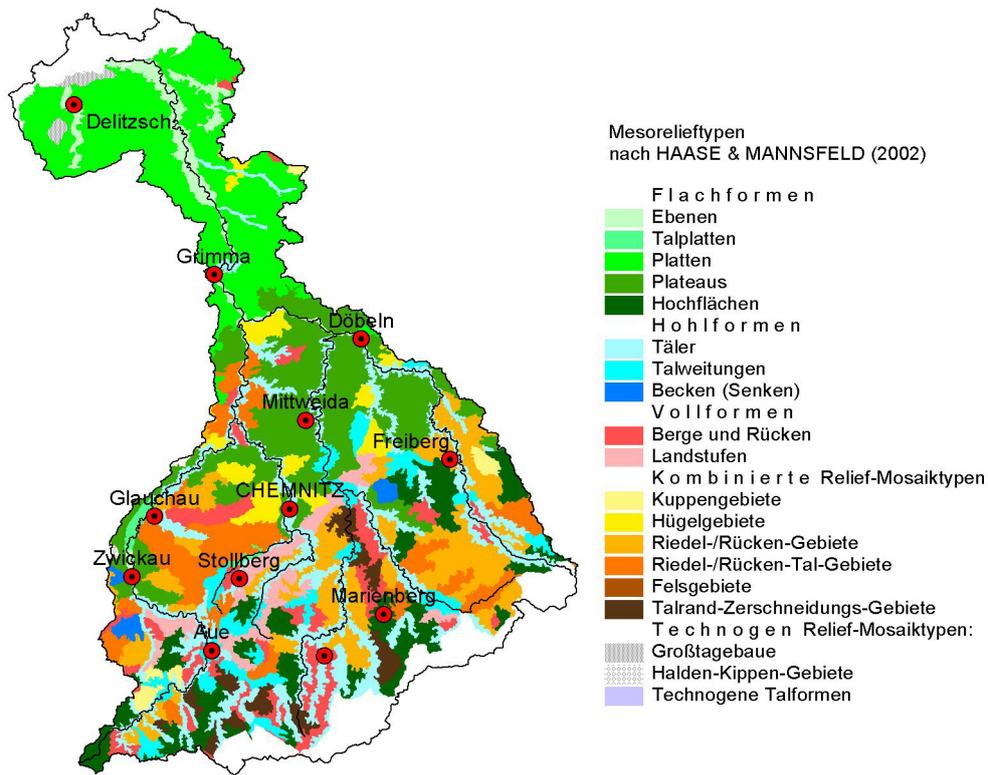


Abbildung 12: Mesorelief- Mosaiktypen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]

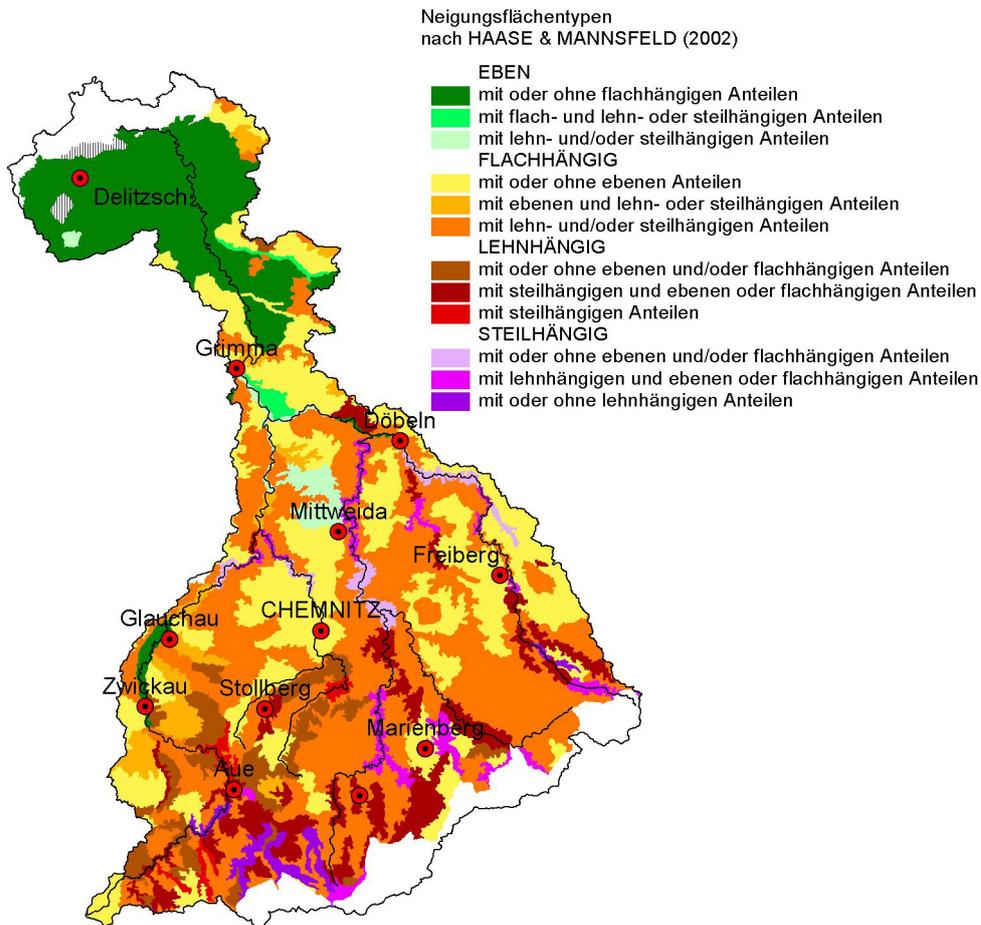


Abbildung 13: Neigungsflächentypen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]

4.4 Geologie

Die Ausgangssubstrate der Bodenbildung sind im nördlichen Einzugsgebietsteil überwiegend Lockermaterialserien des Känozoikum, im südlichen Teil Verwitterungsrückstände der vorwiegend paläozoisch entstandenen Festgesteine [LFUG 1992].

Das Grundgebirge besteht an den Oberläufen von Freiburger Mulde und Zwickauer Mulde im Erzgebirge vorwiegend aus Gneisen und Graniten, im Bereich der Vereinigung beider Flüsse zur Vereinigten Mulde dominieren saure Vulkanite.

Im Zentrum des Untersuchungsgebietes bei Mittweida befindet sich ein als schwach wellige Hochebene ausgeprägtes Granulitgebirge. Zwischen Erzgebirge und Granulitgebirge befindet sich das Erzgebirgsbecken mit seinen Rotliegendensedimenten. Es handelt sich um eine schmale Synklinalzone des Grundgebirges.

Im Unterlauf der Vereinigten Mulde bilden saale- und elsterkaltzeitliche (pleistozäne) Grund- und Endmoränen sowie Schmelzwasserablagerungen den geologischen Untergrund. [HENNINGSEN & KATZUNG 1998], [HIRT 2003]. Für die Bodenbildung sind die periglaziären Sedimente von erheblicher Bedeutung wie Decksande (vor allem Tiefland), äolische Ablagerungen (Sandlöß, Löß vor allem Hügelland), Flussablagerungen und Frostschuttdecken. Die heutige Oberfläche des Untersuchungsgebietes wurde maßgeblich von diesen glazigenen Prozessen geprägt.

In Abbildung 14 geben [HAASE & MANNSFELD 2002] einen stark vereinfachten Überblick über die geologische Gliederung des Mulde-Einzugsgebietes.

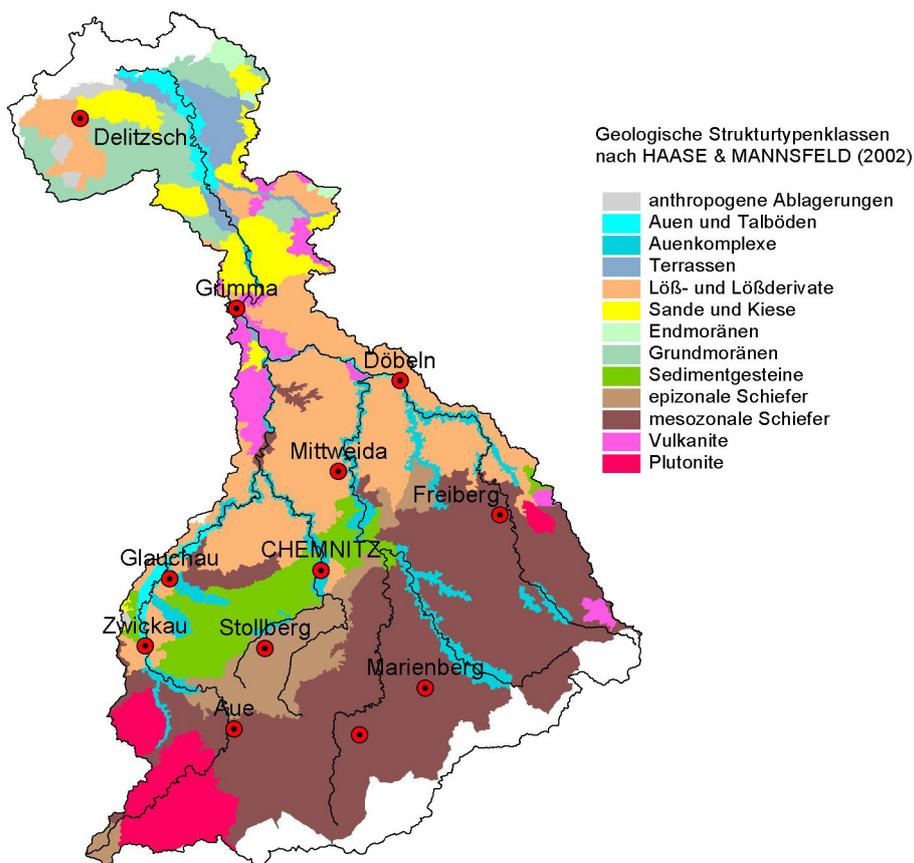


Abbildung 14: Geologische Strukturtypenklassen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]

Für weitergehenden Informationen zur Geologie des Einzugsgebietes sei auf [ALTERMANN & RUSKE 1997], [EISSMANN 1995] und [MANNSFELD & RICHTER 1995] verwiesen. Ausführliche Angaben zur Hydrogeologie können [JORDAN 1988] und [KUNKEL & WENDLAND 2004] entnommen werden.

4.5 Böden

Die sandigen Sedimente des Tieflandes sind heute entkalkt und je nach Zusammensetzung mehr oder weniger nährstoffarm. Weite Regionen werden von podsolierten Braunerden geprägt. Mit zunehmendem Tonanteil finden sich hier auch Parabraunerden. Für Bodenbildungsprozesse ist weiterhin das großräumig oberflächennah anstehende Grundwasser entscheidend. Im Überflutungsbereich der Mulde finden sich großflächige Auelehmlagerungen, wobei hier Vegen und grundwasserbeeinflusste Vega-Gleye die dominierende Bodenform darstellen.

Beim Übergang in das Nordsächsische Platten- und Hügelland sind zunehmend die äolischen Ablagerungen (Sandlöße und Löße meist zu Lößlehmen verwittert) bestimmend. Hier finden sich vermehrt Pseudogley und sandlößdominierte Parabraunerden.

Die Lösshügellandschaft wird durch die mächtigen Lößdecken charakterisiert, die hier Mächtigkeiten von 10 m bis zu 20 m erreichen können. Häufigste Bodenform sind hier die Parabraunerden. In Hangfußbereichen treten Pseudogley-Bildungen auf. Das schluffige, zur Verdichtung neigende Substrat hat oft stark wasserstauende Eigenschaften, die in schwach reliefiertem Gelände und den zunehmenden Niederschlagshöhen des Mulde-Lößhügellandes zur verbreiteten Ausbildung von Pseudogleyen führen.

Mit zunehmender Annäherung an das Erzgebirge wird die Lössdecke geringer und der Einfluss des anstehenden Grundgesteins auf die Bodenbildung nimmt zu. Charakteristisch ist hier der Einfluss des Rotliegenden in der Erzgebirgssenke. Häufig finden sich hier Braunerden.

Das Erzgebirge wird durch Böden aus Gesteinverwitterungsdecken geprägt. In Abhängigkeit des Ausgangsgesteins finden sich hier vielfältige Bodentypen. Podsol-Bildungen treten häufig bei nährstoffarmen Ausgangsgesteinen auf. Typisch sind ebenfalls Braunerden und Gley-Bildungen in Hangfuß- und Hangnässezonen. Die im Bergland und am Rand der großen Flusstäler oberflächennah anstehenden Festgesteine sind meist mehr oder weniger nährstoffarm.

In Abbildung 15 sind die zu Bodengesellschaften zusammengefassten Bodentypengruppen dargestellt [HAASE & MANNSFELD 2002].

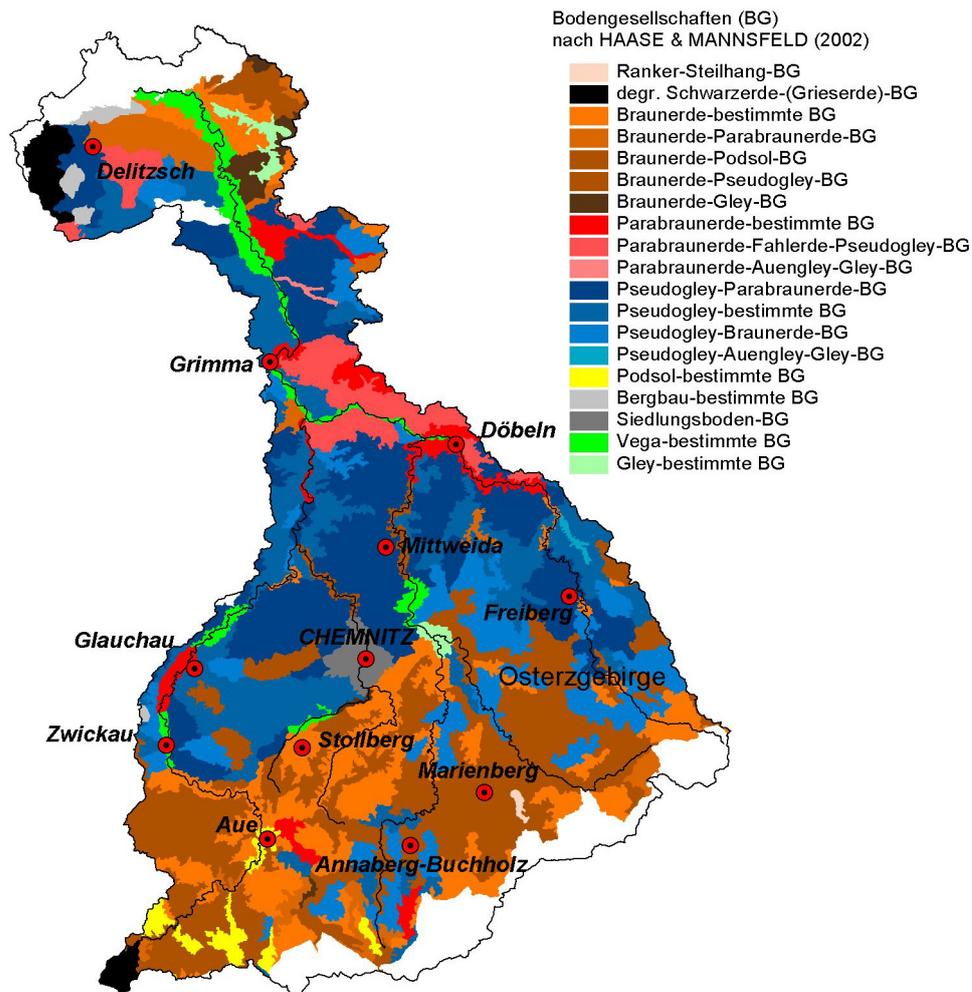


Abbildung 15: Bodengesellschaften (Zusammenfassung von Bodentypen) nach [HAASE & MANNSFELD 2002]

Für die Beurteilung der Bodenhydrologie und bodenhydraulischen Leistungsfähigkeit des Einzugsgebietes ist Kenntnis von Art und Verteilung der Bodenarten von besonderem Interesse. Die unterschiedliche Bodengenese des Gebietes spiegelt sich in der Bodenartenverteilung deutlich wider (Abbildung 16). Die dominierende Bodenart in der Erzgebirgsregion sind die Lehme, wobei die Bodenart Ls3 mit ca. 33 % Anteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets, die dominierende Bodenart darstellt. In den Lösshügelländern sind die Schluffböden die vorherrschenden Bodenarten, wobei die Bodenart Ut2 die größte Verbreitung aufweist. Im Unterlauf finden sich dann die glazialen Sandablagerungen. Auf die einzelnen bodenhydrologischen Kennwerte, die wichtige Einflussparameter der folgenden Untersuchungen sind, wird im Folgenden detailliert eingegangen.

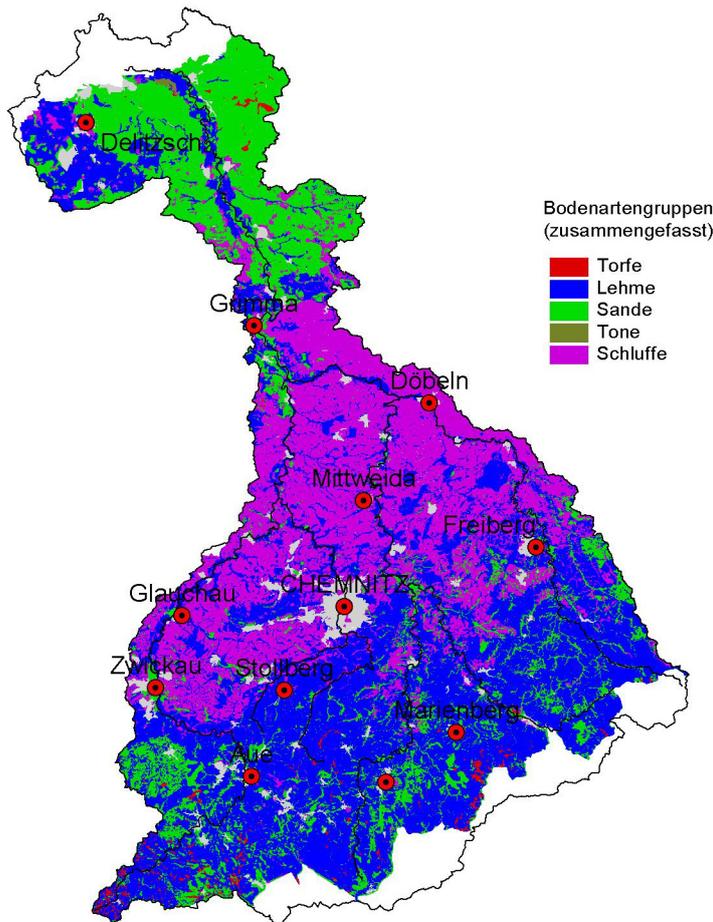


Abbildung 16: Verteilung der Bodenartengruppen des Oberbodens (zusammengefasst) im Untersuchungsgebiet (Bodenarten nach [AG BODENKUNDE 2005])

Für weitergehenden Informationen zur Pedosphäre des Einzugsgebietes sei auf [ALTERMANN & RUSKE 1997], [KUNKEL & WENDLAND 2004] und [MANNSFELD & RICHTER 1995] verwiesen.

4.6 Vegetation

Die potentielle natürliche Vegetation Sachsens ist detailliert in [SCHMIDT et al. 2002] beschrieben. Demnach wird das Untersuchungsgebiet durch verschiedene Waldtypen geprägt. Im nördlichen Altmoränengebiet auf den Sandböden der Düben-Dahlener Heide prägen Kiefern-, Stieleichen- und Kiefern-Wälder die potenzielle natürliche Vegetation. Nach Süden schließen sich Eichen-, Hainbuchen- und Hainsimsen-Eichen-Buchenwälder an. Letztere finden sich auch in den weiten Talräumen des unteren Erzgebirges. Sie verzahnen sich gebietsweise mit fichtenreichen Tannen-Buchen-Wäldern, die im Kammbereich des Erzgebirges in Fichtenwälder übergehen [MANNSFELD & RICHTER 1995], [KLOTZ et al. 1997].

Im jetzigen Zustand sind 27% der Fläche von Wald bedeckt. Die Kammlagen und nährstoffarmen Böden über den Graniten des Westerzgebirges sind von dichten Nadelwaldbeständen geprägt. Die Wälder im Tiefland sind Laub- und Mischwälder; entlang der unteren Mulde treten lockere Auenwälder auf [BEUGE et al. 1999]. Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten kam es infolge des Waldsterbens zu einem Bestandsrückgang im Mittel- und Osterzgebirge.

Die Vegetationsdifferenzierung der Naturlandschaft wurde im Verlauf der Nutzungsgeschichte durch den Menschen stark verändert. Die ersten großen Rodungen betrafen dabei die Löß- und Schwarzerdegebiete, wo große Agrarlandschaften entstanden [KLOTZ et al. 1997].

4.7 Landnutzung

Das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes wird maßgeblich von der existierenden Landnutzung oder Bodenbedeckungen beeinflusst. Dies bezieht sich sowohl auf die Jahreswasserbilanz als auch auf die Hochwasserentstehung bei sommerlichen Starkregenereignissen.

Die naturräumlichen Eigenschaften des Einzugsgebietes der Mulde spiegeln sich auch in der Verteilung der Landnutzungen im Gebiet wider (Abbildung 17). In Abbildung 18 zeigt die prozentualen Anteile der Landnutzungsklassen.

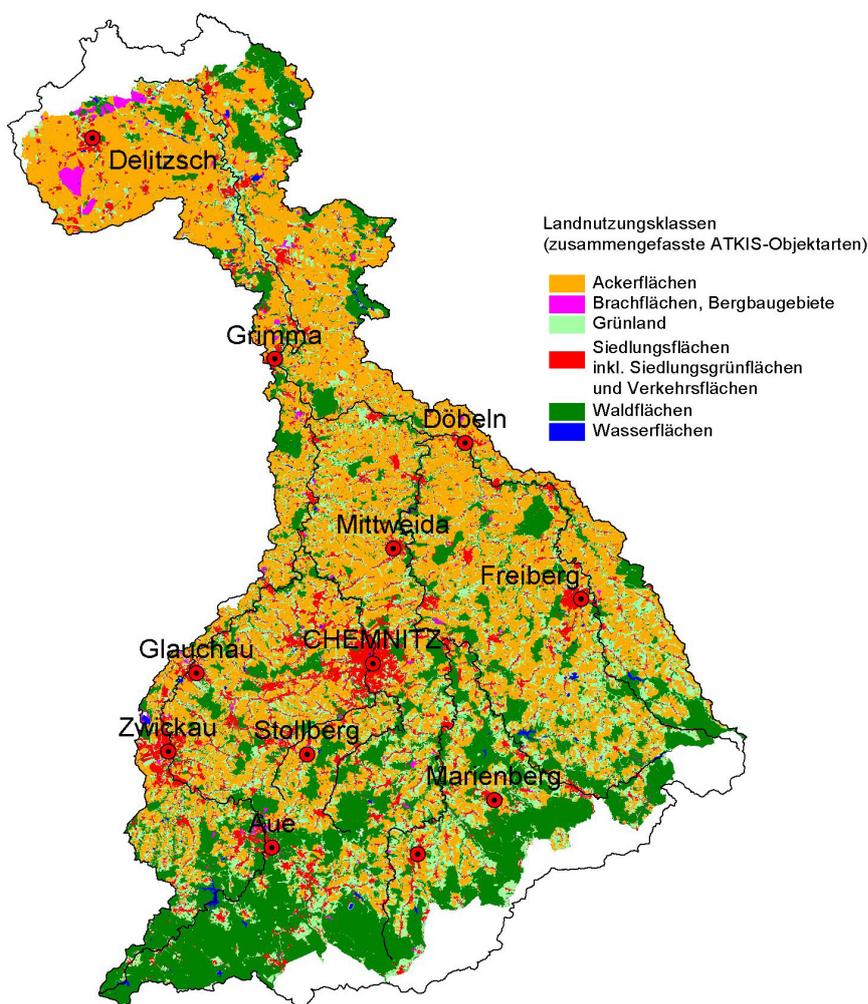


Abbildung 17: Landnutzung des Untersuchungsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM)

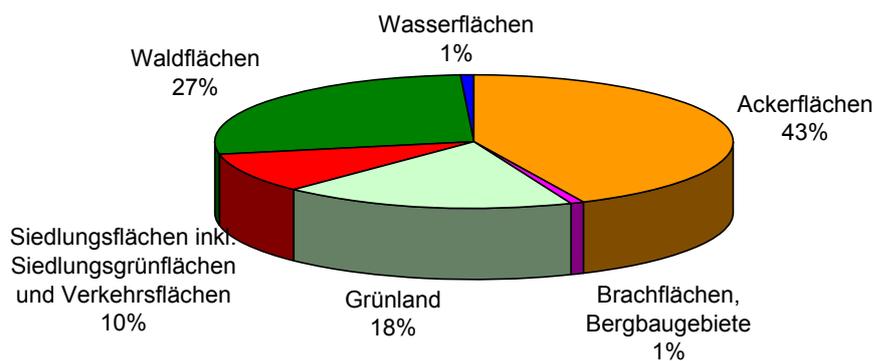


Abbildung 18: Landnutzungsverteilung bezogen auf den Sächsischen Teil des Mulde-Einzugsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM)

Im Einzugsgebiet der Mulde dominieren Böden mit hohem bis sehr hohem Ertragspotenzial. Infolgedessen stellt die landwirtschaftliche Ackernutzung mit einem Anteil von 43 % an der sächsischen Einzugsgebietsfläche die eindeutig dominierende Landnutzung dar. Die größten Anteile finden sich hierbei in den Tieflandsbereichen und den Lößhügelländern.

Die Auenböden werden in der Regel aufgrund oberflächennaher Grundwasserstände lediglich als Weide- und Grünland genutzt. Durch Meliorations- und Hochwasserschutzmaßnahmen zur Entwässerung der Aue wurden jedoch auch Auenböden urbar gemacht, so dass heute auf vielen Flächen der Aue Ackerbau betrieben wird [LANGE 2005]. Grünlandnutzung beschränkt sich in diesen Naturräumen vor allem auf die Tallagen und Flächen in Gewässernähe. Die landwirtschaftliche Nutzung verteilt sich mit Ausnahme des Erzgebirgskammes über das gesamte Einzugsgebiet.

Einen differenzierten Überblick über die landwirtschaftlichen Nutzung im standortkundlichen Kontext geben [MANNSFELD & RICHTER 1995]. Sie weisen darauf hin, dass im Mittelsächsischen Lößhügelland intensiver Feld- Gemüse- und Obstanbau vorherrscht.

Besonders im fruchtbaren Lösshügelland prägen große Ackerschläge die Agrarlandschaft, die im Rahmen der Kollektivierung der Landwirtschaft zu DDR-Zeiten zur Sicherung der Nahrungsmittelversorgung und zur Rationalisierung des Maschineneinsatzes über zahlreiche Flurbereinigungen entstanden sind. Aus der Sicht der Landwirtschaft bieten diese großen Bewirtschaftungseinheiten zahlreiche Vorteile. Die Bewirtschaftung der Flächen kann sehr effizient, d.h. zeit- und kostensparend erfolgen, indem z. B. Maschinen mit großen Arbeitsbreiten eingesetzt werden können. Im Rahmen der Kollektivierung der Landwirtschaft und der so genannten Komplexmelioration entstanden überwiegend großflächig bewirtschaftete und nur noch gering mit Strukturelementen durchsetzte Agrarlandschaften, in denen Ackerschläge von 200 bis zu 400 ha zu DDR-Zeiten keine Seltenheit darstellte. Diese Agrarraumstruktur ist aufgrund ihrer wirtschaftlichen Vorteile in vielen Regionen erhalten geblieben und spiegelt sich noch heute in den Schlaggrößen und in der Fluraufteilung der Landschaft wider.

Die Intensität der Pflanzenproduktion auf durchschnittlich 50 Hektar großen Schlägen verursacht bei dem gegebenen Relief erhebliche Wassererosionen. Im Mulde-Lößhügelland ermöglichen Meliorationen trotz verbreiteter Staunässe auf den Hochflächen ertragreichen Ackerbau. Allerdings wird der Pflege- und Kostenaufwand dieser Standorte von [MANNSFELD & RICHTER 1995] höher eingeschätzt als im Mittelsächsischen Lößhügelland.

[BEHRENDT et al. 2004] schätzen nach Auswertung von Beispielstandorten anhand der mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK), dass 26 % der

landwirtschaftlichen Fläche des Einzugsgebietes der Mulde gedrängt sind, wobei die Zwickauer Mulde einen Dränanteil von 30-40%, die Freiburger Mulde von unter 10 % und die Teileinzugsgebiete entlang der Vereinigten Mulde von 20-30% aufweist. Diese Einschätzung erfolgte auf Basis einer Charakterisierung der Hydromorphie der einzelnen Standorte [MANNSFELD & RICHTER 1995]. [HAMMANN 2000] in [HIRT 2003] gibt einen räumlich differenzierten Überblick über die meliorierten Grünland- und Ackerflächen der verschiedenen Naturräume allerdings beschränken sich die Betrachtungen auf den mittleren Teil des Mulde-Einzugsgebietes. [HAMMANN 2000] bestätigt den von [BEHRENDT et al. 2004] genannten Gesamtdränanteil, allerdings kommt er bezüglich der Verteilung der Flächen zu anderen Ergebnissen. Demnach ist der Dränanteil im Mittellauf der Freiburger- und Zwickauer Mulde annähernd ausgeglichen.

Im Erzgebirge geht der Anteil der Ackernutzung bedingt durch starke Hangneigungen und die aus landwirtschaftlicher Sicht z. T. wesentlich schlechteren Bodeneigenschaften deutlich zurück. Hier dominieren Grünland- vor allem aber auch Waldnutzung. Trotz allem ist der Umfang der Waldnutzung im Einzugsgebiet mit 27 % Anteil an der Gesamtfläche deutlich geringer als die landwirtschaftliche Nutzung. Grünland stellt mit einem Anteil von 18 % an der Gesamtfläche die dritthäufigste Landnutzung dar.

Des Weiteren sind in Abbildung 17 die größeren Siedlungsgebiete Chemnitz (245.000 Einwohner), Zwickau (80.000 Einwohner), Freiberg (50.000 Einwohner) zu erkennen. Hinzu kommen die Städte Grimma, Aue, Annaberg-Buchholz, Marienberg und Glauchau. Neben den Stadtgebieten gibt es eine Vielzahl von kleineren Siedlungen, von denen der überwiegende Teil in den Auen des Gewässersystems liegt. In ländlichen Bereichen mit geringer Siedlungsdichte nimmt die Verbreitung der Misch- oder Trennkanalisation und damit der Anschlussgrad deutlich ab. Hier entwässern die Grundstücke direkt in die Gewässer oder werden bereits dezentral bewirtschaftet.

Insgesamt leben im Einzugsgebiet 2 Mio. Menschen [BEUGE et al. 1999]. Der Anteil der Siedlungsflächen zusammen mit den dazugehörigen Siedlungsgrünflächen und Verkehrsflächen umfasst 10 % des Einzugsgebietes. Damit liegt das Mulde-Einzugsgebiet unter dem bundesweiten Durchschnitt von ca. 14%. Es ist wichtig hervorzuheben, dass die räumliche Verteilung der Siedlungsfläche sehr inhomogen ist. So weisen einzelne Teilgebiete auch außerhalb der großen Städte deutliche höhere Siedlungsanteile auf (vgl. Abbildung 20). Es fällt auf, dass die meisten Städte im Ober- und Mittellauf der Mulde liegen und von wichtigen Nebengewässern der Mulde durchflossen werden. Um diese Siedlungsgebiete zu entwässern, sind die meisten Flächen in den genannten Stadtgebieten an die Misch- oder Trennkanalisation angeschlossen.

Die Gewässerflächen haben im Einzugsgebiet mit 1% Landnutzungsanteil eine untergeordnete Bedeutung. Abgesehen von den künstlichen Speichern, finden sich im Untersuchungsgebiet keine größeren stehenden Gewässer.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass es sich um ein Untersuchungsgebiet mit intensiver landwirtschaftlicher und urbaner Nutzung handelt. Mit Blick auf den Gegenstand dieser Arbeit ist somit davon auszugehen, dass ein großes Potenzial an Maßnahmengebieten existiert.

Für weitergehenden Informationen zur Nutzungsstruktur des Einzugsgebietes insbesondere zu Nutzungsänderungen der jüngeren Vergangenheit sei auf [BEUGE et al. 1999] und [KRÖNERT 1997] verwiesen.

4.7.1 Landnutzung im Einzugsgebiet des Lungwitzbaches

Abbildung 19 stellt einen Detailausschnitt aus Abbildung 17 dar. Es wird deutlich, dass dieses Teileinzugsgebiet genauso stark von Ackerflächen geprägt ist, wie das Gesamteinzugsgebiet. Abbildung 20 zeigt auf, dass der Anteil der Siedlungsflächen jedoch nahezu doppelt so groß wie der durchschnittliche Siedlungsanteil im Mulde-Einzugsgebiet. Im Einzugsgebiet liegen eine Reihe kleinerer Orte, Dörfer und Weiler, die vorzugsweise in

den Tallagen des Lungwitzbaches und seiner Zuflüsse liegen. Ausnahmen stellen die Orte Hohenstein-Ernstthal und Lugau dar, die sich am Hang bzw. Kammlage des Einzugsgebietes befinden. Die größeren Orte sind St. Egidien, Lichtenstein, Hohenstein-Ernstthal, Oelsnitz sowie Nieder- und Oberlungwitz.

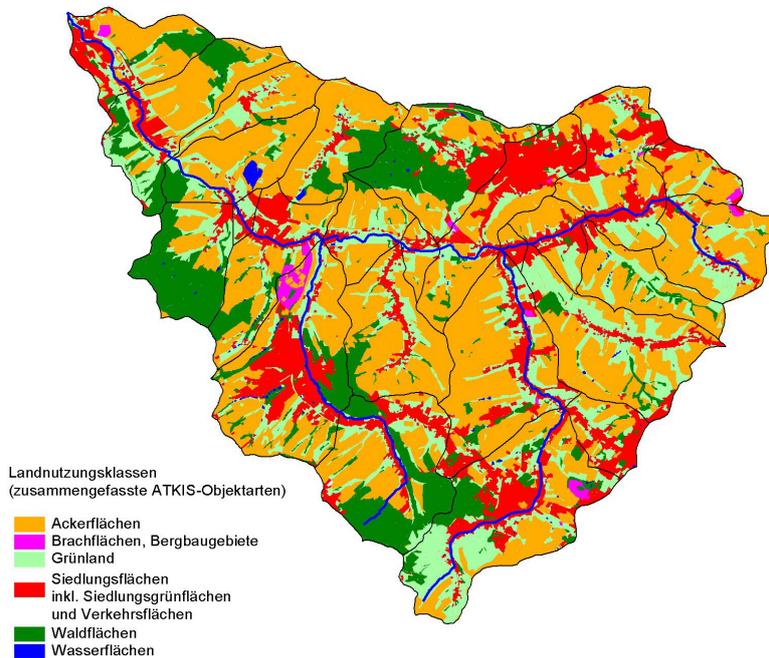


Abbildung 19: Landnutzung des Einzugsgebietes des Lungwitzbaches (Quelle: ATKIS Basis-DLM)

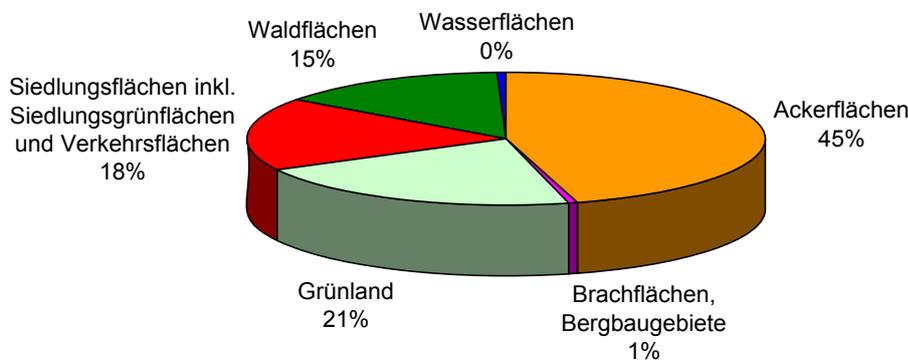


Abbildung 20: Landnutzungsverteilung des Lungwitzbach Einzugsgebietes (Quelle: ATKIS Basis-DLM)

4.8 Klima

Der südliche Teil des Einzugsgebietes der Mulde gehört zum Mitteldeutschen Berg- und Hügellandklima. Der nördliche Teil des Einzugsgebietes der Mulde bei Bitterfeld und der Dübener Heide gehört klimatisch zum stärker kontinental beeinflussten Ostdeutschen Binnenlandklima [TREFFLICH 1997].

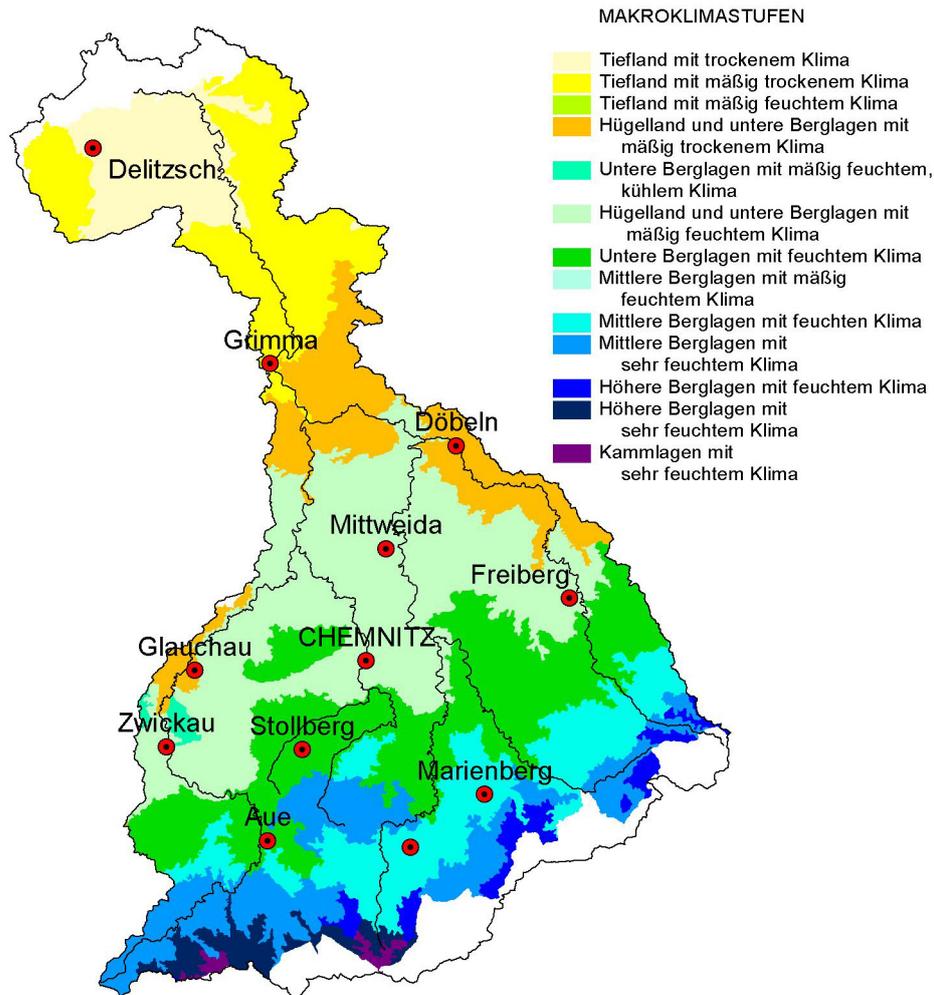


Abbildung 21: Makroklimastufen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]

Die Abbildung 21 zeigt Makroklimastufen nach [HAASE & MANNSFELD 2002]. Diese Klimagliederung basiert auf Angaben zur Höhenlage, zur Jahresdurchschnittstemperatur, zur Jahresschwankungen der Temperatur und zum Jahres- und Winterniederschlag.

Die signifikante Gliederung des Makroreliefs im Untersuchungsgebiet über das Erzgebirge und das Erzgebirgsvorland über das Lösshügelland hin zu den Tiefländern im Leebereich des Harzes führt zu einer deutlich abgrenzbaren Klimazonierung. Diese beeinflusst die Temperatur- und Niederschlagsverteilung im Gebiet. Hier findet sich eine charakteristische Zunahme der Niederschläge von Südost nach Nordwest, wobei der nordwestliche Bereich offensichtlich durch die Lee-Wirkung des Harzes geprägt ist.

Wie in Abbildung 22 zu sehen liegen die Jahresniederschläge im Tiefland zwischen 500 mm und 650 mm (siehe Abbildung 22). Die Jahresmitteltemperaturen schwanken um einen Bereich von 8,0 °C bis 9,0 °C (siehe Abbildung 23). In den Kammlagen und mittleren Lagen des Erzgebirges, die durch Staueffekte durch das Erzgebirge beeinflusst sind, ist dagegen im Mittel mit Jahresniederschlägen von 700 mm bis über 1200 mm zu rechnen. Die Jahresmitteltemperatur liegt im Bereich zwischen 5,5°C und 7,0°C. Die Winterniederschläge im Einzugsgebiet sind durchgehend niedriger als die Sommerniederschläge (siehe Abbildung 24).

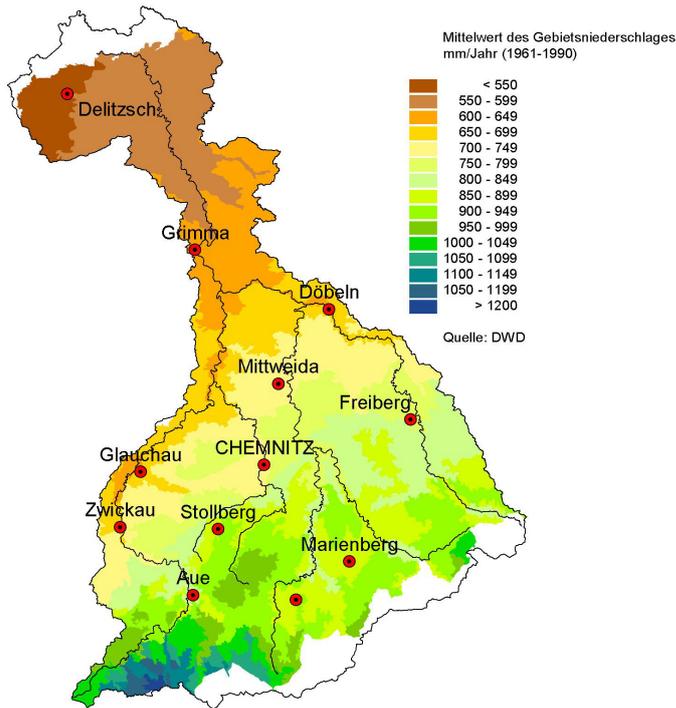


Abbildung 22: mittlerer jährlicher Niederschlag nach [HAASE & MANNSFELD 2002], abgeleitet aus Daten des [HAD 1999].

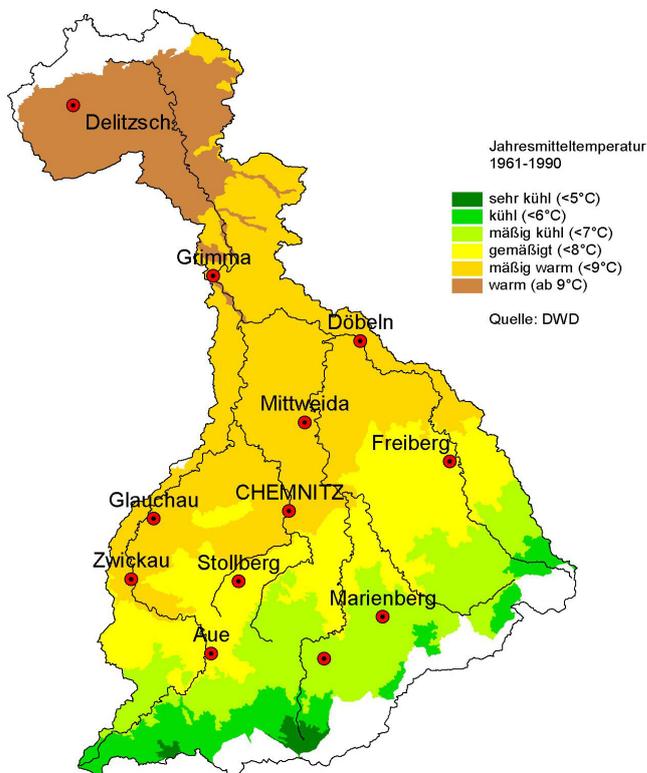


Abbildung 23: mittlere Jahrestemperatur nach [HAASE & MANNSFELD 2002], abgeleitet aus Daten des DWD.

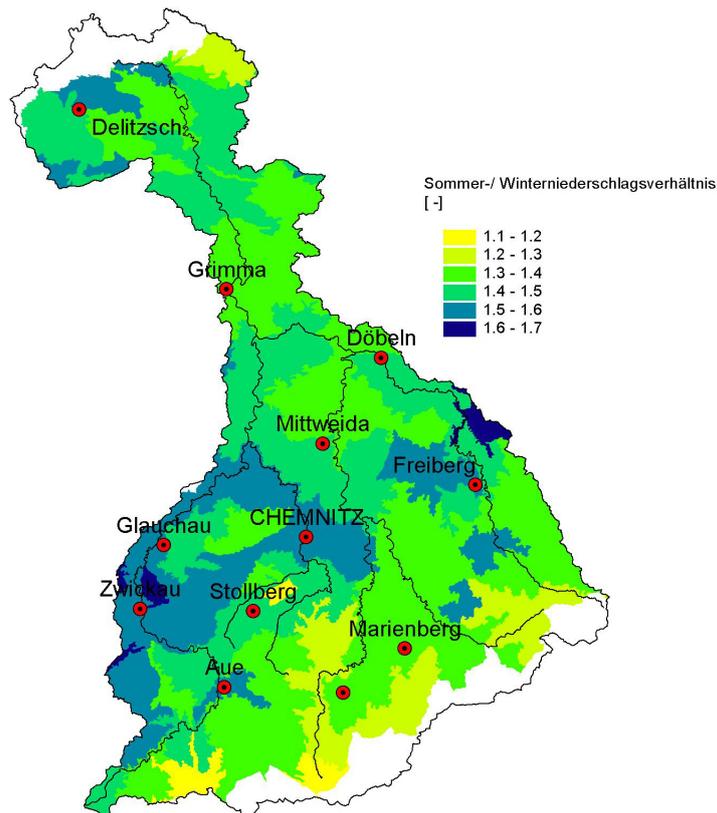


Abbildung 24: Verhältnis des Sommerniederschlags (Apr. – Sept.) zum Winterniederschlag (Okt. – März) – Quelle: DWD

4.9 Gewässernetz, Hydrologie und Hochwasser

Das Flussgebiet der Mulde gehört zum Einzugsgebiet der Elbe. Mit einer Gesamtflächengröße von ca. 7.400 km² nimmt es annähernd 5% des Elbe-Stromgebietes ein (siehe auch Kapitel 4.1).

Den südlichen Teil des Gewässersystems bilden zusammen mit ihren zahlreichen Nebenflüssen die Freiburger Mulde und Zwickauer Mulde. Beide Flüsse entspringen im Erzgebirge, fließen in nördliche Richtung durch das Erzgebirgsvorland und das sächsische Lösshügelland und vereinen sich südlich von Grimma in der Stadt Sermuth zur Vereinigten Mulde. Das Einzugsgebiet der Freiburger Mulde weist auf einer Länge von etwa 124 km ein mittleres Gefälle von knapp 0,6 % auf. Die Zwickauer Mulde zeigt mit einer Länge von rund 166 km und einem mittleren Gefälle von etwa 0,4 % eine ähnliche Gewässermorphologie, die durch den Ursprung beider Flüsse im Erzgebirge bedingt ist. Die Vereinigte Mulde im Unterlauf weist auf einer Strecke von 120,7 km im Mittel ein Gefälle von weniger als 0,1 % auf.

Die Zwickauer Mulde ist der westliche Quellfluss der Mulde. Sie besitzt zwei Quellbäche, die westliche Rote Mulde und die östlich gelegene Weiße Mulde. Die Rote Mulde entspringt in der Nähe der Stadt Schöneck, in der Kammregion des Westerzgebirges in einer Höhe von 770 m über NN. Die Quelle der Weißen Mulde liegt in gleicher Höhe etwa 4 km weiter östlich. Die Rote und Weiße Mulde münden beide in die Talsperre Muldenberg. Dort vereinen sie sich zur Zwickauer Mulde. Der Nebenfluss Schwarzwasser mündet bei Aue in die Zwickauer Mulde. Bei Zwickau verlässt die Zwickauer Mulde das Erzgebirge und fließt an Glauchau vorbei, wo der Lungwitzbach einmündet. In der Nähe von Wechselburg nimmt sie den größten Nebenfluss, die Chemnitz auf. Nach 166 km Fließlänge vereinigt sich nördlich von Colditz die Zwickauer Mulde mit der Freiburger Mulde.

Die Freiberger Mulde ist der östliche Quellfluss der Mulde und entspringt in Tschechien. Die Quelle der Moldavsky potok liegt im Osterzgebirge 2 km südlich von Moldava (Moldau) in einer Höhe von 855 m über NN und ist nur etwa einen Kilometer vom Quellgebiet der Flöha entfernt. In einem 150 bis 200 m tief eingeschnittenen Tal wendet sich der Fluss zunächst in nordwestliche Richtung und dann weiter in nördliche Richtung. Der Fluss fließt in einem stark eingetieften Tal, das zwischen Freiberg und Halsbrücke immer noch fast 100 m tiefer als die Hochfläche des Erzgebirgsvorlandes ist. Die Talhänge sind weitgehend von Mischwald besetzt. Nach Weißenborn/Erzgebirge und Hilbersdorf passiert die Freiberger Mulde ihre Namensgeberin Freiberg. Südöstlich von Siebenlehn nimmt sie die Bobritzsch als rechten Nebenfluss auf. Ihre Fließrichtung knickt bei Nossen scharf in Richtung Westen ab. Sie fließt an Döbeln vorüber, wo sie oberhalb von Döbeln die Striegis und unterhalb von Döbeln den größten Nebenfluss, die Zschopau, aufnimmt. Sie passiert Leisnig und vereinigt sich nach 124 Flusskilometern in Sermuth mit der Zwickauer Mulde.

Charakteristisch für die Abflussdynamik und insbesondere die Hochwassergenese im Einzugsgebiet ist der große Mittelgebirgsanteil am Einzugsgebiet.

Die Regierungspräsidien Leipzig und Chemnitz, sowie die Landestalsperrenverwaltung der Freistaates Sachsen betreiben im Einzugsgebiet der Mulde eine Reihe von Pegelstationen. Repräsentativ wurden in Abbildung 25 und Abbildung 26 für die Pegel „Bad Düben“ (Auslass des Untersuchungsgebietes), „Zwickau-Pölbitz“ (Mittellauf der Zwickauer Mulde) und „Nossen“ (Mittellauf der Freiberger Mulde) die langjährigen monatlichen mittleren Abflüsse (MQ) dargestellt.

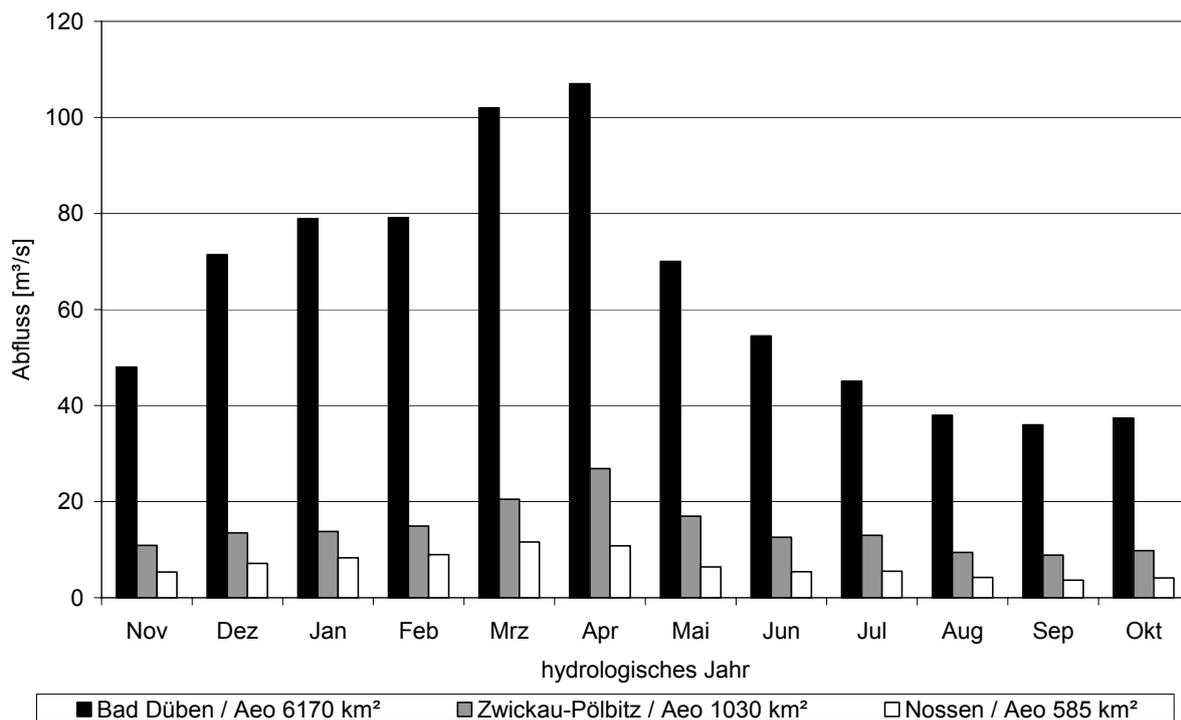


Abbildung 25: Grafische Darstellung der durchschnittlichen mittleren Abflüsse (MQ) ausgewählter Pegel [LFUG 2002a]

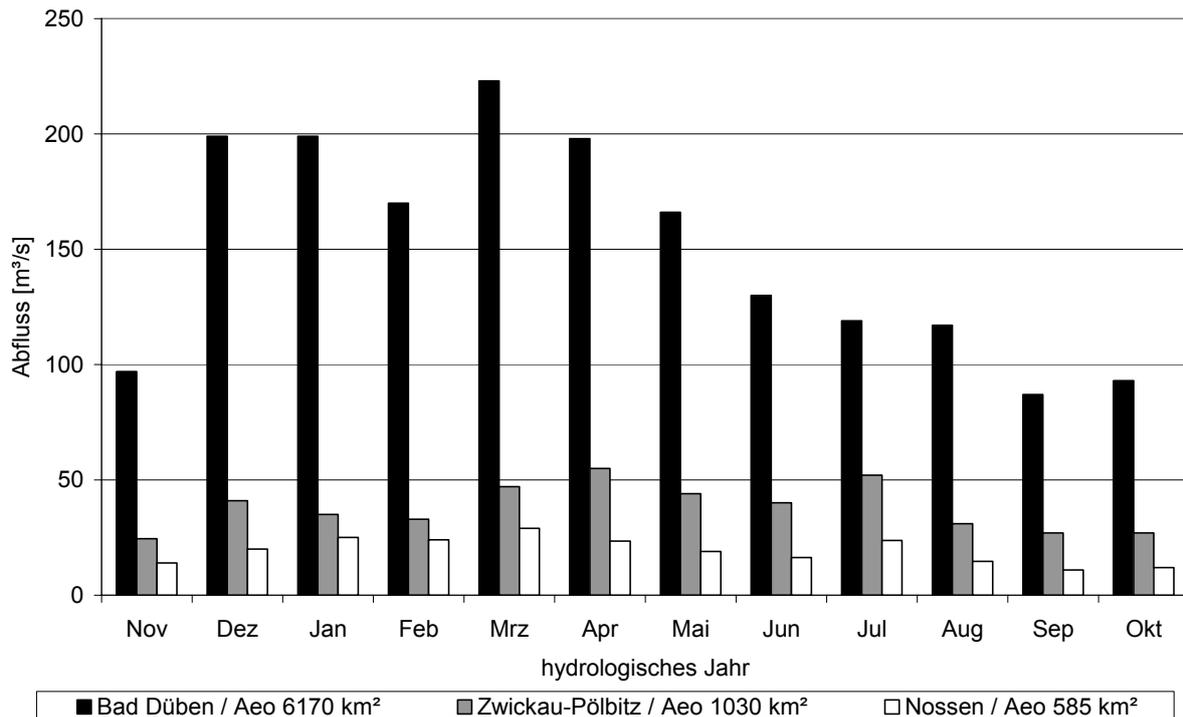


Abbildung 26: Grafische Darstellung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MHQ) ausgewählter Pegel [LFUG 2002a]

Die gewässerstatistische Auswertung [LFUG 2002a] zeigt, dass März oder April im Mittel die abflussreichsten Monate sind. Ursache hierfür sind die durch die Schneeschmelze bedingten Abflüsse aus dem Erzgebirge und dem vorgelagerten Hügelland. Die Analyse der mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) für das Fluss-System gibt Hinweise darauf, dass auch durch sommerliche Starkniederschläge insbesondere an der Freiburger und der Zwickauer Mulde Hochwasser auftreten können. Die Betrachtung der höchsten monatlichen Hochwasserwerte bestätigt, dass im Einzugsgebiet der Mulde sowohl mit Frühjahrs- als auch mit Sommerhochwassern zu rechnen ist. An dieser Einschätzung bleibt dann kein Zweifel, wenn in die Analyse die Abflusswerte des Hochwassers vom August 2002 mit eingebunden werden.

Während der Hochwasserereignisse im August 2002 zählten die Vereinigte Mulde und ihre Zu- und Nebenflüsse zu den Flussgebieten, die neben der Elbe am stärksten betroffen waren. Verursacht wurde dieses Hochwasser durch eine Extremwetterlage in der ersten Hälfte des August 2002. Die auslösende sog. Vb-Wetterlage war mit ungewöhnlich intensiven Niederschlägen in weiten Teilen des Einzugsgebietes verbunden, die teilweise mehr als 48 h andauerten. So wurde an der Station Zinnwald-Georgenfeld vom 12.08.2002 bis zum 13.08.2002 ein 24-Stundenwert der Niederschlagshöhe von 312 mm gemessen. Damit handelt es sich um den größten Tageswert des Niederschlages, der jemals in Deutschland gemessen wurde. Auf Grund der hohen Niederschlagsintensitäten und Gesamtregensmengen vor und während des Hochwasserereignisses wurden die Infiltrationskapazitäten der Böden in den betroffenen Gebieten innerhalb kürzester Zeit überschritten. In der Folge traten beträchtliche Oberflächenabflüsse auf, die zu einem raschen Anwachsen der Durchflüsse führten. Im Ergebnis wurden beim August-Hochwasser 2002 Hochwasserstände erreicht, die deutlich über den bis dato bekannten Höchstwasserständen lagen [LFUG 2002c]. Herauszustellen ist, dass von diesem Ereignis nicht nur die übergeordneten Gewässer wie die Elbe, oder die sächsischen Mulden betroffen waren, sondern dass es infolge von Gewitterregen auch an kleineren und mittleren Gewässern zu Überflutungen und Schäden geführt hat. Das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) gibt auf seiner „Informationsplattform Hochwasserschutz“ einen detaillierten Überblick über die beim Hochwasser 2002 von Überschwemmungen betroffenen

Gewässerabschnitte [LFUG 2007c]. Dem digitalen Kartenwerk kann entnommen werden, dass es insbesondere in den breiten Auen im Unterlauf der Vereinigten Mulde zu großflächigen Ausuferungen kam. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass bereits im Erzgebirge im Oberlauf der Zuflüsse beispielsweise an der Zschopau beim Zusammenfluss mit der Flöha oder an der Chemnitz und dem benachbarten Lungwitzbach große Ausuferungen auftraten, die aufgrund der Querschnittsform der Flusstäler nicht die Ausdehnung wie im Unterlauf hatten. Die Auswertung der Überschwemmungsflächen [LFUG 2007b] ergab, dass im gesamten Einzugsgebiet der Mulde ca. 1.400 Flusskilometer von Überflutungen betroffen waren. Die überfluteten Bereiche bedeckten eine Fläche von mehr als 180 km², davon waren 19 % Siedlungs- und Verkehrsflächen und 54 % Ackerflächen. Insgesamt werden in Sachsen die Sanierungskosten an den Gewässern I. Ordnung auf 590 Mio. € und an den Gewässern II. Ordnung auf 147 Mio. € geschätzt. Die Flut forderte 21 Todesopfer.

Die Beschreibung und Analyse des „Jahrhunderthochwassers“ ist Gegenstand einer Vielzahl von Gutachten und Stellungnahmen u.a. [KIRCHBACH et al. 2002], [LFUG 2004], [GRÜNEWALD et al. 2002], [LFUG 2003], [GRÜNEWALD et al. 2003], [ENGEL et al. 2002]. Als Ursache für das Hochwasser werden einhellig die extremen Niederschläge genannt. Es wird aber auch die Diskussion über mögliche Einflüsse bzw. Handlungsmöglichkeiten des Menschen geführt, zu der die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten möchte. Als Reaktion auf die Hochwasserkatastrophe hat der Freistaat Sachsen umfangreiche Maßnahmen zur Beseitigung der entstanden Schäden durchführen lassen. Gleichzeitig wurden flächendeckend für alle Gewässer erster Ordnung Hochwasserschutzkonzeptionen erarbeitet, die die Grundlage für eine verbesserte Hochwasservorsorge und einen Ausbau des technischen Hochwasserschutzes bilden [LFUG 2007c], [SMUL 2005a].

Darüber hinaus weisen [BÜTTNER et al. 2001], [BÜTTNER 2004] und [KIRCHBACH et al. 2002] darauf hin, dass es in den zurückliegenden Jahrhunderten immer wieder zu schweren Zerstörungen infolge von Hochwassern im Einzugsgebiet der Mulde gekommen ist und dass Vb-Wetterlagen bereits mehrfach Auslöser dieser Hochwasserereignisse war. Bezüglich der Niederschlagsintensität und räumlichen Ausdehnung muss das Hochwasser im August 2002 jedoch als bisher einzigartig festgehalten werden.

Auf eine weitere differenziertere Darstellung des Hochwassers im August 2002 wird mit Verweis auf die oben genannten Quellen verzichtet. Die Darstellung der einzelnen Prozesse, die zu Schäden im Einzugsgebiet der Mulde geführt haben, dient nicht dem Ziel dieser Arbeit. Die Skizzierung dieses Hochwassers an dieser Stelle soll lediglich das Gefährdungspotenzial des ausgewählten Untersuchungsgebietes und damit die Bedeutung des hier bearbeiteten Themas untermauern.

Weitere Informationen, Untersuchungen und Methoden zur Beschreibung des Landschaftswasserhaushalts im Einzugsgebiet der Mulde können den Forschungsergebnissen des BMBF-Projektes „Elbe-Ökologie“ u.a. [WENDLAND & KUNDEL 1999], [SCHWARZE 2004], [HABERLANDT et al. 2001] entnommen werden.

4.10 Synopse der Gebietsbeschreibung

Zusammenfassend wird anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Fakten deutlich, warum sich das Einzugsgebiet der Mulde für die folgenden Betrachtungen besonders gut eignet. Zum einen existiert ein ausgeprägtes Gefährdungspotenzial, aus dem sich ein konkreter Handlungsbedarf ableiten lässt. Zum anderen hat die Beschreibung der naturräumlichen Ausstattung gezeigt, wie heterogen das Einzugsgebiet im Verhältnis zu seiner Größe ist.

Das extreme Süd-Nord-Gefälle der Jahresniederschlagshöhen und der Niederschläge während des Hochwassers 2002 führen zu völlig unterschiedlichen Belastungen der Böden im Bezug auf ihr Infiltrations- und Speichervermögen. Die unterschiedlichen Bodenverhältnisse im Erzgebirge, Lößhügelland und Tiefland sind ebenso ausgeprägt. Hinzu kommt eine ungleichmäßige Verteilung der Ackerflächen und Siedlungsgebiete über das Einzugsgebiet. In der Betrachtung der Abflussbildung werden diese Einflussfaktoren zusammengeführt und bilden im Einzugsgebiet der Mulde eine besonders große Vielzahl von

Kombinationsmöglichkeiten. Der daraus zu ziehende Erkenntnisgewinn ist ungleich höher als bei einem kleineren, homogenen Einzugsgebiet.

Hinzu kommt, dass durch die Menge der verschiedenen Standorteigenschaften der Vorteil des Einsatzes von Entscheidungshilfesystemen zur Verortung und Auswahl von Maßnahmen (Kapitel 7) interessantere, weil weniger vorhersehbare, Ergebnisse liefert. Nicht zuletzt bietet ein Einzugsgebiet von der Größe der Mulden, einer Methodik, die größtenteils auf die Standorteigenschaften zwingend angewiesen ist, die Chance, Umsetzungspotentiale unterschiedlicher Priorität (von sehr gut geeignet bis ungeeignet) zu identifizieren.

5 Datengrundlage und Datenaufbereitung

5.1 Einführung und Werkzeuge

In diesem Kapitel werden die verwendeten Datengrundlagen vorgestellt und erläutert, wie sie für die weiteren Untersuchungen aufbereitet wurden. Damit wird die in Kapitel 4 begonnene Bestandsaufnahme vervollständigt und verdeutlicht, welche Eingangsdaten für die sich anschließende Untersuchung notwendig sind. Auf die einzelnen Datensätze wird in relativ kompakter Form eingegangen, da die meisten der verwendeten Daten allgemein verfügbare und hinsichtlich ihrer Aussage, Genauigkeit und Genese bekannte Daten sind. Dieses gemeinsame Merkmal ist eine Zielvorgabe der entwickelten Methodik gewesen, um die Übertragbarkeit nicht durch einen zu hohen Anspruch an die Datengrundlage zu beschränken. Eine weitere Gemeinsamkeit ist, dass die hier vorgestellten Daten flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorliegen.

Das Untersuchungsgebiet ist nicht identisch mit dem zuvor beschriebenen Flusseinzugsgebiet der Mulde. Nach Analyse der geografischen Verhältnisse und Prüfung der verfügbaren Datengrundlagen wurden die Einzugsgebietsbereiche betrachtet, die vollständig im Freistaat Sachsen liegen. Der Vorteil dieser Eingrenzung ist eine erhebliche Beschränkung des Aufwandes zur Datenbereitstellung und –aufbereitung.

Von dieser Einschränkung sind die südlichen und nördlichen Einzugsgebietsteile betroffen (siehe Abbildung 27). Im Süden des Einzugsgebietes sind 607 km² aus der Betrachtung ausgespart worden. Neben den Teileinzugsgebieten auf tschechischem Staatsgebiet gehören hierzu auch die Sächsischen Gebiete, die hydrologisch mit den tschechischen Gebieten Teileinzugsgebiete bilden. Im Norden endet das hydrologische Untersuchungsgebiet am Pegel Bad Dübener Heide. Das bedeutet, dass die Einzugsgebiete von Lober und Leine zumindest bei der hydrologischen Modellierung unberücksichtigt bleiben. Damit reduziert sich das Untersuchungsgebiet in diesem Bereich um 1.232 km². Das verbleibende Gebiet umfasst 5.564 km² oder 75% der Gesamtfläche. Es hat eine verbleibende Nord-Süd-Ausdehnung von 136 km, die maximale Ost-West-Ausdehnung sind ca. 85 km. Das reduzierte Mulde-Einzugsgebiet wurde nach hydrologischen Gesichtspunkten in 30 Teileinzugsgebiete untergliedert (vgl. Abbildung 34 in Kapitel 5.2.5)

Die Erfassung, Verwaltung, Prüfung, Analyse, Darstellung der räumlichen Daten kann nur mit Hilfe eines leistungsfähigen Geographischen Informationssystems (GIS) durchgeführt werden. Ein GIS ist in der Lage, umfangreiche räumliche Geometrien eines Einzugsgebietes sowie die damit verknüpften Merkmale der Datenbank miteinander zu kombinieren (verschneiden) und so die Grundlage für weitergehende Analysen zu generieren. Im Folgenden, insbesondere in den Kapiteln 6 und 7, sind eine Reihe von Anwendungsbeispielen für diese Methodik zu finden. Des Weiteren bildet die GIS-technische Bearbeitung der Datengrundlagen eine fundamentale Grundlage für einzugsgebietsweite hydrologische Modellierung.

In der vorliegenden Arbeit kamen zwei GIS-Produkte zum Einsatz. Im Allgemeinen wurden die Daten mit ArcView 3.1[®] der Firma Environmental Systems Research Institute, Inc. [ESRI 1998] bearbeitet. Für bestimmte Berechnungsoperationen wurde die GIS-Software GeoMedia[®] Professional 5.2 der Firma Intergraph Corporation [INTERGRAPH CORP. 2004] verwendet, da dieses Programm auf einem herkömmlichen PC mit Microsoft[®] WindowsXP[®] Betriebssystem die notwendigen Verschneidungen in kürzerer Zeit bewältigte.

Wie bereits in Kapitel 3.3 dargestellt, ergeben sich aus den gewählten Betrachtungsmaßstäben (Einzugsgebiet der Mulden 5.564 km² bzw. des Lungwitzbaches 143 km²) Anforderungen und Einschränkungen für die räumlichen Diskretisierung der Eingangsdaten. Dies muss insbesondere bei der Aufbereitung der Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung beachtet werden.

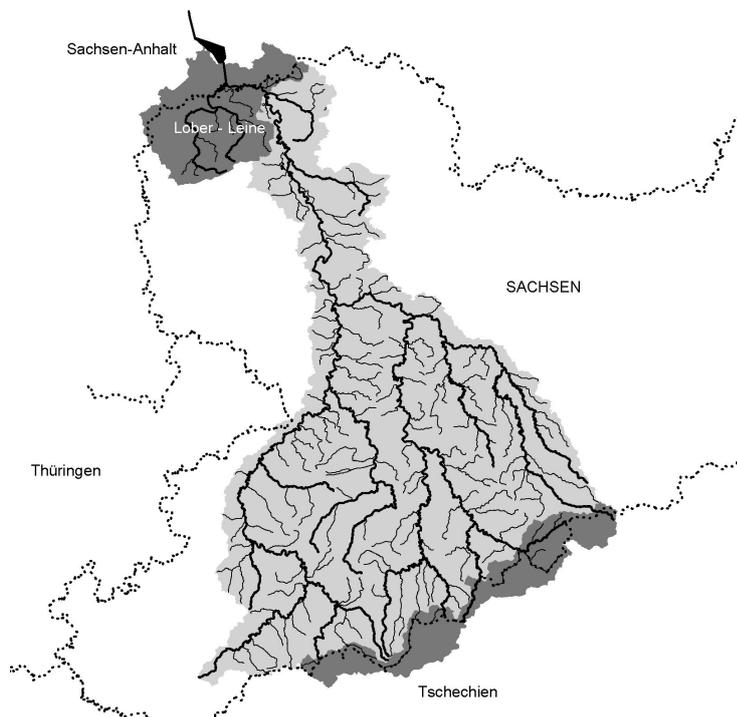


Abbildung 27: Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

5.2 Raumbezogene Daten

5.2.1 Standortkundliche Daten, Bodendaten

Die Bodenkundliche Datengrundlage wurde von Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie, Außenstelle Freiberg, zur Verfügung gestellt. Die bereitgestellte Konzeptbodenkarte (BK 50_{konz}) ist eine Bodenkarte hoher räumlicher Auflösung, die mit verhältnismäßig geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand vom LfUG erstellt werden konnte, da sie auf den Standortkartierungen der Landwirtschaft (MMK) und der Forstwirtschaft (FSK) aufgebaut wurden [LFUG 1997b]. Sie dient dem LfUG vorranglich dazu, die Bodenkarte (BK 50) zu erstellen, die jedoch zu Zeit nicht flächendeckend vorliegt. Der Vorteil der bereitgestellten Datengrundlage gegenüber den Ursprungsdaten ist eine einheitliche Datenbankstruktur sowie blattschnittfreie und von Überlappungen bereinigte Flächendaten. Die bodenkundliche Nomenklatur der meisten Merkmale der Datenbank entspricht den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4) [AG BODENKUNDE 1994].

Die Datenbank der Bodenkonzeptkarte enthält Informationen zu Leitbodentypen, Substrattypen, zur Mächtigkeit des Lockermaterials zum mittleren Flurabstand des Grundwassers und zur Tiefe stauender Horizonte. Jeder der 73.000 Einzelflächen im Mulde-Einzugsgebiet ist eine so genannte Aggregationsnummer (Aggnr) zugeordnet. Die Aggnr markiert Standorte, die gleiche oder vergleichbare Bodeneigenschaften aufweisen. Im Einzugsgebiet der Mulde sind über 700 verschiedene Aggnr vertreten. Über die Aggnr kann die Bodenkonzeptkarte mit einer weiteren Datenbank verknüpft werden – der Leitprofildatenbank. In dieser Datenbank ist für alle Aggnr ein Bodenprofil definiert, das aus bis zu sechs Schichten zusammengesetzt sein kann. Diese Bodenschichten werden durch eine Horizontbezeichnung, die Bodenart und ihre Mächtigkeit beschrieben.

Bedingt durch die Herkunft der Bodenkonzeptkarte als die Kombination aus Waldbodenkarte und Mittelmaßstäbiger Landwirtschaftlicher Standortkartierung sind die Böden von Siedlungsgebieten nur teilweise enthalten. Diese Datenlücken konnten im begrenzten

Umfang durch das Einfügen der Bodenübersichtskarte (M 1:200.000) in die Bodenkonzeptkarte (M 1: 50.000) reduziert werden. Die Bodenübersichtskarte (BÜK 200), ebenfalls vom LfUG bereitgestellt, hat in Bezug auf die wichtigen Merkmale eine ähnliche Datenbankstruktur wie die Bodenkonzeptkarte. Daher war es ohne größeren Aufwand möglich, diese Datenquelle mit einander zu verbinden.

Für die folgenden Standortanalysen war eine weitergehende Aufbereitung der Bodenkonzeptkarte nicht notwendig, die in den Kapitel 6 und 7 angewandten Methodiken erlauben eine Nutzung der Daten in unveränderter Form. Anders verhält es sich im Bezug auf die hydrologische Modellierung. Die Verschneidung der Bodendaten mit der Landnutzung, die für die Generierung hydrologischer Modelleinheiten notwendig ist, führt bei Verwendung unvereinfachter Flächeninformationen zu nicht mehr handhabbarer Feingliedrigkeit (181.000 Einzelflächen für das Gesamtgebiet).

Wie im Falle der Landnutzung (vgl. Kapitel 5.2.2) wurde daher die Bodeninformationen zu Bodenklassen aggregiert. Insgesamt enthält die Bodenkonzeptkarte zusammen mit den Informationen aus der Bodenübersichtskarte rund 1.000 verschiedene Bodenformationen, die sich allerdings in ihrer Schichtung, Mächtigkeit und Bodenartenkombination sowie ihrer Nähe zum Grundwasser teilweise sehr ähnlich sind. Um die Infiltrations- und Retentionseigenschaften ansatzweise in die Klassifizierung mit einfließen zu lassen, wurde nach dem in Kapitel 6 beschriebenen Ansatz von Green und Ampt [GREEN & AMPT 1911], [CHU & MARIÑO 2005], für jeden Boden die Infiltrationshöhe bestimmt. Hierzu wurde ein 72-stündiger Blockregen mit einer Niederschlagsintensität von 2 mm/h verwendet.

Um eine weitere, fachlich begründete Aggregation realisieren zu können, wurden die Bodenarten von der deutschen Fraktionseinteilung nach [AG BODENKUNDE 1994] in die US-amerikanische Einteilung nach [USDA 2006] übertragen, die lediglich eine Untergliederung in 12 Bodenartenklassen vorsieht. Im Vergleich dazu sind nach deutscher Klassifizierung 31 Bodenartenuntergruppen definiert (siehe Abbildung 28).

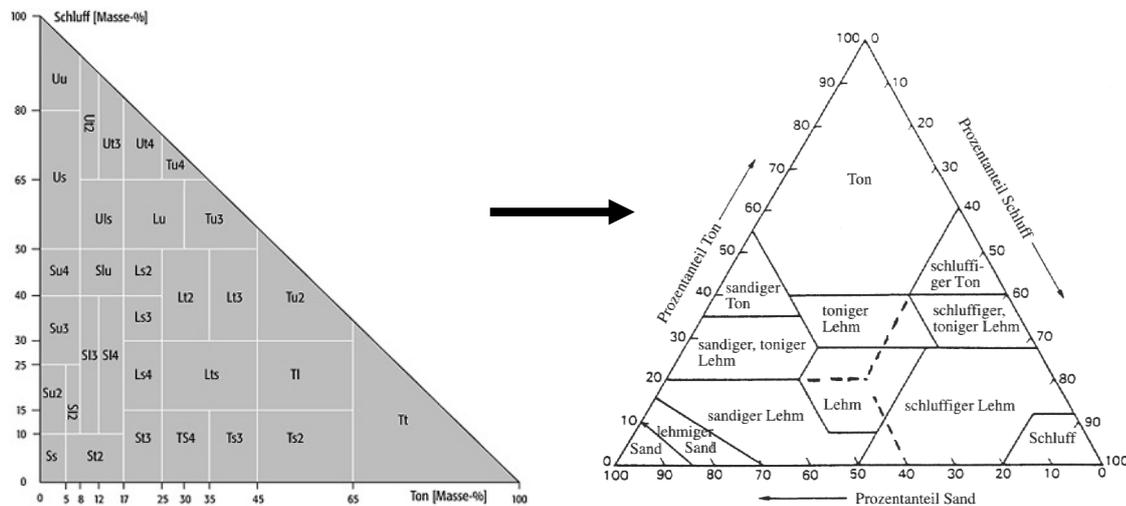


Abbildung 28: Deutsches und US-amerikanisches Bodenartendiagramm [AG BODENKUNDE 1994] und [USDA 2006]

Nach Abschluss dieser vorwiegend manuellen Datenaufbereitung wurden 18 Bodengruppen gebildet (siehe Tabelle 1). Die verwendeten Kürzel „G“ und „T“ geben einen Hinweis auf die Hydromorphie der Bodengruppe (G für grundwasserbeeinflusst; T für terrestrisch). Insgesamt wurden sechs Bodengruppen aus grundwasserbeeinflussten Böden, neun Bodengruppen aus sickerwasserbeeinflussten Böden und drei Bodengruppen aus Stauwasserböden gebildet. In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der definierten Bodenklassen im Einzelnen aufgeführt.

Tabelle 1: Kennwerte der 18 Bodengruppen

Beschreibung	Klassen- kürzel	Anzahl der Boden- schichten	Mächtigkeit der 1. Schicht [m]	Mächtigkeit der 2. Schicht [m]	Mächtigkeit der 3. Schicht [m]	Bodenart der 1. Schicht	Bodenart der 2. Schicht	Bodenart der 3. Schicht	Gesamt- mächtigkeit [m]	Anteil im Mulde- Einzugsgebiet [%]	Flurbestand [m]	Vor- herrschender Bodentyp	Boden- kategorie
Grundwasserboden, Moorböden, schlechtes Infiltrationsvermögen	G0	3	0.20	0.90	0.20	Uls	Uls	Sl2	1.30	2.12%	< 0.5	YK-GG	Grundwasserbeeinflusste Boden
Gley-Vega, mit schlechtem Infiltrationsvermögen	G1	2	0.20	1.10		Ls3	Ls3		1.30	1.50%	< 0.8	GG-AB	Grundwasserbeeinflusste Boden
Auenböden und Gleye mit schlechtem Infiltrationsvermögen	G2	2	0.20	1.00		Uf2	Uf2		1.20	5.89%	< 1.2	GGn	Grundwasserbeeinflusste Boden
Gleye und Pseudogleye mit mäßigem Infiltrationsvermögen	G6	3	0.20	0.60	0.50	Sl2	Sl2	Ss	1.30	1.60%	< 1.3	SS-GG	Grundwasserbeeinflusste Boden
Gleye mit gutem Infiltrationsvermögen	G8	2	0.10	1.20		Ss	Ss		1.30	1.22%	< 1.0	GG	Grundwasserbeeinflusste Boden
Grundwasserboden mit hohem Infiltrationsvermögen	G13	3	0.30	0.20	0.90	Sl2	Sl2	Ss	1.40	0.44%	< 1.2	GG-BB	Grundwasserbeeinflusste Boden
Braunerden mit schlechtem Infiltrationsvermögen	T1	2	0.10	1.00		Ls3	Ls3		1.10	9.76%	> 2.0	BB	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Braunerden mit mäßigem Infiltrationsvermögen	T5	2	0.30	0.70		Uf2	Uf2		1.00	10.47%	> 2.0	BBn	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Braunerden mit mittlerem Infiltrationsvermögen	T6	2	0.30	0.70		Sl4	Sl4		1.00	1.87%	> 2.0	BBn	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Braunerden mit gutem Infiltrationsvermögen	T13	2	0.30	0.70		Sl2	Sl2		1.00	1.81%	> 2.0	BBn	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Braunerden mit hohem Infiltrationsvermögen	T14	3	0.30	0.10	0.60	Sl2	Sl2	Ss	1.00	9.42%	> 2.0	BBn	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Braunerde-Podsol mit schlechtem Infiltrationsvermögen	T2	2	0.10	0.90		Ls4	Ls4		1.00	8.24%	> 2.0	BB-PP	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Parabraunerde mit gutem Infiltrationsvermögen	T9	3	0.30	0.30	0.40	Ls3	Ls3	Sl4	1.00	7.01%	> 2.0	LLn	Sickerwasserbeeinflusste Boden
Pseudogley-Parabraunerde mit gutem Infiltrationsvermögen	T7	3	0.30	0.30	0.70	Uf2	Uf2	Lu	1.30	13.90%	> 2.0	SS-LL	Stauwasserboden
Pseudogley mit schlechtem Infiltrationsvermögen	T3/ T3a	2	0.30	0.70		Ls3	Ls3		1.00	18.27%	> 2.0	SSn	Stauwasserboden
Pseudogley mit mäßigem Infiltrationsvermögen	T4	3	0.20	0.40	0.50	Slu	Slu	Sl4	1.10	5.27%	> 2.0	SSn	Stauwasserboden
"Pseudoboden" unter Wasserflächen (ohne Bedeutung)	GW	1	1.50			TI			1.50	0.22%	< 0.2	JG	Subhydrischer Boden

Im Kapitel 9 wird noch einmal auf die hier aggregierten Bodengruppen eingegangen und im Einzelnen erläutert, welche Infiltrations- und Retentionseigenschaften die Böden bei unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung haben.

5.2.1.1 Konsequenzen der Bodenaggregation auf die hydrologische Berechnung

Ohne Zweifel stellt die hier vorgestellte Aggregation eine erhebliche Vereinfachung der Datengrundlage der hydrologischen Berechnungen dar. Aus diesem Grund war es von Interesse, anhand eines Teilgebietes zu prüfen, welche Konsequenzen sich hieraus für die hydrologische Berechnungen ergeben. Zu diesem Zweck wurden zwei Modellsysteme für das Einzugsgebiet des Lungwitzbaches erstellt. Das vereinfachte System des N-A-Modells beinhaltet die zusammengefassten Bodengruppen. Das zweite System wurde auf der Basis der originalen Bodendaten erstellt. Mit beiden Systemen wurde der Hochwasserzeitraum vom 01.07.2002 bis 30.09.2002 simuliert. Der Vergleich der berechneten Abflussganglinien an verschiedenen Knotenpunkten des Einzugsgebietes ergab kaum nennenswerte Unterschiede. Der Fehler in der hydrologischen Modellierung aufgrund der Vereinfachung der Bodendaten zu erwarten ist somit als sehr klein einzuschätzen.

5.2.2 Daten zur Landnutzung

Als Datengrundlage zur Landnutzung stehen die Informationen aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) des Landesvermessungsamtes Sachsen zur Verfügung. Die Datengrundlage wird in allen Bundesländern einheitlich nach den Vorgaben des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (bkg) und des AdV [ADV 2003] erstellt und laufend aktualisiert. Das ATKIS-Basis DLM basiert auf der Vermessungsdaten und topographischen Karten im Maßstab 1:5.000 bis 1:25.000. Das Datenerhebungskonzept schreibt eine hierarchische Einteilung der Landnutzungskategorien in Objektbereiche (Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer etc.) und Objektarten (Wohnbaufläche, Industriefläche, Freizeitanlage etc.) vor. Aus der Vielzahl von Objektarten sind im Mulde-Einzugsgebiet 59 vertreten.

Für den Datenbereich Landnutzung stehen eine ganze Reihe alternativer Datengrundlagen zur Verfügung:

- CORINE (Coordination of Information on the Environment) die Landnutzungsdaten, die im Auftrag der Europäischen Union durch Auswertung von Satellitenbildern (Landsat TM5) aus den Jahren 1989 bis 1992 generiert wurden. Die Auflösung beträgt 100 Meter. Der Vorteil dieser Daten ist die kostengünstige, EU-weite Verfügbarkeit. Der Nachteil dieser Daten ist die mangelnde Aktualität und räumliche Auflösung.
- IRS-1c Daten sind ebenfalls Landnutzungsdaten, die aus Satellitenbildern abgeleitet wurden. Sie haben eine Auflösung von 20 m und bilden den Ist-Zustand der Landnutzung aus dem Jahre 2001 ab. Der Nachteil dieser Daten ist die sehr begrenzte Anzahl an Landnutzungsklassen.
- Die CIR (Color-Infrarot)-Biotoptypen und Landnutzungskartierung basiert, wie der Name schon sagt, auf Color-Infrarot Luftbildaufnahmen aus den Jahren 1992 – 1993 im Maßstab 1:10.000. Der Vorteil dieser Daten ist neben der allgemeinen Verfügbarkeit auch die hierarchische Ordnung der Landnutzungscodierung, die sehr detailliert ist [RÜTER et al. 2006] [LFUG 2007a].

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen, die die verschiedenen digitalen Landnutzungsdaten einander gegenüber gestellt haben [HIRT 2003] [ERNSTBERGER et al. 2003]. Dabei werden verschiedenste Ungenauigkeiten aufgedeckt. [LANGE 2005] und [SIEKER et al. 2002a] weisen darauf hin, dass vielfach die Siedlungsflächenanteile aufgrund ihrer vielfach feingliedrigen und linienförmigen Strukturen unterschätzt wird. Mit Verweis auf diese Vorarbeiten wird hier auf eine eingehende Diskussion der Datengrundlage verzichtet.

Ausschlaggebend für die Wahl der ATKIS-Landnutzungsdaten war deren laufende Aktualisierung sowie die bundesweite Verfügbarkeit in einheitlicher Form.

Die Aufbereitung der Landnutzungsdaten gestaltete sich besonders aufwendig, da vor einer Weiterverarbeitung überlappende Informationen aus den verschiedenen Objektebenen bereinigt werden mussten. Ziel der Weiterverarbeitung war es, über eine flächendeckende, lückenlose Datengrundlage zu verfügen, ohne dabei Mehrfachinformationen in Kauf nehmen zu müssen. Mit Hilfe des Unterprogramms „poycln.ave“ für ArcView (ein Skript von der ESRI-Internetseite) und einer nachträglichen Datenbankbearbeitung mit Hilfe einer Visual Basis Routine wurde die Datenbereinigung umgesetzt.

Um die Landnutzungsinformationen speziell für die landwirtschaftlichen Flächen zu erweitern, wurden die ATKIS-Daten um die aus dem InVeKoS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) ergänzt. Das InVeKoS ist ein im Rahmen der Agrarreform von der EU eingeführtes Regelungssystem, das in erster Linie der besseren Steuerung von Ausgleichszahlungen dient. Im Zuge dessen wurde ein flächendeckendes „Feldblockkataster“ aufgebaut. Diese Feldblöcke ergeben eine „Inselkarte“, deren Geometrien in die flächendeckende ATKIS-Datengrundlage eingepasst wurden. Die so entstandene Landnutzungsinformation besteht aus rund 250.000 Einzelflächen.

Nach jetzigem Wissenstand kann festgehalten werden, dass die erwartete Verbesserung der Datengrundlage in keinem ausgewogenen Verhältnis zum dadurch entstandenen Bearbeitungsaufwand steht. Die Geometrie der Feldblöcke unterscheidet sich nicht signifikant von den Ackerflächen der ATKIS-Kartierung. Da aus Gründen des Datenschutzes nur allgemeine Angaben zu den Feldblöcken von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) weitergegeben werden kann, verbesserte sich die Datenbankinformation allenfalls in seiner Aktualität.

Für die hydrologische Modellierung wurden die 59 im Einzugsgebiet der Mulde vertretenen ATKIS-Objektarten zu 13 Haupttypen zusammengefasst (siehe Tabelle 2). So finden sich beispielsweise unter dem Haupttyp „Brache“ die Objektarten „unbestimmbare Flächen“, „Tagebau“, „Steinbrüche“, „Halden“ und „vegetationslose Flächen“. Unter dem Haupttyp „Siedlung“ wurden „Wohnbauflächen“, „Industrie- und Gewerbeflächen“, „Kläranlagen“, „Wasserwerke“ und „Stadien“ zusammengefasst. „Sportanlagen“, „Friedhöfe“, „Grünanlagen“ und „Campingplätze“ sind der Kategorie „Siedlungsgrün“ zugeordnet.

Neben den 13 festgelegten Landnutzungsklassen und die dafür vergebenen Kürzel sind in Tabelle 2 die Parameter aufgeführt, die für die Aufstellung des hydrologischen Modells bzw. für die Berechnung der Abflussbildungsprozesse verwendet wurden. Die hier aufgeführten Parameter stellen Mittelwerte dar. Im Kapitel 9.4 werden im Einzelnen die Quellen genannt, die dieser Parameterwahl zugrunde liegen. Die Parametrisierung der Ackerflächen unter Berücksichtigung verschiedener Bewirtschaftungsmethoden, die in dieser Arbeit im Fokus steht, wird an gleicher Stelle differenziert eingegangen.

Tabelle 2: Modellierungsparameter der Landnutzungsklassen

Landnutzungs- klasse	Klassen- kürzel	Versieglungs- grad [%]	Rauheit [m ^{1/3} /s]	mittlerer Bedeckungs- grad [%]	Wurzel- tiefe [m]	Interzeptions- speicher [mm]
Laubwald	WLAUB	0.8	5	100	1.5	5
Mischwald	WMIX	0.8	5	100	1.5	6
Nadelwald	WNAD	0.8	5	100	1.5	7
Grünland	GRUNL	1.2	8	80	0.9	2
Acker	ACKER	siehe Tabelle 20 und Tabelle 21 (Kapitel 9.4.4)				
Brache	BRACH	2.8	10	20	0.9	2
Sättigungsfläche	SATTF	32	10	80	0.9	2
Garten	GARTE	2	12	50	0.9	2
Sonderkult	SKULT	2	12	30	0.9	2
Siedlungsgrün	SIEDG	2	13	80	0.9	2
Siedlung *)	SIED	12	15	50	0.5	2
Verkehr *)	VERK	20	20	50	0.5	2
Wasser	WASS	40	35	50	0.1	0.1

*) die Parameter beziehen sich auf den unversiegelten Teil der Siedlungs- bzw. Verkehrsfläche

5.2.3 Topographische- und orographische Daten

Für diese Untersuchung wurden digitale topografische Karten des Sächsischen Landesvermessungsamtes als Rasterkarten im Maßstab 1:10.000 (TK10) zur Verfügung gestellt. Die Rasterdaten liegen für jeden Blattschnitt in vier Bildebenen (Grundriss, Relief, Vegetation und Gewässer) vor und dienen zur kartographischen Darstellung der Ergebniskarten.

Zur Beschreibung des Reliefs wurde ebenfalls vom Sächsischen Landesvermessungsamt das digitale Höhenmodell (DHM) im 20 m Raster als XYZ-Koordinaten im ASCII-Format zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden mit Hilfe einer Visual Basis Routine zusammengefasst und dann im GIS zu einem ArcView-Grid weiterverarbeitet. Das Ergebnis dieser Datenverarbeitung wurde bereits in Abbildung 11 (Kapitel 4.3) vorgestellt. Die graphische Darstellung des Höhenmodells ermöglicht eine visuelle Plausibilitätskontrolle und gibt einen Überblick über die Topographie des Einzugsgebietes.

Das digitale Höhenmodell ist eine sehr wichtige Datengrundlage, da sich aus ihr eine Reihe von Einflussfaktoren wie die Hangneigung, die Fließrichtung und die Abflussakkumulation relativ einfach generieren lassen.

5.2.3.1 Zeit-Flächen-Funktion

Zur Abbildung der Retention der oberflächennahen Abflusskomponenten wurden, basierend auf dem digitalen Geländemodell, Zeitflächenfunktionen für jedes Teileinzugsgebiet berechnet.

Mit Hilfe eines ArcView-Zusatzmoduls „ZFL“ [HYDROTEC 2005] wird in Abhängigkeit von der Hangneigung, der Abflussakkumulation, der landnutzungsabhängigen Oberflächenrauheit und der Nähe zum Gewässernetz die Entwässerungszeit jeder Rasterzelle des Höhenmodells bis zum Gebietsauslass bestimmt. Das Ergebnis der Berechnung lässt sich insbesondere zu visuellen Plausibilitätskontrolle graphisch darstellen. In Abbildung 29 sind die Flächen gleicher Fließzeit bis zum Teilgebietsauslass farbig dargestellt. Das hier dargestellte Ergebnis wird vom GIS pro Teileinzugsgebiet (siehe Kapitel statistisch ausgewertet und kann in dieser Form problemlos an das N-A-Modell als Teil des Retentionsansatzes übergeben werden.

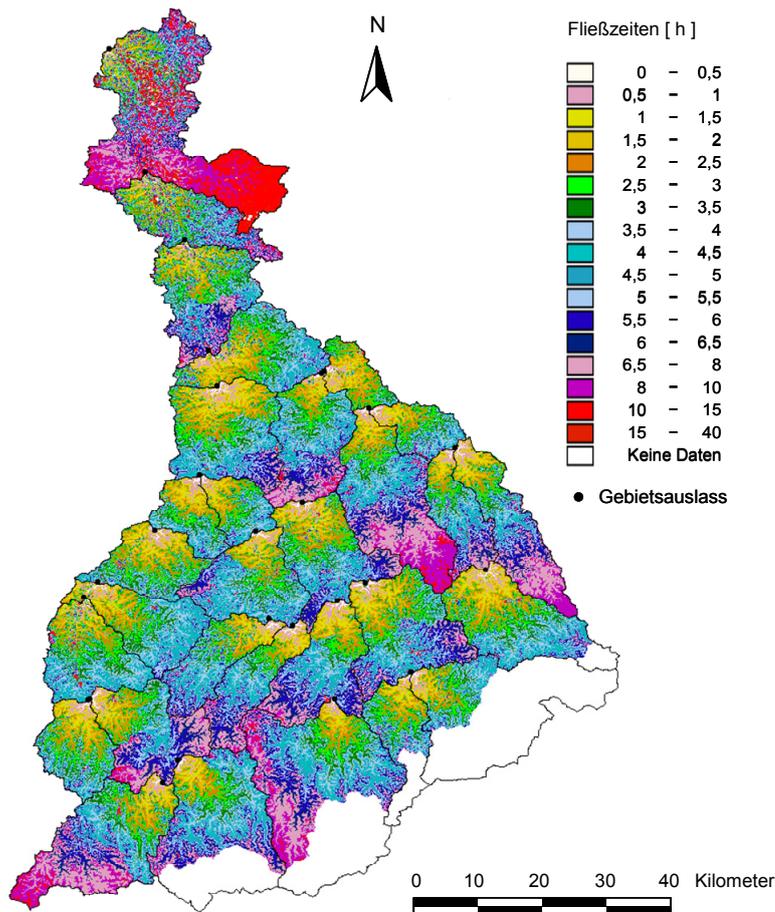


Abbildung 29: Entwässerungszeiten der Teileinzugsgebiete der Mulde

5.2.4 Hydrologisch-räumliche Gliederung

Die Karte der Teileinzugsgebietsgrenzen wurde vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie erstellt. Die insgesamt 1319 Einzelflächen haben eine Größe von weniger als einem Hektar bis über 60 km². Sie wurden aus den Höhenangaben der Topografischen Karte M 1:25.000 abgeleitet.

In einem ersten Schritt wurde die Modellierung auf einen Ausschnitt des Muldeinzugsgebietes beschränkt, um auf vergleichsweise überschaubarer Skalenebene erste Kalibrierungen durchführen zu können. Ausgewählt wurde hierzu das Einzugsgebiet des Lungwitzbaches im Mittellauf der Zwickauer Mulde (vgl. Kapitel 4.1.1 und 4.7.1). Für die Modellierung wurde die Teileinzugsgebieteseinteilung des LfUG übernommen und aus modelltechnischen Gründen geringfügig feiner untergliedert (siehe Abbildung 31). Das Gebiet verfügt über keine nennenswerten Speicherbauwerke. Am Gebietsauslass befindet sich eine Pegelstation Niederlungwitz des Regierungspräsidiums Chemnitz, die die Wasserstände des Lungwitzbaches mit hoher zeitlicher Auflösung aufzeichnet (siehe Kapitel 5.3). Das Einzugsgebiet ist damit besonders für die Kalibrierung der Modellparameter geeignet. In der Summe setzte sich das hydrologische Modell des Lungwitzbaches aus rund 1.300 hydrologischen Einheiten zusammen. In Abbildung 32 ist das STORM-Ersatzsystem für den Lungwitzbach in seiner Modellumgebung dargestellt.

Das gesamte, durch das Modell erfasste Einzugsgebiet der Mulde wurde für die Modellierung in 30 Teileinzugsgebiete eingeteilt (siehe Abbildung 30), um eine räumlich differenzierte Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen. Es umfasst 5.564 km². Hierzu wurden die bereitgestellten Teileinzugsgebiete so aggregiert, dass die Ausgabe von

Abflussganglinien an markanten Knotenpunkten (Zusammenflüssen, oder Pegelstandorten) gewährleistet ist. Die Untergliederung orientierte sich an den hydrologischen Einzugsgebietsgrenzen des Gewässersystems sowie an der naturräumlichen Gliederung des Einzugsgebietes. Der Bereich des Einzugsgebietes nördlich von Leipzig ist in der Teileinzugsgebietseinteilung nicht mehr berücksichtigt, da dieses Teilgebiet erst an der Grenze zu Sachsen-Anhalt der Mulde zufließt und die Abflüsse vor dem „Mündungspegel“ der Mulde (Bad Dübener Heide) nicht mehr erfasst werden.

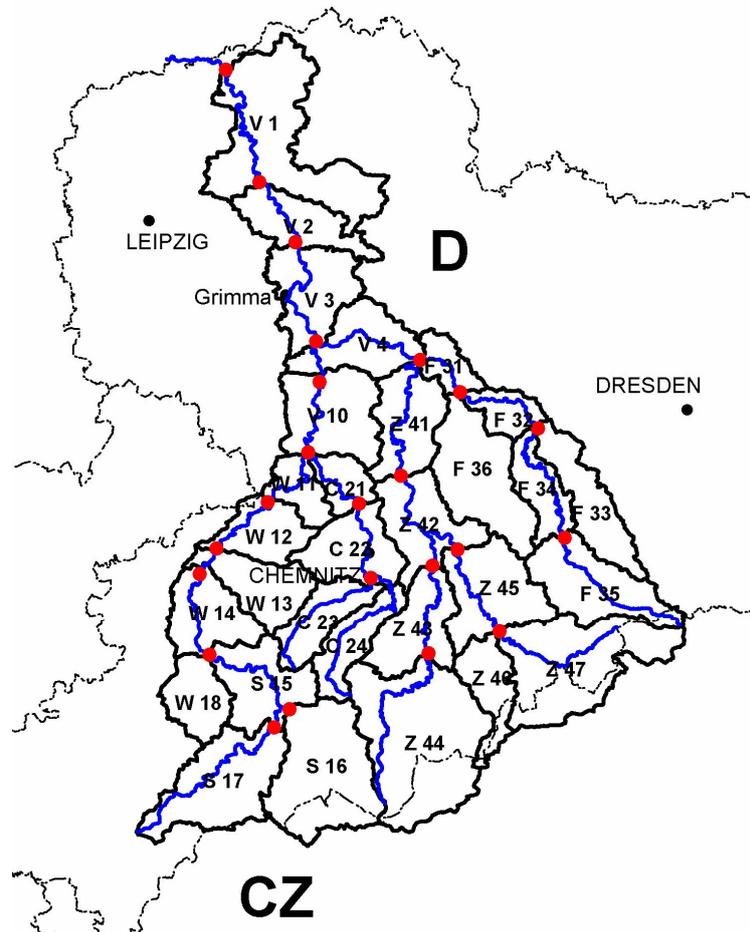


Abbildung 30: Teileinzugsgebiete des Gesamtuntersuchungsgebietes

Das hydrologische Modell für das Gesamtgebiet besteht nach Verschneidung der Teileinzugsgebiete mit der Landnutzung und Standortinformation je nach Szenario aus bis zu 4.700 hydrologischen Einheiten. Hinzu kommen für jedes Teileinzugsgebiet die versiegelten Flächen, die zu einer Einzelfläche zusammengefasst wurden und deren Abflussbildung ohne Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes nach der Grenzwertmethode [IPS 2006] berechnet wurde. In Abbildung 33 ist das STORM-Ersatzsystem für das Gesamtgebiet in seiner Modellumgebung dargestellt (siehe Kapitel 10.2).

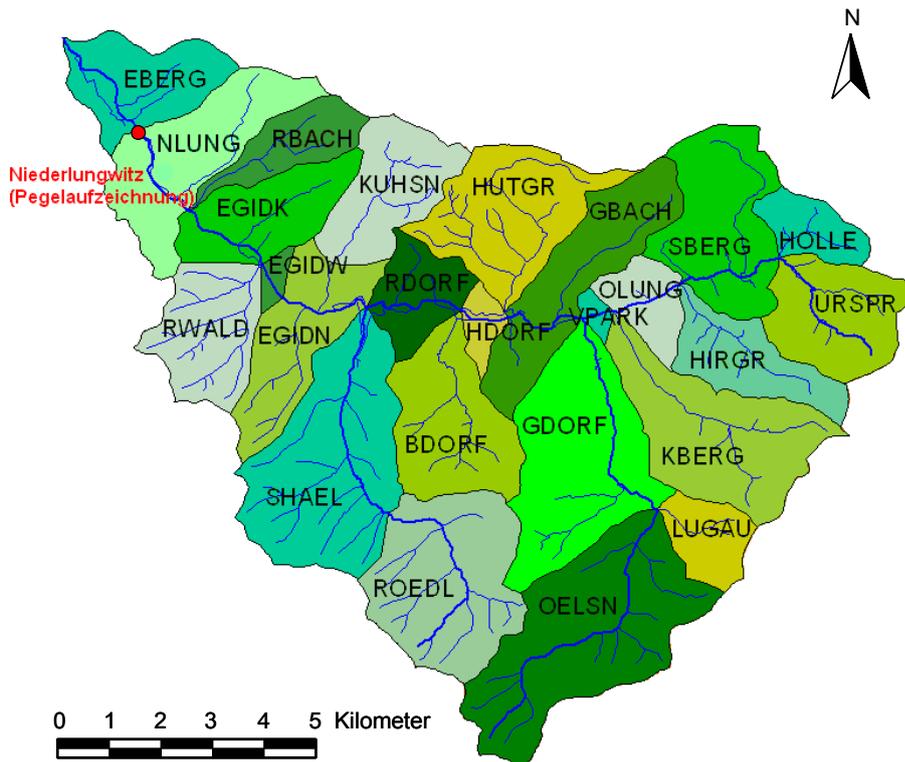


Abbildung 31: Teileinzugsgebiete und Gewässersystem des Lungwitzbaches

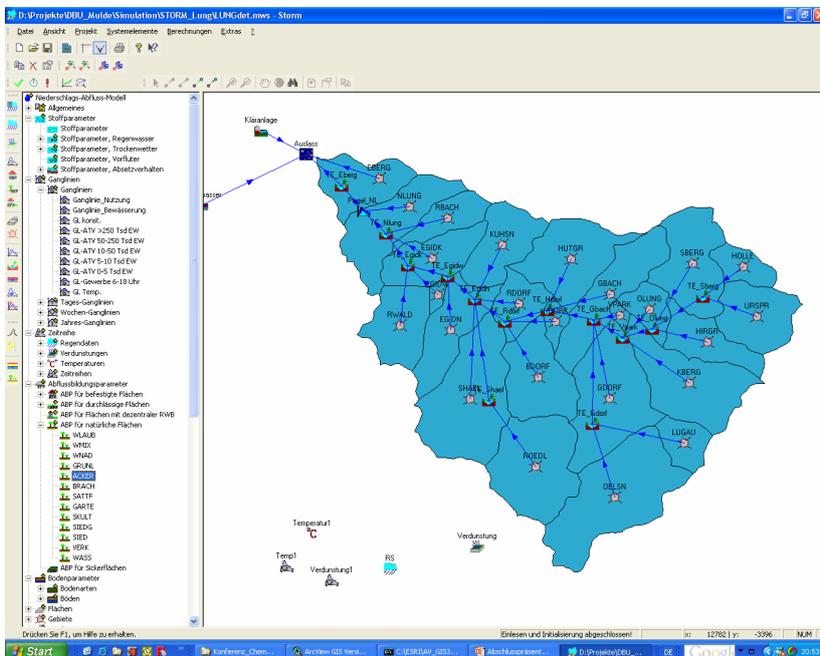


Abbildung 32: Hydrologisches STORM-Ersatzsystem für den Lungwitzbach

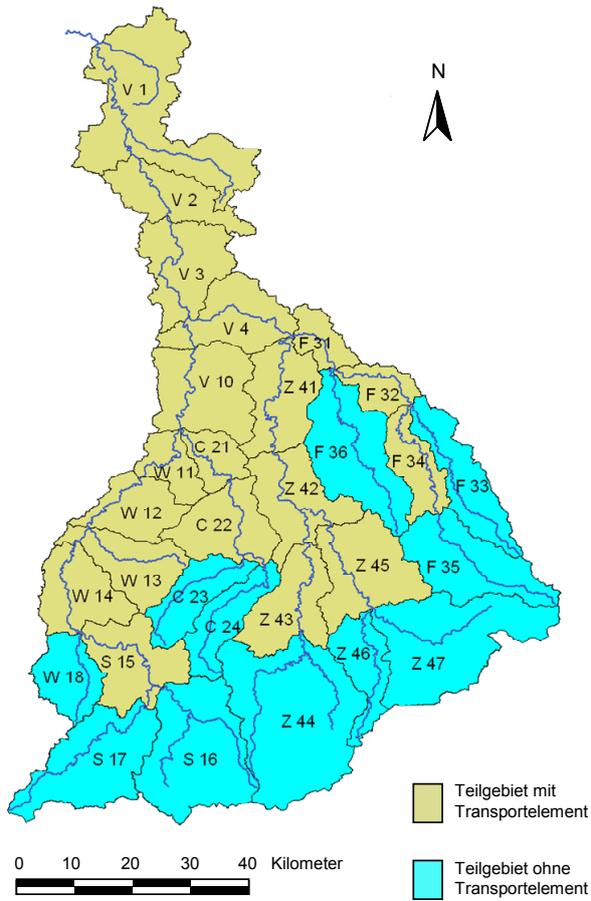


Abbildung 34: Darstellung der Teilgebiete mit und ohne Transportelement

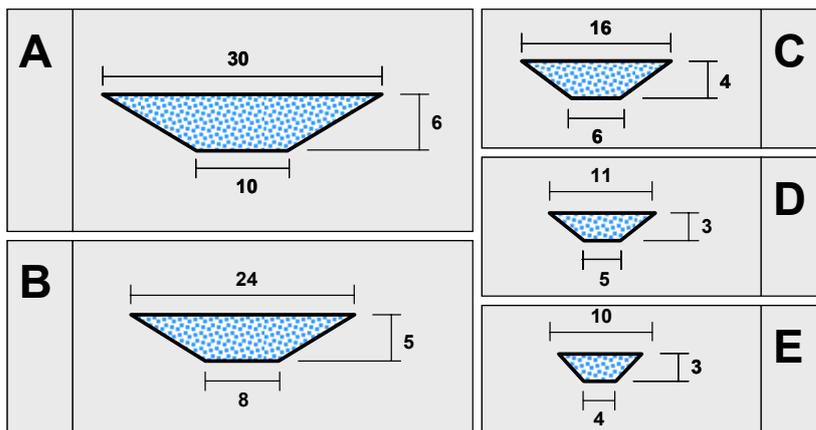


Abbildung 35: Ersatzgeometrien der Flussabschnitte

Tabelle 3: Spezifische Angaben zu den Transportelementen der Teilgebiete

Teilgebiet	Gewässername	Flusslänge [m]	Höhe Zuflussort [m]	Höhe Abflussort [m]	Höhen- differenz [m]	Gefälle [%]	Fluss- quer- schnitt
C 21	Chemnitz	18777	267,0	167,2	99,8	0,53	E
C 22	Chemnitz, Zwönitz	24060	340,5	267,0	73,5	0,31	E
F 31	Freiberger Mulde	13267	180,9	158,5	22,4	0,17	D
F 32	Freiberger Mulde	20147	239,3	180,9	58,4	0,29	E
F 34	Freiberger Mulde	34679	387,4	239,3	148,1	0,43	E
S 15	Zwickauer Mulde	30923	404,3	276,2	128,1	0,41	E
V 1	Mulde	37494	103,5	83,4	20,1	0,05	A
V 10	Zwickauer Mulde	29246	167,2	134,6	32,6	0,11	C
V 2	Mulde	17559	113,1	103,5	9,6	0,05	B
V 3	Mulde	27595	134,6	113,1	21,5	0,08	B
V 4	Freiberger Mulde	24838	158,5	134,6	23,9	0,10	C
W 11	Zwickauer Mulde	18766	208,1	167,2	40,9	0,22	D
W 12	Zwickauer Mulde	18610	232,2	208,1	24,1	0,13	D
W 13	Zwickauer Mulde	3161	238,5	232,2	6,3	0,20	D
W 14	Zwickauer Mulde	24531	276,2	238,5	37,7	0,15	D
Z 41	Zschopau	36751	238,8	158,5	80,3	0,22	D
Z 42	Zschopau	23533	290,9	238,8	52,1	0,22	D
Z 43	Zschopau	26155	369,4	290,9	78,5	0,30	E
Z 45	Flöha	33107	399,2	265,7	133,5	0,40	E

Im Einzugsgebiet der Mulde befinden sich rund 75 Speicherbauwerke, wovon jedoch nur ein geringer Teil für den Hochwasserschutz bestimmt ist. Im Stauanlagenverzeichnis 2002 und 1997 [LFUG 1997a; LFUG 2002b] sind Informationen zur Nutzungsart, geografischen Lage, Trägerschaft, Größe der Sperrbauwerke, Speichervolumen und zum Einzugsgebiet zu finden.

In der hydrologischen Berechnung wurden diese Informationen nicht verwertet, d.h., dass bei der Modellierung auf die Abbildung des Retentionseffektes der Speicherbauwerke verzichtet wurde. Der Grund für die Nichtberücksichtigung der Speicher sind die fehlenden Informationen zur konkreten Bewirtschaftung während der betrachteten Hochwasserereignisse. Aus den Ereignisanalysen zum Hochwasser 2002 können zahlreiche Informationen zu den abgelaufenen Prozessen (Zuflüsse, Abflüsse, Dammbüche) entnommen werden, die jedoch für eine modelltechnische Abbildung der Speicher nicht ausreichen. Das Fehlen der Speicher im Modell muss bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse berücksichtigt werden (siehe Kapitel 10.2).

5.2.6 Weitere flächenbezogene Daten

Eine weitere Datengrundlage, die für die Maßnahmenverortung (vgl. Kapitel 7) unter Umständen von Bedeutung sein kann, sind die im Freistaat Sachsen festgesetzten Wasserschutzgebiete. Hierzu gehören zählen Trinkwasser-, Talsperren- und Heilquellenschutz zonen.

Des Weiteren stehen digitale Flächeninformationen zu den FFH-Gebieten, den Naturschutzgebieten, dem Naturpark Erzgebirge und zu den Europäischen Vogelschutzgebieten gemäß § 10 Abs. 6 des Bundesnaturschutzgesetzes (SPA) zur Verfügung.

Im Rahmen der Bestimmung des Wasserrückhaltepotenzials (siehe Kapitel 6) bestand die Aufgabe, die anthropogenen Einflüsse auf das Infiltrationsverhalten und die Abflussbildung auszublenden, um das tatsächliche Potenzial des Bodenspeichers zu erfassen. Aus diesem Grund wurde die aktuelle Landnutzung in diesen Betrachtungen durch einen fiktiven jedoch wissenschaftlich begründeten „Naturzustand“ ersetzt. Die potenzielle natürliche Vegetation wurde von [SCHMIDT et al. 2002] für den Freistaat Sachsen „kartiert“.

5.3 Zeitbezogene Daten

5.3.1 Meteorologische Daten

Eine Auswahl von Jahresklimawerten wurde bereits in Kapitel 4.8 vorgestellt. Auch wenn die Jahresmittelwerte zum Niederschlag, zur Temperatur und zur Gras-Referenzverdunstung der Datensammlung zur Naturraumbeschreibung von [HAASE & MANNFELD 2002] entnommen wurden, so stammen doch alle diese Daten aus dem Bestand der Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Alle meteorologischen Daten, die in dieser Arbeit genutzt werden, wurden vom DWD erfasst und bereitgestellt.

Für die Untersuchungen standen kontinuierliche Messreihen für den Niederschlag, die Lufttemperatur sowie die potenzielle Verdunstung als Gras-Referenzverdunstung für den Zeitraum zwischen 1973 bis 2002 als Tageswerte zur Verfügung. Es handelt sich um korrigierte Niederschlagsdaten. Die potenzielle Verdunstung wurde mit dem Verfahren nach [WENDLING 1995] berechnet, das auch für die Daten der Hydrologischen Atlases von Deutschland verwendet wurde. Für das Einzugsgebiet der Mulde konnten diese Daten von den Klimastationen Carlsfeld (Westerzgebirge), Marienberg (mittleres Erzgebirge), Chemnitz (Erzgebirgsbecken) und Leipzig (Leipziger Land) bereitgestellt werden (siehe Abbildung 36 b). Diese vier Klimastationen stellen nur eine kleine Auswahl der existierenden Klimastationen des DWD im Umfeld des Mulde-Einzugsgebietes dar. [HABERLANDT et al. 2005] haben für ihre Untersuchungen im Umfeld des Mulde-Einzugsgebietes 287 Stationen mit Tageswerten (DWD RR-Meßnetz), 21 Stationen mit Stundenwerten (DWD MI-Meßnetz) und 3 Radarstationen genutzt. Aus finanziellen und organisatorischen Gründen wurde die Bereitstellung jedoch auf die oben genannten repräsentativen Stationen zunächst begrenzt.

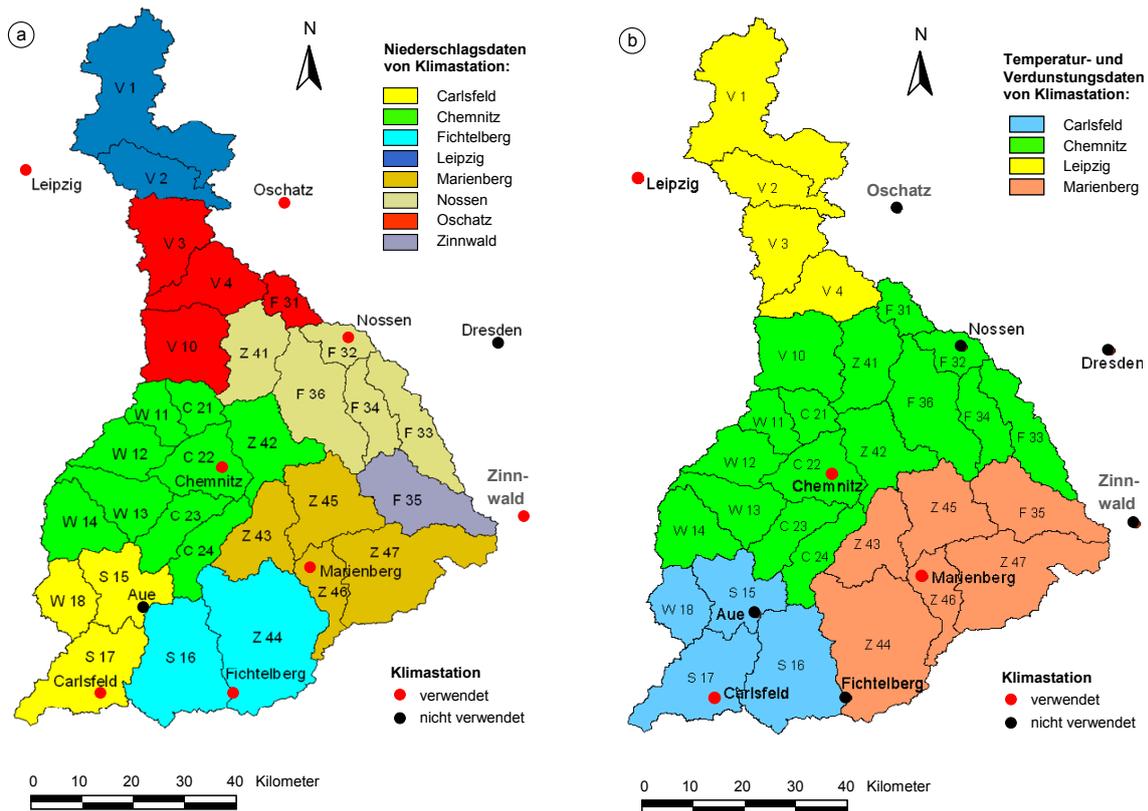


Abbildung 36: Zuordnung der Niederschlagsdaten (a) sowie der Temperatur und Verdunstungsdaten (b) der Klimastationen zu den Teilgebieten

Während die die Temperaturdaten und die Daten zur potenziellen Verdunstung in ihrer zeitlichen Auflösung (Tageswerte) den Ansprüchen der hydrologischen Modellierung genügen (vgl. Kapitel 3.3), sind die Tagesniederschlagswerte für die modelltechnische Abbildung von historischen Hochwasserereignissen ungeeignet.

Im Rahmen des DBU-Projektes zum vorbeugenden Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße [SIEKER et al. 2002b] wurden die Verwendung von Tagesniederschlagswerten und deren Wirkung auf die hydrologischen Modellierung exemplarisch berechnet. Abbildung 37 zeigt deutlich, dass bei Berechnungszeitschritten von 24 h die Scheitel der Abflussganglinien nicht abgebildet werden können. Aus diesem Grund wurden die Tagesniederschläge lediglich dazu verwendet, in Kombination mit den hydrologischen Informationen (siehe Kapitel 4.9 und 5.3.2) Hochwasser erzeugende Niederschlagsperioden auszuwählen und für die zeitlich höher aufgelöste Niederschlagsdaten beim DWD anzufordern. Ausgewählt wurden elf Starkniederschlagsperioden aus den Jahren 1973, 1974, 1975, 1978, 1980, 1988, 1990, 1992, 1995 und 2002.

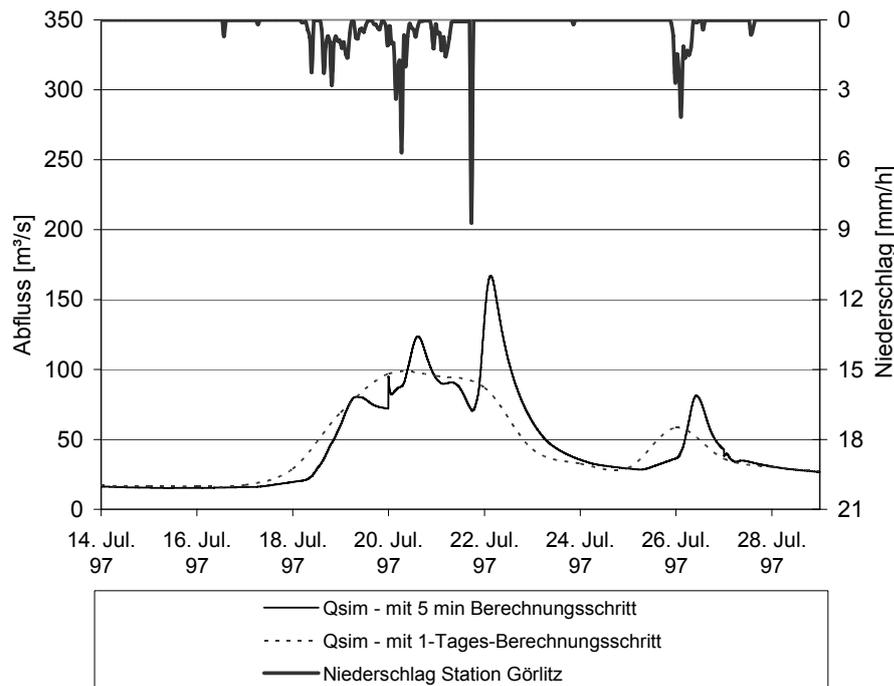


Abbildung 37: Einfluss unterschiedlicher Zeitschritte auf die hydrologische Berechnung – dargestellt am Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Pegel Görlitz)

Aufgrund der Ansprüche an die zeitliche Diskretisierung der Niederschlagsdaten wurde sich im weiteren Verlauf der Datenrecherche auf die MI-Klimastationen (Ombrometrische Daten von Messautomaten) konzentriert, von denen sich im direkten Umfeld des Einzugsgebietes zehn Stationen befinden (siehe Abbildung 36a). Die automatische Niederschlagsaufnahme des MI-Messnetzes hat im Einzugsgebiet der Mulde erst mit Beginn der hydrologischen Jahres 1991/1992 begonnen, sodass ein Großteil der ausgewählten Hochwasserzeiträume nicht abgedeckt war. Hinzu kam, dass die automatischen und unkorrigierten Niederschlagsaufzeichnungen erhebliche Fehler aufwiesen. Dies hat dazu geführt, dass diese Datenquelle gänzlich verworfen wurde. Als Alternative wurde auf Niederschlagsdaten des DWD, Geschäftsfeld Hydrometeorologie in Berlin-Buch zurückgegriffen. Diese hoch aufgelösten Daten (5-min-Werte) liegen nur für die frostfreien Monate (Mai bis September) zur Verfügung. Auch diese Daten erwiesen sich nach Aufbereitung und grafischer Auswertung als fehlerbehaftet (siehe Abbildung 38), so dass die Betrachtung Hochwasser erzeugender Niederschlagszeiträume auf die Hochwasserperioden im September 1995 und im August 2002 beschränkt werden musste.

Zur Abbildung der ungleichmäßigen Überregnung des Einzugsgebietes standen schließlich acht Niederschlagsstationen zur Verfügung: Chemnitz, Fichtelberg Leipzig, Carlsfeld, Marienberg, Nossen, Oschatz und Zinnwald (siehe Abbildung 36a und Tabelle 4).

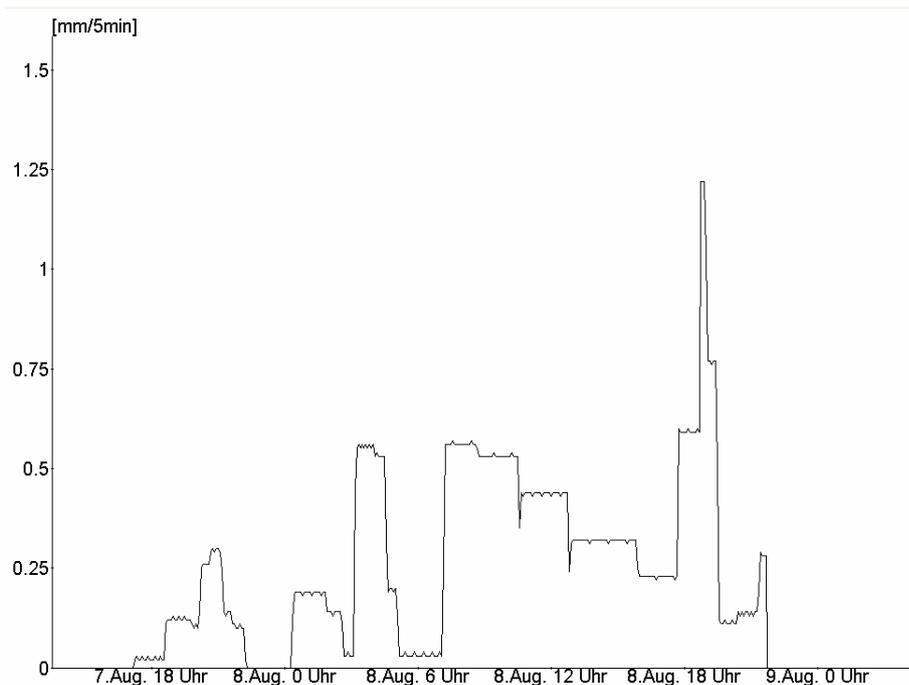


Abbildung 38: Fehlerhafte Niederschlagsdaten für die Station Fichtelberg für den Zeitraum 7. – 8. Aug. 1978

Tabelle 4: Kennwerte der verwendeten Niederschlagsstationen

Station	Höhe [m+NN]	Niederschlags- summe [mm]	Wiederkehrzeit [a]	Niederschlags- summe [mm]	Wiederkehrzeit [a]
		1.8 - 30.8.2002	nach KOSTRA *)	10.8. -10.9.1995	nach KOSTRA *)
Leipzig	141	116	5	98	1
Oschatz	150	189	42	96	2
Nossen	246	227	100	155	5
Chemnitz	418	183	15	118	2
Marienberg	639	297	> 100	200	25
Zinnwald	877	451	>> 100	209	5
Carlsfeld	897	328	> 100	250	5
Fichtelberg	1213	342	> 100	207	25

*) bezogen auf die Dauerstufe 48 h

Für eine realitätsnahe Abbildung der Hochwasserereignisse wäre eine Regionalisierung der Niederschläge, wie sie beispielhaft für des Hochwasser 2002 von [HABERLANDT et al. 2005] durchgeführt wurde, sinnvoll [MANIAK 1993]. Es ist jedoch in Anbetracht der verfügbaren Datengrundlage darauf verzichtet worden. Die Zuweisung der Niederschlagsdaten zu den Teilgebieten ist in Abbildung 36a ersichtlich. Demnach wurden die Niederschlagsdaten nach dem Thiessen-Verfahren den Teileinzugsgebieten zugeordnet, wobei nicht nur distanzbasiert, sondern auch unter Berücksichtigung der Gliederung des Makroreliefs bzw. der Jahresniederschlagsverteilung vorgegangen wurde.

Die fehlende Regionalisierung hat ohne Zweifel Auswirkungen auf die hydrologischen Berechnung (vgl. auch Kapitel 10.3). Der Verzicht auf die Regionalisierung ist jedoch methodisch vertretbar, da es in dieser Untersuchung nicht primär um die Nachbildung historischer Prozesse geht, sondern um den Vergleich verschiedener Bewirtschaftungsszenarien.

Als weitere meteorologische Datengrundlage wurde vom DWD die KOSTRA (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung) in digitaler Form zur Verfügung gestellt [DWD 1997; DWD 2005]. Die bereitgestellte Datenbank enthält für die Dauerstufe 72 h, 12 h und 1 h und die Wiederkehrzeiten 10 a und 100 a die statistischen, regionalisierten Niederschlagshöhen des KOSTRA- bzw. KOSTRA2000-Datensatzes. Dem KOSTRA-Datensatz liegt ein Basiszeitraum von 1951-1980 und dem KOSTRA2000-Datensatz der Basiszeitraum 1951 – 2000 zugrunde. Im Folgenden wurden nur die Werte des KOSTRA2000-Datensatzes verwendet.

Die KOSTRA-Daten dienen insbesondere, dazu die Wasserrückhaltepotenziale der Böden (siehe Kapitel 6) in Relation zu den Niederschlagshöhen zu setzen und als Eingangsdaten für die Abbildung des Infiltrationsprozesses (siehe Kapitel 6.2.2).

5.3.2 Hydrometrische Daten

Über die in Kapitel 4.9 genannten Daten hinaus wurden vom LfUG weiteren Messdaten und Durchflusstafeln und statistische Werte zu den Pegeln im Einzugsgebiet der Mulde bereitgestellt. Von den ca. 60 Pegeln des Basismessnetzes sind die Gewässerkundlichen Hauptwerte von 36 Pegeln ausgewertet. Für 16 dieser Pegel wurden vom LfUG die Tagesmittelwerte des Abflusses und der Wasserstände ausgewählter Abflussjahre bereitgestellt.

Da Tageswerte aufgrund ihrer zeitlichen Auflösung für die Kalibrierung des hydrologischen Modells ungeeignet sind (vgl. Kapitel 3.3 und 5.3.1), wurden von LfUG Stundenwerte bzw. 15 min-Werte des Wasserstandes für die Pegel Niederlungwitz und Golzern 1 für das Jahr 2002 bereitgestellt. Mit den dazugehörigen Durchflusstafeln war es möglich die Werte in Abflussganglinien umzuformen.

Der maximale Abflusswert am Pegel Golzern 1 während des Hochwassers 2002 beträgt 2605 m³/s. Dies entspricht nach der Extremwertstatistik der LfUG [LFUG 2005] mehr als einem HQ₂₀₀. Der Scheitelabfluss am Pegel Niederlungwitz im Jahr 2002 betrug 65.5 m³/s, was in der Statistik eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren zugeordnet wird.

Der Scheitel am Pegel Golzern 1 während des Hochwassers im September 1995 hatte mit 760 m³/s eine Wiederkehrzeit von 5 - 10 Jahren und am Pegel Niederlungwitz mit 37,9 m³/s eine Wiederkehrzeit von 10 - 20 Jahren.

Tabelle 5: Kennwerte ausgewählter Pegel in Mulde-Einzugsgebiet

lfd. Nr	Pegelbezeichnung	Gewässer	Pegel-Kennzahl	EZG-Größe [km ²]
1	Bad Dübener See	Vereinigte Mulde	56005.1	6170.8
2	Golzern 1	Vereinigte Mulde	56002.2	5442.0
3	Wechselburg 1	Zwickauer Mulde	56211.5	2107.0
4	Zwickau-Pöhlitz	Zwickauer Mulde	56207.0	1029.7
5	Aue1	Schwarzwasser	56379.0	362.5
6	Chemnitz 1	Chemnitz	56440.0	403.2
7	Niederlungwitz	Lungwitzbach	56430.0	137.6
8	Markersbach 1	Große Mittweida	56388.0	30.0
9	Nossen 1	Freiberger Mulde	56604.0	585.5
10	Berthelsdorf	Freiberger Mulde	56601.0	244.4
11	Lichtenwalde	Zschopau	56745.0	1574.6
12	Tanneberg	Zschopau	56740.0	90.5
13	Borstendorf	Flöha	56816.0	643.8
14	Pockau 1	Flöha	56814.0	384.6
15	Zöblitz	Schwarze Pockau	56840.0	129.2
16	Niederstriegis 1	Striegis	56732.0	283.0

5.4 Synopse der Datengrundlage

Immer wieder wird in einzugsgebietsweiten Untersuchungen darauf verwiesen, dass nach wie vor die Datenbeschaffung und –aufbereitung einen überproportionalen Zeitaufwand erfordert [HIRT 2003]. Diese Einschätzung muss an dieser Stelle beigepflichtet werden. Darüber hinaus wurde in diesem Kapitel mehrfach herausgestellt, wie die Datengrundlage die methodische Vorgehensweise beeinflusst. Dies gilt im konkreten Fall insbesondere für die zeitbezogen (meteorologischen und hydrometrischen) Daten.

Gleichzeitig wurde in diesem Kapitel erläutert, wie mit den bereitgestellten Daten umgegangen wurde, welche Ansätze verfolgt wurden, diese Daten zu vervollständigen und welche Methoden genutzt wurden, um Daten zu aggregieren.

6 Bewertung des Wasserrückhaltepotenzials der Landschaft

In dieser Arbeit ist das Wasserrückhaltepotenzial definiert als die Niederschlagshöhe, die unter optimalen Infiltrationsbedingungen im Oberboden dauerhaft gespeichert werden kann. Mit „optimal“ ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass die Infiltrationskapazität allein von der Durchlässigkeit und Schichtung des Bodens abhängt und nicht durch Effekte wie der Verschlammung oder Bodenverdichtung negativ beeinflusst wird. Unter „dauerhaft“ ist hier zu verstehen, dass das infiltrierte Wasser zumindest für einen Zeitraum einer ablaufenden Hochwasserwelle im Bodenkörper verweilen muss. Beachtet man die Zeitskalen des hydrologischen Prozesses ([BECKER 1986], [BLÖSCHL 1996] - vgl. Kapitel 2.2) so lässt sich festlegen, welche Abflussprozesse dominieren müssen, um dieses Kriterium zu erfüllen.

Die erste hier zu beantwortende Frage ist: „Auf welchen Standorten führt eine Rückkehr zu natürlichen Infiltrationsverhältnissen und eine darüber hinausgehende Infiltration zu keinem oder nur geringem Anstieg der schnellen unterirdischen Abflussprozesse?“ Diese Frage ist von zentraler Bedeutung für das Konzept des Hochwasserschutzes in der Fläche, da eine erhöhte Infiltration durch Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht zwangsläufig eine Entschärfung der Hochwasserentstehung mit sich bringt. Dahinter steht die in Kapitel 2.2 und 3.1 bereits erläuterte Tatsache, dass neben den Horton'schen Oberflächenabfluss weitere schnelle Abflussprozesse existieren.

Während der Mensch über praktische Möglichkeiten verfügt, zumindest teilweise den negativen Einflüssen auf die Infiltrationskapazität und Speicherfähigkeiten der Böden entgegenzuwirken (siehe Kapitel 7), ist die Beeinflussung der unterirdischen Abflussprozesse nur unter hohem technischen Aufwand und in extrem begrenzten Maße realisierbar. Somit geht es bei der Ausweisung des dominanten Abflussprozesses bereits um die grobe Einteilung in potenzielle Umsetzungsflächen und Ausschlussflächen für die in Kapitel 7 diskutierten Maßnahmen.

Für die Beantwortung der oben formulierten Frage hätte es ausgereicht, sich qualitativ den dominanten Abflussprozessen zuzuwenden. Mit Blick auf das weitere methodische Vorgehen zur Entwicklung von Umsetzungsstrategien bzw. –Szenarien (siehe Kapitel 7.2 und 8) war aber auch die Frage nach dem möglichen kumulierten Infiltrationsvolumen (in mm) von Interesse. Die räumliche Verbindung dieser beiden Standortbewertungen führt zur Bestimmung des Wasserrückhaltepotenzials.

Durch die Einbindung des Infiltrationsvorgangs kommt es zu einer quantitativen Bewertung der Standorte. Es kann zusätzlich zur reinen Betrachtung der Hochwasserentstehung eine zweite Frage beantwortet werden, die sich auf die Handlungsmöglichkeiten und Priorisierung von Standorten für den flächenhaften Hochwasserschutz bezieht. Es kann nun flächendeckend für das gesamte Einzugsgebiet beantwortet werden, wo Speicherpotenziale existieren und welches Speichervolumen von den verschiedenen Standorten zu erwarten ist.

Umgekehrt identifiziert die Standortanalyse auch die Einzugsgebietsbereiche, in denen der Bodenkörper als Hochwasserspeicher keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt und deshalb alternative Konzepte des Hochwasserschutzes greifen müssen.

6.1 Grundlagen

In der Einführung wird bereits deutlich, dass das im Folgenden vorgestellte Verfahren die Abflussbildungsprozesse auf unterschiedlichen Raumskalen betrachtet (Kapitel 2.2). Während die Beschreibung des Infiltrationsprozesses nach [BECKER 1986] auf der mikro- oder lokalen Skala beschrieben wird, ist die Bestimmung der bevorzugten oder dominanten Fließwege der Hang- oder mikro-meso Skala zuzuordnen.

6.1.1 Ansätze zur Beschreibung der Retentionsfunktion und der Abflussprozesse in der Landschaft

Der Hochwasserabfluss eines Gebietes setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen, die in Abhängigkeit des räumlichen und zeitlichen Betrachtungsmaßstabs von unterschiedlicher Relevanz für die Abflussdynamik im Vorfluter sind. Als wichtigste Abflussbildungsprozesse für die Hochwasserentstehung wurden bereits der Infiltrationsüberschuss, der Sättigungsüberschuss sowie der schnelle Zwischenabfluss genannt.

Im Kapitel 2.1 sind die maßgebenden hydrologischen Prozesse in den verschiedenen Zeit-Raum-Skalen bereits vorgestellt worden. An dieser Stelle soll daher speziell auf Untersuchungen eingegangen werden, die das Ziel hatten, die Retentionsfunktion von Einzugsgebieten zu charakterisieren und somit dem hier vorgestellten Ansatz als Grundlage zu dienen.

Grundsätzlich können die hier aufgeführten Untersuchungen zur Retentionsfunktion und zu den Abflussprozessen von Einzugsgebieten in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Während eine Reihe von Untersuchungen aus dem Bereich der Landschaftsplanung stammen, ist die zweite Gruppe von Untersuchungen einem Expertenkreis aus Hydrologie und Wasserwirtschaft zuzuschreiben. Auch wenn beide Gruppen teilweise auf gemeinsamen Grundlagen zum Prozessverständnis aufbauen, so fällt doch auf, dass die Methodik und die Zielsetzung unterschiedlich sind.

Die Untersuchungen und Methoden zur Quantifizierung der Retentionsfunktion der Landschaftsplanung, basieren auf der Tatsache, dass der Landschaft eine wichtige Hochwasserschutzfunktion zukommt, die in den künftigen Konzepten zum Hochwasserschutz stärker als bisher zur Geltung kommen soll. [GÄNSRICH & WOLLENWEBER 1995] formulieren als Veranlassung ihrer Untersuchungen eine einseitige Ausrichtung des Hochwasserschutzes auf die technischen Maßnahmen im Bereich der Täler und Auen. [RÖDER & BEYER 2002] verweisen darüber hinaus auf die Novellierung des Raumordnungsgesetzes aus dem Jahre 1998, das den Hochwasserschutz in der räumlichen Gesamtplanung fordert.

Ein gemeinsames Merkmal dieser Untersuchungen ist, dass es sich um empirische Ansätze handelt, bei denen die Gebiets- und Standorteigenschaften in Ordinalskalen eingeordnet werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die so klassifizierten Einflussfaktoren ohne Verwendung von Modellen miteinander kombiniert und damit vergleichsweise schnell und transparent Bewertungen der Landschaftspotenziale generiert werden können [RÖDER & BEYER 2002].

Beispiele für diese Form der Retentionspotentialbestimmung finden sich u. a. in [GÄNSRICH & WOLLENWEBER 1995], [RÖDER & BEYER 2002], [ZEPP 1992], [HAASE & MANNSFELD 2002], [MARKS et al. 1992] wobei die beiden letztgenannten Arbeiten eine umfassende naturräumliche Charakterisierung für die Landschaftsrahmen- und Regionalplanung vorstellen, in der die „Abflussregulationsfunktion“ nur ein Aspekt ist.

[ZIMMERMAN 2005] wendet diese Form der Bewertungsmethode an, um die Hochwasserwirksamkeit von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten zu prüfen und bei der Erstellung von Abkopplungsszenarien Flächen mit erhöhtem schnellem Zwischenabfluss (bodenbürtigem Abfluss) auszuschließen (siehe auch Kapitel 7.1.1).

Die Bewertungsparameter dieser Untersuchungen sind das Relief, die Bodeneigenschaften (Infiltrationskapazität, nutzbare Feldkapazität, Hydromorphie) und teilweise die Geologie sowie der Grundwasserflurabstand.

Als Nachteil dieser Verfahren muss der fehlende Ereignisbezug hervorgehoben werden. So basierend die oben genannten Analysen auf konstanten Annahmen zur Bodenfeuchte und differenzieren nicht zwischen unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. Häufig beziehen sich die Aussagen (zum Beispiel zum Direktabfluss) auf die mittlere Jahreswasserbilanz, was

mit den methodischen Ansätzen aber auch mit der Datenbasis zu begründen ist. Ein weiterer Nachteil ist die grobe räumliche Auflösung der Aussagen, die sich an den Bedürfnissen der Landesplanung orientiert. Mit Blick auf eine wasserwirtschaftliche Fachplanung hat dies zur Folge, dass kleinräumige Potenzialflächen nicht identifiziert werden.

Die Gruppe der hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Untersuchungen, auf die in dieser Arbeit eingegangen wird, wurden großteils im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Regionalisierung in der Wasserwirtschaft“ [KLEEBERG et al. 1999] erarbeitet. Die insgesamt 18 Forschungsvorhaben dieses Programms haben sich dabei unterschiedlichen Ebenen und Bereichen der Regionalisierung gewidmet.

Der Antrieb für eine verstärkte Auseinandersetzung mit der Regionalisierung in der Hydrologie ist der Wunsch und die Aufgabe, die Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen oder Klimaveränderungen auf immer größeren Skalen zu betrachten.

Die grundsätzlichen Fragen, die in diesem Zusammenhang formuliert werden, sind:

- Wie kann aus Beobachtungen gewonnenes Prozessverständnis auf unbeobachtete Gebiete übertragen werden.
- Und welche konzeptionellen Modellansätze und welche „repräsentativen“ Modellparameter müssen gewählt werden, wenn die Skala eines homogenen Raumelements verlassen wird [KLEEBERG et al. 1999]. Diese Frage wird im Allgemeinen als Skalenproblem bezeichnet.

Das DFG-Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“ hatte den Anspruch, möglichst umfassend die verschiedenen Aspekte der Regionalisierung zu beleuchten. Aus diesem Grund haben sich die verschiedenen Arbeitsgruppen mit Fragen der hydrologischen Modellierung [BECKER & LAHMER 1999], mit einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts (Niederschlag, Verdunstung [BRADEN et al. 1999; MAUSER et al. 1999], Bodenwasser [DIEKKRÜGER 1999], [WESSOLEK et al. 1999], Direktabfluss [SCHUMANN 1999], Grundwasser [HERMANN et al. 1999], [SCHWARZE et al. 1999]) und mit den notwendigen Werkzeugen der Datenaufbereitung und Datenerfassung (Fernerkundung [FUHRMANN et al. 1999]) befasst. Nicht zuletzt widmen sich gleich zwei Arbeitsgruppen der Abflussbildung, da sie eine Schlüsselstellung im Wasserhaushalt darstellt [BRONSTERT 2005a].

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe (AG) Peschke [PESCHKE et al. 1999b] werden eingehender in Kapitel 6.2.1 vorgestellt. Im Gegensatz zur AG Peschke, die eine Aggregation der Flächen gleicher Prozessdominanz vornimmt, stellen [GEROLD et al. 1999] zwei Ansätze zur Aggregation von Gebietsparametern vor. Bei der Bildung so genannter REA's (Representative Elementary Areas) und HRU's (Hydrological Response Units) wird davon ausgegangen, dass gleiche Gebietseigenschaftskombinationen auch gleiche hydrologische Reaktionen hervorbringen. [PESCHKE et al. 1999a] kritisieren diesen Ansatz, da die Vielzahl der im GIS generierten Hydrotope oder REA's die Gefahr der Überparametrisierung birgt.

Weitere Untersuchungen, die wichtige Beiträge zur Regionalisierung der Abflusskomponenten geleistet haben, stammen u.a. vom Institut für Hydrologie der Universität Freiburg [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997; MEHLHORN & LEIBUNDGUT 1999; UHLENBROOK 1999] sowie von der Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich [NAEF 2000; SCHERRER & NAEF 2003] (siehe Kapitel 6.2.1).

6.1.2 Infiltrationsansätze

Unter Infiltration versteht man allgemein das Eindringen von Stoffen in ein System, in diesem Fall das Eindringen von Niederschlagswasser in die Bodenoberfläche.

Die Infiltration in das poröse Medium Boden ist ein äußerst komplexer Vorgang, der sowohl von ortabhängigen Bodeneigenschaften wie auch zeitvariablen Faktoren (Niederschlag,

Bodenfeuchte, Vegetation) abhängt. Der charakteristische Verlauf der Infiltrationskapazität während eines Niederschlagsereignisses lässt mit der fortschreitenden Abnahme des hydraulischen Gradienten durch Eindringen einer Feuchtefront in den Boden begründen. Die Geschwindigkeit, mit der das Wasser in einem bestimmten Zeitschritt in den Boden eindringt, wird als Infiltrationsrate (oder Infiltrationsspende) bezeichnet. Dagegen die Infiltrationskapazität die maximale Infiltrationsrate beschreibt [BRONSTERT 2005a].

[BRONSTERT 1994] gliedert den Infiltrationsprozess grundsätzlich in zwei Prozesse. Er nennt zum einen das direkte Einsickern in die Bodenmatrix (Mikroporeninfiltration) sowie das Eindringen des Wasser über die Makroporen, wobei dieser Prozess erst bei auftreten einer Überstaus an der Oberflächen (bzw. Oberflächenabfluss) auftritt.

[BRONSTERT 1994], [SCHRÖDER 2000], [SCHNEIDER 1999], [WILLIAMS et al. 1998] geben einen umfassenden Überblick über die verfügbaren Modellansätze zur Beschreibung der Mikro- und Makroporeninfiltration.

Als verbreitetsten Infiltrationsansätze für die Bodenmatrix werden [GREEN & AMPT 1911], [HORTON 1933], [HOLTAN 1961] bzw. [OSTROWSKI 1992] und [RICHARDS 1931] genannt. [WILLIAMS et al. 1998] stellen verschiedene Weiterentwicklungen insbesondere des Ansatzes nach Green und Ampt (z.B. [FLERCHINGER et al. 1988]) vor.

Zur Abbildung der Makroporeninfiltration werden die Untersuchungen und Ansätze von [ZUIDEMA 1985] und insbesondere [BEVEN & GERMANN 1980; BEVEN & GERMANN 1982] angeführt. Gleichzeitig wird übereinstimmend darauf verwiesen, dass die Parametrisierung dieser Ansätze Schwierigkeiten bereitet und daher das Ergebnis von Eichungen bleibt. [SCHNEIDER 1999] kommt in seiner Literaturlauswertung zu dem Ergebnis, dass die Definition der Makroporen relativ uneinheitlich ist.

6.2 Lösungsansatz

Das hier vorgestellte Verfahren wurde von Dr. Steffen Zacharias und dem Autor dieser Arbeit entwickelt und mit Unterstützung des IHI Zittau, Herr Dr. Mariusz Merta, auf das Einzugsgebiet der Mulde angewandt [ZACHARIAS & WILCKE 2007].

Ausgangspunkt des Verfahrens ist, dass für das Wasserrückhaltepotenzial einer hydrologischen Gebietseinheit

1. die dynamische Ausbildung verschiedener lateraler unter- und oberirdischer Fließvorgänge
2. aber auch die vertikalen Prozesse der einzelnen Hydrotope entscheidend sind (vgl. Kapitel 2.2).

Eine Beurteilung der potenziellen Möglichkeiten des vorbeugenden Hochwasserschutzes durch Wasserrückhalt in der Fläche ist also einerseits:

1. an die Kenntnis der Abflussprozesse als auch
2. an die standortbezogene Beurteilung des Speichervermögens des Gebietes geknüpft.

Die Ermittlung des potenziellen (theoretischen) Wasserrückhaltepotenzials erfolgt in einer zweistufigen, einzugsgebietsweiten, GIS-basierten Standortanalyse:

1. Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung des dominierenden Abflussprozesses.
2. Diese Information wird in einem zweiten Schritt mit den Ergebnissen der rein bodenkundlich-bodenphysikalischen Betrachtung zum Speichervermögen überlagert (vgl. Abbildung 39).

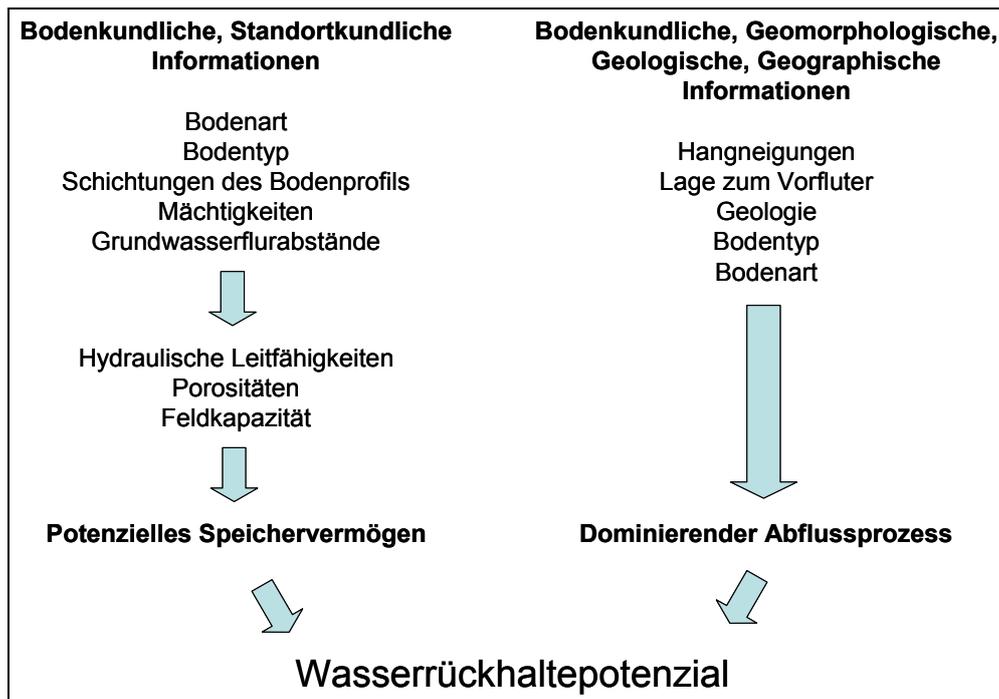


Abbildung 39: Schema zur Ableitung des Wasserrückhaltepotenzials

Die Definition des Wasserrückhaltepotenzials erfolgt sowohl in Bezug auf die Infiltration als auch auf die Ermittlung der Prozessdominanz unter der Annahme der potentiellen natürlichen Vegetationen [SCHMIDT et al. 2002], also unabhängig von der aktuellen Landnutzung oder Bewirtschaftung.

6.2.1 Identifikation des dominanten Abflussprozesses

In nahezu allen Beiträgen zur Regionalisierung in der Hydrologie u.a. [KLEEBERG et al. 1999], [ZIMMERMANN 1999], [ETZENBERG 1998] wird darauf verwiesen, dass trotz langjähriger wissenschaftlicher Auseinandersetzung mit dem Thema eine Vielzahl von Fragen bisher unbeantwortet sind. Die Arbeitsgruppe PESCHKE [PESCHKE et al. 1999c] leitet hieraus die Forderung ab, verstärkt Prozessforschung zu betreiben und dabei auf unterschiedlichen Skalenebenen Messwerte zu erfassen.

Dieser Forderung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgekommen werden. Es steht jedoch außer Frage, dass nur auf Basis eines ausreichend großen Pools an Messwerten, begründete Verallgemeinerungen (oder Regionalisierungen) zum Abflussverhalten getroffen werden können.

In Ermangelung einer ausreichenden Kalibrierungsgrundlage war es folgerichtig, im Rahmen dieser Arbeit kein neues Expertensystem zur Regionalisierung der Abflusskomponenten aufzustellen, sondern auf ein bereits bestehendes aufzubauen.

Ausgewählt wurde das Wissensbasierte System FLAB (FLächen gleicher AbflussBildung) [ETZENBERG 1998; PESCHKE et al. 1999a; PESCHKE et al. 1999c; ZIMMERMANN 1999]. Es wurde am IHI (Internationalen Hochschulinstitutes Zittau) im Rahmen des oben genannten DFG-Schwerpunktprogramms entwickelt.

Mit dem „Wissensbasierten System FLAB“ (WBS-FLAB) steht ein Instrument zur Verfügung, dass die qualitative Ableitung des flächenspezifischen dominanten hydrologischen Prozesses aus den flächenverteilten relevanten Gebietseigenschaften gestattet. Ein wichtiges Merkmal von WBS-FLAB ist, dass es sich auf den flächenspezifisch dominanten Prozess beschränkt. Auf diese Weise kann eine vereinfachte Zustands- und Prozessbeschreibungen begründet werden, sowie die Art und der Umfang der notwendigen Eingangsinformationen eingeschränkt werden. In der methodischen Vorgabe, nur

breitenverfügbare Gebietsinformationen als Grundlage zu verwenden, findet sich eine wichtige methodische Gemeinsamkeit von WBS-FLAB und dieser Arbeit.

Vergleichbar mit einem Niederschlags-Abfluss-Modell (z.B. STORM – siehe Kapitel 9) nutzt WBS-FLAB als Eingangsdaten so genannte Hydrotöpfe (oder REA's „Representative Elementary Areas“), die in ihrer Summe ein Einzugsgebiet formen. Diese Flächen mit homogenen hydrologischen Eigenschaften oder Reaktionen werden unter der Annahme generiert, dass Flächen mit einer ähnlichen Kombination von Gebietseigenschaften (Relief, Boden, Landnutzung, Gewässernähe) auch ähnliche hydrologische Reaktionen hervorbringen (strukturelle Ähnlichkeit = hydrologische Ähnlichkeit). Das Ziel von WBS-FLAB ist, die unüberschaubare Anzahl von Hydrotöpfen, die sich bei der Verschneidung der Gebietsmerkmale ergibt, mit Hilfe eines Regelsystems zu aggregieren, so dass Flächen ähnlicher Prozessdominanz entstehen. Somit versteht sich WBS-FLAB als Preprocessing-Instrument für die nachfolgende Anwendung quantitativer hydrologischer Modelle. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des WBS-FLAB nicht direkt als Input für die hydrologische Modellierung verwendet, sondern fließen indirekt über die Maßnahmenkarten und die daraus gebildeten Szenarien in die Modellierung ein.

Das WBS-FLAB besteht, ähnlich wie das Expertensystem FLEXT (siehe Kapitel 7.2), aus einem Regelsystem, in dem das Zusammenwirken der Einflussfaktoren der Abflussbildung in Form von Regeln abstrahiert wird und dem Hilfsmittel GIS, das zur Datenbereitstellung und zur Visualisierung vor bzw. nach der Anwendung des Expertensystems genutzt wird.

Kernstück der Aggregation von Flächen gleicher Prozessdominanz ist ein Experten- oder Bewertungssystem (siehe Abbildung 40). Es beruht auf den Säulen experimentelle Analyse, theoretische Prozesskenntnis und Modellierung [ETZENBERG 1998].

Berücksichtigt werden im WBS-FLAB die Einflussgrößen Boden, Nutzung, Gewässernetz und Relief, sowie die daraus abzuleitenden Eigenschaften Leitfähigkeit, Speicherfähigkeit, Skelettgehalt, Humusgehalt, Nutzungsart, Bestandsart, Wurzeltiefe, Gewässernetzdichte, Hangneigung, Exposition und Mikrorelief [ETZENBERG 1998]. [ZIMMERMANN 1999] gibt detaillierte Informationen zur Klassifizierung der Einflussgrößen und zu den Modifikationen unter Berücksichtigung zusätzlicher Gebietseigenschaften (z.B. bei unterschiedlichem Humusgehalt).

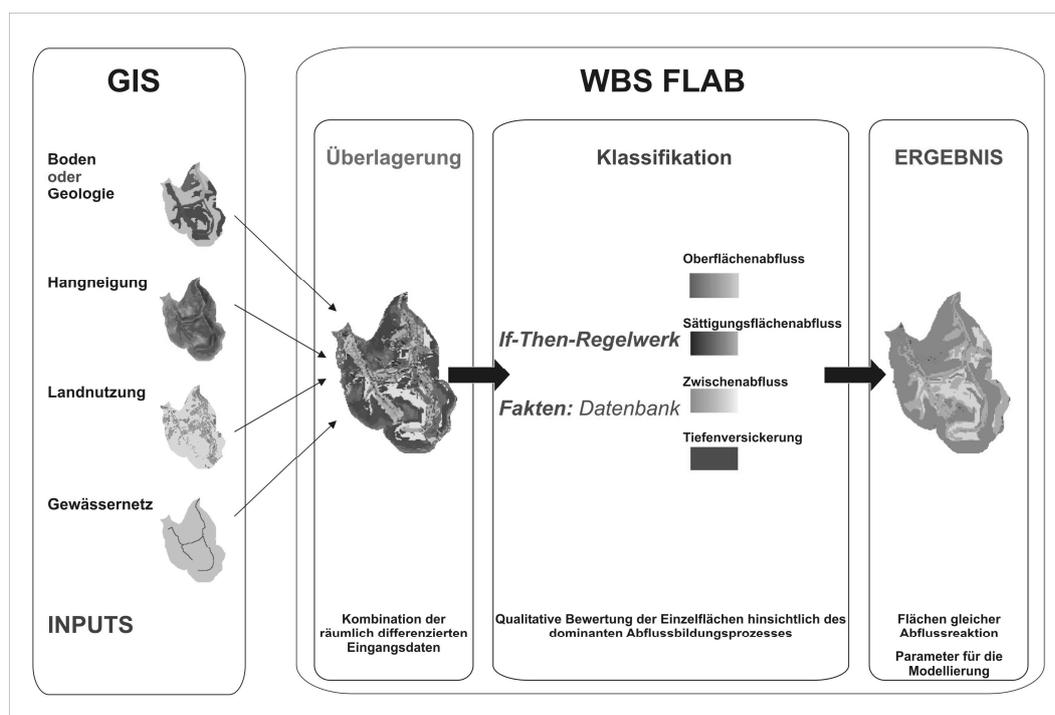


Abbildung 40: Struktur der Wissensbasierte System FLAB (WBS-FLAB) [ZIMMERMANN 1999]

Das eigentliche Regelwerk des WBS-FLAB ist in drei Bearbeitungsschritte gegliedert. Der erste Schritt dient der Aufbereitung der Einflussgrößen zu flächenspezifischen Parametersätzen (s. o.). Darüber hinaus wird die „potenzielle Beitragsfläche“ (oder maximale Sättigungsfläche) als zusätzlicher, abgeleiteter Gebietsparameter bestimmt. Hierfür haben [ETZENBERG 1998; ZIMMERMANN 1999] nicht auf die verbreitete Methodik des Topographischen Indices [BEVEN & KIRKBY 1979] zurückgegriffen, sondern eine neue Methode entwickelt und kalibriert, die sich aus Informationen zur Hangneigung, Bodentyp und Gewässernähe ableitet.

Im zweiten Schritt wird entsprechend den Prozessräumen, in denen sich die einzelnen Abflusskomponenten bilden, in drei Regelkomplexen der dominante Abflussprozess ermittelt. Der erste Regelkomplex (die so genannte „Bilanzebene 1“) bezieht auf die Oberflächenabflussbildung, der zweite Regelkomplex („Bilanzebene 2“) auf die Zwischenabflussbildung und der dritte Regelkomplex („Bilanzebene 3“) auf die Speicherung und Tiefenversickerung im Boden. Die Regelkomplexe abstrahieren unterschiedliche physikalische Prozesse im Boden beziehungsweise an seiner Oberfläche und greifen somit auf unterschiedliche Daten der im ersten Schritt erzeugten Parametersätze zu.

Folgende dominierende Abflussprozesse können mittels WBS-FLAB im Einzugsgebiet differenziert werden:

- Horton'scher Oberflächenabfluss,
- Sättigungsflächenabfluss,
- Zwischenabfluss
- Tiefenversickerung

Weiterhin ist eine qualitative Differenzierung hinsichtlich der Geschwindigkeit der Abflusskomponente möglich (siehe Abbildung 41).

Im dritten und letzten Schritt des WBS-FLAB werden die Ergebnisse der Gebietsanalyse bewertet und zusammengefasst zur Flächen gleicher hydrologische Reaktion. In der von [ETZENBERG 1998; PESCHKE et al. 1999a; ZIMMERMANN 1999] vorgestellten Version des WBS-FLAB wird eine dreistufige Flächenklassifizierung angeboten, die je nach Zielsetzung eine feine, mittlere oder grobe Charakterisierung der dominanten Abflussbildungsprozesse ermöglicht.

In den Jahren 2000- 2004 wurde das WBS-FLAB im Rahmen des DFG-Bündelprojektes „Abflussbildung und Einzugsgebietmodellierung“ weiterentwickelt [SEIDLER 2005]. An diesem Verbundprojekt waren neben dem Internationales Hochschulinstitut Zittau, das GeoForschungsZentrum Potsdam (Prof. Merz), das Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der Technische Universität Wien (Prof. Kirnbauer) sowie das Institut für Hydrologie der Universität Freiburg (Prof. Leibundgut und Dr. Uhlenbrook) beteiligt. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Handhabung des Systems mit Hilfe einer strukturierten Benutzeroberfläche verbessert. Hervorzuheben sind vor allem Veränderungen bei der Aufbereitung der Eingangsdaten und der Klassifizierung der Abflusskomponenten.

Um eine Anwendung des Expertensystems in unterschiedlichen geografischen Regionen mit variablem Angebot an Eingangsinformationen gewährleisten zu können, ist der oben beschriebene Bearbeitungsschritt zur Klassifizierung der Eingangsdaten von zentraler Bedeutung. Die im WBS-FLAB integrierten Bodenprofile wurden gegenüber der ursprünglichen Version von 15 auf 26 erweitert. In diesem Zusammenhang war es notwendig, eine neue Codierung oder einen Übertragungsschlüssel festzulegen, der in einem so genannten „Wörterbuch“ dokumentiert ist.

Bei der Klassifizierung der dominanten Abflusskomponenten wurde von der ursprünglich dreistufigen Flächeneinteilung abgewichen und eine neue Klassifikation aufgestellt, die eine Einteilung in vier verschiedene Abflusskomponentengruppen sowie eine Untergliederung in 15 Klassen unterschiedlicher Prozessintensitäten und Prozesseigenschaften vorsieht (siehe Abbildung 41).

Die neu gewählte Struktur der dominanten Abflusskomponentenklassifikation weist große Ähnlichkeiten zur der Systematik auf, die NAEF et. al in den Jahren 2000 bis 2006 in einer Reihe von Veröffentlichungen vorgestellt hat [NAEF 2000; WEILER et al. 2000; NAEF et al. 2002; SCHERRER & NAEF 2003; SCHMOCKER-FACKEL et al. 2006].

Abflusskomponenten	Komponentenspezifikation
1 Oberflächenabfluss	1.1 von versiegelten Flächen 1.2 von teilversiegelten Flächen 1.3 von Felsflächen 1.4 von Flächen mit geringem Infiltrationsvermögen 1.5 von hydrophob reagierenden Flächen
2 Sättigungsflächenabfluss	2.1 offene Wasserflächen 2.2 Oberflächenabfluss auf permanent gesättigten 2.3 Oberflächenabfluss auf sich schnell sättigenden
3 Zwischenabfluss	3.1 sehr schnell 3.2 schnell 3.3 verzögert 3.4 stark verzögert 3.5 sehr stark verzögert
4 Tiefenversickerung	4.1 Versickerung
0 unbewertet	Die vorliegenden Daten erlauben keine Bewertung

Abbildung 41: Klassifikation der Abflusskomponenten im WBS-FLAB [SEIDLER 2005]

Für die Anwendung dieses Systems sprach, dass beim Aufbau des Regelsystems ein sächsisches Einzugsgebiet verwendet wurde, das direkt an das Einzugsgebiet der Mulde angrenzt. Das Versuchs- und Repräsentativgebiet „Wernersbach“ (Tharandter Wald) wird seit 1967 von Wissenschaftlern der technischen Universität Dresden und dem IHI intensiv und kontinuierlich sowohl hydrologisch wie meteorologische beobachtet. Der große Umfang an Messdaten umfasst nicht nur das Gesamtgebiet von 4,6 km², sondern auch Teilgebiete und Standorte. Eine detaillierte Beschreibung des Wernersbach-Einzugsgebietes kann [ETZENBERG 1998] entnommen werden.

Darüber hinaus sprach für das Wissensbasierte System FLAB, dass es bereits ohne erneute Kalibrierung auf andere Einzugsgebiete angewendet wurde und damit seine Übertragbarkeit bestätigen konnte. Eine Überblick über die Anwendungsgebiete sowie die für die Gebiete bestimmten Berechnungsergebnisse sind in [SEIDLER 2005] zusammengestellt.

Nicht zuletzt muss erwähnt werden, dass die Wahl des Wissensbasierten Systems FLAB durch die Bereitschaft des IHI, Lehrstuhl für Umwelt-Biotechnologie, zur Zusammenarbeit sehr begünstigt wurde. Von besonderer Bedeutung mit Blick auf die Übertragung der hier entwickelten Methodik ist auch die stetige Weiterentwicklung des WBS-FLAB, was eine stetige Verbesserung der Wasserrückhaltepotenzialbestimmung impliziert.

Für die Beschreibung der dominanten Prozesse wurden die bereits vorgestellten Daten (siehe Kapitel 5.2) verwendet. Das Entscheidungshilfesystem FLAB verwendet in seinen Algorithmen auch die Informationen zur Landnutzung. Um sich für die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung dem Begriff des Wasserrückhalte-„Potenzials“ anzunähern, wurden hier die Angaben zur potenziellen natürlichen Vegetation verwendet [SCHMIDT et al. 2002]. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass sich in den quantitativen Angaben zum potenziellen Speichervermögen tatsächlich das „Potenzial“ des Wasserrückhalts von Landschaft und Boden widerspiegelt und Einflüsse der aktuellen Landnutzung ausgeschlossen sind.

Im Hinblick auf den vorbeugenden Hochwasserschutz durch einen Wasserrückhalt in der Fläche sind alle Flächen von Interesse, die auf Grund der Abflussbildung eine längerfristige Speicherung ermöglichen. Flächen, die z. B. durch Oberflächenabfluss dominiert werden oder auf denen versickerndes Wasser einem schnellen Zwischenabfluss unterliegt, setzen

einer wirksamen Erschließung unterirdischer Wasserrückhaltekapazitäten dagegen enge Grenzen.

6.2.2 Quantifizierung des Infiltrationsprozesses

Neben der in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Prozessdominanz, die sich auf die Prozesse der Hangskala beziehen, bestimmen als zweite Komponente die Speichereigenschaften der Standorte über das Wasserrückhaltepotenzial. Die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ist in erster Linie eine Funktion der Ausbildung des Porenraumes. Je höher der Mittelporenanteil eines Bodens (ca. 0,2 – 1,0 μm), desto größer ist sein Wasserspeichervermögen und desto langsamer ist i.d.R. die Verlagerungsgeschwindigkeit der Sickerwassers [KUNKEL & WENDLAND 2004].

Die Abbildung des Infiltrationsprozesses dient der Bestimmung des theoretisch auf Grund der boden- und standortkundlichen Eigenschaften zur Verfügung stehenden Speicherraumes. Das Speicherpotenzial für das jeweilige Niederschlagsereignis wird im Wesentlichen durch drei Standorteigenschaften bestimmt:

1. Die maximale Wassermenge, die aufgenommen werden kann und sich in Abhängigkeit von der Tiefe des ungesättigten Bodenprofils und den Wasserretentionseigenschaften des Bodenprofils ergibt (Bodenart und Lagerungsdichte).
2. Die hydraulischen Leitfähigkeiten des Bodenprofils, die über die Infiltrations- und Exfiltrationsgeschwindigkeiten des Bodenspeichers entscheiden (Bodenart und Lagerungsdichte).
3. Der Entwässerungszustand des Bodenspeichers zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses, der seinerseits abhängig ist von den Wasserretentionseigenschaften und bodenhydraulischen Eigenschaften des Bodenprofils (Bodenart und Lagerungsdichte) sowie Standorteigenschaften (insbesondere Grundwasserflurabstand).

Die Beschreibung der boden- und standortkundlichen Aspekte des Speicherpotenzials erfolgte auf der Grundlage vorliegender standortkundlicher Daten (siehe Kapitel 5.2). Besonderes Augenmerk wurde auf die flächendeckende Beschreibung einerseits und die allgemein gegebene Verfügbarkeit der Daten andererseits gelegt. Außerdem sollte durch die Auswahl der Datengrundlage die Übertragbarkeit des methodischen Vorgehens auf andere Einzugsgebiete gewährleistet werden.

Für die Bestimmung des potenziellen Speichervermögens am Beispiel des Einzugsgebietes der Mulde wurde die Bodenkonzeptkarte verwendet, die teilweise durch Informationen aus der Bodenübersichtskarte (BÜK 200) ergänzt wurde (siehe Kapitel 5.2).

Eine Regionalisierung des Speicherpotenzials erfordert die Einbeziehung der regionalisierten Niederschlagsdaten des Einzugsgebietes. Um dies zu gewährleisten, erfolgte die Berechnung des Speicherpotenzials auf der Grundlage der regionalisierten, statistischen Starkniederschlagshöhen für das Einzugsgebiet (siehe Kapitel 5.3.1). Ausgewählt wurden hier die ein- und zwölfstündigen sowie die 72-stündigen Ereignisse mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 10 bzw. 100 Jahren.

6.2.2.1 Das ausgewählte Infiltrationsmodell

Hydrologische Betrachtungen des Wasserrückhaltepotenziales für ausgewählte Niederschlagsereignisse machen eine Separierung von Oberflächenabfluss und Infiltration erforderlich. In zahlreichen hydrologischen Modellen wird die Versickerung im Boden auf der Basis des Green-Ampt-Infiltrationsmodells [GREEN & AMPT 1911] beschrieben. Durch verschiedene Autoren wurden Modifikationen des Green-Ampt-Ansatzes [WILLIAMS et al. 1998] vorgenommen, um diesen für geschichtete Bodenprofile anwendbar zu machen. Neuere Ansätze stammen von [HACHUM & ALFARO 1980], [BEVEN 1984], [SELKER et al. 1999], [FLERCHINGER et al. 1988] oder [SALVUCCI & ENTEKHABI 1994]. Für die

vorliegende Arbeit wurde ein Ansatz von [CHU & MARIÑO 2005] verwendet, der neben Schichtungen im Bodenprofil auch Instationaritäten im Niederschlagsverlauf berücksichtigt. Das Modell wurde für verschiedene Randbedingungen erfolgreich validiert und zeigte auch für die in der vorliegenden Arbeit verwendete Szenarien geschichteter Böden und stationäre Niederschlagsereignisse gute Ergebnisse, insbesondere auch beim direkten Vergleich mit einem numerischen Modell für den ungesättigten Wassertransport. Einen Überblick über die Modellvalidierung und eine detaillierte Beschreibung des Modellansatzes findet sich bei [CHU & MARIÑO 2005].

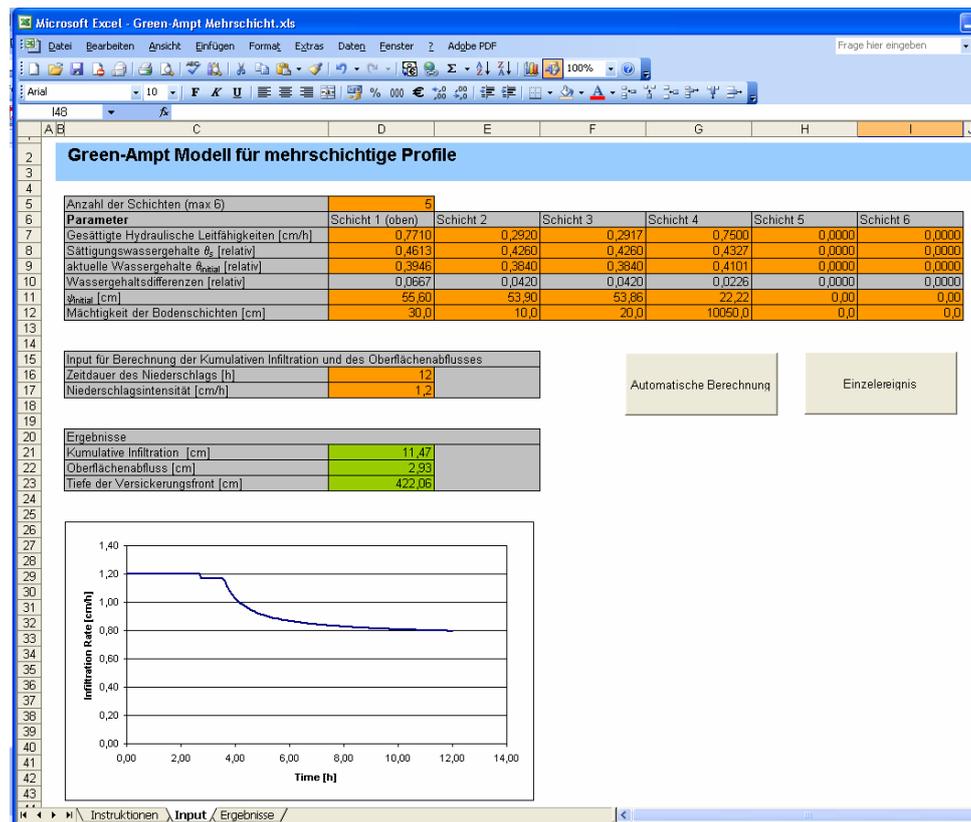


Abbildung 42: Eingabe- und Berechnungsmaske für das Green-Ampt-Modul nach [CHU & MARIÑO 2005] aufgestellt von ZACHARIAS [SIEKER et al. 2007a]

Die Modellierung der Infiltration erfolgte in Microsoft Excel (Microsoft Inc., Redmond, WA). Hierfür wurde der Infiltrationsansatz in Form eines Visual-Basic-Codes eingebunden. Das Einlesen der Modellparameter (Horizontabfolgen, bodenartabhängige Kennzeichnung der Wasserretention, Startwassergerhalte) für das gesamte Untersuchungsgebiet erfolgte automatisiert durch eine Online-Kopplung des Excel-Moduls mit der Datenbank der digitalen Bodenkarte. Die Ergebnisse der Modellierung wurden gleichfalls automatisiert in die entsprechende GIS-Datentabelle zurückgeschrieben (s. Abbildung 42).

Durch die Verknüpfung der regionalisierten Starkniederschläge mit den konkreten Boden- und Standorteigenschaften im Einzugsgebiet konnte eine sehr detaillierte Regionalisierung des potenziellen Speichervermögens erreicht werden.

Eine Regionalisierung des Speicherpotenzials erfordert die Einbeziehung der klimatologischen Charakteristik des Einzugsgebietes. Um dies zu gewährleisten, erfolgte die Berechnung des Speicherpotenzials auf der Grundlage der regionalisierten, statistischen Starkniederschlagshöhen für das Einzugsgebiet [DWD 1997; DWD 2005].

6.2.2.2 Die Parametrisierung der Bodeneigenschaften

Um das Rückhaltepotenzial einer Bodenschicht zu definieren, bieten sich bodenkundliche Kennwerte oder Grenzwerte des Bodenwasserhaushaltes als Bezugsgröße an. Der Parameter der Feldkapazität gibt Auskunft über längerfristig speicherbare Wassermengen. Die Definition von Porositäten erlaubt die bodenartspezifische Definition maximaler Speichermengen.

Um das Untersuchungsgebiet hinsichtlich seines Wasserrückhaltepotenzials qualitativ-quantitativ bewerten zu können, war es auch hier erforderlich, definierte Bezugzustände festzulegen.

Hydrologische Fragestellungen erfordern eine möglichst standortkorrekte Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes unter Einbeziehung der zeitlichen Komponente der Entwässerung. Eine rein bodenartabhängige Definition der Feldkapazität über eine definierte Saugspannung (z. B. $h = 63 \text{ cm}$ bzw. $pF=1,8$) vernachlässigt den instationären Charakter des Entwässerungsvorganges. Darüber hinaus können andere Einflussgrößen, die den Wert der Feldkapazität (als die Menge an Wasser, die an einem Standort zu einem definierten Zeitpunkt vorhanden ist) beeinflussen (vor allem Grundwasserflurabstände), nicht berücksichtigt werden [ZACHARIAS & BOHNE 2007].

Ausgehend von diesen Überlegungen erfolgte eine Definition des Ausgangszustands des Bodenwasservorrates, die eine Einbeziehung der Entwässerungsdauer erlaubte. Um unterschiedliche Austrocknungszustände in die Bewertung des potenziellen Speichervermögens einbeziehen zu können, wurden drei Ausgangszustände definiert – Bodenwasservorrat nach 5-tägiger, 10-tägiger und 15-tägiger gravitativer Entwässerung (Gl. 1).

$$SC = \theta_s * d - W_{5,10,15 d}$$

(Gl. 1)

SC potenziell zur Verfügung stehender Speicherraum [mm]

d Mächtigkeit der betrachteten Bodenschicht [mm]

θ_s Sättigungswassergehalt [cm^3/cm^3]

$W_{5, 10, 15 d}$ Bodenwasservorrat nach 5-, 10- bzw. 15-tägiger Entwässerung [mm]

Die von der Korngrößenverteilung und den Lagerungsverhältnissen bestimmte Wasserretentionscharakteristik eines Bodens kennzeichnet die Abhängigkeit der Bodenwassergehalte von den gegebenen Saugspannungsverhältnissen ($\theta(h)$ - Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung oder Wasserretentionsfunktion). Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung lässt sich für jede Bodenart in Abhängigkeit der typischen Porengrößenverteilung definieren. Die mathematische Beschreibung kann z. B. über die Beziehung nach [VAN GENUCHTEN 1980] erfolgen.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{(1-1/n)}}$$

(Gl. 2)

θ_r Restwassergehalt [cm^3/cm^3]

θ_s Sättigungswassergehalt [cm^3/cm^3]

α Optimierungsparameter [cm^{-1}]

n Optimierungsparameter [dimensionslos]

h Saugspannung oder Matrixpotenzial [cm Wassersäule]

Zur bodenartsspezifischen Beschreibung der van Genuchten-Beziehung (Gl. 2) wurde auf eine neu abgeleitete Pedotransferfunktion zurückgegriffen [ZACHARIAS & WESSOLEK 2007]. Diese Pedotransferfunktion erlaubt die bodenartenabhängige Schätzung der van Genuchten-Parameter und wurde insbesondere auch für deutsche Böden erfolgreich validiert. Gegenüber anderen Pedotransferansätzen, die häufig zur Parametrisierung bodenhydrologischer Modelle in regionalen Maßstäben eingesetzt werden, besitzt die neue Funktion den Vorteil, dass auf die Angabe des Gehaltes an organischer Bodensubstanz als Prädiktor verzichtet wird und lediglich Angaben zur Textur und Lagerungsdichte benötigt werden. Die alleinige Verwendung von Textur und Lagerungsdichte erleichtert die Nutzung in mittel- und kleinmaßstäbigen Modellen deutlich. Angaben zur Textur können auf der Grundlage der vorliegenden digitalen Kartenwerke einzugsgebietsweit abgeleitet werden. Über die Angaben mittlerer, bodenartenabhängiger Lagerungsdichten können außerdem noch Einflüsse der Bodentiefe und Landnutzung berücksichtigt werden.

Die Kenntnis der bodenartsspezifischen Wasserretentionsfunktion (Gl. 2) erlaubt die Berücksichtigung der Instationarität des gravitativen Wassertransportes in der ungesättigten Bodenzone und damit die Einbeziehung der Entwässerungszeit bei der Berechnung des Bodenwasservorrates (bzw. des freien Porenraumes). Die grundlegende Gleichung zur Beschreibung der Wasserbewegung – die Richards-Gleichung [RICHARDS 1931] – erlaubt die mathematische Beschreibung des Entwässerungsvorganges. Vorliegende analytische Lösungen für spezielle Randbedingungen oder die Nutzung numerischer Lösungs-Verfahren ermöglichen eine einfache Anwendung. Bei Kenntnis der bodenartenabhängigen Porengrößenverteilung lässt sich mit Hilfe dieser Verfahren der zeitliche Verlauf der Sickerwasserbewegungen relativ einfach abschätzen. In dieser Arbeit wurden sowohl analytische Lösungsverfahren [ZACHARIAS & BOHNE 1997; BOHNE 2005] als auch die numerische Lösung der Richards-Gleichung verwendet.

Um den gravitativen Sickerwasserabfluss zu berechnen, wurden die Rechenprogramme TPM [BOHNE 2005] und HYDRUS-1D, Ver. 3.0 [SIMUNEK et al. 2005] eingesetzt. Hierbei nutzt HYDRUS-1D eine numerische Lösung der Richards-Gleichung. Bei bestimmten Parameterkonstellationen (insbesondere bindige Böden mit geringer gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit) können im Zusammenhang mit der gewählten und für alle Bodenarten konstant gehaltenen zeitlichen Diskretisierung numerischer Instabilitäten im Rechenlauf auftreten, die zu physikalisch inkorrekten Ergebnissen führen. In diesen Fällen wurde auf analytische Lösungen der Richards-Gleichung zurückgegriffen (Software TPM, [BOHNE 2005]), welche gleichfalls die Berechnung der Entwässerung grundwasserferner und grundwassernahe Bodenprofile erlaubt.

Unter Nutzung dieser Methodik erfolgte die Berechnung der Bodenwassergehalte unter Einbeziehung der Entwässerungszeit für alle deutschen Bodenarten. Grundlage der Berechnung war ein homogenes Bodenprofil von 100 cm Mächtigkeit, und Startwert der Entwässerungsberechnung war eine jeweils 95-%ige Sättigung des Porenraumes. Gleichzeitig erfolgte eine separate Berechnung für unterschiedliche Lagerungsdichten und für grundwasserferne und grundwassernahe Bodenprofile (angenommener Grundwasserflurabstand 100 cm). Mit Hilfe der Pedotransferfunktion von [ADAMS 1973] konnte außerdem der Einfluss der organischen Bodensubstanz auf die Lagerungsdichte und damit eine Differenzierung in Ober- und Unterböden vorgenommen werden. Die auf diese Weise ermittelten Bodenwasservorräte (in Abhängigkeit von Textur, Lagerungsdichte, Grundwasserflurabstand, Entwässerungszeit) bildeten den Ausgangswert für die zu berechnende Green-Ampt-Infiltration.

Strenggenommen erlaubt die angewendete Methodik nur die Ableitung von Bodenwassergehalten für homogene Bodenprofile. Der Einfluss der im Einzugsgebiet anzutreffenden Bodenschichtungen, die bei der Green-Ampt-Infiltration berücksichtigt wurde, findet in den so errechneten Bodenwassergehalten keine Einbeziehung. Theoretisch erlaubt die numerische Lösung der Richards-Gleichung natürlich auch die Einbeziehung der Bodenschichtung in die Berechnung der Entwässerung. Angesichts der im

Untersuchungsgebiet anzutreffenden und zu berücksichtigenden Horizont-Abfolgen (Anzahl > 1.000) war solch ein Vorgehen jedoch nicht umsetzbar. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Effekte der Bodenschichtung auf die gravitative Entwässerung im Wesentlichen durch den Zusammenhang zwischen Wasserspannung und ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit der unterlagernden Bodenschicht bestimmt werden, wobei die Effekte umso geringer ausfallen, je kleiner die hydraulische Leitfähigkeit der überlagernden Schicht ist [ZACHARIAS & BOHNE 2007]. Allerdings ist zu erwarten, dass eine Einbeziehung der Bodenschichtung nur für sehr wenige Bodenartenkombinationen zu relevanten Differenzen für die in dieser Arbeit relevante Fragestellung führen wird. Darüber hinaus tritt das Problem der Nicht-Einbeziehung der aktuellen Bodenschichtung auch bei der Mehrzahl anderer Verfahren (z. B. Parametrisierung mit Hilfe bodenartenspezifischer Kennwerte der Feldkapazität) auf und ist damit kein spezifischer Nachteil der hier vorgestellten Methodik.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Abbildung des Entwässerungsverhaltens ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Kf-Wert). Zur Bestimmung dieses wichtigen Bodenparameters stehen eine Reihe von Pedotransferfunktionen zur Verfügung. Für die Auswahl der jeweils bestgeeigneten Pedotransferfunktion in Abhängigkeit von der Bodenart wurde den Hinweisen von [TIETJE & HENNINGS 1996] gefolgt.

6.3 Ergebnisse

Eine Verschneidung der Flächen gleicher Prozessdominanz (aus Kapitel 6.2.1) mit den ermittelten Infiltrationsvolumen erlaubt:

1. eine qualitative Beschreibung des Untersuchungsgebietes hinsichtlich Lage und Ausdehnung geeigneter Flächen für den vorbeugenden Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche sowie die
2. gleichzeitige Quantifizierung des Rückhaltepotenzials im Einzugsgebiet.

Die Analyse der standörtlichen, hydrologisch relevanten Eigenschaften des Einzugsgebietes der Vereinigten Mulde zeigt eine charakteristische Zweiteilung des Untersuchungsgebietes. Der südliche Teil des Einzugsgebietes im Bereich des Erzgebirges und Erzgebirgs-Vorlandes wird klar durch Böden geringerer Mächtigkeit und starken Hangneigungen charakterisiert. Demgegenüber zeichnen sich die Flächen im Mittel- und Unterlauf des Einzugsgebietes durch eher geringe Hangneigungen und größere Bodenmächtigkeiten aus (Abbildung 43).

Die Erzgebirgsregion ist durch das flächenhafte Auftreten von Lehmböden und typischen Sandablagerungen in den Tälern der Vorfluter gekennzeichnet. Das Mulde-Lößhügelland wird durch die Schluffböden dominiert, während sich im Unterlauf des Einzugsgebietes die eiszeitlichen Sandablagerungen zeigen. Die Flussauen im Mittel- und Unterlauf zeigen teilweise ausgedehnte Auenlehmlagerungen (vgl. auch Kapitel 4.5, Abbildung 16).

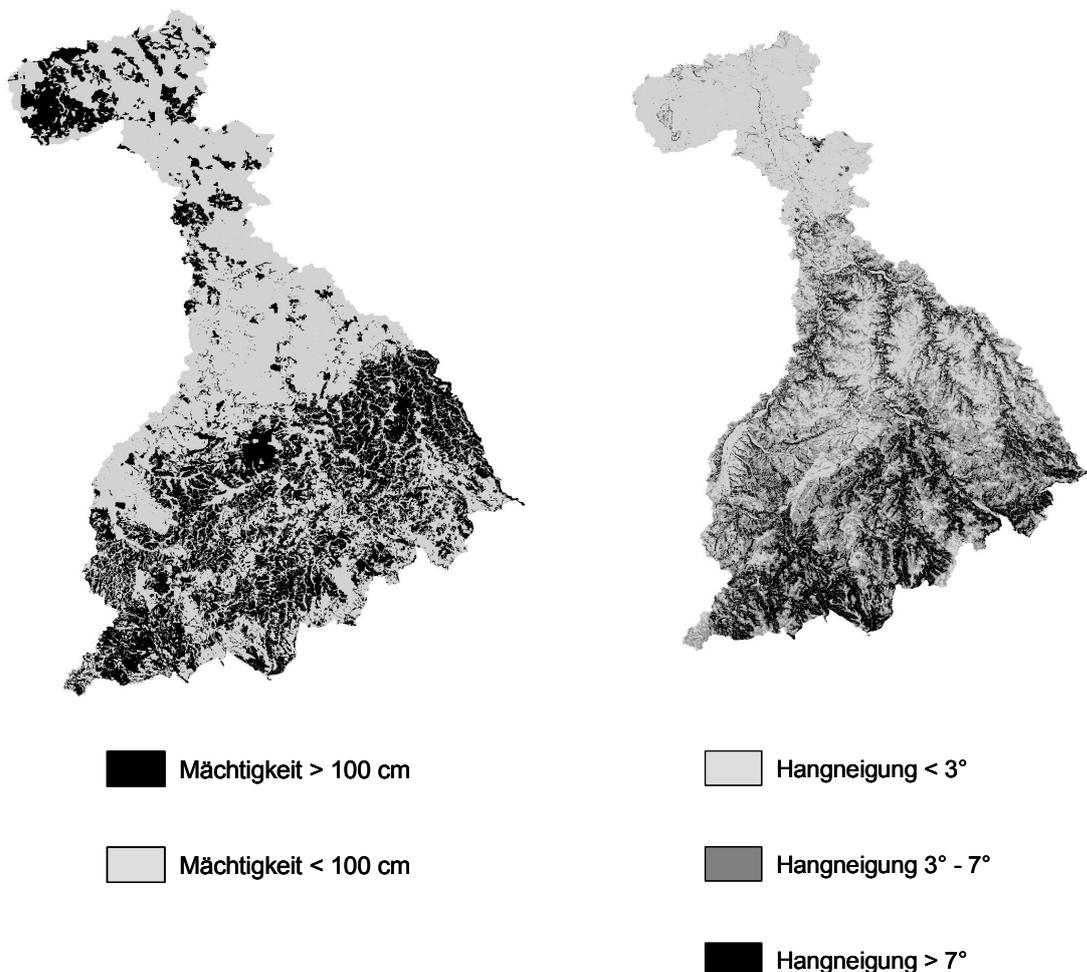


Abbildung 43: Bodenmächtigkeiten (links) und Hangneigungen (rechts) im Untersuchungsgebiet

6.3.1 Ergebnisse der Identifikation des dominanten Abflussprozesses

Die geomorphologischen, bodenkundlichen und standörtlichen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes finden in der hydrologischen Bewertung ihre funktionale Entsprechung. Das Zusammenspiel von Hangneigung, Bodenauflage, Geologie und Bodenart schlägt sich deutlich in der Bewertung der Abflussprozesse nieder. Abbildung 44 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Verteilung der durch das WBS-FLAB diagnostizierten dominanten Abflussprozesse. Es wird deutlich, dass der Oberlauf des Gebietes stark durch Flächen mit schnellen Abflusskomponenten dominiert wird. Die Kombination aus starker Hangneigung und geringmächtiger Bodenauflage bei gleichzeitig direkt unterlagerndem Grundgebirge resultiert hier sehr oft im Auftreten von schnellen Zwischenabflüssen. Dagegen kann im Bereich des Mittel- und Unterlaufes infolge der großen Bodenmächtigkeiten bei oft nur geringen Hangneigungen oft eine Tiefenversickerung der Niederschläge stattfinden. Flächen, die durch die Bildung von Sättigungsflächenabflüssen gekennzeichnet sind, finden sich insbesondere in den Flussauen und in unmittelbarer Gewässernähe oft im Hangfußbereich.

Die gebietscharakteristische Verteilung der Bodenarten mit ihren entsprechenden bodenhydraulischen Eigenschaften sowie die Bodenmächtigkeit schlagen sich natürlich auch in der Berechnung des Infiltrationsvolumens nieder. Die Abbildung 45 enthält eine graphische Darstellung der ermittelten Speichereigenschaften für ein 72-stündiges Regenereignis mit 100-jährlicher Wiederkehrwahrscheinlichkeit im Einzugsgebiet. Dargestellt

ist hier die Relation zwischen ermittelter Infiltrationsmenge und statischer regionalisierte Regenmenge nach [DWD 2005].

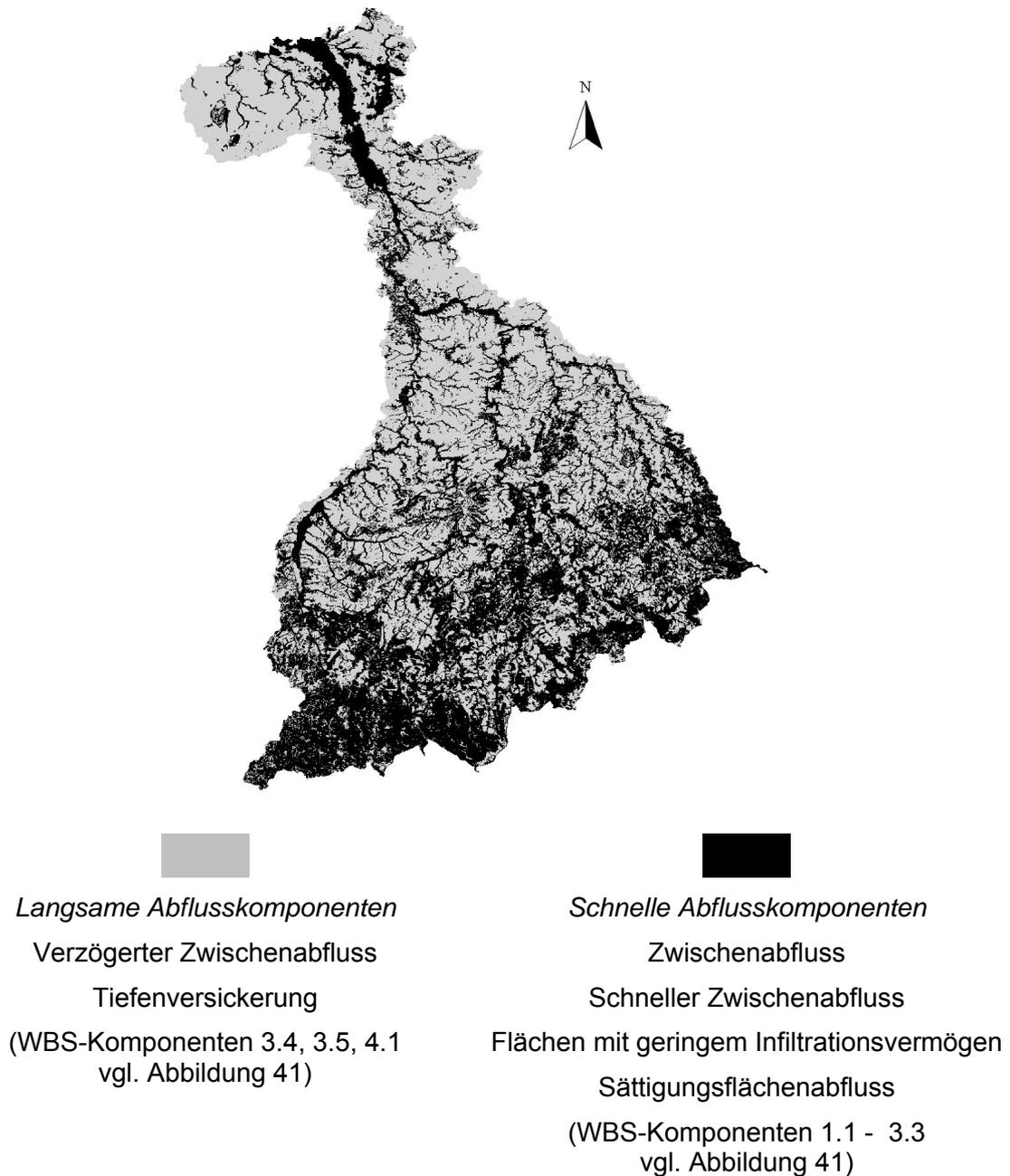


Abbildung 44: Verteilung der dominanten Abflussprozesse im Einzugsgebiet (aggregiert) (nach WBS FLAB)

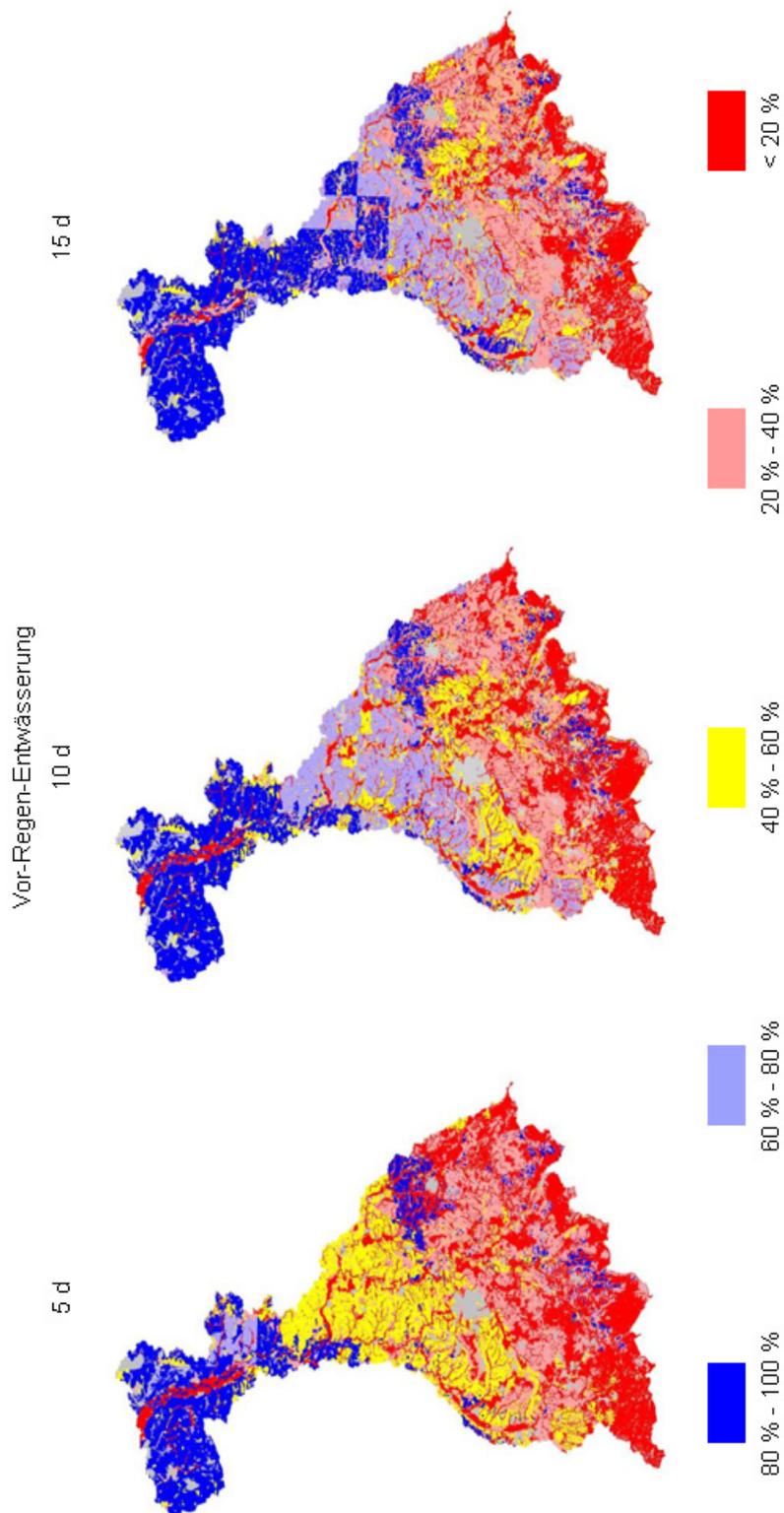


Abbildung 45: Potenzielles Speichervermögen des Untersuchungsgebietes in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamtregennmengen - KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 3 Tage

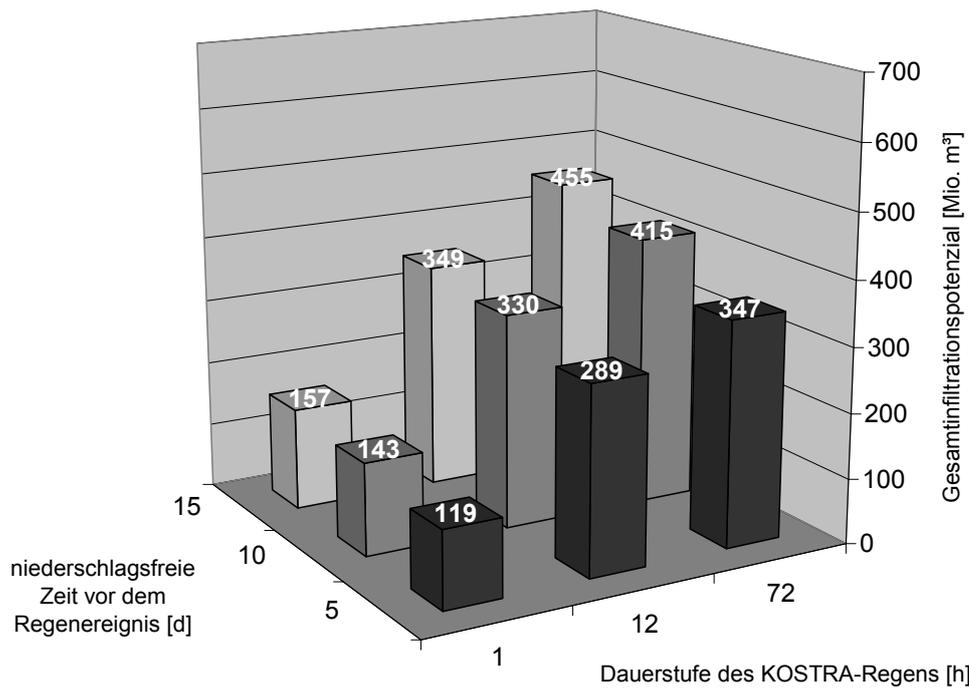


Abbildung 46: Theoretische Gesamtinfiltration für das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Regendauer und Vor-Regen-Entwässerung KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a

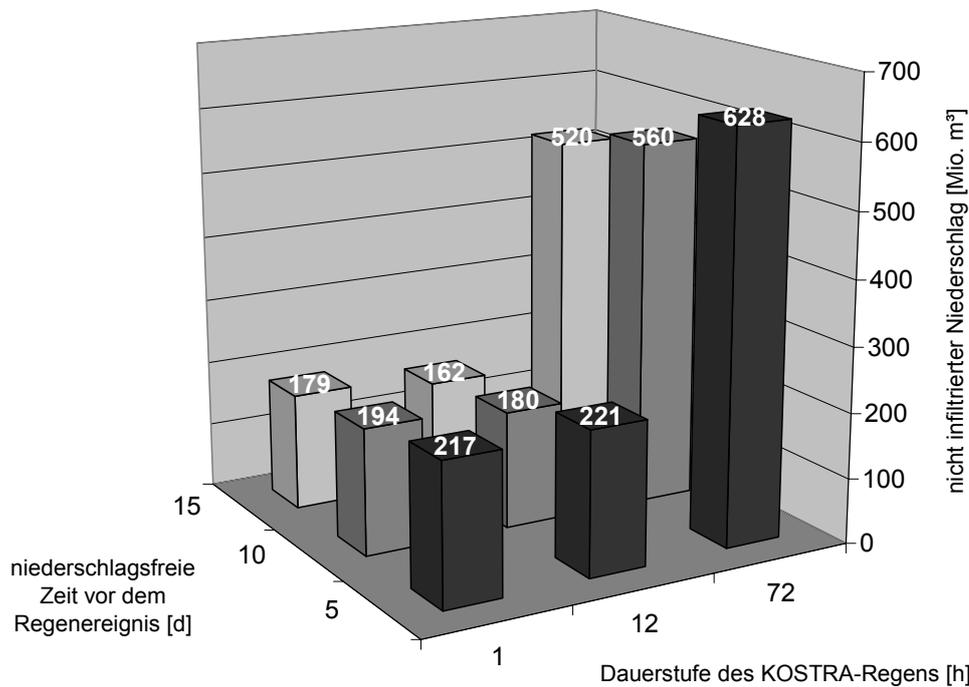


Abbildung 47: Nicht infiltriertes Niederschlagsvolumen für das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Regendauer und Vor-Regen-Entwässerung KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a

6.3.2 Ergebnisse der Infiltrationspotenzialanalyse

Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass die dargestellten Ergebnisse das theoretische Speichervermögen der Böden kennzeichnen (Abbildung 46), wie es sich allein auf Grund der angenommenen bodenhydraulischen Eigenschaften errechnet und bei einer theoretischen Überregnung entsprechend der verwendeten Regenhöhen und –intensitäten auf Basis der KOSTRA-Daten [DWD 2005] ergibt. Die Infiltration negativ beeinflussende Prozesse wie Versiegelung, Verschlammung oder Verdichtung bzw. ggf. die Infiltration erhöhende Effekte infolge z. B. nutzungsinduzierter Makroporen fanden keine Berücksichtigung.

Das verbleibende Niederschlagsvolumen, das von den Böden des Einzugsgebiets nicht aufgenommen werden kann, ist in Abbildung 47 dargestellt. Aus diesem Volumen werden Wasserhaushaltskomponenten an der Oberfläche, wie Interzeption und Muldenspeicher, gespeist. Sind die Speicher an der Oberfläche erschöpft, kommt es zum je nach Standort Horton'schem Oberflächenabfluss oder schnellen oberflächennahen lateralen Abflussprozessen. Die in Abbildung 47 dargestellten Volumina für ein 72-stündiges Niederschlagsereignis der Wiederkehrzeit 100 a verdeutlichen, dass auch bei optimaler Ausnutzung des Bodenspeicherpotenzials mit einem erheblichen Direktabflussvolumen zu rechnen ist.

6.3.3 Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse – Gesamtgebiet

Durch die Zusammenführung der quantitativen Angaben zum potenziellen Speichervermögen mit den qualitativen Aspekten aus der Bewertung der Abflussprozesse und wird die weitere Betrachtung auf Flächen beschränkt, für die ein langsamer Abflussprozess als dominierend definiert wurde, ergibt sich eine flächendeckende Bewertung der Senkenpotenziale des Untersuchungsgebietes. Der Begriff „Senkenpotenzial“ definiert an dieser Stelle die Fähigkeit einer Landschaftseinheit, eine bestimmte Wassermenge aufzunehmen (Infiltration) und diese auch über einen (unter dem Gesichtspunkt des vorbeugenden Hochwasserschutzes) relevanten Zeitraum im Boden zurückzuhalten.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 48 - Abbildung 50) zeigen die räumliche Verteilung der Senkenpotenzialflächen im Einzugsgebiet für das berechnete theoretische Niederschlagsereignis mit 100-jährlicher Wiederkehrwahrscheinlichkeit. Bezogen auf das Infiltrations- und Speichervermögen sind die Abbildung 45 und Abbildung 50 identisch. Durch die Verschneidung mit den dominanten Abflussprozessen nach WBS-FLAB werden jedoch die Bereiche mit schnellen Abflussprozessen (siehe Abbildung 44) ausgeblendet (grauen Flächen).

Die Ergebnisse machen die Abhängigkeit des Abflussgeschehens von der Niederschlagscharakteristik deutlich. Das betrachtete 60 Minuten-Regenereignis ist durch sehr hohe Niederschlagsintensitäten gekennzeichnet. Die Infiltrationskapazität der Böden wird in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes durch die Regenintensität überschritten. Ein 12-stündiges Regenereignis resultiert zwar in einer insgesamt größeren Gesamt-Regenmenge, die Regenintensitäten sind jedoch deutlich geringer als für ein einstündiges Ereignis gleicher Wiederkehrwahrscheinlichkeit. Diese Eigenschaft resultiert in einer deutlichen größeren Wasseraufnahme der Böden. Bereits nach einer Austrocknung von 5 Tagen wären weite Teile des Einzugsgebietes in der Lage, Regen dieser Charakteristik fast vollständig aufzunehmen. Das betrachtete 72-stündige Regenereignis ist durch die hohen Gesamtregentmengen gekennzeichnet. Der verfügbare Speicherraum der Böden ist nur beschränkt in der Lage, diese Wassermengen aufzunehmen. Für diese Regenereignisse zeigt sich eine besonders starke Abhängigkeit der Abflussbildung von der klimatischen Vorgeschichte und der deutliche Einfluss von der Dauer der Vor-Regen-Entwässerung.

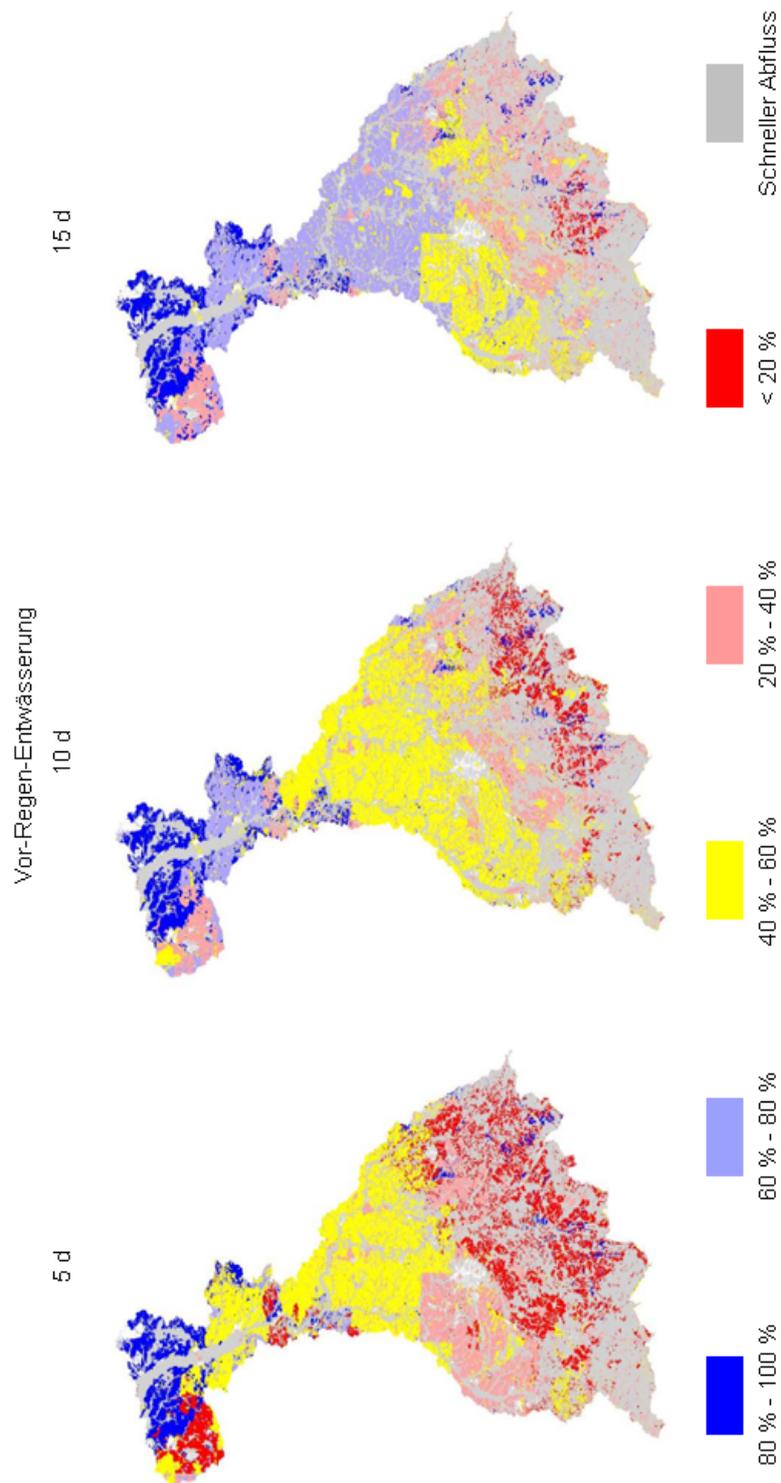


Abbildung 48: Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 60 Minuten

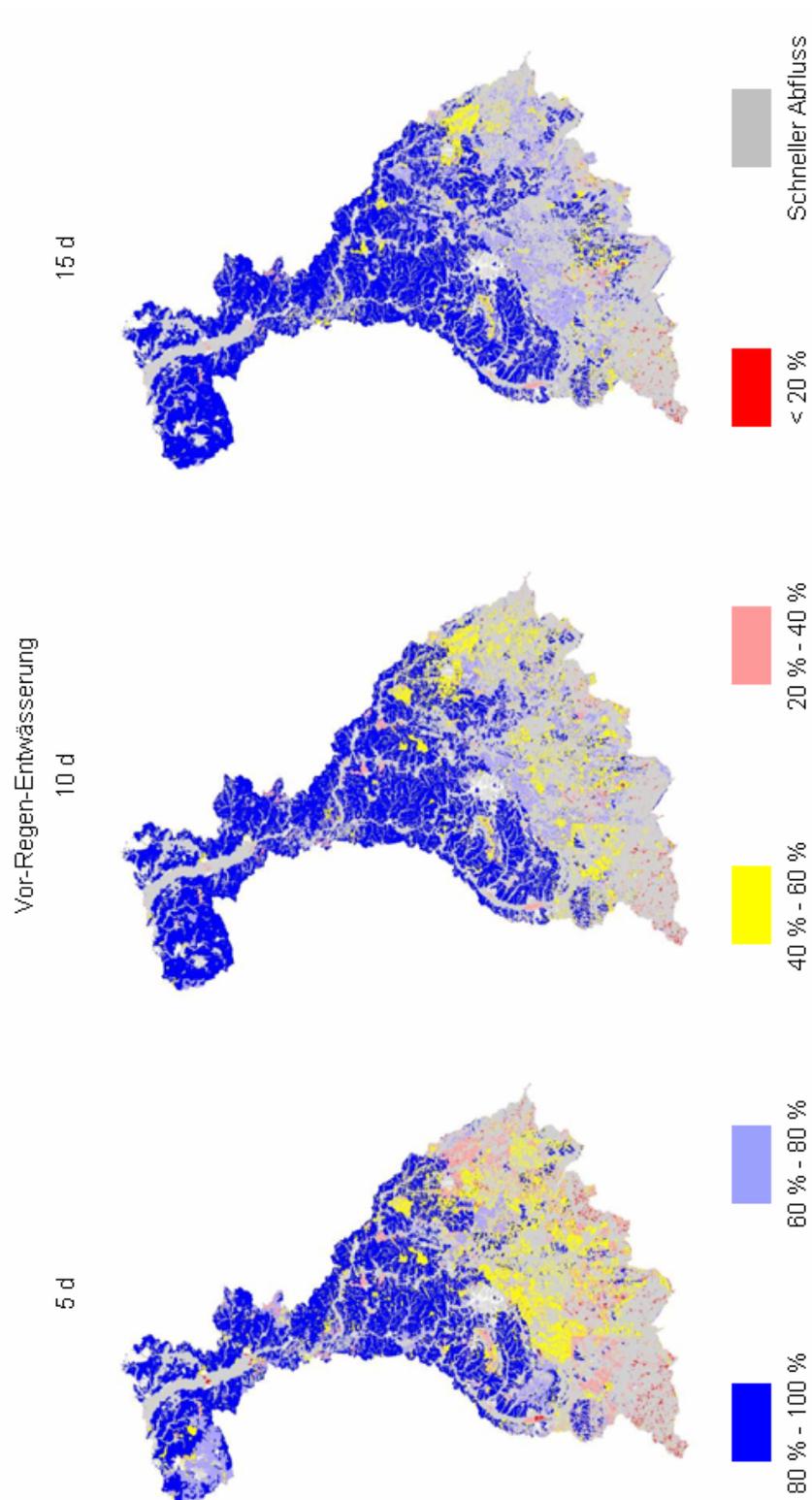


Abbildung 49: Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 12 Stunden

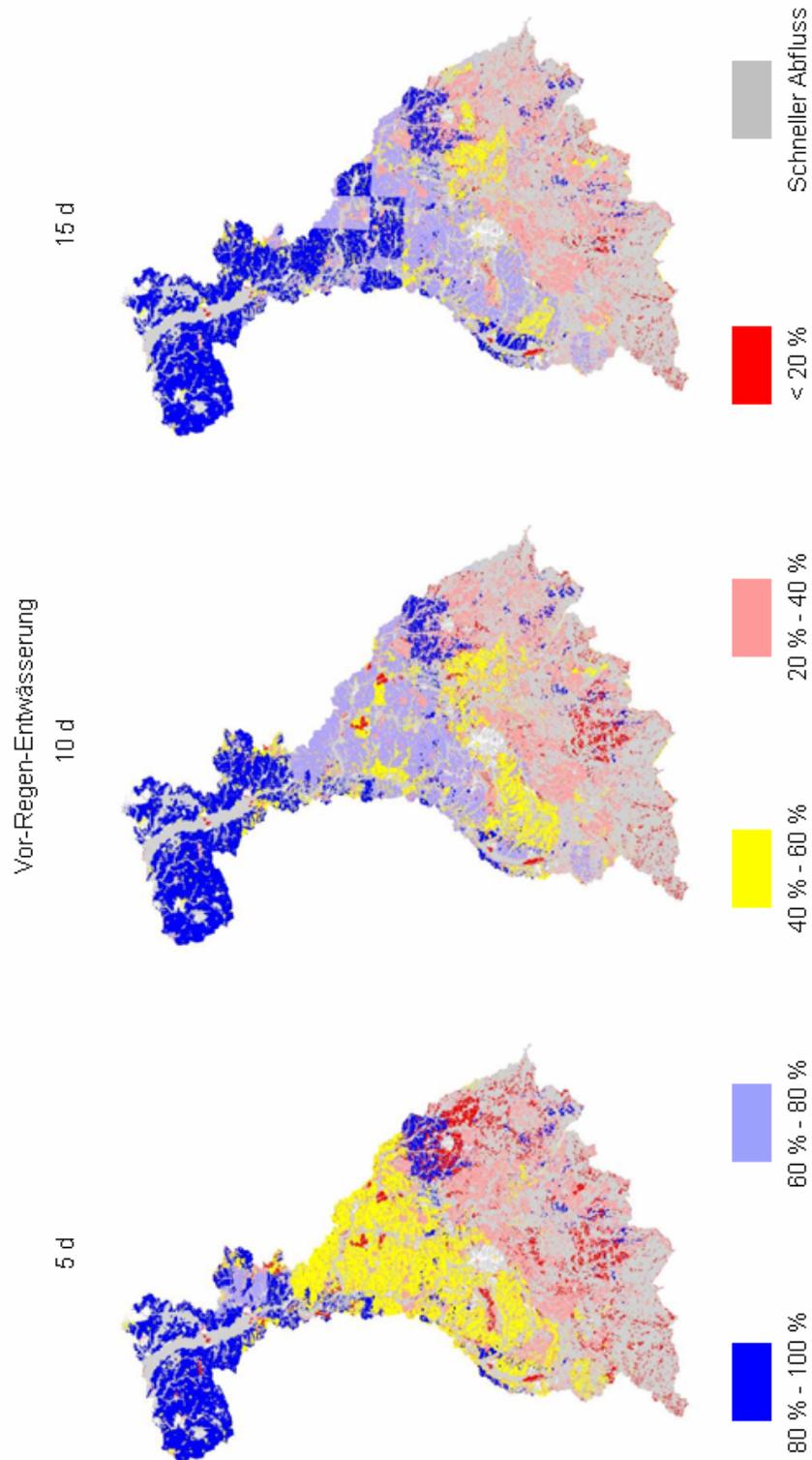


Abbildung 50: Verteilung der Senkenpotenziale im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerung – Anteil des infiltrierenden Wasser im Verhältnis zur Gesamt-Regenmenge - KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 3 Tage

Die Gegenüberstellung von errechneten Infiltrationsmengen und zugrunde gelegten statistischen Regenmengen zeigt, dass das gesamte Einzugsgebiet über ein Senkenpotenzial verfügt, das je nach Regenereignis ca. 15 % - 45 % der Gesamtregenmenge beträgt (Abbildung 51). Der beschriebene Zusammenhang zwischen Regenintensität und Regenmenge auf der einen sowie Infiltrationskapazität und verfügbarem Bodenspeicher wird in dieser Gegenüberstellung besonders deutlich. Für das 12h-Ereignis konnte der mit Abstand größte relative Anteil des Gesamtniederschlags zur Infiltration gebracht und der Abflussbildung entzogen werden. Bereits nach einer fünftägigen Entwässerung des Bodenkörpers beträgt der Anteil des Senkenpotenzials 40 % der Gesamtregenmenge. Für das einstündige und 72h-Regenereignis sind die Anteile deutlich geringer.

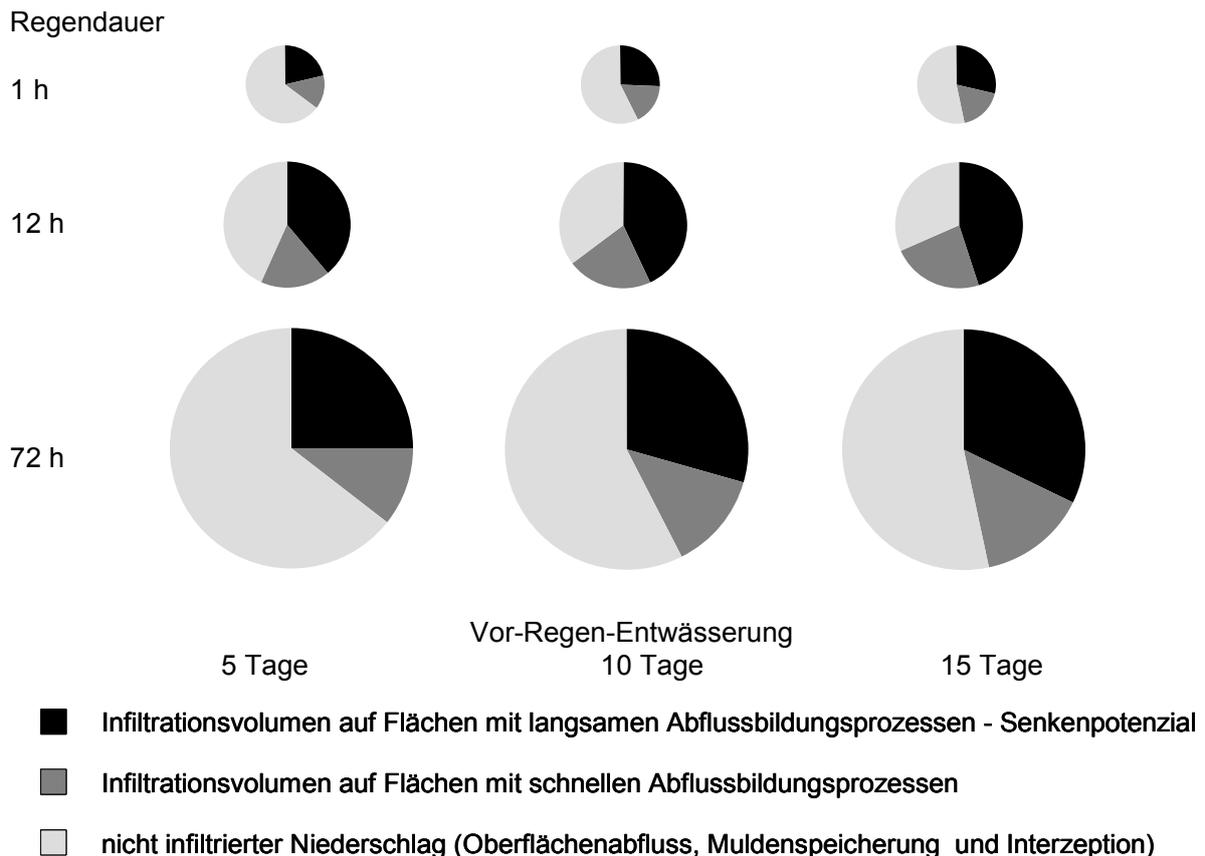


Abbildung 51: Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit und der Regencharakteristik für des gesamte Untersuchungsgebiet (Größe der Kreise in Relation zur Gesamtniederschlagsmenge)

6.3.4 Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse – Teilgebiete

In der räumlichen Verteilung der Senkenpotenziale (Abbildung 48 - Abbildung 50) bilden sich die geographischen, geologischen, geomorphologischen und standörtlichen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes ab. Um eine bessere Differenzierung dieser Effekte vornehmen zu können, wurde eine Detailanalyse der Ergebnisse unter Berücksichtigung der naturräumlichen Gliederung vorgenommen. Hierzu wurde das Untersuchungsgebiet in drei Teilgebiete unterteilt, deren räumliche Abgrenzung auf der Basis der in Kapitel 4.2, beschriebenen Naturräume erstellt wurde [HAASE & MANNSFELD 2002]. Folgende Naturräume wurden, abweichend von der Einteilung der mitteleuropäischen Naturregionen, nach [MANNSFELD & RICHTER 1995] zu „hydrologischen Regionen“ zusammengefasst (s. Abbildung 52).

- Tiefland-Region: Nordsächsisches Platten- und Hügelland, Düben-Dahlener Heide, Leipziger Land
- Lößhügelland-Region: Mulde-Lößhügelland, Mittelsächsisches Lößhügelland
- Erzgebirgs-Region: Ost-Erzgebirge, Mittleres Erzgebirge, West-Erzgebirge, Erzgebirgsbecken.



Abbildung 52: „hydrologische Regionen“

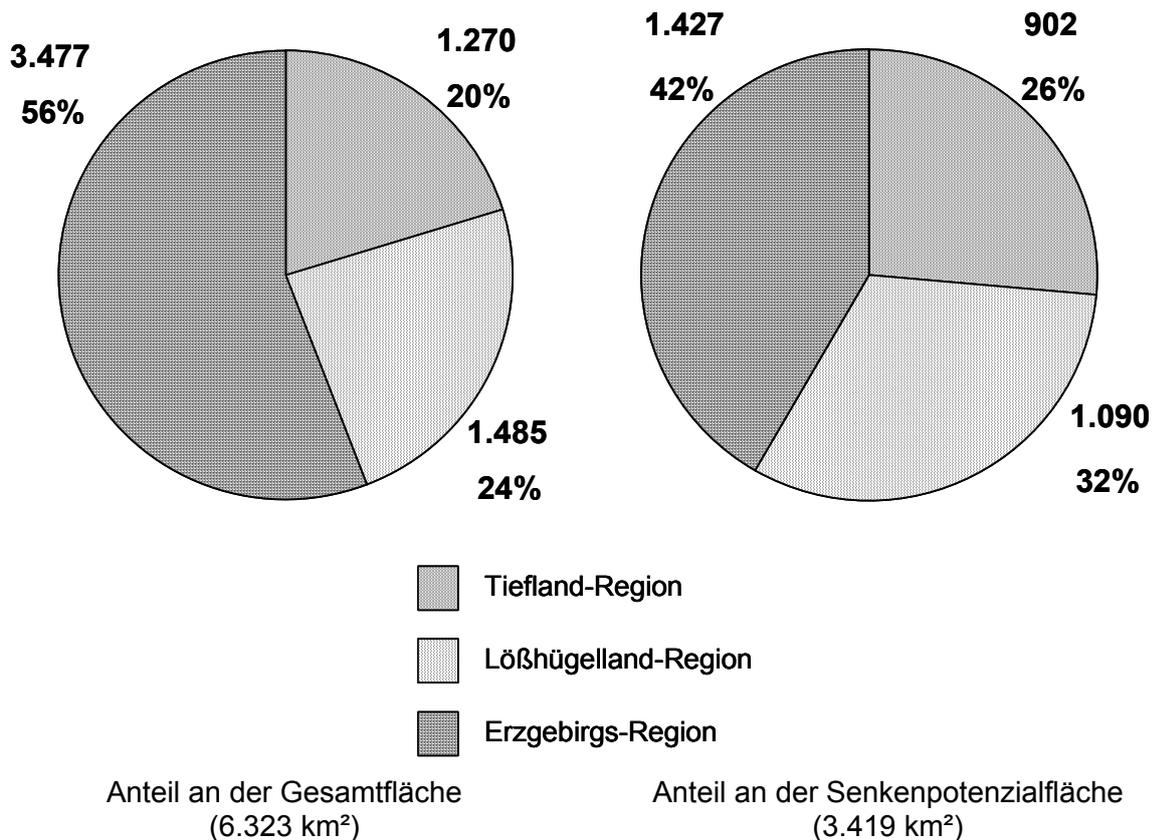


Abbildung 53: Anteile der Einzugsgebiets-Regionen an der Gesamtfläche und den Flächen mit Senkenpotenzial (Angaben in km² und Prozent)

Die Kombination aus geringer Bodenmächtigkeit bei gleichzeitig geringem freien Porenraum und geringen hydraulischen Leitfähigkeiten reduziert das potenzielle Speichervermögen der Böden insbesondere in der Erzgebirgs-Region. Während im Mittel- und Unterlauf (Tiefland- und Lößhügelland-Region) 60 % bis teilweise deutlich mehr als 80 % der Regenmenge versickern können, sind die Anteile im Bereich des Erzgebirges und deutlich geringer. Die Erzgebirgs-Region umfasst mit ca. 3.500 km² mehr als 50 % des Gesamteinzugsgebietes (s. Abbildung 53). Auf Grund der genannten abflussfördernden Standorteigenschaften ist der Anteil dieser Region an der Senkenpotenzialfläche mit ca. 40 % jedoch deutlich geringer. Für die Tiefland- und Lößhügelland-Region dagegen sind die relativen Anteile an der Senkenpotenzialfläche deutlich größer als ihr Anteil an der Gesamtfläche des Mulde-Einzugsgebietes.

Diese naturräumlichen Beeinflussungen der Abflussbildung werden besonders deutlich, wenn die errechneten Infiltrationsmengen für die drei Regionen des Untersuchungsgebietes den zugrunde gelegten statistischen Regenmengen gegenübergestellt werden (Abbildung 54 - Abbildung 56). Während in der Tieflands- und Lößhügelland-Region je nach Niederschlagsereignis theoretisch 40 % bis über 60 % des Niederschlags als Senkenpotenzial aufgenommen werden können, ist der Anteil des Senkenpotenzials für das Erzgebirge mit lediglich ca. 10 % - 30 % sehr gering. Im Falle des 10-Minuten-Regens ist die Ursache vor allem in den geringen hydraulischen Leitfähigkeiten der dominierenden Lehme zu sehen.

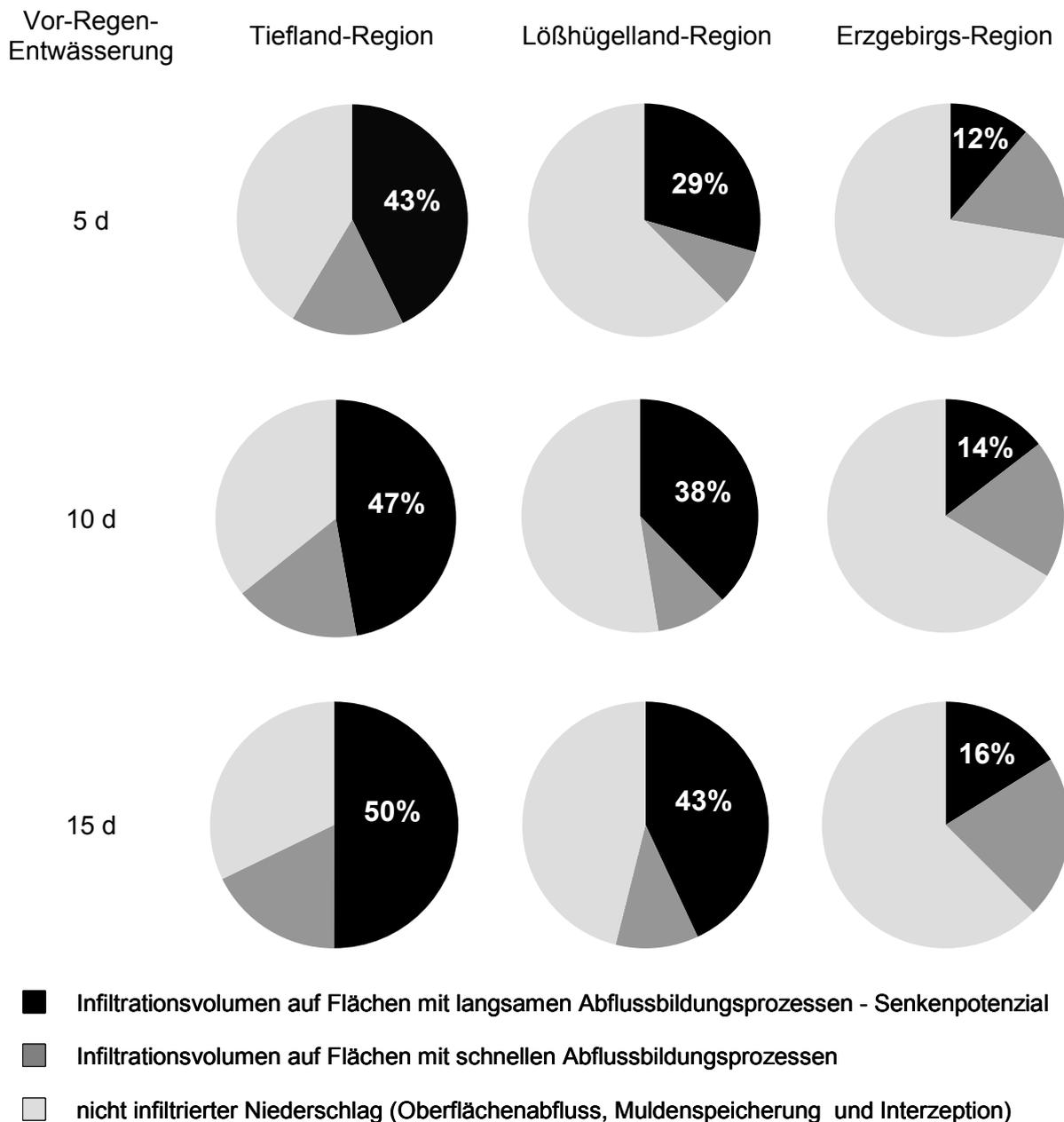


Abbildung 54: Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 1 h

Die Kreisdiagramme veranschaulichen den Einfluss der klimatologischen Vorgeschichte auf die Abflussbildung. Der mit zunehmender Entwässerungsdauer wachsende freie Porenraum des Bodenkörpers ist für die Wasseraufnahmefähigkeit von entscheidender Bedeutung. So zeigen Schluffböden der Lößhügelland-Region infolge ihres hohen Mittelporenanteiles deutlich größere ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten als z. B. die Lehmböden der Erzgebirgs-Region. Im Ergebnis finden auf den Schluff-Standorten auch nach mehrtägiger gravitativer Entwässerung noch relevante Sickerwasserbewegungen statt, die zu einer Erhöhung des freien Porenraumes beitragen. Dieser Effekt wird bei der Betrachtung der zunehmenden Infiltrationsvolumina bei längeren Entwässerungszeiten besonders deutlich (s. auch Abbildung 45). Während in der Lößhügelland-Region (Schluffböden) eine Erhöhung der

Vor-Regen-Entwässerung von 5 d auf 10 d bzw. auf 15 d zu einer spürbaren Vergrößerung des Speicherraumes führt, ist solch ein Effekt bei den Lehmböden des Erzgebirges deutlich geringer. Der Effekt der Vor-Regen-Entwässerung wird auch sichtbar, wenn die Gesamtmengen der theoretischen Infiltration betrachtet werden (Abbildung 46).

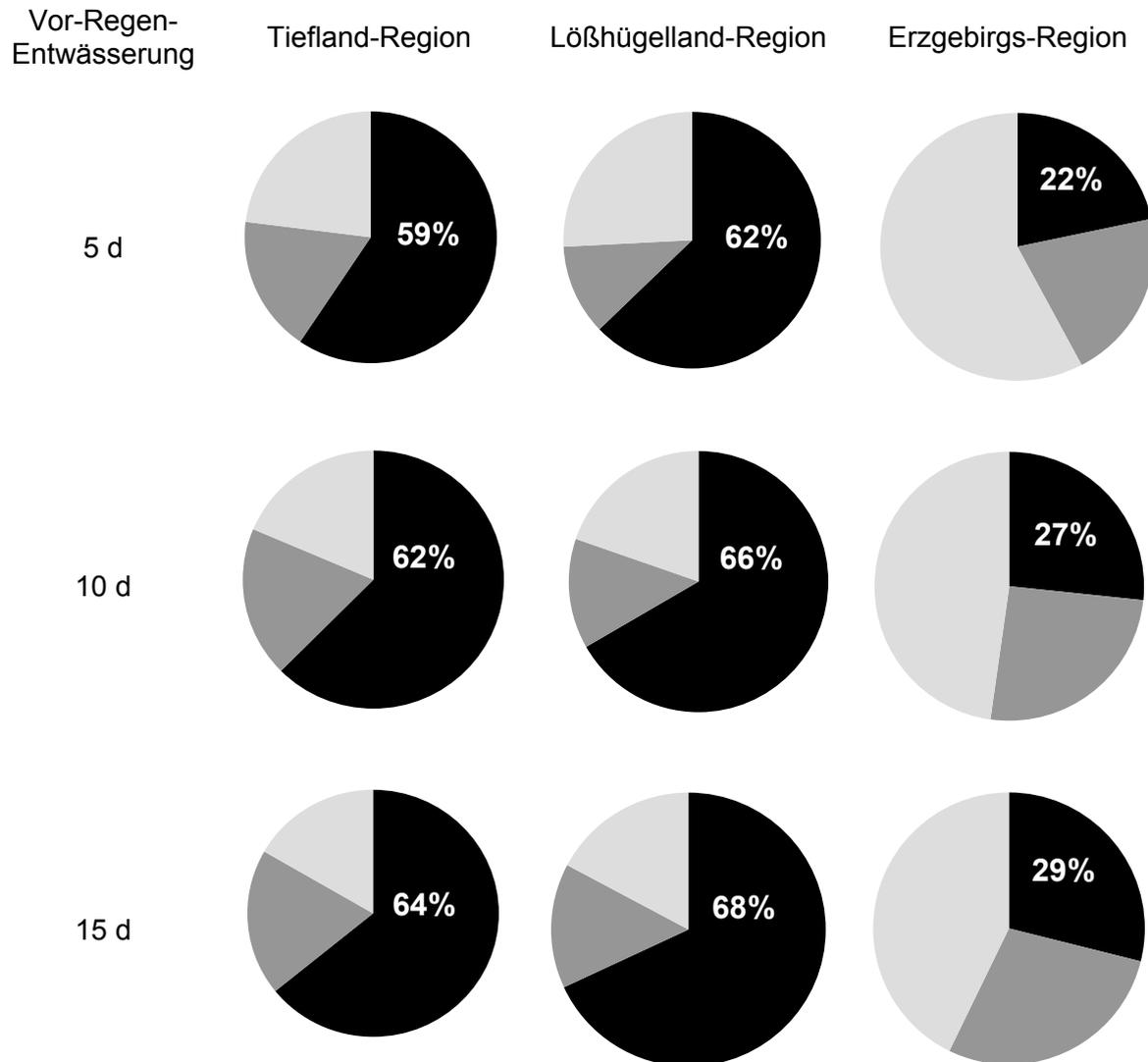


Abbildung 55: Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 12 h

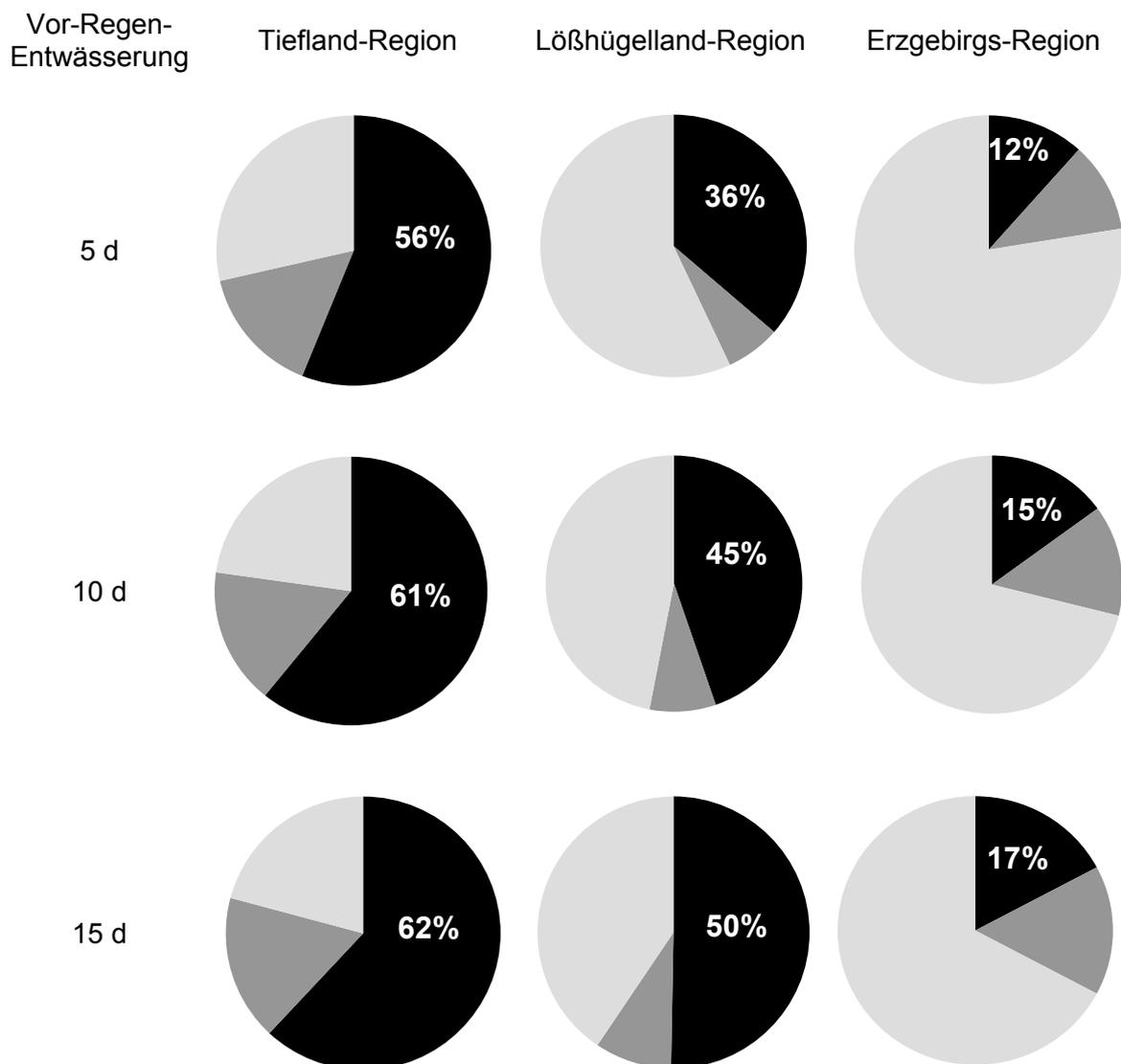


Abbildung 56: Anteile des Infiltrationsvolumens auf Flächen mit schnellen und langsamen Abflussprozessen am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit von der Vor-Regen-Entwässerungszeit für die drei Einzugsgebiets-Regionen – KOSTRA-Niederschlag: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 100 a, Dauerstufe 72 h

6.3.5 Ergebnisse der Wasserrückhaltepotenzialanalyse bezogen auf die aktuelle Landnutzung

Bezogen auf das Senkenpotenzial stellen die Tieflands- und die Lößhügelland-Region die leistungsfähigsten Bereiche des Untersuchungsgebietes dar. Das Erzgebirge als klassisches Hochwasserentstehungsgebiet ist auf Grund der oft geringen Mächtigkeit seiner Böden bei gleichzeitig starken Hangneigungen und der hohen Verbreitung von Lehm Böden nur beschränkt in der Lage, Starkregenereignissen über einen Wasserrückhalt im Boden Abfluss mindernd entgegenzuwirken. In diesem Zusammenhang ist die Betrachtung der konkreten Landnutzung im Untersuchungsgebiet von besonderem Interesse. Abbildung 57 zeigt die Anteile der unterschiedlichen Landnutzungen bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes sowie die Senkenpotenzialfläche. Die Ackernutzung stellt mit 44 % Anteil an der Gesamtfläche die deutlich dominierende Landnutzungsform dar. Die Verteilung der Landnutzungen im Untersuchungsgebiet (Abbildung 17) zeigt auch, dass die

Ackernutzung insbesondere in der Tieflands- und Lößhügelland-Region verbreitet ist. Dies resultiert in einem mit 62 % überproportional hohen Anteil der Ackernutzung an den Senkenpotenzialflächen. Gleichzeitig macht diese Tatsache die besondere Bedeutung der Landwirtschaft und der landwirtschaftlichen Bodenutzung für den vorbeugenden Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche besonders deutlich.

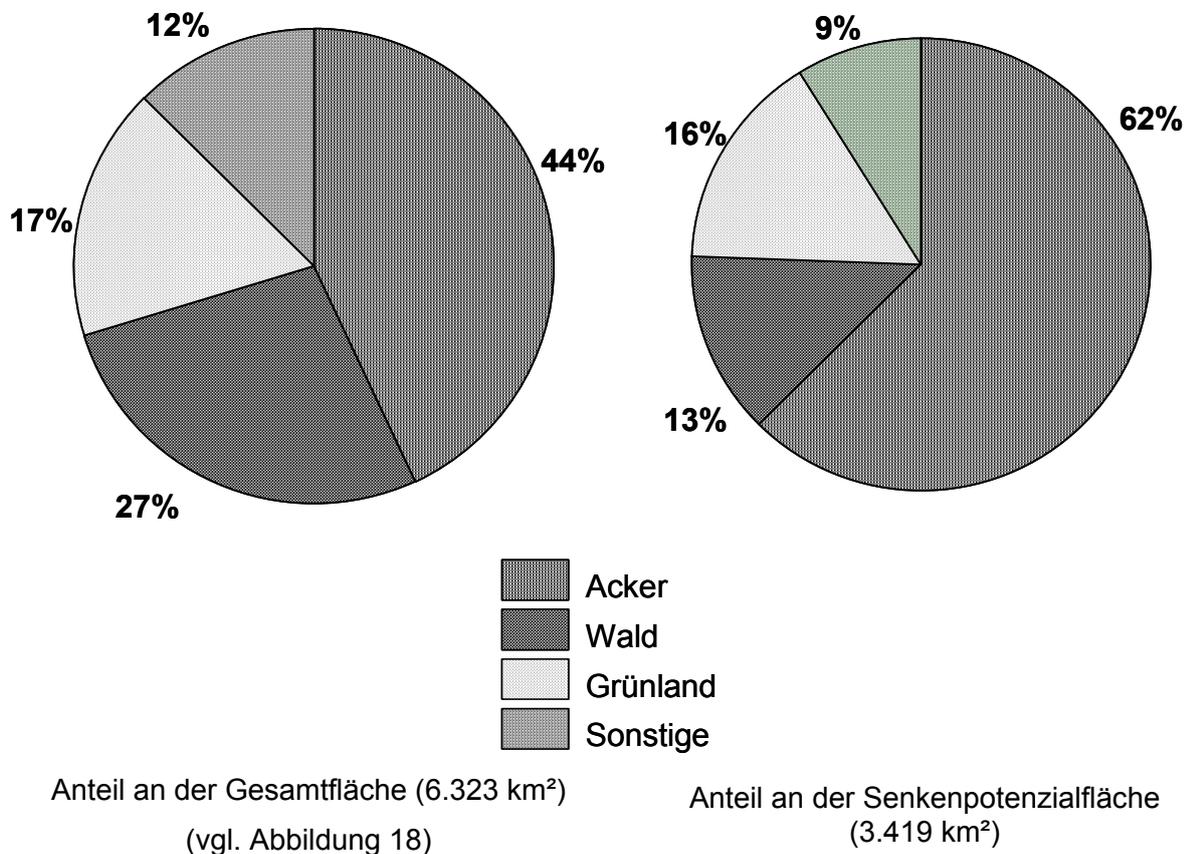


Abbildung 57: Anteile der Landnutzung an der Gesamtfläche und Senkenpotenzialfläche des Einzugsgebietes

6.4 Diskussion

Mit der Bewertung der Landschaft bezüglich ihres Wasserrückhaltepotenzials steht ein entscheidender Baustein im Konzept zur Implementierung von Hochwasserschutzmaßnahmen in der Fläche zur Verfügung. Durch die kombinierte qualitative Charakterisierung des dominanten Abflussprozesses und der quantitativen Ermittlung der Speicherpotenziale kann einzugsgebietsweit und flächendeckend die generelle Aussage getroffen werden, ob Maßnahmen zur verstärkten Infiltration einen Hochwasser vermindernenden Effekt erwarten lassen. Dies ist eine grundlegende Information für die Verortung von Maßnahmen und die Aufstellung von Szenarien (siehe Kapitel 7 und 8). Darüber hinaus lässt die quantitative Betrachtung der Speicherpotenziale eine Priorisierung besonders geeigneter Standorte zu.

Unabhängig von der Frage nach der Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Darstellung des Wasserrückhaltepotenzials dazu geeignet, Hochwasserminderungsgebiete zu identifizieren und umgekehrt die Raumeinheiten mit besonderem Gefährdungspotenzial zu lokalisieren. So könnten negative Eingriffe im Bereich von Hochwasserentstehungsgebieten nach § 100b [SÄCHSWG 2004] durch gezielte Ausgleichsmaßnahmen in Hochwasserminderungsgebiete (oder Wasservorsorgegebiete) kompensiert werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig herauszustellen, dass die hier vorgestellte Methodik keine Aggregation der für das Einzugsgebiet vorliegenden Standortinformationen (siehe Kapitel 5.2.1) notwendig macht. Somit entspricht die räumliche

Auflösung der Wasserrückhaltepotenzialkarten (Abbildung 48 - Abbildung 50) der Bodenkonzeptkarte (M 1: 50.000). Dieser Maßstab erlaubt es, Hochwasserminderungsgebiete oder Potenzialflächen für infiltrationsfördernde Maßnahmen in Bereichen des Einzugsgebietes aufzuzeigen, die bei einem größeren Maststab herausgemittelt worden wären (siehe Abbildung 58).

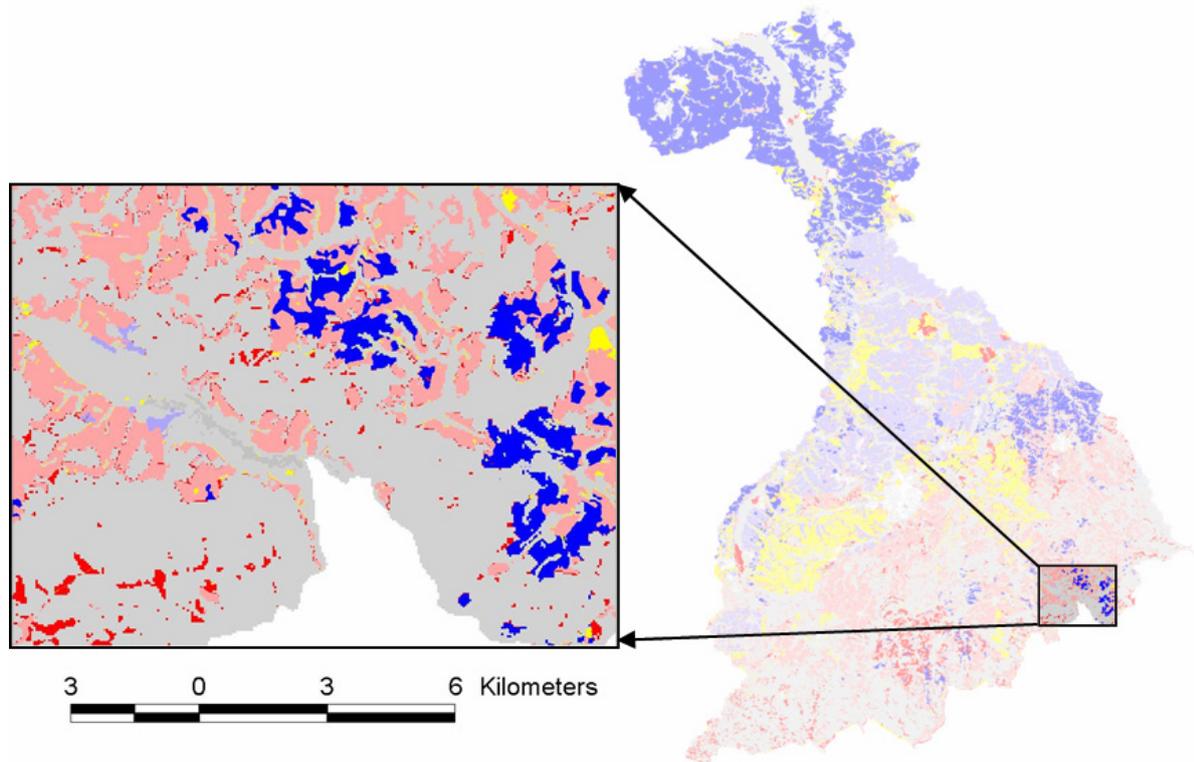


Abbildung 58: Beispiel für die räumliche Auflösung der Wasserrückhaltepotenzialkarte

Ein weiterer Nutzen mit Bezug auf folgende Methodik bezieht sich auf die hydrologische Modellierung (Kapitel 9). Das Einflechten der hier vorgestellten Ergebnisse in die berechneten Szenarien stellt einen deutlichen Qualitätsgewinn für die hydrologische Berechnung dar. Mit der Berücksichtigung der dominanten Abflussprozesse bei der Szenarienentwicklung fließt mittelbar eine differenzierte Betrachtung der Prozesse auf der Hangskala in die Modellierung ein, die durch die Modellansätze des ausgewählten Modells STORM nicht geleistet werden kann. Somit sind die hier vorgestellten Ergebnisse ein wichtiges preprocessing und ebnet den Weg zur skalenübergreifenden Modellierung mit einer Kopplung von kleinräumigen und großräumigen Prozessen [PESCHKE et al. 1999a; ZIMMERMANN 1999].

Von der Güte der hier vorgestellten Standortanalyse hängt es ab, mit welcher Sicherheit im Folgenden der Befürchtung entgegengetreten werden kann, dass eine infiltrationsfördernde Bewirtschaftung durch schnelle laterale Abflusskomponenten an Wirkung verliert. Aus diesem Grund sollen hier noch einmal „einschränkende“ Randbedingungen herausgestellt werden, um die Aussagekraft der hier vorgestellten Ergebnisse richtig einschätzen zu können.

- Die Klassifizierung der Eingabeparameter für das WBS-FLAB wurde keiner Validierung unterzogen. Diese mit der Größe des Einzugsgebiet und der Methodik zur begründende Einschränkung bezieht sich insbesondere auf die Klassifizierung der Bodeninformation entsprechen dem WBS-FLAB „Wörterbuch“ (siehe Kapitel 6.2.1).

- Die Bestimmung des dominanten Abflussprozesses bezieht sich nicht auf konkrete Niederschlagsverhältnisse. Vielmehr handelt es sich um die potentiell dominanten Abflussprozesse [ZIMMERMANN 1999].
- Jede Teilfläche wird separat betrachtet. Das bedeutet, dass Wechselwirkungen nicht berücksichtigt werden können.
- Auch wenn die räumliche Auflösung der Datengrundlagen für die Fragestellung als ausreichend erscheint, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass für einzelne Gebiete der Mess- bzw. Beobachtungsmaßstab, also der Maßstab der gewählten Datengrundlagen, nicht mit dem Maßstab der Prozesse übereinstimmt [BLÖSCHL 1996]. Dies kann insbesondere für die morphologisch und pedologisch stark differenzierten Mittelgebirgsbereiche zutreffen.

Die zuletzt genannte Einschränkung gilt sowohl für die Bestimmung des dominanten Abflussprozesses wie auch für die Ermittlung des Speicherpotenzials der Böden.

Das Ziel dieser Methodik ist eine Potenzialanalyse auf der Basis breiten verfügbarer Gebietsdaten. Dies beinhaltet nicht das Abbilden von Abflusskonzentrationsprozessen oder resultierenden Abflussganglinien. Vor diesem Hintergrund sind die genannten Einschränkungen als tolerabel zu bezeichnen.

7 Maßnahmen des Hochwasserschutzes in der Fläche

7.1 Vorstellung der betrachteten Maßnahmen

Nachdem in Kapitel 6 die potenziellen Speichervolumina lokalisiert und quantifiziert wurden, schließt sich die Frage an, wie der ungenutzte Speicher im Boden wirtschaftlich und im Einklang mit bestehenden Nutzungsansprüchen erschlossen werden kann (siehe Kapitel 3).

Es liegt auf der Hand, dass eine flächenhafte Erschließung des Bodenspeichers nur durch eine Veränderung der Bewirtschaftung realisiert werden kann. In dieser Arbeit wird zunächst ein ganzer Katalog an Maßnahmen betrachtet. Für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft zählen hierzu verschiedene Formen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, die für die unterschiedlichsten Standorte geeignet sind und ihre technischen, wasserwirtschaftlichen und finanziellen Vorteile im langjährigen Betrieb unter Beweis gestellt haben. Der Maßnahmenkatalog für die Landwirtschaft teilt sich in drei Maßnahmengruppen auf. Neben Maßnahmen der veränderten Bewirtschaftung werden hier Landnutzungsänderungen und Maßnahmen der Flurgestaltung betrachtet (siehe Tabelle 8).

Die möglichst große Auswahl unterschiedlicher Maßnahmen ist für die konkrete Maßnahmenumsetzungen notwendig, weil auch die Landschaft sowie die an sie gekoppelten Funktionen sehr vielfältig sind (siehe RÜTER in [SIEKER et al. 2007a]). Bei der Aufstellung von Szenarien und der sich anschließenden hydrologischen Modellierung (siehe Kapitel 8 und 9) kommt es zu einer drastischen Konzentration auf nur jeweils eine Maßnahme für den Bereich der Siedlungsgebiete und der ackerbaulich genutzten Flächen. Es werden dann nur noch die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Mulden-Rigolen-Elementen und die konservierende Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahmen untersucht.

Diese Einschränkung kann als „methodischer Bruch“ aufgefasst werden und soll deshalb an dieser Stelle begründet werden.

Sowohl die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Mulden-Rigolen-Elementen als auch die konservierende Bodenbewirtschaftung auf Ackerflächen genügen den folgenden Ansprüchen, die für die Umsetzung und das hier entwickelte Konzept des Hochwasserschutzes (siehe Kapitel 3.1) grundlegend sind:

- Sie wirken den negativen anthropogenen Einflüssen (Versiegelung, Verschlammung und Bodenverdichtung) der konventionellen aktuellen Landnutzung entgegen. Es kommt zu einer Wiederherstellung des natürlichen Abflussbildungsregimes (siehe Kapitel 2.2) und zu einer Minimierung von schnellen Oberflächenabflüssen. Bei optimaler Umsetzung der Maßnahmen ist sogar eine Stärkung der Infiltration über das Maß der natürlichen Wasserbilanz während eines Hochwassers möglich (siehe Kapitel 9.3) [BRONSTERT et al. 1999].
- Sie ermöglichen eine Beibehaltung der momentanen Nutzung. Die Maßnahmen bedeuten keine Landnutzungsänderung sondern eine Bewirtschaftungsänderung.
- Die Maßnahmen nutzen dem Hochwasserschutz als Nebeneffekt. Die Motivation dieser Maßnahmen zur Umsetzung leitet sich aus Eigenschaften ab, die den Betreibern (Entwässerungsbetriebe und Grundstückeigentümer bzw. Landwirte) zugute kommen. Aus diesem Grund hat eine großflächige Umsetzung hohe Erfolgsaussichten (siehe Kapitel 11). In diesem Punkt unterscheidet sich das Konzept des Hochwasserschutzes in der Fläche ganz erheblich vom technischen Hochwasserschutz, der oft mit grundsätzlichen Widerständen im Umsetzungsprozess zu kämpfen hat und in der Regel aus Steuermitteln finanziert werden muss (siehe Kapitel 3.1).

Die anderen Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs können diese Ansprüche nicht vollständig erfüllen.

Ein weiterer Grund, der gegen die Berücksichtigung weiterer Maßnahmen bei der hydrologischen Modellierung spricht, ergibt sich aus der Konzeption dieser Arbeit. Auf der gewählten Maßstabebene bereitet es Probleme, Maßnahmen modelltechnisch abzubilden, die beispielsweise durch linienförmige Strukturen die Abflusskonzentration an der Oberfläche verzögern (Maßnahmen zur Schlaggliederung). Gleiches gilt für Maßnahmen, die das Mikrorelief oder Kleinspeicher zur Retention von Niederschlagswasser nutzen (Konturnutzung bzw. dezentrale Abflussmulden). Für die genannten Beispiele gilt, dass die Prozessskala nicht mit der Modellskala und den dazu passenden Modellansätzen in Einklang zu bringen ist (siehe Kapitel 3.3). Dieser Umstand kann jedoch nicht als Argument gegen diese Maßnahmen verwendet werden. Vielmehr ist es als Einschränkung der hier vorgestellten Methodik zu werten. [SIEKER et al. 2007a] haben daraus die Konsequenz gezogen und auf unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben die in Tabelle 8 genannten Maßnahmen untersucht.

Im Folgenden wird die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und die konservierende Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme vorgestellt. Es wird darauf eingegangen, wie diese Maßnahmen auf den Abflussbildungsprozess wirken. Die modelltechnische Abbildung der Maßnahmen und die dafür notwendige Parametrisierung ist Gegenstand der Kapitel 9.3 und 9.4. Die weiteren Maßnahmen in außerörtlichen Gebieten werden in Kapitel 7.1.3 vorgestellt.

7.1.1 Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung als Hochwasserschutzmaßnahme

Ausgehend von den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen negativen Auswirkungen der konventionellen Regenwasserableitung in Siedlungsgebieten wurden in den vergangenen Jahrzehnten Regenwasserbewirtschaftungskonzepte und technische Lösungen entwickelt, die die negativen Auswirkungen von Siedlungsgebieten minimieren, den gewohnten „Entwässerungskomfort“ in Siedlungsgebieten gewährleisten und gleichzeitig positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und den vorbeugenden Hochwasserschutz haben.

Die „neuen“ Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung setzen auf die

- Entsiegelung von Flächen
- Zentrale oder dezentrale Speicher, Versickerung und gedrosselte Ableitung von Niederschlägen
- Erhaltung der unmittelbaren Ableitung des Niederschlagswassers in Oberflächengewässer

Der Maßnahmenkatalog für die Siedlungsgebiete beschränkt sich auf die technischen Lösungen zur Versickerung, Rückhaltung und ggf. gedrosselter Ableitung von Niederschlagswasser sowie die Ableitung ins Gewässer (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Maßnahmenkatalog für die Siedlungsgebiete

1	Flächenversickerung
2	Muldenversickerung
3	Versickerung mit unterirdischer Speicherung (Mulden-Rigolen-Element)
4	Versickerung mit Ableitung (Mulden-Rigolen-System)
5	Versickerung mit Ableitung und Stauwasserbewirtschaftung (Mulde-Rigolen-Systeme)
6	Ableitung ins Gewässer

Bei der Beschreibung dieser Maßnahmen kann auf eine Reihe von Veröffentlichungen verwiesen werden, die Untersuchungen und praktischen Erfahrungen aus den Bereichen Konzeption, Planung, Bau und Betrieb dokumentieren. Einen guten Überblick über die oben genannten Maßnahmen sowie weitere Literaturhinweise geben z. B. [SIEKER et al. 1996], [SIEKER et al. 2006a], [GEIGER & DREISEITL 1995] und [STECKER 1997]. [ADAMS 1996]

dokumentiert darüber hinaus eine Reihe von Ausführungsbeispielen. [SCHNEIDER 1999] geht insbesondere auf die modelltechnische Abbildung von Versickerungsmaßnahmen ein. [SIEKER 2001b] stellt die Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung konventionellen Formen der Regenwasserbewirtschaftung gegenüber und geht dabei auch auf die Bedeutung der Maßnahmen für den Wasserhaushalt (s.u.) ein. Des Weiteren nennt H. Sieker die rechtlichen Rahmenbedingungen. Die DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) trägt dem Wandel in der Regenwasserbewirtschaftung Rechnung und hat für die „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ ein Arbeitsblatt herausgegeben, das Hinweise zur Bemessung gibt [DWA-A 138 2005] (siehe Kapitel 9.2). Veröffentlichungen aus den USA oder Lateinamerika weisen darauf hin, dass auch dort Erfahrungen mit der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung gesammelt werden und als Alternative zur konventionelle Ableitung empfohlen wird [US-EPA 2005] [DICTUC 1996].

Die oben genannten Quellen dienen u.a. zur Erstellung von so genannten Maßnahmensteckbriefen, die im Rahmen des DBU-Mulde-Projektes zusammengestellt wurden [SIEKER et al. 2007a]. In den Maßnahmensteckbriefen wurde qualitativ herausgestellt, welcher Nutzen die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung für den Hochwasserschutz hat und welche Synergieeffekte sich hierbei ergeben.

Bei der Recherche zu den Steckbriefen fiel auf, dass nur wenige quantitative Aussagen zur Auswirkung dezentraler Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Hochwasserabflüsse in der Literatur zu finden sind. Die folgende Literaturlauswertung schließt sich direkt an die in Kapitel 2.3.1 geführte Diskussion über die Folgen der Urbanisierung auf den Hochwasserabfluss in Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe an.

[STAUSS 1999] hat unter Annahme hochwassererzeugender Niederschläge aus dem Rheingebiet im Januar 1995 die Wasserbilanzen für Mulden-Rigolen-Elemente bestimmt und dabei verschiedene Dimensionierungen und Bodendurchlässigkeiten berücksichtigt. Er stellte fest, dass bei einer Bemessung der Mulden-Rigolen-Elemente auf ein Überstauintervall von 5 Jahren (vgl. [DWA-A 138 2005]) die Abflussbeiwerte zwischen 7 und 15% liegen. Dagegen lagen die Abflussbeiwerte von Mulden-Rigolen-Systemen mit Drosselabfluss deutlich höher (59 -79%).

[SIEKER 2001b] hat anhand seiner Modellrechnung ähnliche Direktabflussanteile von Mulden-Rigolen-System ermittelt wie STAUSS (ca. 80%). Die Abflüsse aus Mulden-Rigolen-Elementen schätzt SIEKER wesentlich höher ein als STAUSS. Nach seinen Berechnungen fließen bei Annahme eines vierwöchigen Niederschlages ca. 60 % als Direktabfluss aus den Mulden-Rigolen-Elemente dem Vorfluter zu (siehe auch [SIEKER 2001a]).

Die Berechnung von Wasserbilanzen für Mulden-Rigolen-Elemente während ausgewählter Starkregenereignisse unter Verwendung von drei Niederschlagsreihen aus dem Mulde-Einzugsgebiet stützen die je nach betrachtetem Ereigniszeitraum sowohl die Ergebnisse von STAUSS als auch von SIEKER. Vergleichbar zu der Methodik von STAUSS wurde das betrachtete Mulden-Rigolen-Element mittels Niederschlag-Abfluss-Langzeitsimulation mit dem Modell STORM dimensioniert (siehe Kapitel 9.2). Die Bilanzen in Tabelle 7 bilden in der Summe den effektiven Niederschlag, d.h. es handelt sich um die Abflüsse von den versiegelten und unversiegelten Flächen, in denen die Benetzung- und Verdunstungsverluste nicht mehr enthalten sind. Die Verdunstung aus den Mulden wurde in Anbetracht der kurzen Berechnungszeiträume in den Bilanzen nicht berücksichtigt. Eingehende Erläuterungen zu den hier untersuchten Mulden-Rigolen-Elementen und den ausgewählten Starkniederschlägen sind in Kapitel 9.3 zu finden. Im Gegensatz zu den von STAUSS und SIEKER verwendeten hochwassererzeugenden Niederschlagsdaten, beschreiben die hier verwendeten Niederschlagsdaten durchgehend Sommerhochwasser. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass je nach Starkregenereignis in den Mulden-Rigolen-Elementen zwischen 30 und 100 % des effektiven Niederschlags gespeichert und vor Ort in den Boden infiltrieren können (siehe Tabelle 7) [WILCKE et al. 2007]. [ZWEYNERT et al. 2006] ermitteln bei gleicher Vorgehensweise und Verwendung der Regenreihe Dresden-Klotzsche Abflussbeiwerte zwischen 6 und 48 %.

Aus den zusammengestellten Modellberechnungen wurde für diese Arbeit die Konsequenz gezogen, die Umsetzung von unvernetzten Mulden-Rigolen-Elementen an den dafür geeigneten Standorten als Szenario für die Siedlungsgebiete zu verwenden (siehe Kapitel 8.2).

Tabelle 7: Wasserbilanz von Mulden-Rigolen-Elementen bei unterschiedlichen Starkregenereignissen (bezogen auf den effektiven Niederschlag)

Hochwasser-Zeitraum	Station Fichtelberg		Station Chemnitz		Station Leipzig	
	Versickerung	Direktabfluss	Versickerung	Direktabfluss	Versickerung	Direktabfluss
10.8.-14.8.2002	30%	67%	85%	11%	100%	0%
25.8.-5.9.1995	91%	9%	99%	1%	100%	0%
7.8.-12.8.1978	91%	9%	100%	0%	100%	0%
30.8.-13.9.1990	100%	0%	100%	0%	100%	0%

Die dargestellten Wasserbilanzen geben Auskunft über das aktivierbare Speichervolumen. Sie geben jedoch noch keinen Hinweis auf die erzielbaren Abflussreduktionen in den aufnehmenden Gewässern.

[KOEHLER 2006] bezieht sich auf Untersuchungen an Rems ($A_{EO} = 532 \text{ km}^2$ siehe auch [KOEHLER 1998]) und stellt heraus, dass die Scheitelabminderung (zwischen 1 und 25 %) mit der Zunahme der Niederschlagshöhe überproportional abnimmt. Allerdings basiert dieses Ergebnis auf der Annahme, dass eine Abkopplung von Siedlungsflächen einer Entsiegelung gleichgesetzt werden kann. [SIEKER et al. 2004] widersprechen dieser Annahme, die nach ihrer Meinung auch zu falschen Ergebnissen bei der Einschätzung des „Einflusses der Landnutzung und der Ausbaumaßnahmen auf den Hochwasserabfluss im Rhein“ [BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) 2002] geführt haben.

[BOLD & SPENGLER 2006] stellen Simulationsberechnungen mit dem Modell NASIM [HYDROTEC 2002] unter der Vorgabe zunehmender dezentraler Regenwasserbewirtschaftung für das Einzugsgebiet der Emscher ($A_{EO} = 865 \text{ km}^2$) vor. Sie geben an, dass bei 10 % Abkopplung eine Scheitelreduktion des mittleren Hochwassers (MHQ) um 7 % erreicht werden kann. Eine vollständige Abkopplung würde sogar zu einer Scheitelreduktion um 46% führen. BOLD und SPENGLER verweise jedoch auch darauf, dass diese Effekte mit zunehmender Jährlichkeit kleiner werden. Als Besonderheit dieser Untersuchung muss der extreme Bebauungsgrad von 50 % im Einzugsgebiet der Emscher hervorgehoben werden.

[ZIMMERMAN 2005] hat in seiner Arbeit die Auswirkung von Abkopplungsmaßnahmen (Umstellung von konventioneller Ableitung auf dezentrale Regenwasserbewirtschaftung) auf den Hochwasserabfluss eines 195 km^2 großen Einzugsgebietes modelliert. Ihm lagen dazu Informationen zur ungleichmäßigen Überregnung des Einzugsgebietes vor. ZIMMERMAN stellte fest, dass im Durchschnitt die Hochwasserabflüsse am Gebietsauslass durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftung um bis zu 7 % reduziert werden können. Gleichzeitig stellt ZIMMERMAN heraus, dass die Abflussreduktion im erheblichen Maße von der ungleichmäßigen Überregnung als dem örtlichen Zusammentreffen des Niederschlags mit den bewirtschafteten Siedlungsgebieten abhängt [SIEKER et al. 2005a].

ZIMMERMAN stellt seine Ergebnisse den Ergebnissen des Projekte LAHoR [NIEHOFF 2001] (siehe auch [KATZENMAIER et al. 2001] und [BRONSTERT 2003]) gegenüber und widerspricht der Einschätzung, dass bei lang anhaltenden (advektiven) Niederschlagsereignissen die Wirkung der Versickerung stark nachlässt. Er begründet dies mit falschen Annahmen bei der Abbildung des Referenzzustandes. Neben der Niederschlagsintensität (Ereignisdauer) nennt NIEHOFF die Bodenfeuchtebedingungen zu Ereignisbeginn als wichtigen Einflussfaktor. NIEHOFF kommt wie ZIMMERMAN zu dem Ergebnis, dass die Jährlichkeit der Niederschläge nicht zwangsläufig mit der Wirksamkeit von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen korreliert. Wichtig in diesem Zusammenhang

ist die Feststellung NIEHOFFS, dass die Jährlichkeit eines Hochwassers nicht in allen Teileinzugsgebieten auftritt und deshalb der Einfluss von Bewirtschaftungsänderungen auf große Einzugsgebiete nicht generell als gering eingestuft werden kann (siehe Kapitel 2.1).

Des Weiteren verweist ZIMMERMAN in seiner Arbeit auf die Untersuchung von [BRONSTERT et al. 1999], die die Wirkung von Muldenversickerung auf der Hangskala untersucht haben. Aussagen zum Verhalten der Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen während eines Hochwassers können allerdings hieraus nicht direkt gezogen werden, da lediglich eine langfristige Wasserbilanz aufgestellt wurde. Demnach gleichen sich die schnellen Abflusskomponenten durch die Bewirtschaftung dem natürlichen Zustand an und unterbieten diesen sogar geringfügig. Eine deutliche Veränderung gegenüber dem natürlichen Zustand ist bei der Verdunstung zu verzeichnen, die zugunsten der Bodenfeuchte und Tiefenversickerung zunimmt. Wichtig zu erwähnen ist, dass der erhöhte Bodenwassergehalt in diesem konkreten Fall nicht zur Aufsättigung des Hangfußes führt.

In Kapitel 2.3.1 sind eine Reihe von Quellen genannt, die den negativen Einfluss der Bebauung und Versiegelung auf den Hochwasserabfluss beschreiben und die Verschiebung zu mehr Horton'schem Oberflächenabfluss als Ursache nennen. Wird diese Tatsache den Berechnungsergebnissen von [BRONSTERT et al. 1999] gegenübergestellt, so kann zumindest indirekt daraus ein positiver Effekt von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen auf den Hochwasserabfluss abgeleitet werden.

In diesem Kapitel wurde insbesondere auf die hydrologischen Auswirkungen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, speziell auf die Wirkung von Mulden-Rigolen-Elementen, eingegangen. Dies könnte den falschen Eindruck hinterlassen, dass die Umsetzung dieser siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen in der Praxis aus dem Wunsch nach einem verbesserten vorbeugenden Hochwasserschutz erwächst. Vielmehr ist der Hochwasserschutz ein positiver Nebeneffekt. Das Eigeninteresse der Siedlungswasserwirtschaft ergibt sich aus der Tatsache, dass die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung wirtschaftlich ist und dazu beitragen kann, Überlastungen im Entwässerungssystem zu entschärfen [BANDERMANN 2001]. In diesem Zusammenhang wurde bereits auf die Maßnahmensteckbriefe in [SIEKER et al. 2007a] verwiesen.

Eine ökonomische Bewertung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen im Vergleich zur konventionellen Ableitung kann ansatzweise anhand der in den Maßnahmensteckbriefen genannten Erstellungs- und Betriebskosten vorgenommen werden. Bei der Gegenüberstellung der Erstellungskosten fällt auf, dass die Erschließung bisher unbebauter Flächen mit konventionellen Regenwasserkanälen relativ kostengünstig ist (7,5 €/ m² angeschlossene Fläche). Dagegen ist für die Sanierung von Regenwasserkanälen in Bestandsgebieten ein Vielfaches der Erstellungskosten anzusetzen (60 €/ m² angeschlossene Fläche). Die Erstellungskosten für dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen variieren je nach Standortbedingungen und Flächenverfügbarkeit zwischen 5 und 35 €/ m² angeschlossener Fläche. Im Mittel muss bei der Erstellung von Mulden-Rigolen-Elementen von 10 €/ m² angeschlossener Flächen ausgegangen werden. Der ökonomische Vorteil dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen ergibt sich im Zuge der Sanierung, da hierbei die gleichen Kosten wie für die Neuerstellung angesetzt werden können.

Der Vergleich der Betriebskosten unterstreicht die ökonomische Nachhaltigkeit der dezentralen Bewirtschaftung. Für die Unterhaltung konventioneller Regenwasserkanäle werden in der Literatur jährliche Kosten von 0,18 €/ m² angeschlossener Fläche genannt. Die Wartungskosten dezentraler Anlagen belaufen sich dagegen auf 0,05 – 0,075 €/ m² angeschlossener Fläche. Diese ökonomische Gegenüberstellung beinhaltet nicht, dass bei der dezentralen Bewirtschaftung bereits eine Retention und Reinigung der Abflüsse inbegriffen ist, die bei der konventionelle Ableitung erhebliche Zusatzkosten verursachen würde.

Für eine vertiefende ökologische und ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen dem Konzept der konventionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen

Regenwasserbewirtschaftung sei auf jüngste Veröffentlichungen verwiesen [SIEKER et al. 2006b], [SIEKER et al. 2006c], [SIEKER et al. 2007b]. Diese Untersuchungen und Ergebnisse werden der Komplexität einer objektiven Kosten-Nutzen-Analyse unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und unter Einbeziehung nicht-monetärer Aspekte gerecht.

7.1.2 Die konservierende Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme

Dieser Abschnitt dient der allgemeinen Beschreibung der konservierenden Bodenbearbeitung und deren Wirkung auf die Abflussbildung. Es soll verdeutlicht werden, warum dieser Maßnahme in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die Parametrisierung der Maßnahme mit dem Ziel einer präzisen Abbildung im Niederschlags-Abfluss-Modell erfolgt in Kapitel 9.4.

Im Gegensatz zur konventionellen Bodenbearbeitung verzichtet die konservierende Bodenbearbeitung auf den Pflugeinsatz (= pfluglose Bodenbearbeitung). Hier kommen nicht wendende Bodenbearbeitungsgeräte zum Einsatz (z. B. Grubber, Scheibeneggen oder zapfwellengetriebene Geräte), die den Boden weitgehend in seinem Aufbau belassen. Gleichzeitig verbleiben Ernterückstände, wie z.B. Stroh (= Mulchauflage), an der Bodenoberfläche oder werden flach eingearbeitet [KTBL 1998].

Mit Hilfe von Abbildung 59 [KTBL 1993] lässt sich die konservierende Bodenbearbeitung (Bodenbearbeitung ohne Pflug) gut von den anderen in Deutschland praktizierten Bodenbearbeitungsverfahren abgrenzen.

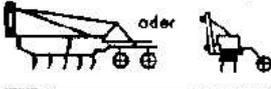
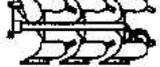
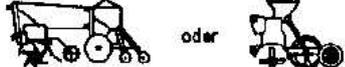
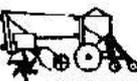
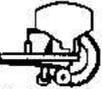
Verfahren	Grundbodenbearbeitung	Saatbettbereitung	Saat	Ablauf der Arbeitsgänge	
Bodenbearbeitung mit Pflug				getrennt	
			Bodenfräse oder Rotoregge	kombiniert Saatbettbereitung u. Saat zusammengefasst	
					alle Arbeitsgänge kombiniert
Bodenbearbeitung ohne Pflug –konservierend–				getrennt	
				kombiniert Saatbettbereitung u. Saat zusammengefasst	
					alle Arbeitsgänge kombiniert
	—				ohne Grundbodenbearbeitung Saatbettbereitung und Saat kombiniert
Direktsaat	—	—		Saat ohne Bodenbearbeitung	

Abbildung 59: Definition der Bodenbearbeitungsverfahren [KTBL 1993]

Die Definition der konservierenden Bodenbearbeitung als „pflugloses“ Verfahren ist wichtig, da der Begriff nicht einheitlich verwendet wird. So ist die konservierende Bodenbewirtschaftung in den USA durch einen Mulchauflageanteil von mindestens 30 % definiert. Die FAO fasst die konservierende Bodenbearbeitung unter dem Begriff konservierende Landwirtschaft zusammen und weitet ihren Ansatz auf alle Bereiche der

Landwirtschaft (z. B. Tierproduktion, Düngemittleinsatz etc.) aus [FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 2002]. Synonyme für die konservierende Bodenbearbeitung sind „reduzierte Bodenbearbeitung“, „Minimalbodenbearbeitung“, „pfluglose Bodenbearbeitung“ oder auch „nicht wendende Bodenbearbeitung“.

Entsprechend den in Kapitel 7.1 genannten Kriterien muss an dieser Stelle betont werden, dass die konservierende Bodenbearbeitung als Nebeneffekt eine hochwassermindernde Wirkung hat. So ist die Einführung der konservierenden Bodenbearbeitung mit Hilfe des Förderprogramms Umweltgerechte Landwirtschaft (UL) in der sächsischen Landwirtschaft nicht als Hochwasserschutzmaßnahme sondern auf seine erosionvermindernde Wirkung zurückzuführen [SCHMIDT 2006]. Hinzu kommt, dass es sich bei dieser Art der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung um eine relativ bekannte Bewirtschaftungsform handelt, die dem Landwirt eine wirtschaftliche Nutzung ermöglicht. Auf den Erfolg dieser Förderung und die momentane Verbreitung der konservierenden Bodenbearbeitung im Freistaat Sachsen wird in Kapitel 8.1 eingegangen.

Nach Angaben der [FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 2002] sind die USA Pionierland der konservierenden Bodenbearbeitung, gefolgt von Brasilien, Argentinien, Australien und Kanada.

[ZIMMERLING & SCHMIDT 2002a] beschreiben den Einfluss der konservierenden Bodenbearbeitung auf die Abflussbildungsprozesse wie folgt:

„Die Veränderungen infiltrationsbeeinflussender Bodeneigenschaften bei Umstellung von konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren haben ihren Ursprung in einer höheren Mulchbedeckung und in einem Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug.

Die höhere Mulchbedeckung führt einerseits direkt zu einem Schutz vor Oberflächenverschlammung, da das auf der Bodenoberfläche liegende Mulchmaterial die Bodenaggregate direkt vor Regentropfenaufschlag schützt. Somit ist von einer unmittelbaren infiltrationsfördernden Wirkung des Mulchmaterials bei konservierender Bodenbearbeitung auszugehen.

Die Mulchauflage hat aber auch eine Anreicherung von organischer Substanz in der obersten Bodenschicht zur Folge. Außerdem wirkt sich die Mulchschicht auch auf eine Steigerung der biologischen Aktivität aus, da das Mulchmaterial eine Nahrungsgrundlage für Bodenlebewesen darstellt und die Mulchauflage das Bodenklima verbessert.

Die Anreicherung der Oberkrume mit organischer Substanz verbessert die Wasserstabilität der Bodenaggregate. Besitzt ein Boden eine Oberfläche mit stabilen Aggregaten, so ist diese Oberfläche deutlich weniger verschlammungsanfällig und ermöglicht so eine höhere Infiltration, da verschlammte Oberflächen die Infiltration erheblich behindern (siehe auch Kapitel 9.4.3) [FOHRER 2005], [BERKENHAGEN 1998].

Im Zusammenhang einer höheren Mulchauflage mit der deutlich herabgesetzten Intensität der Bodenbearbeitung kommt es insbesondere zu einer Förderung von tiefgrabenden Regenwurmartensorten und zu einer größeren Zahl von vertikal ausgerichteten Makroporen. Die im Boden vorhandenen vertikal ausgerichteten Makroporen werden durch die geringere Intensität der Bodenbearbeitung im bisherigen Pflughorizont nicht mehr regelmäßig unterbrochen. Die Folge ist eine erhöhte Anzahl von kontinuierlichen Makroporen bei konservierender Bodenbearbeitung. Diese kontinuierlichen Makroporen können als präferenzielle Fließbahnen dienen, in denen Makroporenfluss auftritt.

Folglich kann davon ausgegangen werden, dass bei konservierender Bodenbearbeitung nicht nur durch eine geringere Oberflächenverschlammungsanfälligkeit die Infiltration sich erhöht sondern auch durch Makroporenfluss [BEISECKER 1994].

Außerdem wirkt sich der Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug auch auf bodenphysikalische Parameter der Ackerkrume aus. Insbesondere nähert sich in der

Unterkrume der konservierenden Bodenbearbeitung die Trockenrohdichte wieder der natürlichen Lagerungsdichte an, so dass mit einer höheren Lagerungsdichte bzw. mit einem geringeren Gesamtporenvolumen der Unterkrume gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung auszugehen ist.

Zusammenfassend kann die Infiltration in einen konservierend bearbeiteten Boden folgendermaßen beschrieben werden. Aufgrund der deutlich geringeren Verschlammungsanfälligkeit der Bodenoberfläche wird die Infiltration weitaus weniger durch eine Verschlammung behindert. Die Infiltration ist folglich stärker durch bodenphysikalische Parameter determiniert als bei konventioneller Bearbeitung. Physikalische Veränderungen der Bodenmatrix können zwar zu einer Herabsetzung der Infiltrationskapazität in der Bodenmatrix führen, ermöglichen aber dann auch Makroporenfluss, in dem an der Grenzschicht ein positives hydraulisches Potenzial auftreten kann und konservierend bearbeitete Böden eine höhere Anzahl kontinuierlicher Makroporen besitzen. Das Wasser kann dann durch Makroporenfluss schnell von der Bodenoberfläche in tiefere Schichten abgeleitet werden, in dem es durch „by-pass“ Fluss die Matrix im Oberboden passiert. [CARTER et al. 1999] berichten, dass sich Wasserflüsse zu einem Anteil von 83-97 % in konservierend bearbeiteten Böden in Makroporen mit einem Durchmesser größer als 0,75 mm ereignen können. Es ist aber davon auszugehen, dass solche Makroporenflüsse nur bei Extremereignissen von Bedeutung sind, wenn es zu einem Überstau an der Bodenoberfläche kommt. [EDWARDS et al. 1990] berichten, dass in zwölf Wachstumsperioden nur bei 4 % der Niederschlagsereignisse ein solcher Makroporenfluss auftrat.“

Zu den hier beschriebenen Prozessen hat [ZIMMERLING 2003] eine umfangreiche und systematischen Literaturrecherche einschließlich statistischer Auswertung angefertigt. Auf die Nennung aller Quellen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Im Einzelnen wurden von ZIMMERLING folgende Parameter bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung gegenübergestellt:

- Trockenrohdichte (Lagerungsdichte des Unterbodens)
- Kohlenstoffgehalt (organische Substanz des Oberbodens)
- Aggregatstabilität (Verschlammungsneigung)
- Regenwurmabundanz (Makroporendichte)
- Makroporosität (Makroporendichte)
- Wasserleitfähigkeit
- Endinfiltrationsrate
- und Gesamtinfiltration.

Während in der Mehrzahl der Arbeiten die geringere Verschlammungsanfälligkeit konservierend bestellter Flächen nachgewiesen werden konnte [ZIMMERLING 2003], weisen Untersuchungen zur Porenstruktur z. T. widersprüchliche Wirkungen nach [ZIMMERLING 2003], [CARTER et al. 2002], [RASMUSSEN 1999], [VAN DEN BYGAART et al. 2000], [NITZSCHE et al. 2001]).

Aus den positiven Effekten der konservierenden Bodenbearbeitung auf das Infiltrationsvermögen der Böden leitet sich die Erosionsschutzwirkung ab. Da die Wassererosion direkt mit dem Auftreten von Oberflächenabfluss gekoppelt ist [FRIELINGHAUS 1998], liegt folglich der Schluss nahe, dass durch die konservierende Bodenbearbeitung ein größerer Anteil des Niederschlagswassers zur Versickerung gebracht werden kann.

Verschiedene Untersuchungen verweisen auf die erosionsmindernde Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung und die damit einhergehende Reduktion des Oberflächenabflusses oder Direktabflusses [SCHMIDT 2001]. Bei Bodenabtragsmessungen

auf sächsischen Ackerflächen wurde die wassererosionsmindernde bzw. –verhindernde Wirkung von konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren herausgearbeitet [SCHMIDT & MICHAEL 1999]. [FRIELINGHAUS et al. 1997; FRIELINGHAUS 1998] stellen die konservierende Bodenbearbeitung als Teil eines Lösungsansatzes zur Vermeidung von Wassererosion vor. [NITZSCHE et al. 2001] präsentieren Messergebnisse mittels Beregnungsversuchen vor und vergleichen hierbei unterschiedliche Bodenbearbeitungsformen zur konservierenden Bodenbearbeitung. [SEMMELE & HORN 1995] weisen auf einen weiteren Synergieeffekt der konservierenden Bodenbearbeitung hin. Nach ihren Standortuntersuchungen haben pfluglos bearbeitete Böden eine gebesserte Tragfähigkeit und eine geringere Verdichtung in der Unterkrume (siehe auch [BEISECKER 1994]).

Die Untersuchungen zum Infiltrations- und Erosionsverhalten der Böden unter konservierender Bodenbearbeitung können jedoch nur als indirekte Hinweise auf eine Hochwasser mindernde Wirkung interpretiert werden, da sie sich auf die Standortskala beziehen oder keine quantitativen Aussagen zu den Abflussprozessen auf der Hangskala oder der Einzugsgebietsskala treffen. Ähnlich wie im Fall der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung sind in der Literatur nur wenige Angaben zu finden, die sich explizit der Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf Hochwasserabflüsse widmen; darauf weisen auch [KOEHLER 2006] sowie [UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997] hin.

[AKKERMANN 2004] hat in seiner Arbeit untersucht, welche Möglichkeiten zur Reduktion der Hochwasserabflüsse die Landbewirtschaftung bietet. Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass durch eine Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung und eine Vermeidung bzw. Verminderung der Bodenverdichtung der Oberflächenabfluss um 10 bis 50 % reduziert werden kann. Grundlagen dieser Aussage sind eine Literaturanalyse, die die Auswertung von [ZIMMERLING 2003] erweitert und um die Aspekte Bodenverdichtung, Fruchtfolgegestaltung und Dränagen ergänzt sowie Berechnungen mit den „Modell Erosion 2D/3D“ [SCHMIDT et al. 1996] (synthetisches Einzugsgebiet $A_{eo} = 2,5 \text{ km}^2$). AKKERMANN leitet aus der Recherche konkrete Handlungsempfehlungen für eine angepasste Landnutzung im Sinne der Hochwasserabflussverminderung ab. Die Frage nach der Bedeutung der Direktabflussreduktion auf der Standortskala für die Scheitelabflussreduktion eines Flussgebietes wird von AKKERMANN diskutiert aber nicht abschließend beantwortet. Er verweist u.a. auf [POTTER 1991], der anhand von Zeitreihenanalysen die Abflüsse eines 572 km² großen Einzugsgebietes in den USA den Abfluss mindernden Einfluss nachweisen konnte. POTTER stellte nach Einführung der konservierenden Bodenbearbeitung einen Rückgang der Sommer- und Herbsthochwasser und einen besonders ausgeprägten Rückgang der Winter- und Frühlingshochwasser fest.

Auch [ZIMMERLING 2003] diskutiert die Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf Hochwasserabflüsse und stellt dabei seine Messergebnisse teilweise bereits zitierten Angaben aus der Literatur gegenüber. ZIMMERLING führt aus, dass bei Starkniederschlagsereignissen im Frühjahr und Sommer eine Hochwasserminderung durch konservierende Bodenbearbeitung erwartet werden kann, dass aber auch bei Hochwassern im Winter mit hohen Anfangsbodenfeuchten der positive Einfluss der konservierenden Bodenbearbeitung im direkten Vergleich zur konventionelle Bodenbearbeitung nicht verloren geht.

[RODE 1995] hat für das Einzugsgebiet der Lumda in Hessen berechnet, dass sich der Direktabfluss um 4 % reduziert, wenn die gesamte Ackerfläche (29 %) auf konservierende Bodenbearbeitung umgestellt würde. Im Vergleich zu den [AKKERMANN 2004] recherchierten Werten der Abflussreduktion scheint dies jedoch eine sehr pessimistische Einschätzung zu sein.

Die DWA-Arbeitsgruppe HW 4.3 „Dezentraler Hochwasserschutz“ erläutert in ihrem Arbeitsbericht [DWA 2006], dass die Teilwelle von landwirtschaftlichen Flächen den gleichen Verlauf hat wie die Abflusswelle des Gesamtgebietes und somit die Reduktion des Abflussvolumens unabhängig von seiner Größenordnung in den meisten Fällen den

Scheitelabfluss verringert. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Wirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen in besonderem Maße von der Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses abhängig ist [DWA 2006] (vgl. Kapitel 6). Diese Aussage trifft jedoch nur dann uneingeschränkt zu, wenn von einer gleich bleibenden Mächtigkeit ausgegangen wird, die im Verlauf eines Hochwasserereignisses vom versickernden Wasser erreicht wird. Die Beschreibungen der konservierenden Bodenbearbeitung im direkten Vergleich mit der konventionellen Bodenbearbeitung zeigen jedoch, dass diese Annahme nicht zutreffen muss.

Ausgehend von dem oben Genannten kann davon ausgegangen werden, dass die konservierende Bodenbearbeitung als eine aktive bzw. vorbeugende Hochwasserschutzmaßnahme anzusehen ist. Neben den genannten Eigenschaften, die für eine genauere Betrachtung der konservierenden Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme sprechen, muss hier ein weiterer Aspekt angeführt werden, der für Maßnahmen in der Landwirtschaft und speziell für die konservierende Bodenbearbeitung spricht. Im Durchschnitt sind in der Bundesrepublik Deutschland ca. 40 % der Fläche ackerbaulich genutzt. Das in den darunter befindlichen Böden vorhandene Speicherpotenzial kann nur durch angepasste ackerbauliche Bewirtschaftungsmaßnahmen erschlossen werden. Das gilt insbesondere für die verschlammungs- und erosionsanfälligen Böden mit mittlerer bis großer Mächtigkeit, deren aktuelles Infiltrationsvermögen weit hinter seinem natürlichen Potenzial zurückbleibt.

Hinzu kommt, dass Ackerbau vorzugsweise auf besonders ertragreichen Standorten mit gutem pflanzenverfügbarem Wasserspeichervermögen stattfindet. Dies erhöht die Bedeutung der ackerbaulich genutzten Standorte umso mehr (siehe Kapitel 6 - Abbildung 57). Wie groß die konkreten Umsetzungspotenziale für konservierende Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme im Einzugsgebiet der Mulde sind wird in Kapitel 7.2 quantifiziert.

Für die modelltechnische Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung wurde insbesondere auf die Messergebnisse von [ZIMMERLING & SCHMIDT 2002b] bzw. [ZIMMERLING 2003] zurückgegriffen. Hierfür sprach die Tatsache, dass ZIMMERLING seine Beregungsversuche größtenteils auf Standorten im Einzugsgebiet der Mulde oder benachbarten Einzugsgebieten mit vergleichbaren standortkundlichen und naturräumlichen Bedingungen durchgeführt hat. Des Weiteren sind die Randbedingungen dieser Messungen von ZIMMERLING detailliert dokumentiert und die Ergebnisse nachvollziehbar statistisch ausgewertet.

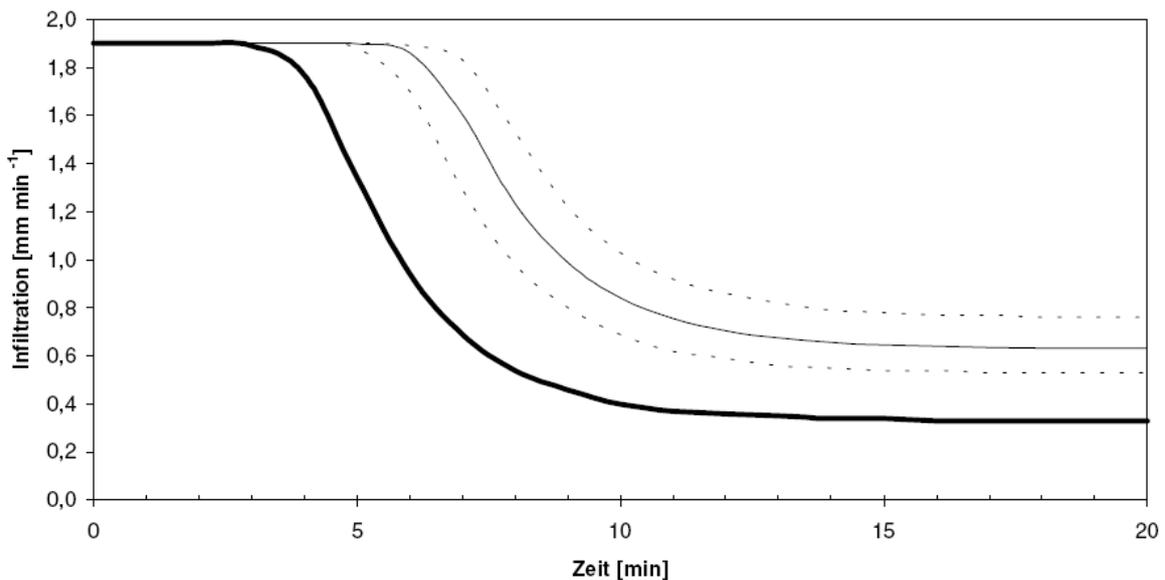


Abbildung 60 Infiltrationsverlauf nach Umstellung der konventionellen Bodenbearbeitung (fette Linie) auf mehrjährig konservierende Verfahren auf Basis der Mediandifferenzen (dünne Linie) sowie der unteren und oberen Grenze des Konfidenzintervalls (gestrichelte Linien) für Böden im sächsischen Lößgebiet [ZIMMERLING 2003].

Abbildung 60 fasst die von ZIMMERLING gemessene Veränderung der Wasserinfiltration bei konservierender Bodenbearbeitung im Vergleich zur Bodenbearbeitung mit dem Pflug zusammen. Bei dauerhafter mehrjähriger konservierender Bodenbearbeitung liegt die Gesamtinfiltration (als Fläche zwischen den Kurven) im Median 6,2 mm höher. Das entspricht einer Beregnungshöhe von 38 mm und einem Zuwachs der Gesamtinfiltration von ca. 15 %. ZIMMERLING stellte signifikante Differenzen in der zeitlichen Verzögerung des Oberflächenabflussbeginns (im Median 2 min) und bei den Endinfiltrationsraten (im Median 0,36 mm/min) fest. Während das spätere Einsetzen des Oberflächenabflusses bzw. das spätere Einsetzen der Infiltrationsabnahme von besonderer Bedeutung für Starkniederschläge ist, hat die höhere Endinfiltration positive Konsequenzen für lang anhaltende Niederschläge. Die große Streuung seiner Messergebnisse begründet ZIMMERLING mit der Breite der unterschiedlichen Bearbeitungsformen und sowie der Dauer der kontinuierlichen Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung. ZIMMERLING betont deshalb, dass für eine nachhaltige Verbesserung des Infiltrationsverhaltens eine dauerhafte Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung erfolgen muss. Diese Forderung wurde auch in das EPLR-Förderprogramm (Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum (EPLR), Programm zur Umsetzung der Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) in Sachsen und Nachfolger des UL-Förderprogramms [SMUL 2007c; SMUL 2007d]) übernommen, da davon ausgegangen wird, dass nur auf diese Weise die erwünschte erosionsmindernde Wirkung sichergestellt werden kann.

Des Weiteren fällt bei genauerer Auswertung der Beregnungsversuche auf, dass ZIMMERLING insbesondere Versuchsfelder mit Zuckerrüben als Vorfrucht ausgewählt hat. Im Verhältnis zu Vorfrüchten wie Raps stellt die Vorfrucht Zuckerrübe eine sehr ungünstige Randbedingung dar, da in der Periode der Folgefrucht eine vergleichsweise geringe Mulchauflage und schlechte Durchwurzelung zurückbleibt. Laut Sächsischem Agrarbericht liegt der Zuckerrüben-Anteil bei 5%, dagegen umfassen die mit Raps bestellten Flächen einen Anteil von 20-25%. Es muss festgehalten werden, dass die von ZIMMERLING ermittelte mittlere infiltrationsfördernde Wirkung auf vielen Ackerflächen im Einzugsgebiet der Mulde je nach Fruchtfolge eine vorsichtige Einschätzung darstellt.

Neben Beregnungsversuchen führte ZIMMERLING Tracerversuche durch, um die Makroporosität bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung zu untersuchen. Die Messergebnisse lassen vermuten, dass an der Grenzschicht zwischen Oberkrume und Unterkrume, die sich bei konservierender Bodenbearbeitung bereits in 10 cm Tiefe befindet, durch die plötzliche Zunahme der Lagerungsdichte und Abnahme der Wasserleitfähigkeit Makroporenfluss einsetzt. Der Makroporenfluss bei konservierender Bodenbearbeitung ist so nicht an das Auftreten von Oberflächenabflusswasser gebunden. Es ist davon auszugehen, dass das in die Oberkrume infiltrierte Wasser bei zunehmender Aufsättigung im Grenzbereich zur Unterkrume von der Matrix in Makroporen übertritt und vertikal in tiefere Bodenschichten verlagert wird.

Als weitere Grundlage für die Modellkalibrierung dienen neben den oben genannten Vorarbeiten die von [ZACHARIAS 2004] im Rahmen des DBU-Projektes-Mulde durchgeführten Untersuchungen (Beregnungsversuche auf ausgewählten Standorten im Untersuchungsgebiet). In Abbildung 61 und Abbildung 62 sind beispielhaft Ergebnisse dieser Feldmessungen dargestellt. Abbildung 61 verdeutlicht anhand eines Standortes den signifikanten Unterschied des Wasserretentionsverhaltens von konservierend bearbeiteten Böden gegenüber gepflügten Ackerflächen. Während die gepflügten Flächen in oberflächennahen Bodenschichten aufgrund der wendenden Bodenbearbeitung ein höheres Gesamtporenvolumen aufweisen, sind konservierend bearbeitete Flächen in der Lage, größere Wassergehalte dauerhaft zu speichern. Aufgrund eines größeren Anteils an Mittelporen bleiben die Wassergehalte auf konservierend bearbeiteten Böden bei steigenden Saugspannungen auf einem etwas höheren Niveau. Dies macht sich auch bei der Langzeitbeobachtung zweier benachbarter aber unterschiedlich bewirtschafteter Ackerböden bemerkbar. In Abbildung 62 ist zu sehen, dass der Bodenwassergehalt auf konservierend bearbeiteten Flächen durchgehend höher liegt als bei gepflügten Flächen. Neben Unterschieden im Wasserretentionsverhalten spielen vor allem auch Differenzen in den ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten und eine verdunstungshemmende Wirkung der Mulchauflage konservierend bearbeiteter Standorte eine besondere Rolle.

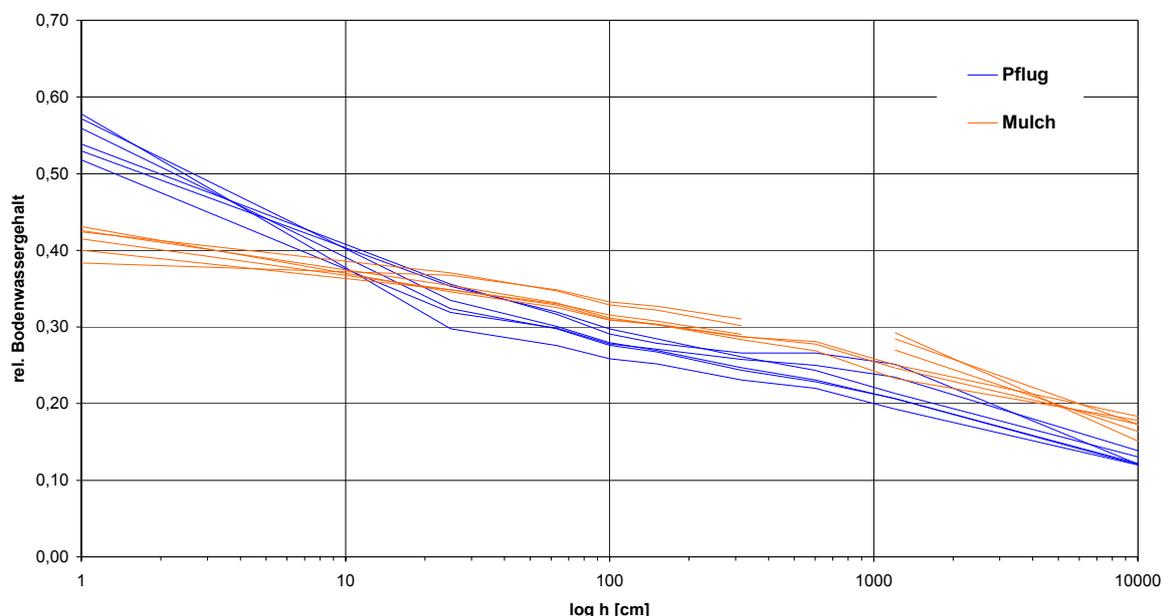


Abbildung 61: Gemessene Wasserretentionskurven konventionell und konservierend bearbeiteter Böden (Bodenart Ut4, Bodentiefe 20 cm - Messungen von ZACHARIAS [SIEKER et al. 2007a])

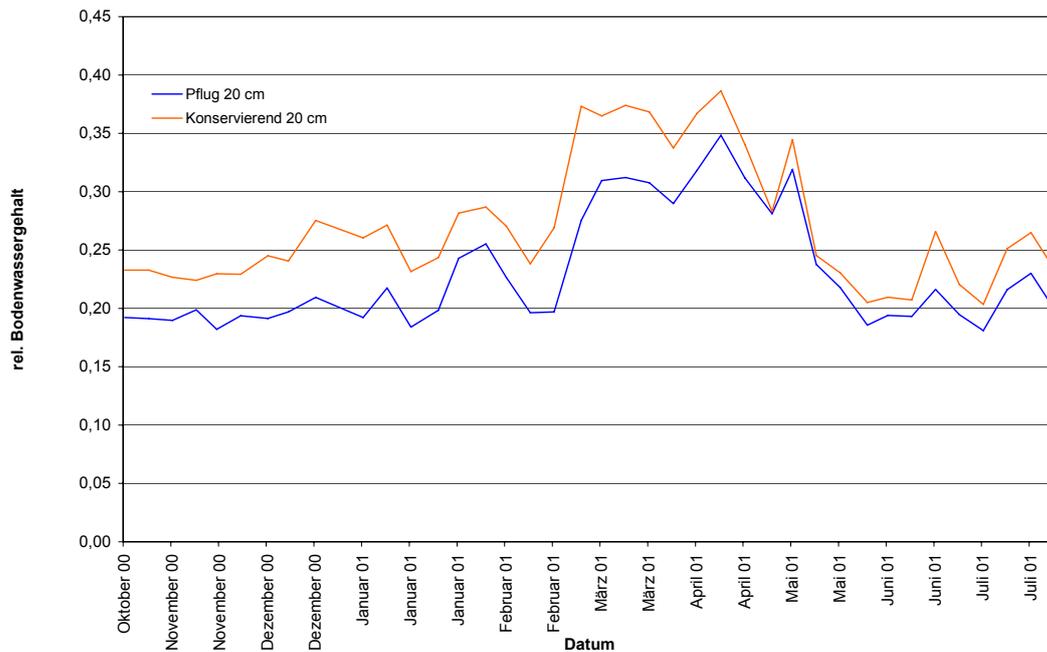


Abbildung 62: Gemessene Bodenwassergehaltsganglinien konventionell und konservierend bearbeiteter Böden im Lößhügelland (Bodenart Ut4, Bodentiefe 20 cm - Messungen von ZACHARIAS [SIEKER et al. 2007a])

7.1.3 Weitere Maßnahmen, Maßnahmenkombinationen

7.1.3.1 Alternativmaßnahmen in Siedlungsgebieten

Bereits im Kapitel 7.1.1 wurde der Maßnahmenkatalog für die Siedlungsflächen vorgestellt und erläutert, warum die Mulden-Rigolen-Elemente bei dieser Untersuchung im Mittelpunkt stehen.

Die Maßnahme „Ableitung ins Gewässer“ wurde in den Maßnahmenkatalog aufgenommen, obwohl sie keine Retentionswirkung und damit keinen positiven Effekt für den Hochwasserschutz hat. Die Betrachtung dieser Maßnahmen erfolgte mit Blick auf die Erstellung realistischer Umsetzungsszenarien (siehe Kapitel 8). Da diese Maßnahme für Grundstücke in unmittelbarer Nachbarschaft zu Gewässern die mit Abstand kostengünstigste Maßnahme darstellt, wäre es realitätsfremd gewesen, sie unberücksichtigt zu lassen.

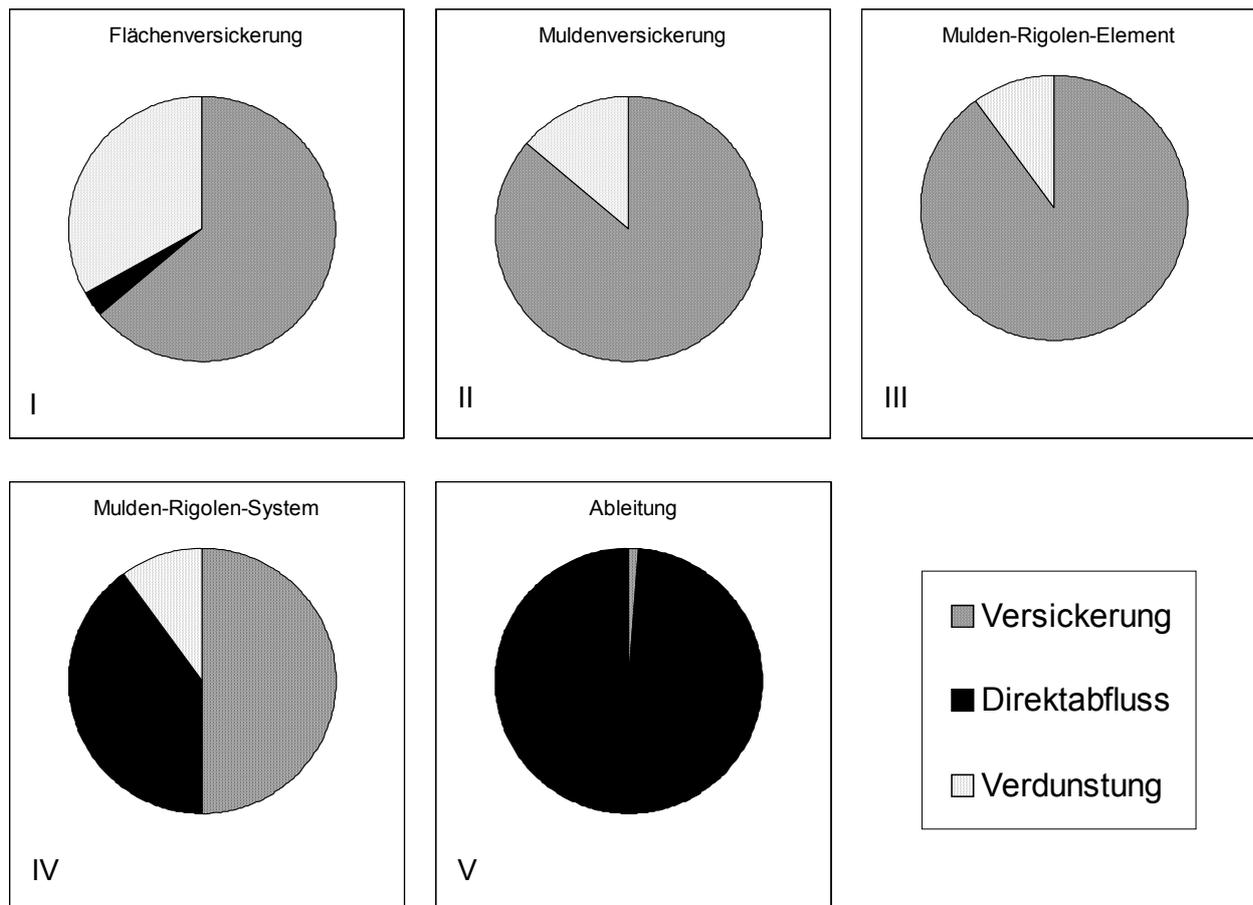


Abbildung 63: Beispielhafte Jahreswasserbilanzen für verschiedene Regenwasserbewirtschaftungssysteme (100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b]

In Abbildung 63 sind die beispielhaften Jahreswasserbilanzen aus den Maßnahmensteckbriefen graphisch dargestellt [SIEKER 2001b]. Die Jahreswasserbilanz ist aus naturschutzfachlicher und klimatischer Sicht sowie als Planungskriterium von großer Bedeutung [SIEKER et al. 2006c] und verdeutlicht den grundsätzlichen Unterschied zur konventionellen Regenwasserableitung. Für Aussagen zur Wirkung der Maßnahmen während Hochwasser erzeugender Niederschläge sind Jahresbilanzen nur begrenzt geeignet. Aus diesem Grund sind in Abbildung 64 und Abbildung 65 die Wasserbilanzen für einen Starkregen bzw. einen Hochwasser erzeugenden Regen dargestellt, wie sie [SIEKER 2001b] für verschiedene Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung bestimmt hat.

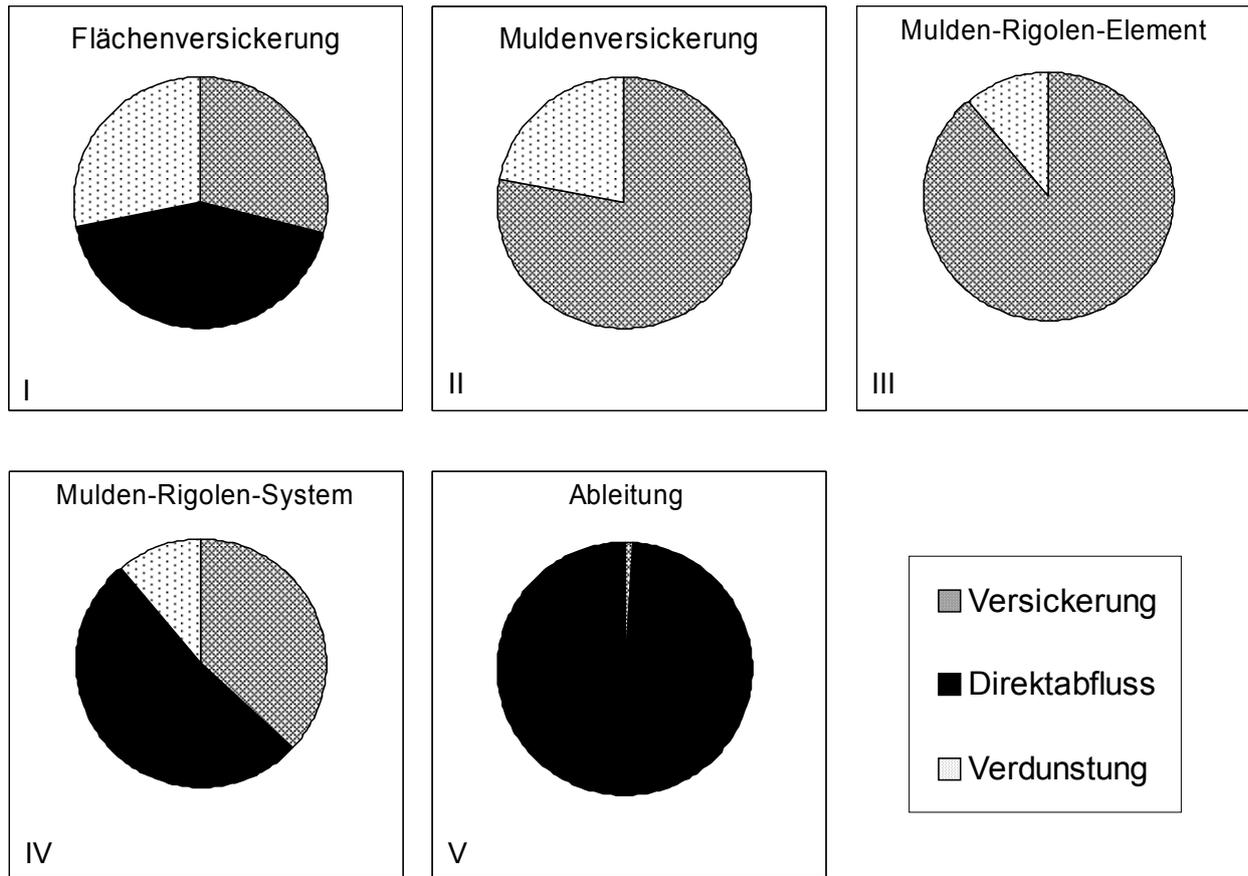


Abbildung 64: Beispielhafte Wasserbilanz verschiedener Regenwasserbewirtschaftungssysteme bei einem Starkregenereignis (Wiederkehrzeit 2 Jahre - 100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b]

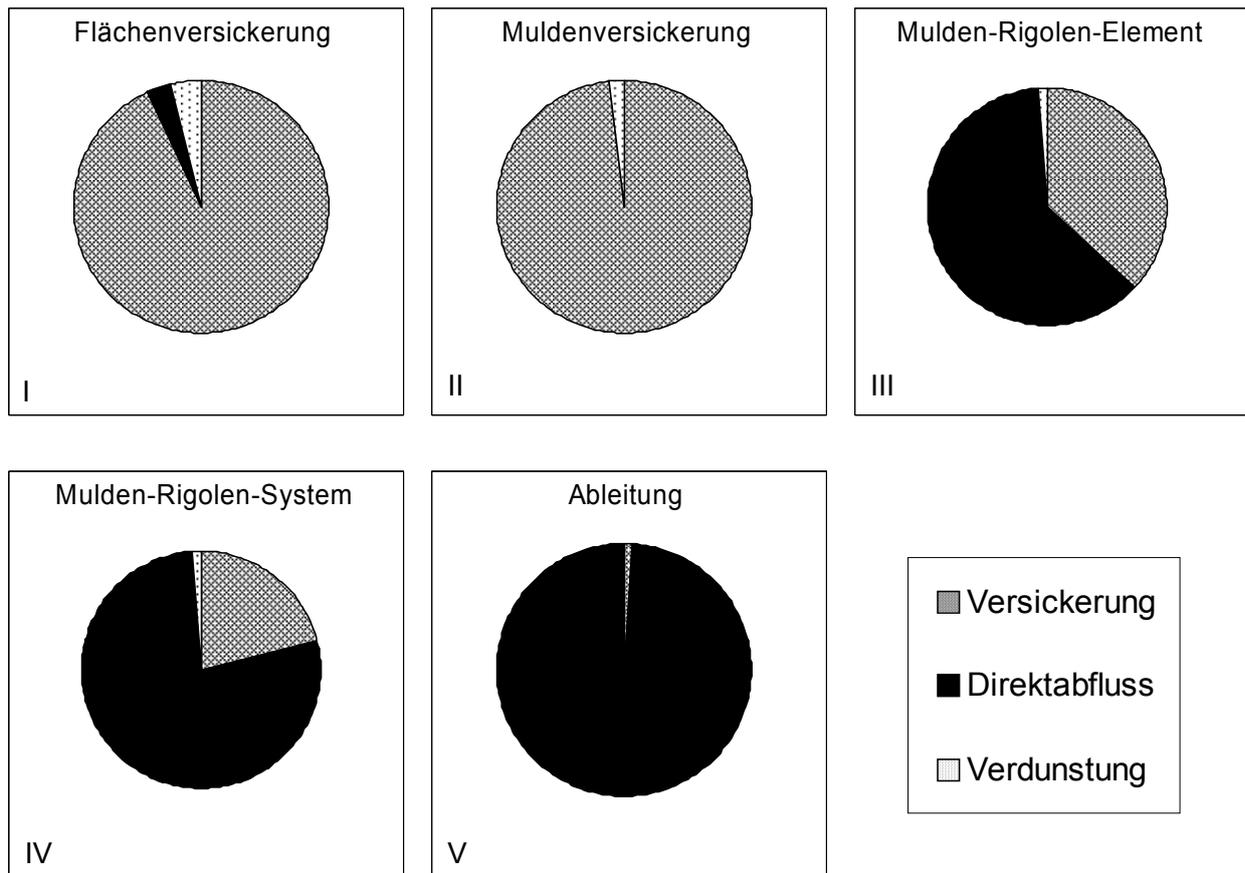


Abbildung 65: Beispielhafte Wasserbilanz verschiedener Regenwasserbewirtschaftungssysteme bei einem Hochwasser erzeugenden Regen (100% entspricht dem Zulauf zum System – effektiver Niederschlag) nach [SIEKER 2001b]

Die Bilanzen bilden in der Summe den effektiven Niederschlag, d.h., es handelt sich um die Abflüsse von den versiegelten und unversiegelten Flächen, in denen die Benetzungs- und Verdunstungsverluste nicht mehr enthalten sind. So ist zu erklären, warum die Maßnahme „Ableitung“ keine Verdunstung in der Bilanz ausweist.

Die „konventionelle Ableitung“ oder die „Ableitung ins Gewässer“ ändert ihr Abflussverhalten während eines Hochwassers im Vergleich zur Jahreswasserbilanz nicht. Systembedingt fließen aus diesen Entwässerungsanlagen nahezu 100 % des effektiven Niederschlages ab und tragen zum Hochwasser bei (Bilanz V in Abbildung 63).

Dagegen können Mulden-Rigolen-Elemente mehr als ein Drittel des Hochwasserzuflusses speichern und versickern. Die Bilanz der Mulden-Rigolen-Systeme fällt ungünstiger aus, da die gedrosselte Abteilung kontinuierlich Wasser an das angeschlossene Dränagesystem abgibt. Die Muldenversickerung, die unter den verschiedenen Niederschlagsarten am meisten Wasser zurückhalten kann, hat i. d. R. wie auch im Einzugsgebiet der Mulde kein signifikantes Umsetzungspotenzial, da deren Umsetzung sehr gute Infiltrationskapazitäten voraussetzt (siehe Kapitel 8.2)

7.1.3.2 Alternativmaßnahmen in außerörtlichen Gebieten

Angesichts der besonderen Flächenwirksamkeit trägt die Landwirtschaft mit 70 bis 90 % wesentlich zur Entstehung von Oberflächenabfluss in der Landschaft bei [AUERSWALD 2002], [BEESE & TEEPE 2002]. Weitere negative Umweltwirkungen der intensiven Landwirtschaft lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfunktionen (z. B. Erosion, Verdichtung, Verlust an Bodenfruchtbarkeit, erhöhter Oberflächenabfluss);
- Belastung der Ökosysteme, insbesondere von Grund- und Oberflächengewässern (Kontaminierung durch Sedimente, Pestizide, Nitrat- und Phosphateinträge);
- Erzeugung klimarelevanter Gase (Methan, Lachgas, Ammoniak);
- Reduzierung der Biodiversität der Agrarökosysteme (z. B. Rückgang von typischen Pflanzen und Tierarten der Feldflur, Ausräumung der Landschaft).

Ausgehend von diesen grundlegenden Umweltproblemen in Agrarlandschaften wurden Maßnahmen zusammengestellt, die sowohl aus der Sicht des vorbeugenden Hochwasserschutzes, als auch vor dem Hintergrund anderer Naturschutzziele Vorteile bieten (z. B. Erosionsschutz, Gewässerschutz, Arten- und Biotopschutz). Diese Maßnahmen stellen eine Auswahl aus dem Spektrum der Möglichkeiten dar, welche als besonders effektiv eingestuft werden. Sie bilden den Katalog, der neben der konservierenden Bodenbearbeitung betrachteten Maßnahmen die Grundlage für die Erstellung der Maßnahmenkarten ist.

Der Maßnahmenkatalog umfasst insgesamt 15 Maßnahmen, die den Obergruppen „Bodenbearbeitung und Bestellverfahren (A)“, „Nutzungsänderung (B)“ und „Flurgestaltung (C)“ zugeordnet werden können (siehe Tabelle 8). Sämtliche Maßnahmen sind in der Praxis situations- und standortbezogen zu ergreifen. Hierbei sollte stets das gesamte Spektrum der möglichen Maßnahmen zum Einsatz gebracht werden, um das Wasserrückhaltepotenzial und soweit möglich weitere Naturraumpotenziale zu erschließen.

Tabelle 8: Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Bestellverfahren

A	Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Bestellverfahren
A1	Konservierende Bodenbearbeitung
A2	Direktsaatverfahren
A3	Konturnutzung
B	Maßnahmen der Nutzungsänderung
B1	Aufforstung
B2	Umwandlung von Acker- in Grünland
B3	Flächenstilllegung
C	Maßnahmen der Flurgestaltung
C1	Schlagverkleinerung
C2	Schlaguntergliederung durch Grünstreifen
C3	Schlaguntergliederung durch Gras-/Krautstreifen
C4	Anlage von Gras-/Krautsäumen
C5	Anlage von Gewässerrandstreifen
C6	Schlaguntergliederung durch Hecken
C7	Anlage von Feldgehölzen
C8	Begrünung von Abflussbahnen
C9	Anlage von Abflussmulden

Im Rahmen des DBU-Projektes-Mulde [SIEKER et al. 2007a] wurden auch für die Maßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Maßnahmensteckbriefe zur systematischen Charakterisierung angefertigt, um eine gezielte Ausnutzung der sich

bietenden Synergieeffekte zwischen Hochwasserschutz und Naturschutz zu ermöglichen [RÜTER 2007a].

Die Steckbriefe stellen eine zusammenfassende Maßnahmenbewertung durch die im DBU-Projekt-Mulde vertretenen Fachdisziplinen dar. Hiermit kann ein übersichtlicher Informationspool zu hydrologischen, naturschutzfachlichen, landwirtschaftlichen und ökonomischen Aspekten sowie Pflege- und Entwicklungszielen bereitgestellt werden. Im Vordergrund stehen jeweils die Auswirkungen auf den Hochwasserschutz sowie die Biotopqualität und soweit relevant, den Schutz der abiotischen Schutzgüter Klima, Wasser und Boden sowie des Landschaftsbildes. Zusätzlich enthalten die Maßnahmensteckbriefe Informationen über betriebswirtschaftliche Aspekte, Fördermöglichkeiten sowie Kriterien, die zum Ausschluss einer Maßnahmenumsetzung führen können. Die Steckbriefe können dabei nur einen Grundstock der wichtigsten Informationen vermitteln und ersetzen keinesfalls detaillierte Planungen vor Ort. Für weitergehende Hinweise zur Pflege- und Entwicklung wird auf weiterführende Literatur verwiesen.

Der Maßnahmenkatalog für die Landwirtschaft umfasst grundsätzlich nur Maßnahmen, die einen positiven Einfluss auf das Hochwassergeschehen haben. Des Weiteren haben sie gemein, dass sie mehr oder weniger weit vom Gewässersystem umgesetzt werden.

Um die hydrologische Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft prognostizieren zu können, ist eine Kenntnis der genauen bodenphysikalischen Wirkungen zwingend erforderlich. Im Wesentlichen sind drei Wirkungskomplexe zu unterscheiden

- Geomorphologische Wirkungen (Oberflächenrauigkeit, Muldenspeicherung),
- Wirkungen der Porenstruktur (Porengrößenverteilung, Porenkontinuität) und
- Wirkungen der Aggregatstruktur (Oberflächenverschlämmung).

Die positiven Auswirkungen auf den Hochwasserschutz resultieren aus der Beeinflussung der Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse vor dem Zufluss ins Gewässer. Die Wirkung der hier diskutierten Maßnahmen kann in drei Klassen eingeteilt werden:

Die erste Klasse von Maßnahmen erzielt ihre positive hydrologische Wirkung durch die Förderung der Infiltration. Hierzu zählen die bereits vorgestellte konservierende Bodenbearbeitung, die Direktsaatverfahren, die Maßnahmen der Nutzungsänderung (Gruppe B in Tabelle 8) oder die Anlage von Feldgehölzen. Im Idealfall kommt es bei Anwendung dieser Maßnahmen zu keiner Überschreitung des Infiltrationsvermögens und damit auch nicht zur Bildung von Oberflächenabfluss. Zumindest führen die Maßnahmen dazu, dass das Einsetzen des Oberflächenabflusses später eintritt.

Die potentielle Infiltration eines Bodens ist maßgeblich durch seine Bodenart (Korngrößenverteilung) bestimmt. Ausgehend von dieser natürlichen Randbedingung gibt es jedoch Prozesse, die die Infiltrationsfähigkeit der Böden verbessern oder auch drastisch verschlechtern können. Die Verschlämmung der Böden, die Verdichtung der Oberkrume, die Ausbildung von Verdichtungshorizonten (Pflugsohlenverdichtung) oder ein fehlendes Porensystem fördern die Bildung von Oberflächenabfluss, der aufgrund seiner geringen Retention maßgeblich für die Entstehung von Hochwasserabflüssen verantwortlich ist.

Die genannten Maßnahmen wirken diesen infiltrationshemmenden Einflüssen entgegen. Zusätzlich fördern sie den schnellen Transport des Wassers in tiefere Bodenschichten. Dies geschieht durch die Ausbildung vertikaler Fließwege im Boden (Makroporen). Die Makroporeninfiltration setzt ein, wenn die Niederschlagsintensität die aktuelle Infiltrationskapazität überschreitet.

Die zweite Klasse von Maßnahmen zielt darauf ab, den so genannten Muldenspeicher an der Oberfläche zu vergrößern und damit ein temporäres Überschreiten der Niederschlagsintensität über die Infiltrationsrate ganz oder teilweise zu kompensieren. Bei der Konturnutzung wird im Rahmen der Bodenbearbeitung ein Mikrorelief (viele kleine Mulden) geschaffen, in denen bei exakt höhenlinienparalleler Ausbildung eine solche Zwischenspeicherung gelingen kann.

Die dritte Klasse von Maßnahmen trägt positiv zum Hochwasserschutz bei, indem sie bereits entstandenen Oberflächenabfluss auffängt oder zumindest verzögert. Bei einigen Maßnahmen bietet diese Retention zusätzlich die Möglichkeit, dass es (räumlich versetzt) doch noch zur Infiltration des Niederschlages kommt und der direkte Abfluss ins Gewässer vermieden werden kann. Zu dieser Klasse gehören mit Ausnahmen der Anlage von Feldgehölzen alle Maßnahmen der Flurgestaltung (Gruppe C in Tabelle 8).

Von besonderer Bedeutung in dieser Gruppe sind aus hydrologischer Sicht die Maßnahmen, die in der Lage sind, den erfassten Oberflächenabfluss ganz oder teilweise zwischenspeichern. Die Zwischenspeicherung in oberirdischen Mulden erhöht die Verweilzeit des Wassers und damit das Infiltrationsvolumen. Hierzu gehören die Anlage von Abflussmulden und die Schlaguntergliederung durch Hecken.

Insbesondere bei der Anlage von Gewässerrandstreifen muss einschränkend festgehalten werden, dass die Infiltration von Oberflächenabfluss keine Retentionswirkung darstellt, da von einem direkten hydraulischen Kontakt zum Gewässer auszugehen ist.

Generell muss betont werden, dass der hier und in den Maßnahmensteckbriefen genannte positive Einfluss auf Hochwasserereignisse aufgrund erhöhter Infiltration nur dann zutrifft, wenn die Maßnahmen auf geeigneten Standorten mit ausreichend Wasserrückhaltepotenzial (Senkenpotenzial) umgesetzt werden (siehe Kapitel 6). Auf Standorten, die zu schnellen unterirdischen Fließvorgängen in Richtung Gewässer tendieren, sind nur die Maßnahmen mit oberirdischer Speicherung hochwasserwirksam. Alle anderen Maßnahmen mögen aus naturschutzfachlichen oder landwirtschaftlichen Aspekten sinnvoll und notwendig sein. In diesen Fällen kann der vorbeugende Hochwasserschutz als Umsetzungsargument jedoch nicht dienen.

Weiteren Informationen zu den hier genannten Maßnahmen können zum Beispiel den Maßnahmensteckbriefen [RÜTER 2007a], [DWA 2006] oder [HACH & HÖLTL 1989] entnommen werden.

7.2 Erstellung von Maßnahmenkarten

Möchte man die Auswirkung einer flächenhaften dezentralen Bewirtschaftung auf die Hochwassereinflüsse eines Einzugsgebietes bestimmen, muss zunächst geklärt werden, in welchen Bereichen des Einzugsgebietes die verschiedenen Maßnahmen umsetzbar sind. Es stellt sich nun nach Bestimmung des Wasserrückhaltepotenzials die Frage nach dem Umsetzungspotenzial.

Diese Frage soll im Folgenden mit Hilfe so genannter Maßnahmenkarten beantwortet werden. Beispielhaft für das Einzugsgebiet der Mulde wird damit aufgezeigt, wo aus der Sicht des Hochwasserschutzes eine bestimmte Änderung der Landnutzung oder Landbewirtschaftung besonders effektiv ist. Sie bilden damit die Grundlage zur Erstellung von Umsetzungsszenarien und sind ein wichtiger Baustein der methodischen Vorgehensweise (siehe Abbildung 2).

7.2.1 Lösungsansatz

Der hier verwendete Lösungsansatz ist in seiner Struktur mit dem bereits vorgestellten WBS-FLAB vergleichbar (siehe Kapitel 6). Auch in diesem Kapitel wird ein wissensbasiertes Expertensystem aufgestellt und mit einer GIS-Datenbank mit dem Ziel der räumlichen Übertragung verknüpft (siehe Abbildung 69).

Der in Kapitel 7.1 vorgestellte Maßnahmenkatalog mit den dazugehörigen Steckbriefen repräsentiert eine fachübergreifende Wissensdatenbank, die die wichtigsten Maßnahmen für den Wasserrückhalt in der Fläche im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft und der Landwirtschaft beschreibt. Für die einzugsgebietsweite Nutzung dieses Fachwissens bedarf es eines Bindegliedes, das in der Lage ist, möglichst viele Informationen der Wissensdatenbank auf die Standorte des Untersuchungsgebietes zu übertragen.

Als Übertragungswerkzeug vom Standort zur regionalen Ebene wurde das von [JIN 2005] im Rahmen einer Dissertation entwickelte computergestützte GIS-basiertes Expertensystem „FLEXT“ genutzt. Dieses Werkzeug kann komplexe Entscheidungsprozesse, die sich aus den Maßnahmenbeschreibungen ableiten lassen, aufnehmen und diese mit den Flächeninformationen des Einzugsgebietes verknüpfen.

Das Ergebnis dieser GIS-basierten Expertensystemanwendung sind die so genannten Maßnahmenkarten. Diese Karten stellen dar, welche Standorte für die betrachteten Maßnahmen geeignet sind. Diese Eignung konzentriert sich auf den Aspekt des vorbeugenden Hochwasserschutzes, ohne dabei die Kriterien aus landwirtschaftlicher, naturschutzfachlicher, siedlungswasserwirtschaftlicher und/oder ökonomischer Sicht aus den Augen zu verlieren.

In Abbildung 66 ist die grundsätzliche Herangehensweise zur Erstellung der Maßnahmenkarten in vier Schritten dargestellt, wie sie [BANDERMANN 2002; 2006a] für Siedlungsgebiete vorschlägt:

Schritt 1: Aufbereitung der Eingangsdaten

Schritt 2: Klassifizierung/ Interpretation der Eingangsdaten

Schritt 3: Entscheidungsprozess mit FLEXT

Schritt 4: Ausgabe der Ergebnisse und Hinweise aus dem Entscheidungsprozess

Grundsätzlich muss zwischen der Maßnahmenkarte für den Siedlungsbereich und den Maßnahmenkarten für die landwirtschaftlich genutzten Flächen unterschieden werden, die das Ergebnis zweier separater Expertensystemoperationen sind. Theoretisch wäre es denkbar, den Entscheidungsprozess unabhängig von der bestehenden Nutzung durchzuführen. Da die Auswahl der Maßnahmen für urbane und landwirtschaftliche Flächen jedoch keine Überschneidung aufweist und die notwendigen Flächendaten sich teilweise deutlich unterscheiden, wurde auf diesen Aufwand verzichtet.

Die in Abbildung 66 dargestellten Bearbeitungsschritte gehen davon aus, dass eine Wissensdatenbank in FLEXT bereits existiert und auf ein konkretes Untersuchungsgebiet angewendet werden soll. Für den Bereich der Siedlungsgebiete ist dies zutreffend (siehe [BANDERMANN 2002; JIN 2005]), für die landwirtschaftlichen Flächen musste eine Wissensdatenbank zunächst erstellt werden. Im Folgenden wird auf die Erstellung eingegangen.

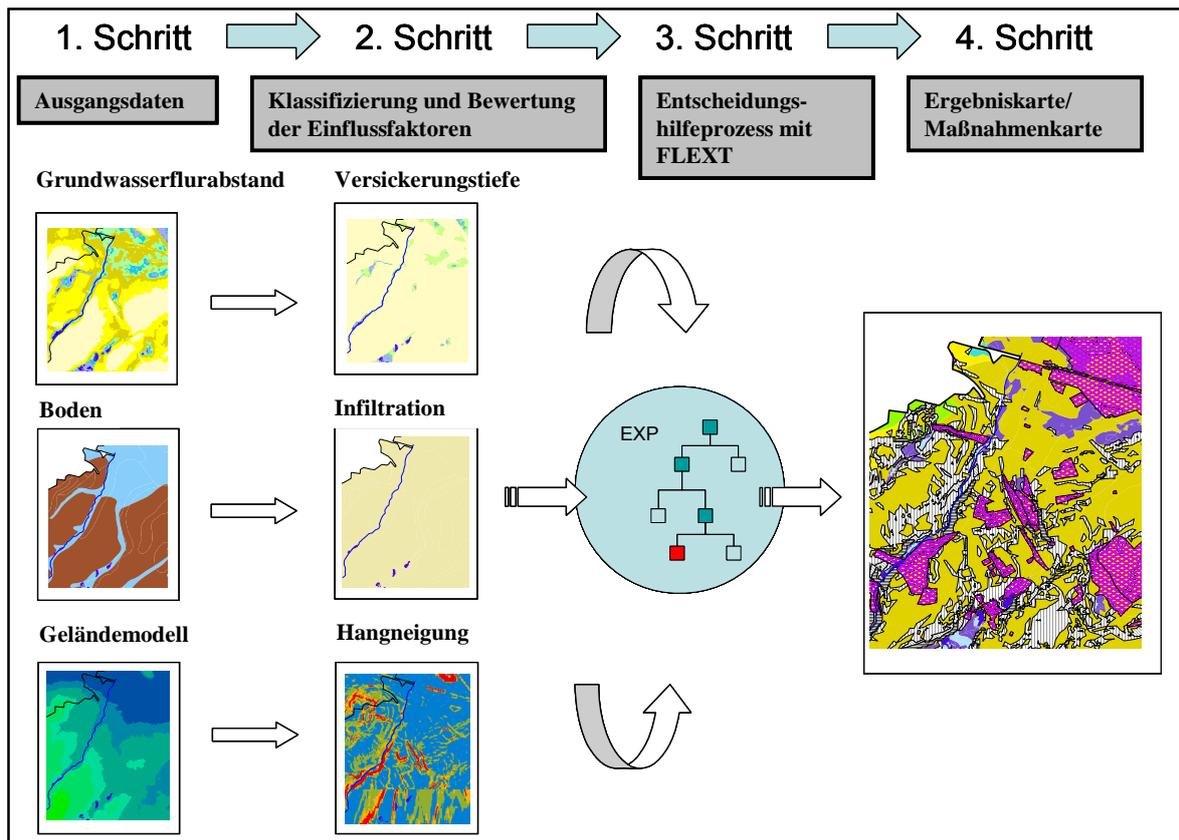


Abbildung 66: Lösungsansatz zur Erstellung der Maßnahmenkarten - [BANDERMANN 2006a]

7.2.2 Das Entscheidungshilfesystem FLEXT

Der automatisierte Entscheidungsfindungsprozess mit dem Expertensystem FLEXT [JIN 2005] gliedert sich in drei Anwendungsschritte.

In der ersten Anwendungsphase muss das Fachwissen in Form von Regeln abstrahiert werden und in das Modell FLEXT eingegeben werden. FLEXT bietet hierzu eine grafische Oberfläche an. In Abbildung 67 ist die Eingabemaske zur Definition von Entscheidungsregeln dargestellt. Die Regeln lassen sich in Form von „Entscheidungsbäumen“ [BANDERMANN 2001], als Matrizen oder im Falle komplexer Regelwerke als Kombinationen dieser Strukturen darstellen (Schritt IIb zu IIa in Abbildung 69).

Wichtig ist zu erwähnen, dass bei der Aufstellung der Entscheidungsregeln auch der Fall von Datenlücken oder gänzlich fehlender Informationen in der Datenbank berücksichtigt werden kann. In diesen Fällen gibt FLEXT Hinweise oder so genannte „weiche Kriterien“ aus, die eine Maßnahme nicht ausschließen, jedoch den Nutzer auf gewisse Unwägbarkeiten für die betroffenen Standorte aufmerksam machen (siehe Kapitel 7.2.4).

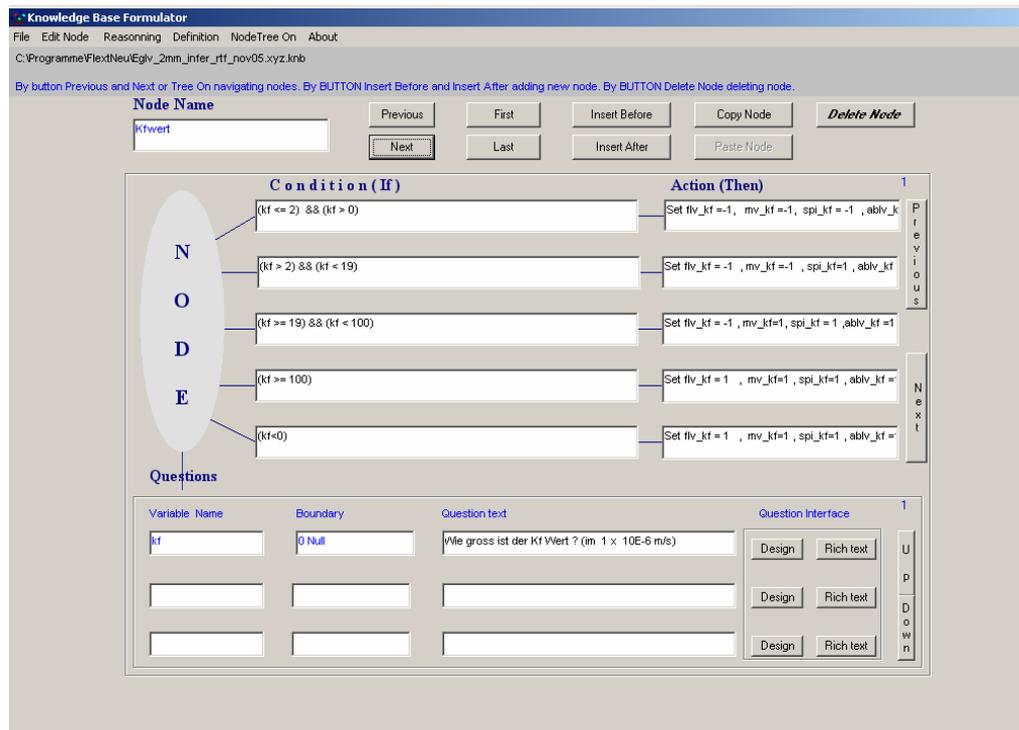


Abbildung 67: Eingabemaske zur Definition von Entscheidungsregeln

Die Prüfung der Regelstruktur im System erfolgt durch die Eingabe von ausgewählten Beispielstandorten, wobei die Entscheidungsfindung durch FLEXT grafisch dargestellt wird (Abbildung 68) und dann mit dem Soll-Ergebnis verglichen werden kann.

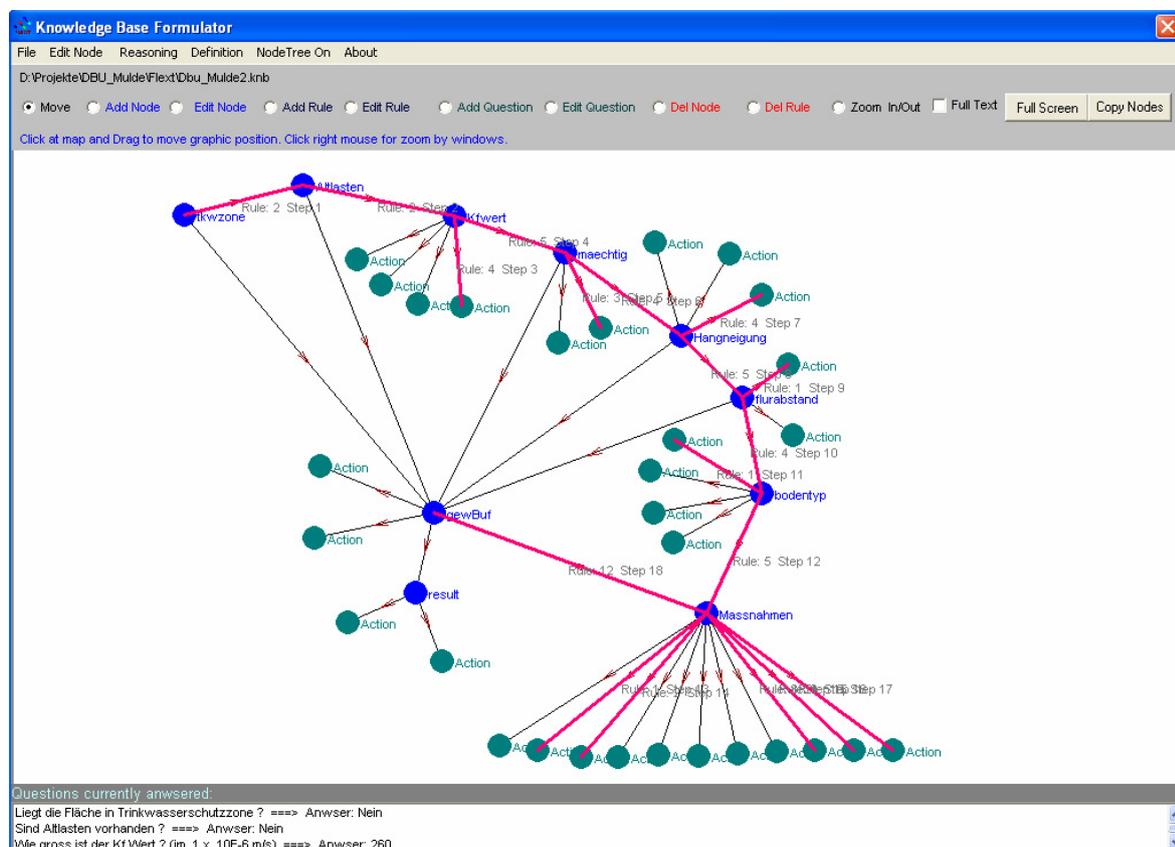


Abbildung 68: Prüfung des Entscheidungsprozesses an Beispielstandorten

In der zweiten Anwendungsphase wird in FLEXT die Verknüpfung zu einer Datenbank aufgebaut, in der möglichst viele für den Entscheidungsprozess notwendige Parameter für jeden Standort im Einzugsgebiet der Mulde zu finden sind (siehe Kapitel 5). Das Modell FLEXT bietet die Möglichkeit, mit unterschiedlichen Datenbankformaten zu interagieren und ist somit als eigenständige Software an keine bestimmte GIS-Software gebunden (Schritt I zu IIa in Abbildung 69).

Die dritte Anwendungsphase ist der eigentliche Entscheidungsprozess und das Herausschreiben der Ergebnisse (in diesem Fall die möglichen Maßnahmen) in die Datenbank. Dies kann als Rechenlauf für alle Einträge der Datenbank (Einzelflächen) erfolgen oder für ausgewählte einzelne Standorte (Schritt IIa zu III in Abbildung 69).

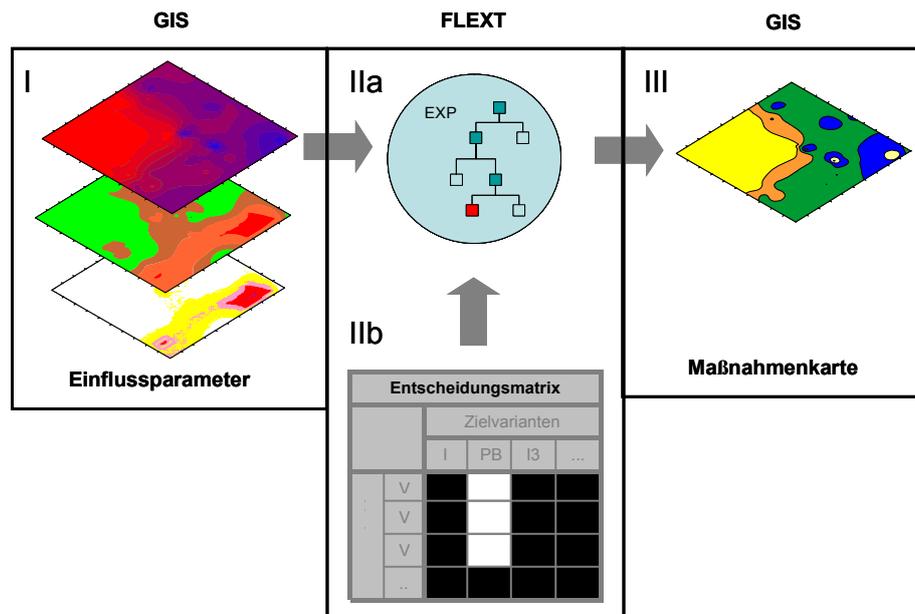


Abbildung 69: Struktur des Modells FLEXT

Die Software FLEXT hat sich in ihrer Konzeption, Funktionalität und nicht zuletzt in ihrer Leistungsfähigkeit als geeignetes Instrument erwiesen, das in der Lage ist, die gewählte Komplexität des Entscheidungsprozesses mit der in dieser Untersuchung gewählten räumlichen Auflösung auf das Einzugsgebiet zu übertragen. Die Berechnungszeiten erlauben es, die Sensitivität von Grenzwerten und Regeln bezogen auf das gesamte Einzugsgebiet zu untersuchen, wobei betont werden muss, dass die Grenzwerte und Ausschlusskriterien der Entscheidungsmatrix Expertenwissen und Planungserfahrung widerspiegeln und nicht das Ergebnis von Kalibrierungsprozessen sind.

Aus den vorangegangenen Erläuterungen ist bereits deutlich geworden, dass der Entscheidungsmatrix in dieser Methodik zur Erstellung der Maßnahmenkarten eine zentrale Rolle zukommt (IIb in Abbildung 69). Deshalb soll an dieser Stelle auf den ersten FLEXT-Anwendungsschritte noch einmal eingegangen werden.

Das Format der Matrix ist keine Vorgabe des Modells FLEXT. Denkbar ist auch, den Entscheidungsprozess in Form eines Entscheidungsbaumes darzustellen. Der Entscheidungsbaum entspricht mehr der klassischen Vorstellung eines Entscheidungsprozesses [BANDERMANN 2001]. In ihm werden nacheinander die Einflussparameter abgefragt und nach jeder Abfrage eine Teilentscheidung gefällt. Bei dem System der Matrix werden ebenfalls die Einflussparameter der betrachteten Flächen nacheinander abgefragt. Eine Entscheidung über die Empfehlung oder den Ausschluss einer Maßnahme wird aber erst gefällt, wenn dem Modell alle verfügbaren Parameter bekannt sind. Der Vorteil dieser Methode ist, dass Kriterien formuliert werden können, die als Entscheidungsgrundlage eine Kombination von Einflussparametern verwenden. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Entscheidungsprozess mehr als eine Maßnahmenempfehlung zulässt.

Dies ist insbesondere für den Planungsprozess wichtig, da je nach Prioritätensetzung und Akzeptanz von den Entscheidungsträgern vor Ort unterschiedliche Maßnahmen bevorzugt werden. Als Gemeinsamkeit der empfohlenen Maßnahmen ist die positive Wirkung auf den Hochwasserrückhalt hervorzuheben.

In der Matrix wird festgehalten:

- welche Maßnahmen in dem Entscheidungsprozess berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 7.1),
- welche Einflussparameter über die Empfehlung oder den Ausschluss einer Maßnahme entscheiden (siehe Kapitel 7.2.3)
- und nicht zuletzt ist in ihr dokumentiert, welche Anforderungen oder Grenzwerte ein Standort erfüllen muss, damit es zu einer Empfehlung einer Maßnahme an dieser Stelle des Mulde-Einzugsgebietes kommt.

Das Ergebnis – die Maßnahmenkarte – ist durch den Aufbau der Entscheidungsmatrix theoretisch vorbestimmt. Ohne die Kopplung mit den GIS-Daten bleibt das Ergebnis jedoch unvorhersehbar, da die Entscheidungsprozesse zu komplex und die Anzahl der betrachteten Einzelstandorte zu groß ist. Die Kopplung mit dem GIS und die Ausgabe des Ergebnisses im GIS sind daher unverzichtbar und rechtfertigen den betriebenen Aufwand. Es muss aber kritisch festgehalten werden, dass der Zeitaufwand für die GIS-Aufbereitung beträchtlich ist und nicht unterschätzt werden darf (Schritt 1 und 2 in Abbildung 66 - Kapitel 7.2.1).

Für die praktische Bearbeitung ist weiterhin anzumerken, dass die Auswahl der Einflussparameter und die Festlegung der Grenzwerte und Standortparameter stark von der digital verfügbaren Datengrundlage beeinflusst werden. Der Aufbau der Entscheidungsmatrizen zum einen und die Aufbereitung, Klassifizierung und Zusammenführung der Flächendaten zum anderen musste somit parallel realisiert werden.

7.2.3 Datenbank der Einflussparameter (Flächendatenbank)

Neben der Qualität der Informationen in der Wissensdatenbank (Entscheidungsmatrix), sind die Art, Güte und Aktualität der Flächendaten die bestimmenden Einflussgrößen für die Aussagekraft der Maßnahmenkarten. Ziel der Datenzusammenstellung und –aufbereitung ist es, möglichst viele für den Entscheidungsprozess relevante Informationen dem Modell FLEXT bereitzustellen (Schritt 1 und 2 in Abbildung 66).

In Abhängigkeit von der betrachteten Maßnahme (siehe Kapitel 7.1) hängt die Umsetzbarkeit von unterschiedlichen Faktoren ab. Diese Faktoren lassen sich grob in drei Gruppen gliedern [STECKER & BANDERMANN 1996], [BANDERMANN 2001; 2006a; 2002], [BECKER et al. 2005]:

- Faktoren zur Beschreibung des Standortes (Relief, Geologie, Boden, Hydromorphie, Grundwassernähe, Gewässernähe)
- Faktoren zur Beschreibung der momentanen Nutzung (Nutzungstyp, Bebauung, Versiegelungsgrad, Bodenbearbeitungsform, Fruchtfolge)
- Faktoren zur Beschreibung des Klimas (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung).

Für die Gruppe der Maßnahmen im Siedlungsbereich sind schwerpunktmäßig die Nutzungsfaktoren prägend, während sich im landwirtschaftlichen Bereich die Ausschlusskriterien vor allem aus den Standortbedingungen ableiten.

Vor dem zweiten Anwendungsschritt (von I zu IIa in Abbildung 69) muss eine Flächendatenbank erstellt werden, die die Nutzungs- und Standortinformationen der Einzelflächen im Untersuchungsgebiet enthält. Diese Datenbank wurde durch Verschneidung verschiedener Flächendaten im GIS erzeugt. Folgenden in Kapitel 5 vorgestellten GIS-Kartenwerken wurden die Informationen zu den Einflussparametern entnommen:

- Der Bodenkonzeptkarte (Bkkonz50) wurden die Informationen zur Mächtigkeit des Lockergesteins, der Bodentyp, der Grundwasserflurabstand sowie die von der Bodenart abhängige hydraulische Leitfähigkeit entnommen.
- Die Gewässernähe der Standorte wurde aus der Information zum Gewässersystem abgeleitet.
- Die Hangneigung wurde aus dem Digitalen Geländemodell des ATKIS-Datensatzes abgeleitet.
- Die Informationen zur bestehenden Landnutzung sind ebenfalls den ATKIS-Datensatz entnommen worden.
- Die digitale Karte der Trinkwasser-, Heilquellen- und Talsperrenschutzzonen wurde genutzt.
- Für die verbesserte Beschreibung der Größe der landwirtschaftlich genutzten Bewirtschaftungseinheiten wurden die InVeKos-Daten hinzugezogen.

Die zuletzt genannten InVeKos-Daten stellen eine Ausnahme in der Datengrundlage dar. Die anderen Daten sind allgemein verfügbar und erfüllen damit den Anspruch, dass die hier vorgestellte Methodik auf andere Einzugsgebiete in und außerhalb Sachsens angewendet werden kann. Ein weiterer Einflussfaktor, der für den Entscheidungsprozess wünschenswert wäre, ist die Information über Altlasten- bzw. Altlastenverdachtsflächen. Hierzu steht einzugsgebietsweit keine digitalisierte Information zur Verfügung.

Bei der Erstellung der Maßnahmenkarte für die landwirtschaftlichen Flächen spielen standortbezogene Einflussfaktoren die dominierende Rolle. Dies lässt sich damit begründen, dass die betrachteten Maßnahmen zum verstärkten Rückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen die natürlichen Infiltrations- und Speicherpotenziale des Bodens nutzen müssen. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse zur Analyse des Wasserrückhaltepotenzials (Kapitel 6) als Einflussfaktoren in den Entscheidungsprozess mit aufgenommen. Bei der Erstellung der Maßnahmenkarte für die Siedlungsgebiete ist dies nicht notwendig, da technische Maßnahmen (Rigolen) die künstliche Schaffung von Speicherpotenzialen im Boden ermöglichen. Die standortbezogenen Daten sind entscheidend für die Dimensionierung der dezentralen Maßnahmen im Siedlungsbereich. Somit fließen die Parameter des Wasserrückhaltepotenzials indirekt in die Maßnahmenkarte für die Siedlungsgebiete ein.

Die genannten Daten wurden im ArcView GIS (Version 3.1) aufbereitet (siehe Kapitel 5.1). Im Kapitel 4 sind auszugsweise die Einflussfaktoren als Karte für das Einzugsgebiet der Mulde dargestellt. Nach der Aufbereitung der Daten erfolgte die Klassifikation der Einflussparameter entsprechend den Vorgaben aus den Entscheidungsmatrizen (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 11). Abschließend wurden die klassifizierten Flächendaten des Mulde-Einzugsgebietes miteinander verschnitten, um je eine Datenbank für die Siedlungsgebiete und die landwirtschaftlichen Flächen zu generieren. Die Verschneidung führt zu einer sehr großen Anzahl von Einzelflächen, deren Darstellung und Handhabung im GIS ohne weiteres möglich ist, dessen Erstellung das ArcView GIS jedoch vor erhebliche Probleme gestellt hat. Aus diesem Grund wurde für diesen Arbeitsschritt auf das GIS Geomedia Professional zurückgegriffen (siehe Kapitel 5.1).

Auf eine Komprimierung der Datenbank durch räumliche Aggregation oder gröbere Klassifizierung von Merkmalen konnte verzichtet werden, da das Modell FLEXT eine Einzelbetrachtung aller Standorte ermöglicht. Dies gilt auch, wenn es sich um sehr große Einzugsgebiete mit vielen Einflussparametern handelt. Der geringe Rechenzeitaufwand eröffnet die Möglichkeit, die Sensitivitäten veränderter Entscheidungsregeln zu untersuchen.

7.2.4 Entscheidungsmatrix für die Siedlungsflächen

Die Bewertung der urbanen Flächen hat zum Ziel, die Eignung verschiedener Regenwasserbewirtschaftungsformen für die bestehenden Siedlungsflächen des Einzugsgebietes zu prüfen.

Für den Entscheidungsprozess wurden Informationen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit, zur Mächtigkeit des Lockergesteins, zum Bodentyp, zum Flurabstand, zur Hangneigung, zur Lage der Gewässer, zu Wasserschutzzonen und zur aktuellen Art der Bebauung/Nutzung der Siedlungsflächen als Einflussfaktoren verwendet (siehe Tabelle 9). Im Vordergrund der Maßnahmenauswahl stehen Mulden-Rigolen-Elemente (Versickerung mit unterirdischer Speicherung), die mit ihrer Speicher- und Versickerungskapazität einen Hochwasserrückhalt bereitstellen, der bei der direkten Ableitung in Kanäle oder ins Gewässer nicht existiert (siehe Kapitel 7.1).

Für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft kann auf bereits bestehende Wissensdatenbanken („Entscheidungsbäumen“) zurückgegriffen werden, die bereits auf verschiedene Einzugsgebiete angewandt wurden. [BANDERMANN 2001] stellt Karten der Bewirtschaftungsart für ein Einzugsgebiet im Saarland vor. [SIEKER et al. 2002b] bestimmten die Möglichkeiten der Regenwasserbewirtschaftung der Stadt Zittau, [SIEKER 2002] präsentiert verschiedene Anwendungsbeispiele aus der Arbeit der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Stadt Chemnitz, Land Berlin, Stadt Zittau, Einzugsgebiet der Blies), [ZIMMERMAN 2005] untersuchte das Einzugsgebiet der Glens und das Saarland ([SIEKER et al. 2002a]), [JIN 2005] wendet sein System FLEXT auf das Stadtgebiet Chemnitz und die Emscher-Region an (siehe auch [BECKER et al. 2005]). In diesen Arbeiten wurde stets vergleichbares Fachwissen angewendet. Allerdings variieren die Eingangsdaten und die Entscheidungsregeln.

Tabelle 9: Entscheidungsmatrix für die Siedlungsflächen

		Maßnahmen					
		Flächen- versickerung	Mulden- versickerung	Versickerung mit unterirdischer Speicherung	Versickerung mit Ableitung	Versickerung mit Ableitung und Stauwasserbewirt- schaftung	Ableitung ins Gewässer
Einflussfaktoren	Trinkwasserschutz- zone	Nein, Zone III	Nein, Zone III	Nein, Zone III	Nein, Zone III	Nein, Zone III	ohne Einfluss
	Gewässernähe	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss	Ja
	Flurabstand	≥ 13 dm	≥ 13 dm	≥ 23 dm	≥ 23 dm	10 – 23 dm	ohne Einfluss
	Bodenmächtigkeit	≥ 5 dm	≥ 5 dm	≥ 13 dm	≥ 13 dm	≥ 13 dm	ohne Einfluss
	Bodentyp	kein Staunässe- und Grundwasser- böden	kein Staunässe- und Grundwasser- böden	kein Staunässe- und Grundwasser- böden	kein Staunässe- und Grundwasser- böden	kein Grundwasser- böden	ohne Einfluss
	hydraul. Leitfähigkeit (kf)	≥ 100 mm/h	≥ 19 mm/h	≥ 5 mm/h	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss
	Hangneigung	$< 15\%$	$< 15\%$	$< 15\%$	$< 15\%$	$< 15\%$	ohne Einfluss
	Landnutzung	gering verschmutzte Flächen	gering verschmutzte Flächen	gering verschmutzte Flächen	gering verschmutzte Flächen	gering verschmutzte Flächen	gering verschmutzte Flächen

In Tabelle 9 ist die Entscheidungsmatrix dargestellt, die für die Siedlungsflächen im Mulde-Einzugsgebiet verwendet wurde. Insgesamt wurden acht Einflussparameter festgelegt, um entscheiden zu können, welche Art oder welche Arten der Regenwasserbewirtschaftung auf den verschiedenen Siedlungsstandorten technisch und gestalterisch möglich sind. Die in Tabelle 9 aufgeführten Werte stellen Konditionen dar, die erfüllt werden müssen. Eine Maßnahme durchläuft nur dann positiv den Entscheidungsprozess, wenn der Standort die Bedingungen der weißen Felder einhalten kann. Dagegen bedeutet eine Standorteigenschaft, die außerhalb des angegebenen Wertebereichs liegt, den Ausschluss

der Maßnahme für diese Fläche, auch wenn alle anderen Konditionen erfüllt werden. Die grau hinterlegten Felder markieren die Einflussfaktoren, die für die konkrete Maßnahme kein Ausschlusskriterium darstellen.

Die betrachteten Maßnahmen für Siedlungsgebiete sind die Flächenversickerung, Muldenversickerung, Versickerung mit unterirdischer Speicherung (Mulden-Rigolen-Elemente), Versickerung mit Ableitung (Mulden-Rigolen-Systeme), Versickerung mit Ableitung und Grundwasserbewirtschaftung [BANDERMANN 2006b], Ableitung ins Gewässer und konventionelle Ableitung im Kanalnetz. Die beiden letztgenannten Maßnahmen sind als Hinweise für den Planungsprozess zu verstehen, da sie keinen positiven sondern negativen Einfluss auf das Hochwassergeschehen haben. In den Szenarien werden Siedlungsflächen, für die nur die Ableitung ins Gewässer und/ oder konventionelle Ableitung im Kanalnetz vorgeschlagen werden, als Bereiche ohne Umsetzungspotenzial bezeichnet (siehe Kapitel 8). In Bezug auf ihre Wirkung für den vorbeugenden Hochwasserschutz sind die Flächenversickerung, die Muldenversickerung und Versickerung mit unterirdischer Speicherung gleich hoch einzustufen, da sie kein Niederschlagswasser über Kanäle an das Gewässernetz abgeben (siehe Kapitel 7.1).

Ein weiterer Teil der Entscheidungsmatrix sind die bereits erwähnten Grenzwerte oder andere Standortanforderungen, die nicht zur Empfehlung oder zum Ausschluss einer Maßnahme führen sondern FLEXT dazu veranlassen, für den betrachteten Standort neben dem Ergebnis auch noch eine Anmerkung in die Datenbank zu schreiben. Diese Möglichkeit wurde in FLEXT implementiert,

- um besser auf unzureichende Standortinformation (Datenlücken) reagieren zu können
- und um zusätzliche, standortspezifische Handlungsempfehlungen geben zu können, die über die maßnahmenspezifischen Empfehlungen hinausgehen.

In Tabelle 10 ist aufgeführt welche Anmerkungen bei entsprechenden Datenbankangaben gegeben werden.

Tabelle 10: Zusatzinformationen zum Entscheidungsprozess

Einflussfaktoren	Angabe in der GIS-Datenbank	Anmerkung
Trinkwasserschutzzone	Zone III	Die Fläche liegt in Trinkwasserschutzzone III
Gewässernähe	bis 80m	Prüfung vor Ort, ob Ableitung ins Gewässer möglich ist
Flurabstand	Keine Daten	Flurabstand prüfen
Bodenmächtigkeit	Keine Daten	Mächtigkeit des Lockergesteins prüfen
Bodentyp	Siedlungsböden (Keine Daten)	Prüfung der Bodenverhältnisse vor Ort notwendig
Bodentyp	Sd-Verdacht	Verdacht auf Stauwasser
Bodentyp	Bodenwasserhinweis	ggf. Stauwasser
Hangneigung	5-10%	hohe Baukosten
Hangneigung	10-15%	sehr hohe Baukosten
Landnutzung	„Industrie“, Verkehrsflächen“	Verschmutzungsgrad der Flächen beachten
Landnutzung	„Ortlage“	Art der Bebauung prüfen

Für die Siedlungsflächen ist die Option der so genannten „weichen“ Kriterien sehr wichtig, da insbesondere unter Siedlungsflächen die Bodendaten große Informationslücken aufweisen. Der Ursprung dieser Datenmängel ist begründbar mit anthropogener Überprägung der Stadtböden [ZIMMERMAN 2005]. Bezogen auf die Maßnahmen der

Regenwasserbewirtschaftung in den Siedlungsgebieten muss aber darauf hingewiesen werden, dass die fehlende oder lückenhafte Bodeninformation die Aussagekraft der Maßnahmenkarte nicht in dem Maße einschränkt, wie dies für die Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft gelten würde. Der Hintergrund ist, dass die Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung technische Bauwerke darstellen, die in der konkreten Umsetzung die Möglichkeit bieten, sich den gegebenen Standortbedingungen flexibel anzupassen, ohne dass es dabei zu Einschränkungen der Funktionsfähigkeit kommt.

7.2.5 Entscheidungsmatrix für die landwirtschaftlich genutzten Flächen

In Tabelle 11 ist die Entscheidungsmatrix für die landwirtschaftlichen Flächen dargestellt. Die landwirtschaftliche Fläche ist in diesem Kontext definiert als Ackerland, Grünland, Gartenland oder Sonderkulturen, die in ihrer Summe 61% des Mulde-Einzugsgebiets umfassen (siehe Abbildung 18). Davon sind 70% Ackerflächen und nur 1% Sonderkulturen oder Gartenland. Die Dominanz der Ackerflächen unterstreicht die Notwendigkeit, Maßnahmen in den Entscheidungsprozess mit aufzunehmen, die insbesondere bei ackerbaulicher Landnutzung angewendet werden können. Im Entscheidungsprozess wurden Maßnahmen zur veränderten Bodenbearbeitung, zur Änderung der Landnutzung und zur Flurgestaltung bewertet (siehe Kapitel 7.1). Neun der insgesamt 15 betrachteten Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs beziehen sich ausschließlich auf Flächen, die zurzeit für den Ackerbau genutzt werden. Die anderen sechs Maßnahmen können auch auf Grünlandflächen umgesetzt werden. Eine genaue Charakterisierung der Maßnahmen insbesondere der konservierenden Bodenbearbeitung erfolgte in Kapitel 7.1.

Tabelle 11: Entscheidungsmatrix für die landwirtschaftlichen Flächen

		Einflussfaktoren						
		Art der landw. Nutzung	Hangneigung	potenzielles Wasserspeicherpotenzial im Boden	dominanter Abflussprozess im natürlichen Zustand	Flurabstand	Gewässernähe	Größe der Ackerschläge
A: Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Bestellverfahren								
A1	Konservierende Bodenbearbeitung	Acker	kein Einfluss	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
A2	Direktsaatverfahren	Acker	kein Einfluss	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
A3	Konturnutzung (höhenlinienparallel)	Acker	>3°	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
B: Maßnahmen zur Nutzungsänderung								
B1	Aufforstung	alle Flächen	kein Einfluss	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
B2	Umwandlung von Acker in Grünland	Acker	kein Einfluss	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
B3	Flächenstilllegung (Brache)	alle Flächen	kein Einfluss	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
C: Maßnahmen zur Flurgestaltung								

		Einflussfaktoren						
		Art der landw. Nutzung	Hangneigung	potenzielles Wasserspeicherpotenzial im Boden	dominanter Abflussprozess im natürlichen Zustand	Flurabstand	Gewässernähe	Größe der Ackerschläge
C1	Schlagverkleinerung	Acker	>3°	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	>20
C2	Schlaguntergliederung durch Grünstreifen	Acker	<7°	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	>20
C3	Schlaguntergliederung durch Gras-/Krautstreifen	Acker	<7°	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	>20
C4	Anlage von Gras-/Krautsäumen	alle Flächen	kein Einfluss	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
C5	Anlage von Gewässerrandstreifen	Acker	kein Einfluss	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	gewässernah	nicht relevant
C6	Schlaguntergliederung durch Hecken	alle Flächen	>3°	nicht relevant	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	>20
C7	Anlage von Feldgehölzen	alle Flächen	kein Einfluss	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
C8	Begrünung von Abflussbahnen	Acker	>7°	mittel bis hoch	Oberflächen-, langsamer Zwischenabfluss	groß	nicht relevant	nicht relevant
C9	Anlage von Abflussmulden	alle Flächen	>3°	gering	alle Abflussprozesse	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant

Insgesamt wurden sieben Einflussparameter festgelegt, um entscheiden zu können, welche potenziellen Maßnahmen standortbezogen möglich sind und aus Sicht des vorbeugenden Hochwasserschutzes einen positiven Einfluss haben.

Als Einflussfaktoren wurden die aktuelle Art der landwirtschaftlichen Nutzung, die Hangneigung, das Wasserspeicherpotenzial im Boden und der dominanter Abflussprozess im natürlichen Zustand (Potenzialkarte) sowie der Flurabstand, die Nähe zum Gewässer und die Größe der Ackerschläge berücksichtigt.

Wie bereits in Kapitel 7.2.3 erwähnt, wird der Entscheidungsprozess für landwirtschaftliche Flächen von zwei zusätzlichen Parametern dominiert, die sich auf das Speicher- und Abflussbildungs- bzw. Abflusskonzentrationsverhalten der Böden beziehen. Diese Einflussparameter sind keine allgemein verfügbaren „Rohdaten“, sondern das Ergebnis der Methodik zur Erstellung der Wasserspeicherpotenzialkarte (Senkenpotenzialkarte; siehe Kapitel 6). Die Entscheidungsmatrix der Siedlungsflächen kann auf diese abgeleiteten Daten verzichten, da das Bodenspeicherpotenzial bei Bedarf beispielsweise in Form von Rigolen künstlich geschaffen werden kann (s. o.).

Die Interpretation der Entscheidungsmatrix wurde bereits am Beispiel der Siedlungsflächen erläutert. Demnach sind die grau hinterlegten Felder für die konkrete Maßnahme kein

Ausschlusskriterium. Es fällt auf, dass für viele Maßnahmen eine Reihe von Parametern keine Relevanz besitzen. Die Konsequenz hieraus ist, dass im Rahmen des Entscheidungsprozesses eine große Anzahl von Maßnahmen vorgeschlagen und teilweise relativ wenige Maßnahmen ausgeschlossen werden.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Ergebnis des Entscheidungsprozesses für die Siedlungsflächen

In Abbildung 70 ist das Ergebnis des oben beschriebenen Entscheidungsprozesses für die Siedlungsflächen dargestellt. Die Siedlungsflächen im Einzugsgebiet der Mulde umfassen 617 km², was einem Flächenanteil von ca. 10 % entspricht (siehe Abbildung 18).

Insgesamt führte die Verschneidung der Flächendaten zu einer Datenbank mit rund 213.000 Datensätzen. Jeder Datensatz repräsentiert eine Siedlungsfläche im Muldegebiet, für die im FLEXT-Modell, basierend auf der Entscheidungsmatrix, ein Entscheidungsprozess durchgeführt wurde und Maßnahmenempfehlungen sowie Anmerkungen ausgegeben wurden.

Wendet man die Entscheidungsmatrix für einen Beispielstandort an, so ergeben sich ggf. mehrere mögliche Maßnahmen. Die Festlegung auf eine der möglichen Maßnahmen orientiert sich nach ökonomischen Gesichtspunkten. D. h., es wird die kostengünstigste Variante favorisiert. Diese Auswahl der „besten“ Regenwasserbewirtschaftungsart wurde im Nachgang zum Entscheidungsprozess durchgeführt. Aus diesem Grund ist es nicht notwendig, für jede der betrachteten Maßnahmen eine separate Karte mit den möglichen Umsetzungspotenzialen dazustellen. Für einen Detailausschnitt nordöstlich der Stadt Chemnitz ist in Abbildung 71 das Bewertungsergebnis der Siedlungsflächen dargestellt.

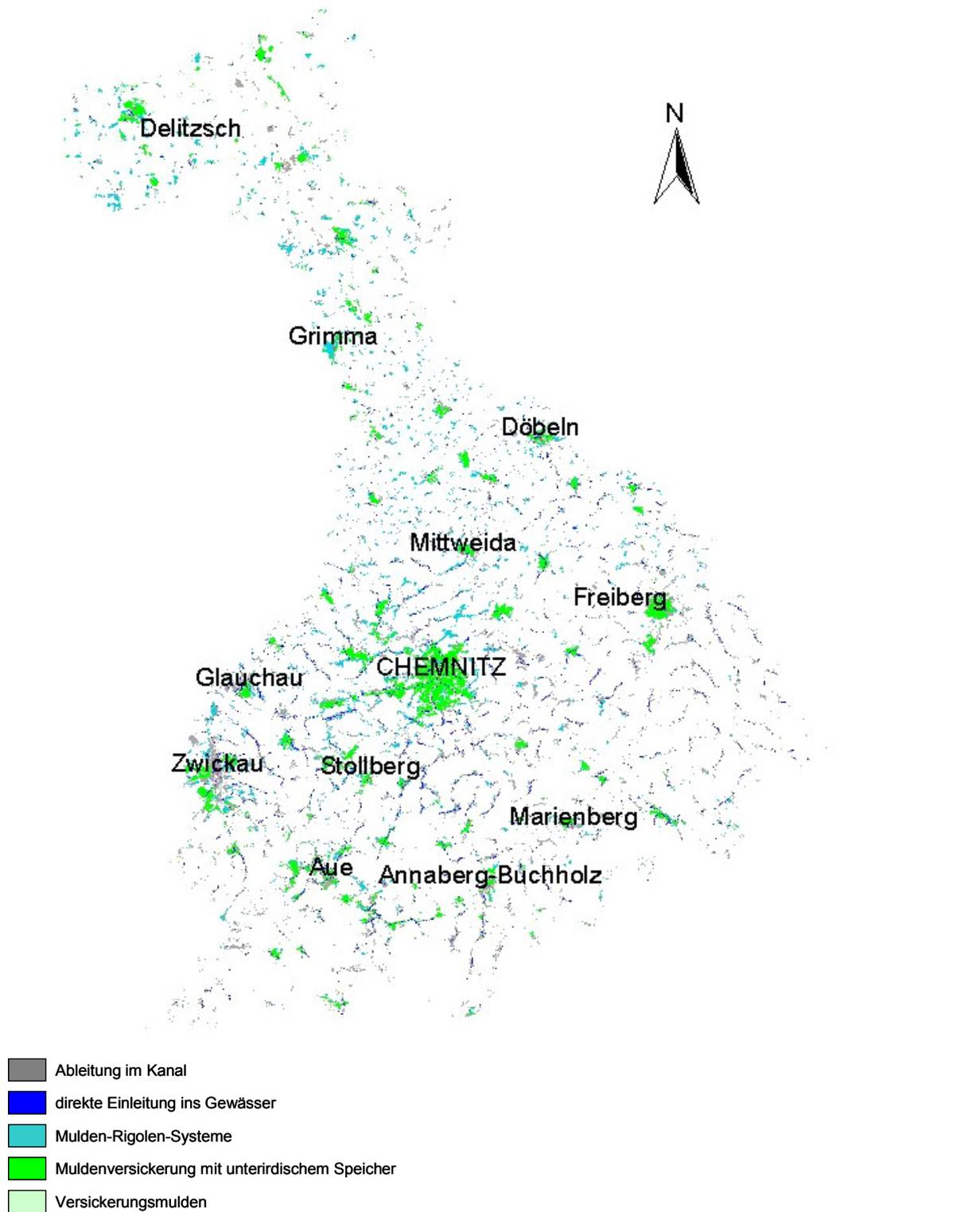


Abbildung 70: Maßnahmenkarte für die Siedlungsflächen

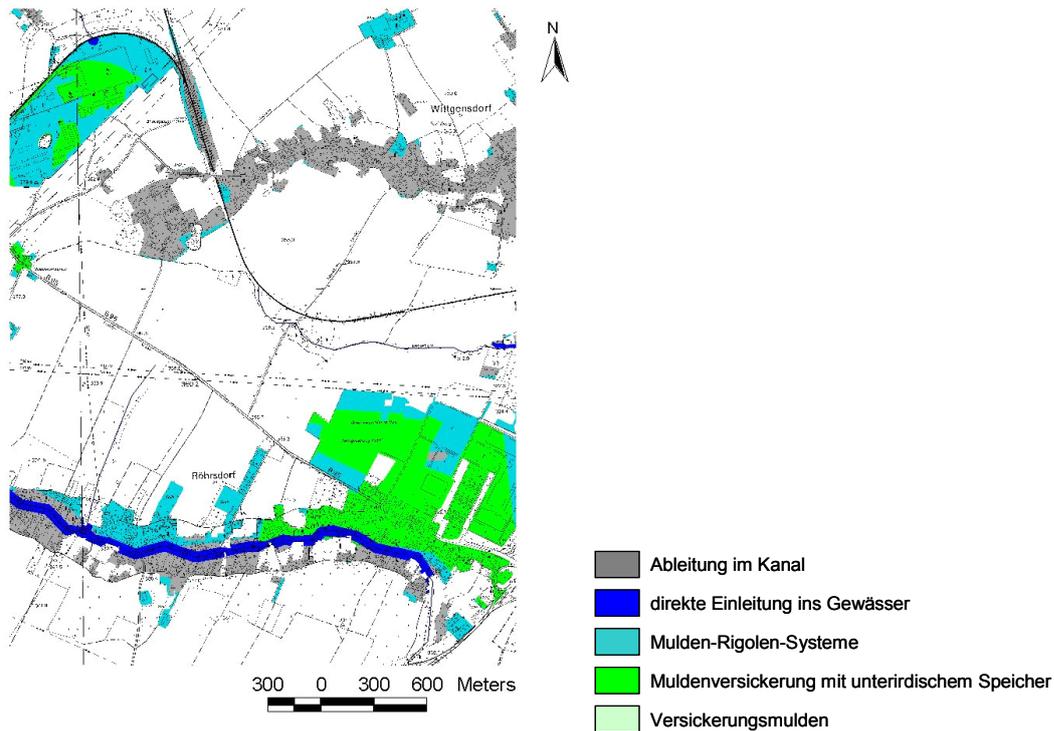


Abbildung 71: Maßnahmenkarte für die Siedlungsflächen – Ausschnitt nordöstlich der Stadt Chemnitz

Abbildung 72 zeigt die Verteilung aller betrachteten Bewirtschaftungsarten summiert über die Siedlungsflächen des Einzugsgebietes. Es zeigt sich, dass die in dieser Arbeit besonders beachteten Mulden-Rigolen-Elemente (Muldenversickerung mit unterirdischer Speicherung) mit 28 % auf einem großen Teil der Siedlungsflächen umsetzbar sind. Die Auswertung ist Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen (siehe Kapitel 8).

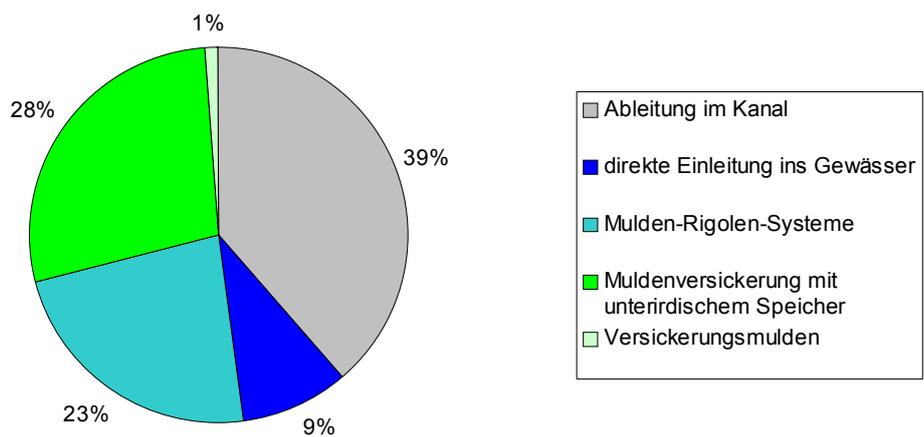


Abbildung 72: Prozentuale Verteilung der anwendbaren Bewirtschaftungsverfahren

7.3.2 Ergebnis des Entscheidungsprozesses für die landwirtschaftlich genutzten Flächen

Insgesamt wurden im Rahmen des Entscheidungsprozesses rund 3.761 km² landwirtschaftlich genutzte Fläche bewertet.

Die Verschneidung der Flächendaten führte zu einer Datenbank mit rund 580.000 Datensätzen. Jeder Datensatz repräsentiert einen Teil einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, die sich in Bezug auf eine der genannten Einflussgrößen von den Nachbarflächen unterscheidet. Für diese Flächen wurden mit dem FLEXT-Modell basierend auf der Entscheidungsmatrix Maßnahmenempfehlungen generiert.

Im Rahmen des Entscheidungsprozesses werden eine Reihe von Maßnahmen vorgeschlagen und teilweise relativ wenige Maßnahmen ausgeschlossen. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, eine Maßnahmenkarte zu erstellen. Im Gegensatz zu dem Ergebnis für die Siedlungsflächen kann unter den vorgeschlagenen landwirtschaftlichen Maßnahmen keine „beste“ Maßnahme im Nachgang herausgefiltert werden, da dies zu sehr von lokalen Standorteigenschaften abhängt, die in der Datenbank nicht erfasst werden.

Die Maßnahmenkarte wurde daher aufgeteilt in eine Serie von so genannten Fachplanerkarten. Die Fachplanerkarten beinhalten die Information des Umsetzungspotentials einer der 15 betrachteten Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes unabhängig von konkurrierenden Nutzungen. Die Karten sollen dem Fachplaner Auskunft erteilen, welche Maßnahmen in seinem Untersuchungsgebiet sinnvoll sind. Die Fachplanerkarten dürfen nicht gleichgesetzt werden mit realitätsnahen Umsetzungsszenarien. Vielmehr dienen sie als Einstieg in die Erstellung möglicher, fachlich begründeter Szenarien (siehe auch Kapitel 8) und zeigen die Umsetzungspotenziale der Maßnahmen des Maßnahmenkataloges auf.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse des Entscheidungsprozesses für die landwirtschaftlichen Flächen dargestellt. Exemplarisch für die 15 untersuchten Maßnahmen erfolgt hier die grafische Darstellung für:

- die konservierende Bodenbearbeitung (Maßnahme A1)
- die Konturnutzung – höhenlinienparallele Bewirtschaftung (Maßnahme A2)
- die Schlaggliederung durch Grünstreifen oder Gras- und Krautstreifen (Maßnahmen C2 und C3)
- sowie die Anlage von dezentralen Abflussmulden (Maßnahme C9).

Die Übersichtskarte (Abbildung 73) zeigt, dass von den rund 5.800 km² betrachteten Einzugsgebietsflächen ca. 40 % ackerbaulich genutzt werden (ca. 2.300 km²) und hiervon wiederum 75 % (ca. 1.800 km²) für die konservierende Bodenbearbeitung (Maßnahme A1) geeignet sind. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass die konservierende Bodenbearbeitung auf den ausgewiesenen 1.800 km² Ackerfläche positive (Neben-) Effekte für den Hochwasserschutz mit sich bringt, da entsprechend der Standortinformationen ein großer Teil des zusätzlich infiltrierten Niederschlagswassers im Boden zwischengespeichert werden kann.

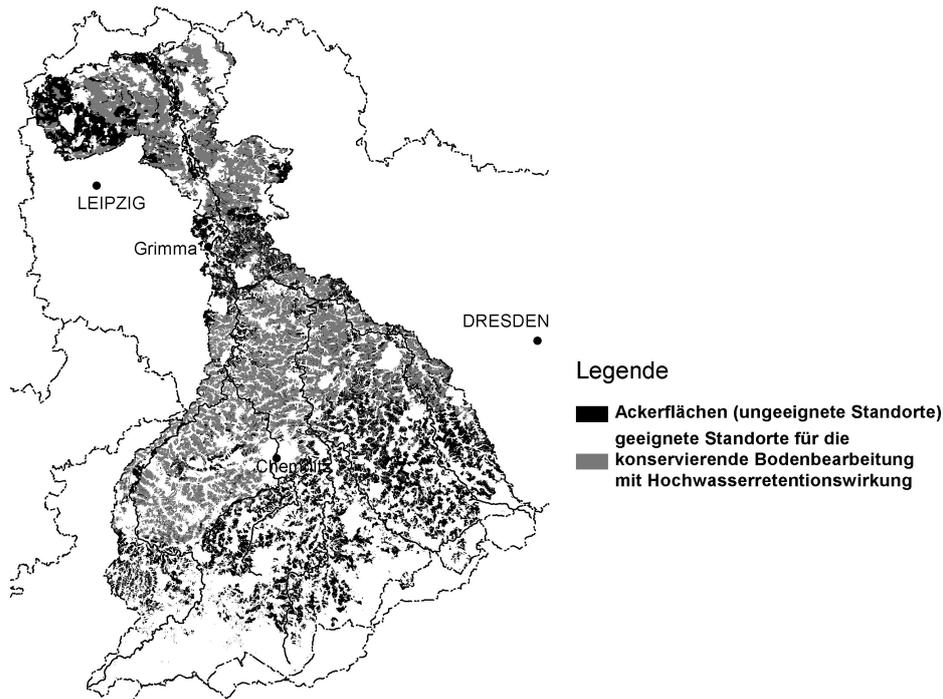


Abbildung 73: Fachplanerkarte für die konservierende Bodenbearbeitung

Die Maßnahmen zur Schlaggliederung (Maßnahmen C2 und C3) haben unabhängig vom potenziellen Wasserspeicherpotenzial im Boden einen positiven Einfluss auf den Hochwasserrückhalt. Aus diesem Grund ist ihre Umsetzung auf noch mehr Ackerflächen des Einzugsgebietes zu empfehlen als die konservierende Bodenbearbeitung. Das Expertensystem weist ca. 2.000 km² (53% der bewerteten landwirtschaftlichen Flächen oder 76% der bewerteten Ackerflächen) aus, auf denen durch Schlaggliederung vorbeugender Hochwasserschutz betrieben werden würde (vgl. Abbildung 74).

Die Konturnutzung kann ihre Vorteile insbesondere auf stärker geneigten Standorten entfalten. Gleichzeitig müssen diese Flächen ein ausreichendes Bodenspeicherpotenzial ausweisen. Diese Kombination von Eigenschaften, ist im Einzugsgebiet in nur sehr begrenztem Umfang zu finden. Das Umsetzungspotenzial beschränkt sich auf 280 km² bzw. 7% der bewerteten landwirtschaftlichen Flächen oder 11% der bewerteten Ackerflächen (Abbildung 75).

Die letzte der beispielhaft dargestellten Maßnahmen ist die oberirdische Speicherung von Niederschlagswasser in dezentralen Speichern oder Mulden (Abbildung 76). Diese Form des Hochwasserrückhalts wurde entsprechend des Ansatzes dieser Arbeit als Alternativlösung für die Standorte gesehen, auf denen das Konzept der Speicherung im Boden aufgrund der Standorteigenschaften versagt. Der Entscheidungsmatrix kann entnommen werden, dass diese Maßnahme auf all den Standorten empfohlen wird, wo die vierzehn zuvor charakterisierten Maßnahmen nicht zur Anwendung kommen können. Der entscheidende Einflußparameter in diesem Zusammenhang ist der dominante Abflussprozess im natürlichen Zustand. Auf Standorten, die von schnellen Abflussprozessen im Boden und an der Oberfläche geprägt sind, kann nur durch oberirdische Speicherung ein Rückhalt in der Fläche erzielt werden. Insbesondere im Süden des Untersuchungsgebietes, in den Oberläufen der Mulden, sind die Standorte zu finden, bei denen auf diese Form des Rückhalts in der Fläche zurückgegriffen werden muss. Rund 1.500 km² potenziell „geeigneter“ Flächen (40 % der bewerteten landwirtschaftlichen Flächen) hat das Expertensystem für diese Maßnahme identifiziert.

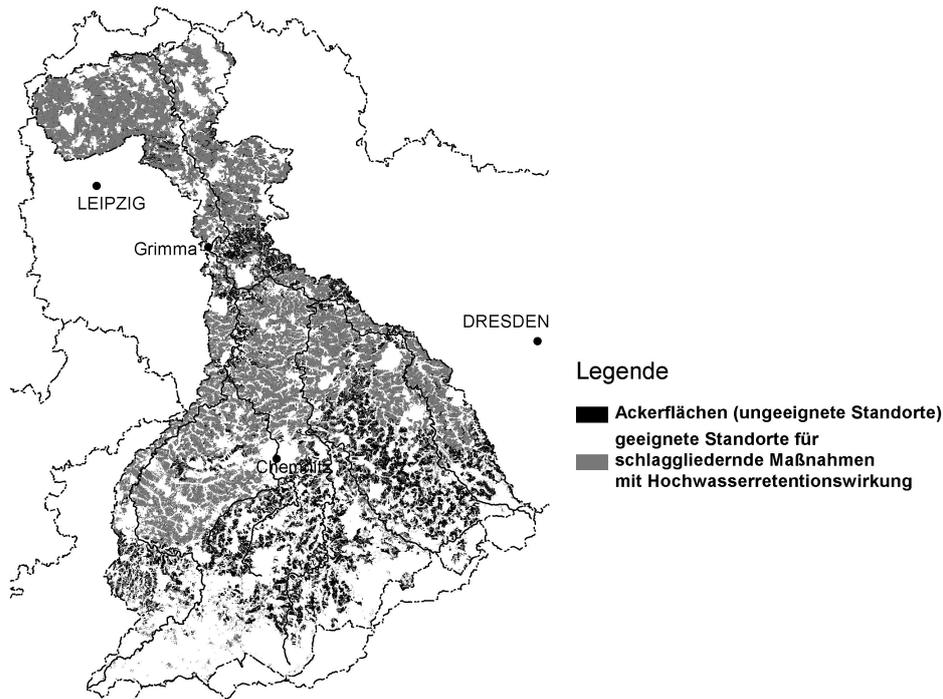


Abbildung 74: Fachplanerkarte für Maßnahmen zur Schlaggliederung

Für einen Detailausschnitt nordöstlich der Stadt Chemnitz sind in den folgenden Abbildungen (Abbildung 77 - Abbildung 80) die Bewertungsergebnisse der landwirtschaftlichen Flächen noch einmal im größerem Maßstab dargestellt.

Der Detailausschnitt verdeutlicht die räumliche Auflösung der Maßnahmenkarte. Die schwarz dargestellten Flächen markieren die Acker- bzw. Grünlandflächen, die aus der Sicht des vorbeugenden Hochwasserschutzes nicht für die jeweilige Maßnahme geeignet sind. Die grauen Flächen markieren die jeweiligen potenziellen Umsetzungsstandorte. Die weißen Bereiche sind im Ist-Zustand von anderen Landnutzungen wie Wald oder Siedlungen geprägt. Diese Flächen wurden nicht betrachtet, da bei dieser Methodik eine Umnutzung von Siedlungs-, Brach- oder Waldflächen in landwirtschaftliche Nutzungen nicht berücksichtigt wurde.

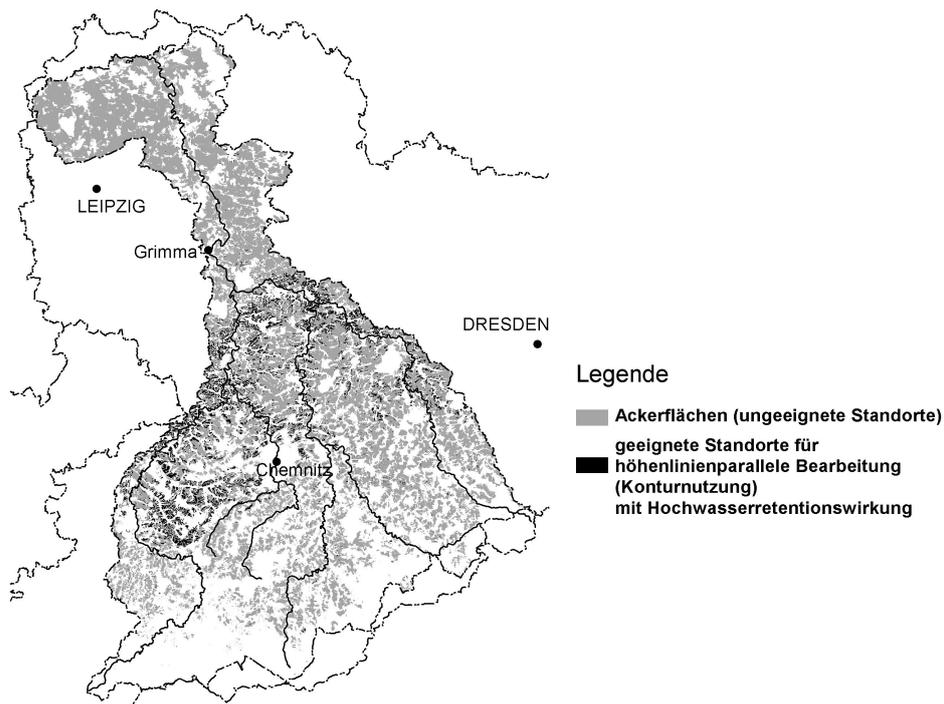


Abbildung 75: Fachplanerkarten zur Einführung der Konturnutzung

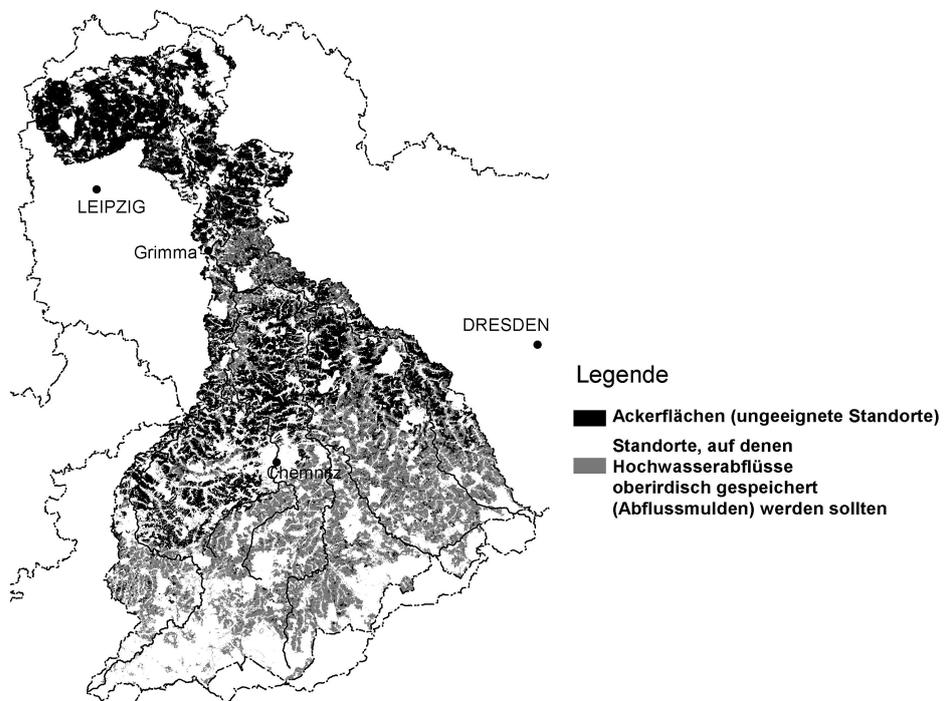
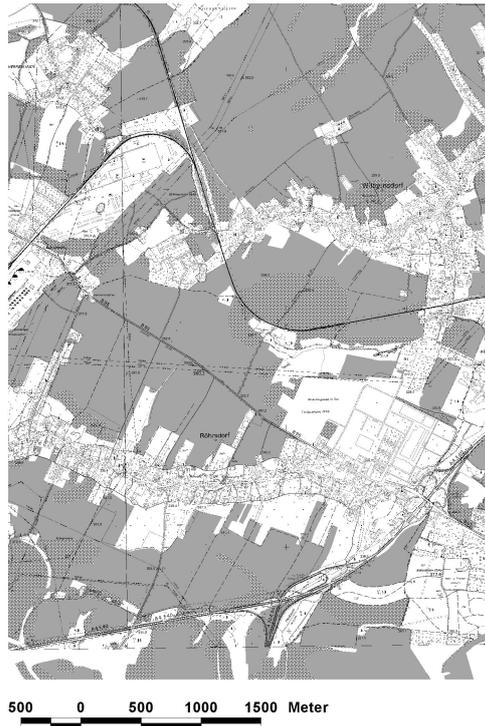


Abbildung 76: Fachplanerkarte für Maßnahmen zur oberirdischen Speicherung



Legende

- Ackerflächen (ungeeignete Standorte)
- geeignete Standorte für die konservierende Bodenbearbeitung mit Hochwasserretentionswirkung

500 0 500 1000 1500 Meter

Abbildung 77: Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für die konservierende Bodenbearbeitung

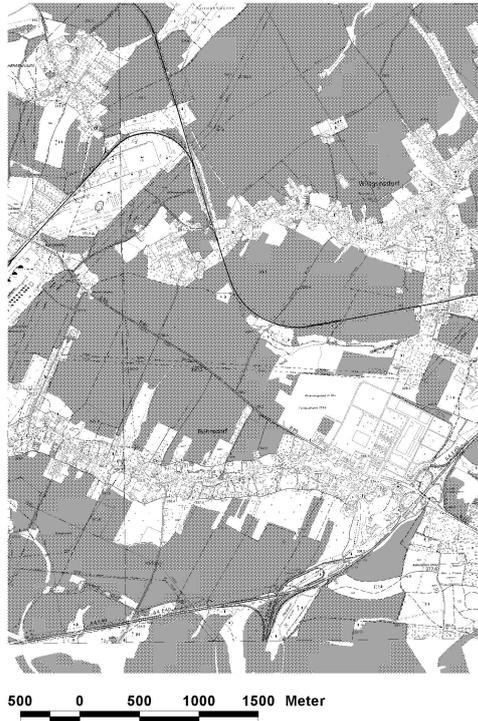


Legende

- Ackerflächen (ungeeignete Standorte)
- geeignete Standorte für schlaggliedernde Maßnahmen mit Hochwasserretentionswirkung

500 0 500 1000 1500 Meter

Abbildung 78: Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für Maßnahmen zur Schlaggliederung



Legende

- Ackerflächen (ungeeignete Standorte)
- geeignete Standorte für höhenlinienparallele Bearbeitung (Konturnutzung) mit Hochwasserretentionswirkung

Abbildung 79: Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte zur Einführung der Konturnutzung



Legende

- Ackerflächen (ungeeignete Standorte)
- Standorte, auf denen Hochwasserabflüsse oberirdisch gespeichert (Abflussmulden) werden sollten

Abbildung 80: Detailausschnitt aus der Fachplanerkarte für Maßnahmen zur oberirdischen Speicherung

7.4 Diskussion

In diesem Kapitel wurde ein Werkzeug vorgestellt, dass in der Lage ist, Expertenwissen auf mesoskalige Einzugsgebiete anzuwenden [JIN 2005].

Die hier vorgestellte Erarbeitung der Maßnahmenkarten/ Fachplanerkarten zeigen auf, welcher räumliche Betrachtungsmaßstab auf regionaler Ebene (Einzugsgebietsebene) realisiert wurde, welche Einflussparameter in den Entscheidungsprozess einfließen konnten und welchen Einfluss die gewählten Grenzwerte auf die Verortung der Maßnahmen im Einzugsgebiet der Mulde haben.

Mit Blick auf die Handlungsempfehlungen schließen sich die Maßnahmenkarten in ihrer methodischen Notwendigkeit unmittelbar an die Ermittlung des Wasserrückhaltepotenzials an. Nachdem in Kapitel 6 eine Aussage getroffen wurde, welche Wasserspeicherpotenziale in der Fläche zu finden sind, wird mit dem Expertensystem beantwortet, welche Maßnahmen dazu geeignet sind, die Wasserrückhaltepotenziale der Landschaft zu erschließen und in welchen Bereichen des Einzugsgebietes die geeigneten Umsetzungsstandorte liegen.

Die Erstellung der Maßnahmenkarte für die Siedlungsflächen liefert belastbare, standortangepasste Aussagen zur Art der Regenwasserbewirtschaftung versiegelter und unversiegelter urbaner Flächen. Die Genauigkeit der Aussagen ist insbesondere vor dem Hintergrund des Betrachtungsmaßstabs sehr hoch. Eine weitere Verbesserung der Aussagequalität könnte in erster Linie durch eine Nachverdichtung der einzugsgebietweiten Dokumentation der Einflussparameter erreicht werden. Hierbei sind insbesondere die Dokumentation von Altlastenstandorten und eine detailliertere Dokumentation der Baustruktur als wünschenswert, jedoch nicht als zwingend notwendig zu nennen.

In den Entscheidungsprozess für die Siedlungsflächen flossen die Erfahrungen der vorangegangenen Untersuchungen ein (siehe Kapitel 7.2.4). Diese Vorarbeiten waren von großem Nutzen und entscheidend für die Verifizierung der Entscheidungsergebnisse. Bei der Erstellung der Wissensdatenbank zum Entscheidungsprozess für die landwirtschaftlichen Flächen konnte nicht auf eine vergleichbare Vorarbeit zurückgegriffen werden. Es kann jedoch festgehalten werden, dass mit den vorgelegten Ergebnissen für die landwirtschaftlichen Flächen ebenfalls wertvolle Aussagen zur Verortung der Umsetzungspotenziale im Sinne eines vorbeugenden Hochwasserschutzes in der Fläche getroffen werden können.

Im Folgenden sollen die Aspekte genannt werden, aus denen sich ggf. weiterer Forschungsbedarf oder Verbesserungsmöglichkeiten ergeben:

- Mehrfach wurde darauf hingewiesen, dass der Entscheidungsprozess für landwirtschaftliche Standorte eine Reihe von Maßnahmen auslöst und teilweise relativ wenige Maßnahmen ausgeschlossen werden. Ein Grund hierfür ist sicherlich in der Tatsache zu suchen, dass die einzugsgebietsweite, digitale Dokumentation der Standorteigenschaften nicht vollständig ist. Während die in der Entscheidungsmatrix genannten Einflussparameter zu den Bodenverhältnissen, zur Landnutzung, zur Hangneigung sowie zur Gewässernähe flächendeckend und in zufriedenstellender Qualität vorliegen, ist die Dokumentation der aktuellen Bewirtschaftungsform, die Schlagaufteilung der Feldblöcke, die Anbaufrüchte und Fruchtfolgen sowie die Ausstattung der Landwirtschaftsflächen mit flurgestaltenden Elementen nicht dokumentiert. Es wurde versucht, diesen Informationsmangel auszugleichen, indem die verwendeten Landnutzungsdaten (DLM-ATKIS) mit den InVeKos-Daten verknüpft wurden. Abschließend muss jedoch eingeräumt werden, dass der Informationsgewinn dieser Datenverknüpfung begrenzt war und es im Sinne einer allgemeinen, übertragbaren Anwendung der hier vorgestellten Vorgehensweise kein gangbarer Weg zu sein scheint. Selbst bei idealer Datengrundlage darf nicht davon ausgegangen werden, dass eine Identifikation einer „besten“ Maßnahme im außerörtlichen Bereich möglich ist. Dies erscheint nach den Erkenntnissen dieser Arbeit auch nicht sinnvoll. Das Ziel des Entscheidungsprozesses sollte vielmehr sein, dem Nutzer auch die „zweitbeste“

Alternative anzubieten. Die Aufstellung der Entscheidungsmatrix unterlag der Abwägung zwischen der landwirtschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Bewertung, die zum Ausschluss von Maßnahmen führt, wenn sie den Zielen des vorbeugenden Hochwasserschutzes entgegen stehen und dem Anspruch, dem Nutzer des Expertensystems die notwendige Flexibilität (Alternativen) im Planungsprozess lassen. Eine verstärkte Nutzung der FLEXT-Option „weiche Kriterien“ beim Entscheidungsprozess (siehe Kapitel 7.2.1) wurde in diesem Zusammenhang nicht weiter verfolgt, da die Hinweise weniger an die Standorte als vielmehr an die Maßnahmen gekoppelt sind. Deshalb wurden die Umsetzungshinweise in den erwähnten Maßnahmensteckbriefen (siehe [SIEKER et al. 2007a]) platziert. Die Hinweise zu den Informationslücken sind von genereller Natur und somit als expliziter Hinweis für jeden Standort nicht zielführend.

In diesem Punkt und mit Blick auf die Verifizierung des Entscheidungsprozesses wäre es wünschenswert, wenn beispielsweise im Rahmen von Entwicklungs- und Erprobungsvorhaben eine weitere Vertiefung des vorgelegten Ansatzes anhand von Fallstudien stattfinden könnte, wie es für die Siedlungswasserwirtschaft bereits existiert. Darüber hinaus führt [ZIMMERMAN 2005] aus, dass eine optimale Maßnahmenkombination nur im Zuge einer Nutzwertanalyse ermittelt werden kann, die den verschiedenen Szenarien (siehe Kapitel 8) nach multikriterieller Bewertung einen Gesamtnutzen zuweist (siehe auch [SIEKER et al. 2005b]). Dieser Ansatz wurde in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, weil der Schwerpunkt nicht auf der Identifikation der besten Maßnahmenkombination für ein konkretes Einzugsgebiet lag.

- Es ist festzuhalten, dass naturschutzfachliche Einflussfaktoren nicht direkt in die Entscheidungsmatrizen eingebunden wurden. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist eine typisierte Standortbewertung für Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes nur in begrenztem Maße sinnvoll, da diese zu verallgemeinernd, zu wenig örtlichen Bezug und ohne Berücksichtigung der räumlich-funktionalen Zusammenhänge erfolgen müsste. Deshalb können konkrete Entscheidungsregeln nur für wenige Teilaspekte generell formuliert werden. Dazu gehört z. B. die vorrangige Sicherung vorhandener Flächennutzungen/Biotoptypen in Schutzgebieten. Die darüber hinaus gehenden entscheidungsrelevanten Naturschutzaspekte können nur dann einen hinreichenden Konkretisierungsgrad im Sinne einer Handlungsanleitung erfahren, wenn sie die speziellen Bedingungen und die naturräumlichen Gegebenheiten bei der Maßnahmenumsetzung vor Ort berücksichtigen (siehe [RÜTER 2007a]).
- Die ökonomischen Einflussfaktoren wurden aus dem programmgestützten Entscheidungsprozess ausgeklammert und nur für den Bereich der siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen zur Festlegung der „besten“ Maßnahme genutzt. Im landwirtschaftlichen Bereich wurde hierauf verzichtet, da die ökonomische Einschätzung komplexer ist. Wie beim naturschutzfachlichen Aspekt wurde auch eine maßnahmenbezogene ökonomische Bewertung vorgezogen (siehe [SIEKER et al. 2007a]).
- Die Einbindung forstwirtschaftlicher Maßnahmen und Einflussfaktoren in den Entscheidungsprozess ist möglich und wünschenswert. Hierzu müsste die Wissensdatenbank und ggf. die Datenbank der Einflussparameter um forstwirtschaftliche Parameter erweitert werden. Geeignete Grundlagen für die Erweiterung des Entscheidungsprozesses auf forstwirtschaftliche Maßnahmen könnten sich aus den Untersuchungen von [IRRGANG 2002] (WAHMWU-Projekt), von [SCHÜLER 2006] (WaReLa-Projekt) oder von [SCHMIDT et al. 2005] (DBU-Projekt „Hochwasserschutz und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche im Osterzgebirge“) ableiten lassen (siehe auch [FELDWISCH 1999]). Eine konkrete Einbindung konnte in dieser Arbeit jedoch nicht erfolgen.

Die Zielgruppe dieser Maßnahmen- bzw. Fachplanerkarten sind Planer und Entscheidungsträger aus der Wasserwirtschaft und der Siedlungswasserwirtschaft aber auch

Fachleute aus der Landwirtschaft, dem Naturschutz und der Raumplanung. Ein optimaler Nutzen ergibt sich bei kombinierter Betrachtung der Karten mit den entsprechenden Maßnahmenbeschreibungen (z. B. Maßnahmensteckbriefen – siehe Kapitel 7.1). Somit wäre eine Kopplung der Maßnahmensteckbriefe mit den Maßnahmenkarten, beispielsweise in Form einer erweiterten Abfragefunktion in GIS, eine denkbare Erweiterung des hier vorgestellten Planungsinstrumentes.

8 Szenarien

Ein verbesserter Wirkungsnachweis von flächenhaften Hochwasserschutzmaßnahmen war eine Kernfrage dieser Arbeit. Um Aussagen zur Wirkung von Maßnahmen in der Fläche auf das Hochwassergeschehen treffen zu können, müssen die hydrologischen Prozesse und insbesondere die durch die betrachteten Maßnahmen veränderten Prozesse während eines Hochwasserereignisses beschrieben werden. Außerdem muss festgelegt werden, in welchem Maße die betrachteten Maßnahmen im Einzugsgebiet umgesetzt werden können. Zu beiden Aspekten wurden im Rahmen dieser Arbeit Ansätze erarbeitet, die bereits vorgestellt wurden (siehe Kapitel 7) oder im Folgenden beschrieben werden (siehe Kapitel 9).

Die Frage nach der Umsetzbarkeit der in Kapitel 7.1 vorgestellten Maßnahmen mündet in der Festlegung fachlich begründeter Szenarien. Unter einem Szenario wird ein hypothetischer Zustand verstanden, der die Möglichkeit bietet, denkbare Entwicklungen abzuschätzen und deren Auswirkungen zu quantifizieren. Somit erheben die hier entwickelten Szenarien des flächenhaften Hochwasserschutzes auf regionaler Ebene (Einzugsgebietsebene) nicht den Anspruch, unverändert umgesetzt zu werden. Es sollen jedoch fiktive Zukunftszustände entwickelt werden, die in Art und Umfang der vorgeschlagenen Maßnahmen sowie in ihrer zeitlichen Dimensionen realistisch sind.

Die in Kapitel 7.2 erläuterten Maßnahmenkarten und die in Kapitel 6 dargestellte einzugsgebietsweite Ermittlung des Wasserrückhaltepotenzials (Senkenpotenzials) bilden die Grundlage für die Aufstellung realistischer Zukunftsszenarien für das Untersuchungsgebiet. Wie in Kapitel 7 werden die Siedlungsgebiete und die landwirtschaftlichen Flächen auch bei der Szenarienentwicklung separat vorgestellt.

8.1 Referenz-Zustand (-Szenario)

Für das weitere Vorgehen ist es notwendig, dass ein Referenzzustand definiert wird, der die angenommene momentane Form der Bewirtschaftung beschreibt. Dieser wird im Folgenden auch Ist-Zustand genannt, wohlweislich, dass es sich nicht um den tatsächlichen Zustand zu einem bestimmten Datum handelt, und ggf. so auch nie existiert hat.

Für den Bereich der urbanen Gebiete wurde angenommen, dass von den versiegelten wie unversiegelten Flächen der Oberflächenabfluss vollständig über die Kanalisation (im Misch- oder Trennverfahren) oder über die direkte Einleitung dem Gewässersystem zufließt. Diese Annahme muss im Einzelfall nicht zutreffen, da vereinzelt Grundstücke bereits jetzt über Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung verfügen.

Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die konservierende Bodenbearbeitung als betrachtete Maßnahme ausgewählt. Im Gegensatz zur Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten liegen über die Verbreitung der konservierenden Bodenbearbeitung Informationen vor.

Seit Herbst 1993 wird die konservierende Bodenbearbeitung in Sachsen über der Programm „Umweltgerechte Landwirtschaft“ (UL) gefördert. Dies geschah ursprünglich, da die konservierende Bodenbearbeitung ein effektiver Schutz des Bodens gegen Wassererosion ist. Anhand der Statistiken des Förderungsprogramms UL lässt sich nachvollziehen, wie sich die Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung in den verschiedenen Einzugsgebieten der sächsischen Ämter für Landwirtschaft (AfL) entwickelt hat.

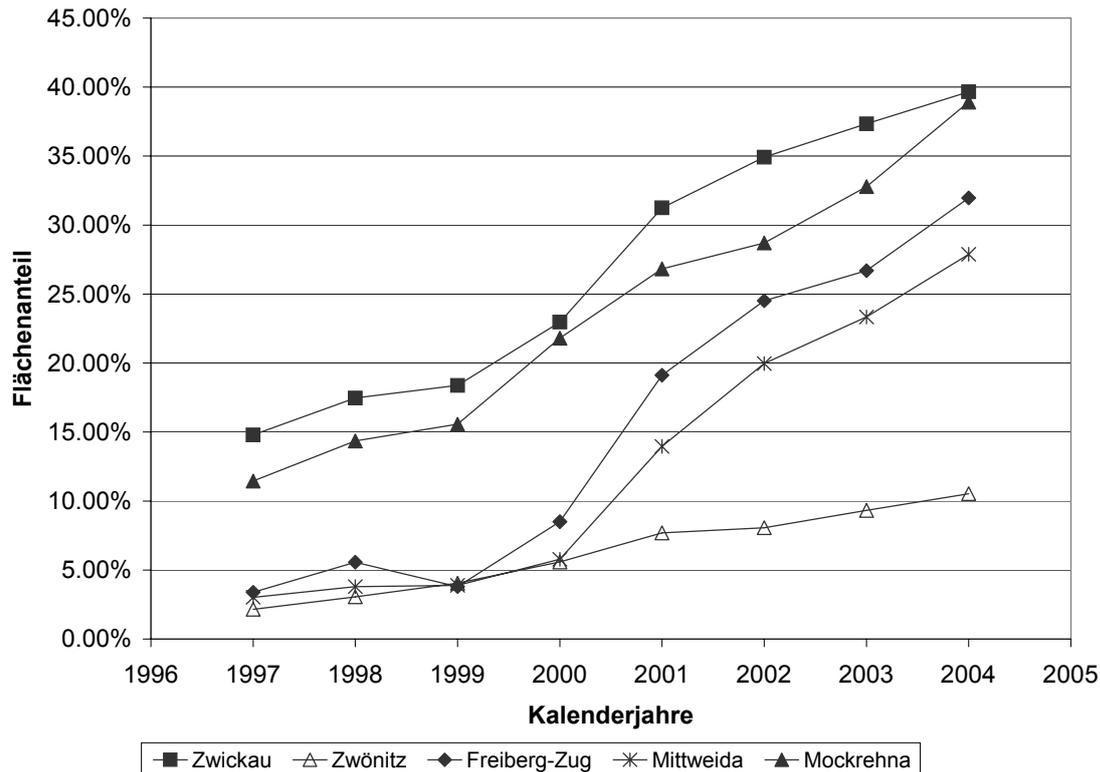


Abbildung 81: Entwicklung der konservierenden Bodenbearbeitung in verschiedenen Einzugsgebieten der Ämter für Landwirtschaft (Quelle: Sächsischer Agrarbericht 1997 - 2004)

Abbildung 81 zeigt, wie sich die konservierende Bodenbearbeitung in Sachsen in den letzten Jahren zunehmend durchgesetzt hat (siehe auch [SCHMIDT 2006]). In den Bereichen einzelner AfLs ist die konservierende Bodenbearbeitung im Begriff, die vorherrschende Form der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung zu werden. Allerdings wird auch deutlich, dass es große Unterschiede zwischen den landwirtschaftlichen Regionen im Einzugsgebiet gibt (siehe Abbildung 82).

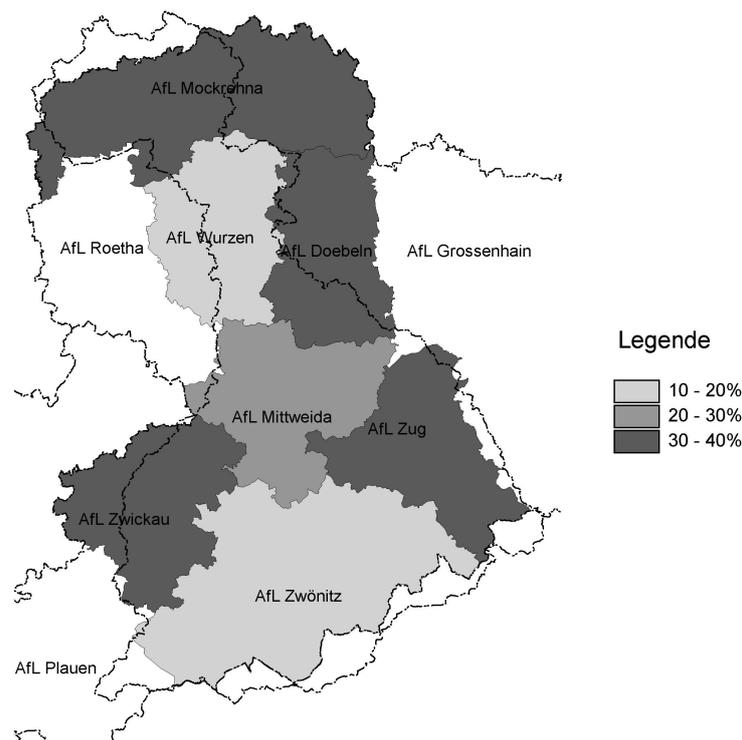


Abbildung 82: Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung in den Einzugsgebieten der Ämter für Landwirtschaft (AfL) im Jahr 2004 (Quelle: Sächsischer Agrarbericht 2004)

Die Bestandsaufnahme für das Jahr 2004 wurde als Grundlage für die Festlegung des Ist-Zustands verwendet. Von den insgesamt 2.361 km² Ackerfläche in den 30 Teileinzugsgebieten (siehe Abbildung 30) sind unter Berücksichtigung der oben vorgestellten Anteile rund 650 km² im Ist-Zustand unter konservierender Bearbeitung.

Im Rahmen der Erstellung der Maßnahmenkarte für die konservierende Bodenbearbeitung wurde erläutert, dass nicht alle Ackerflächen für den vorbeugenden Hochwasserschutz geeignet sind. Ein Vergleich mit der Entscheidungsmatrix (Tabelle 11 in Kapitel 7.2.5) zeigt, dass auf Ackerflächen mit geringem Wasserrückhaltepotenzial und der Tendenz zu schnellen Zwischenabflüssen die konservierende Bodenbearbeitung wohl möglich und aus Sicht des Erosionsschutzes oder anderer Aspekte auch sinnvoll zu sein mag, dass aber die Wirkung für den vorbeugenden Hochwasserschutz vermutlich gering ist.

Unter der Vorgabe, dass nur die Standorte bei der Szenarienerstellung berücksichtigt werden, die als dominanten Abflussprozess die Tiefenversickerung oder sehr langsame Zwischenabflüsse aufweisen, verringert sich der Umfang der geeigneten Ackerflächen auf 1.840 km². Das entspricht 78 % der gesamten Ackerflächen. Werden zusätzlich noch die Ackerflächen von der Betrachtung ausgeschlossen, die ein nur geringes Wasserrückhaltepotenzial (< 40 mm bei einem 72-stündigen Regenereignis) haben, dann reduziert sich das Umsetzungspotenzial für konservierende Bodenbearbeitung mit Hochwasserschutzwirkung auf 1.786 km². Davon sind rund 500 km² (28 %) im Ist-Zustand bereits konservierend bearbeitet (siehe Tabelle 13).

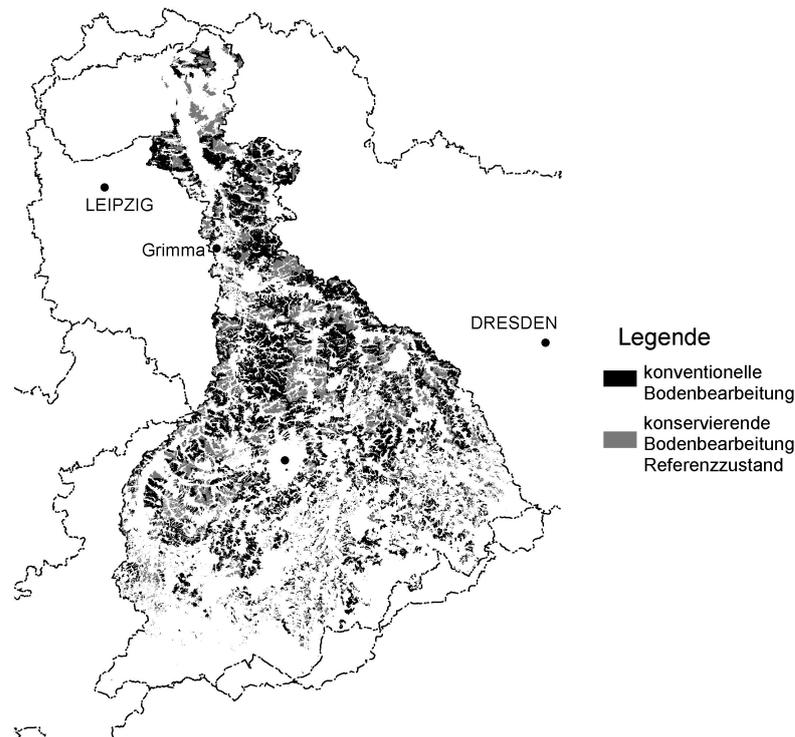


Abbildung 83: Angenommener Ist-Zustand der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Mulde im Jahr 2004

Die genaue Lage der bereits jetzt konservierend bearbeiteten Ackerschläge kann aus der vorliegenden Datengrundlage nicht ermittelt werden. Deshalb stellt die in Abbildung 83 dargestellte Verteilung der konservierenden Bodenbearbeitung eine fiktive Annahme dar, die sich jedoch bezüglich der dargestellten Flächenanteile an den bekannten Anteilen der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde orientiert. Abbildung 83 zeigt nur die 1.785 km² Ackerflächen, die laut Maßnahmenkarte für den Hochwasserrückhalt geeignet sind (vgl. Abbildung 73 und Tabelle 13).

8.2 Szenario für die Siedlungsflächen

Sowohl bei der Erstellung der Szenarien im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft als auch im Bereich der Landwirtschaft wurde jeweils eine Maßnahme ausgewählt und deren mögliche Umsetzung im Einzugsgebiet der Mulde genauer untersucht (siehe Kapitel 7.1).

Für den Bereich der urbanen Gebiete wurde die unvernetzte Form der Regenwasserbewirtschaftung durch Mulden-Rigolen-Elemente (MRE) ausgewählt. Die Maßnahmenkarte für die Siedlungsgebiete weist aus, dass 28 % der bestehenden Siedlungsflächen im Mulde-Einzugsgebiet mit Hilfe unverteilter Mulden-Rigolen-Elemente entwässert werden könnten (siehe Kapitel 7.3.1). Für ein glaubwürdiges Szenario wäre es falsch, davon auszugehen, dass dieses Potenzial vollständig ausgeschöpft, d. h. dass 28 % der Siedlungsfläche abgekoppelt würden.

Unter Abkopplung versteht man dabei, dass bereits bebaute Grundstücke (Bestand) nicht mehr ins Kanalnetz entwässern und vor Ort bewirtschaftet (versickert) werden. Das realisierbare Abkopplungspotenzial bestehender Siedlungsflächen ist weitgehend unabhängig von den bekannten Einflussfaktoren zur Bestimmung der Art der Regenwasserbewirtschaftung. Hier spielen vielmehr die Eigenschaften der einzelnen Grundstücke und Gebäude (Art der Versiegelung, Flächennutzung, Verteilung der versiegelten Fläche, Gebäudegröße, Dachtyp und Entwässerungstechnik) eine

entscheidende Rolle. [BANDERMANN 2001] und [SIEKER et al. 2002a] beschreiben eine Methodik zur Erarbeitung von Abkopplungspotenzialkarten. Diese fand jedoch in dieser Arbeit keine Anwendung, da die genannten Einflussparameter nicht in der notwendigen Detailliertheit flächendeckend vorliegen. Es wurde daher angenommen, dass rund die Hälfte der potenziellen Flächen mittel- bis langfristig mit einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung ausgestattet werden können. Als Planungszeitraum für dieses Ziel können 15 Jahre als realistisch angesehen werden. Die Zielvorgabe, eine 15 %ige Abkopplung in 15 Jahren zu realisieren, wurde bereits in einem Planungsvorhaben im Einzugsgebiet der Emscher verwendet. In diesem Einzugsgebiet ist ein „Abkopplungsprogramm“ mit gleich lautendem Ziel im Jahre 2005 gestartet worden [BECKER et al. 2005] und [BOLD & SPENGLER 2006].

Auch wenn die Auswahl von 15 % der geeigneten Siedlungsflächen nicht auf der Basis der Abkopplungspotenzialkarte erfolgen konnte, war es trotzdem möglich, Kriterien zu formulieren und anzuwenden, die zu einer qualifizierten Auswahl der Flächen führen. In diesem Zusammenhang kommt den so genannten „weichen Kriterien“ des Entscheidungsprozesses, eine entscheidende Bedeutung zu (siehe Kapitel 7.2.4). Unter den Standorten, die mit Hilfe von FLEXT als geeignet für die Bewirtschaftung mit Mulden-Rigolen-Elementen identifiziert wurden, kann anhand dieser Zusatzinformationen eine weitere Differenzierung erfolgen.

In einem ersten Schritt wurden die Flächen aus dem Szenario ausgeblendet, die zwar für MRE geeignet sind, auf denen die Gefällesituation jedoch hohe Baukosten verursachen wird. Außerdem wurden die Flächen von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen, die im Bereich einer 80 m-Zone um die Gewässer liegen. Neben der Gefahr des hydraulischen Kurzschlusses liegt es im Bereich des Möglichen, dass hier eine direkte Ableitung ins Gewässer realisiert werden kann.

In einem zweiten Schritt wurden die Flächen eliminiert, auf denen die momentane Nutzung eine erhöhte Verschmutzung vermuten lässt oder die aufgrund der Bodentypinformationen im Verdacht stehen, zeitweise Stauwasserhorizonte auszubilden. Die Anwendung dieser Filterkriterien reduzierte den betrachteten Flächenanteil von 28 % auf 25 %. Eine weitere Reduktion der betrachteten Flächen auf 15 % musste nach dem Zufallsprinzip erfolgen. Der Versuch, eine zusätzliche Filterung der Flächen über die hydraulische Leitfähigkeit der Standorte zu realisieren, führte zu keinem Erfolg, weil bereits im Rahmen des FLEXT-Entscheidungsprozess die hydraulische Leitfähigkeit als Ausschlusskriterium angewendet wurde. Dies hat zur Konsequenz, dass die Gesamtheit der MRE-Standorte in einem Kf-Wertebereich liegen (zwischen 5 bis 15 mm/h).

Im Ergebnis wurden 87 km² der Siedlungsflächen im Einzugsgebiet der Mulde ausgewählt. Hierbei handelt es sich nicht ausschließlich um versiegelte Flächen. Basierend auf den bereits genannten Untersuchungen zur Ermittlung von Abkopplungspotenzialkarten [BANDERMANN 2001] konnte den verschiedenen Siedlungsklassen des ATKIS-Datensatzes (siehe Kapitel 5.2.2) näherungsweise ein Versiegelungsgrad zugeordnet werden. Danach lassen sich die ausgewählten Flächen des Einzugsgebietes differenzieren in 50 km² versiegelte und 36 km² unversiegelte Flächen. Der mittlere Versiegelungsgrad liegt bei 58 %, wobei dieser je nach Teileinzugsgebiet zwischen 56 % und 60 % variiert. Die Einteilung der abgekoppelten Flächen in versiegelte und unversiegelte Flächen hat aber nicht den Zweck, die unversiegelten Bereiche aus der weiteren Betrachtung herauszunehmen. Es muss an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass von einer Mitbewirtschaftung der unversiegelten Bereiche, im Sinne einer vollständigen Abkopplung der ausgewählten Grundstücke, ausgegangen wird. Dieser Ansatz ist in vielen Untersuchungen nicht enthalten, da häufig den natürlichen Flächen kein Anschluss an das Kanalnetz unterstellt wird, den sie jedoch ohne Zweifel haben.

Die räumliche Verteilung der Siedlungsgebiete im Einzugsgebiet (siehe Abbildung 70) führt zwangsläufig dazu, dass der angestrebte Anteil abgekoppelter Flächen von 15 % nicht in jedem Teileinzugsgebiet erreicht werden kann. Der angestrebte Abkopplungsgrad von 15 % ist ein einzugsgebietsweiter Mittelwert, der sich nach den ausgewiesenen Potenzialen der

Maßnahmenkarte richtet und von Teileinzugsgebiete zu Teileinzugsgebiete zwischen 1 % und 21 % variiert (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Zusammenstellung der abgekoppelten Flächen für der Szenario 15 % Abkopplung

Name des Teilgebietes	Siedlungsfläche gesamt [km ²]	abgekoppelte Fläche [km ²]	Abkopplungsgrad
C 21	7.8	0.3	4%
C 22	69.2	11.7	17%
C 23	18.0	3.1	17%
C 24	14.3	1.8	13%
F 31	10.1	1.5	15%
F 32	8.7	1.5	17%
F 33	9.8	0.1	1%
F 34	19.7	4.1	21%
F 35	9.0	0.1	1%
F 36	19.4	3.1	16%
S 15	27.1	4.5	17%
S 16	22.5	4.0	18%
S 17	14.7	1.3	9%
V 1	25.2	4.3	17%
V 10	15.3	1.8	12%
V 2	15.1	2.3	15%
V 3	18.2	2.8	15%
V 4	14.0	2.3	17%
W 11	13.7	2.5	18%
W 12	16.0	2.5	16%
W 13	32.4	5.0	15%
W 14	42.6	6.2	14%
W 18	10.0	1.5	15%
Z 41	20.8	3.1	15%
Z 42	24.2	4.1	17%
Z 43	17.7	2.1	12%
Z 44	29.0	4.5	16%
Z 45	13.8	1.2	9%
Z 46	8.6	1.6	18%
Z 47	12.1	1.8	15%
Summe/Mittel	579	87	15%

8.3 Szenario für die Ackerflächen

Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die konservierende Bodenbearbeitung als betrachtete Maßnahme ausgewählt und deren mögliche Umsetzung im Einzugsgebiet der Mulde genauer untersucht. Die Gründe hierfür wurden in Kapitel 7.1 dargelegt. Zum einen hat die Maßnahmenkarte für die landwirtschaftlichen Flächen eine sehr großes Umsetzungspotenzial für die konservierende Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet ausgewiesen, was auf den hohen Anteil an Ackerflächen insbesondere im Mittel- und Unterlauf der Mulde in Verbindung mit nachgewiesenen großen Senkenpotenzialen zurückzuführen ist (siehe Kapitel 7.3.2). Zum anderen handelt es sich bei dieser Art der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung um eine allgemein anerkannte Bewirtschaftungsform, die dem Landwirt weiterhin eine wirtschaftliche, ackerbauliche Nutzung ermöglicht und deren zunehmende Anwendung eine gute Grundlage für ein realistisches Szenario darstellt.

Neben dem großen Umsetzungspotenzial und der hohen Akzeptanz spricht für konservierende Bodenbearbeitung die Tatsache, dass die Implementierung der konservierenden Bodenbearbeitung in die sächsische Landwirtschaft seit geraumer Zeit sowohl praktisch als auch wissenschaftlich vom der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft begleitet wird.

Mit Blick auf die Entwicklung der konservierenden Bodenbearbeitung in den vergangenen Jahren (17 % mehr konservierende Bodenbearbeitung in 7 Jahren – siehe Abbildung 81), ist es keine unrealistische Annahme, wenn von einer weiteren Zunahme der konservierenden Bodenbearbeitung in der sächsischen Landwirtschaft ausgegangen wird.

Als Zielvorgabe für das hier vorgestellte Szenario wird ein Anstieg des Flächenanteils der konservierenden Bodenbearbeitung um 20 % in den nächsten 10 Jahren festgelegt. Je nach Lage der geeigneten Ackerflächen könnte dann der Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung in den Regionen zwischen 20 % und 87 % liegen (siehe Tabelle 13). Im gesamten Einzugsgebiet der Mulde kämen 350 km² konservierend bearbeitete Ackerflächen hinzu. Bezogen auf die laut Maßnahmenkarte geeigneten Ackerflächen läge der Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung dann bei 48 %. Betrachtet man alle Ackerflächen des Einzugsgebietes unabhängig von ihrer Bedeutung für den Hochwasserschutz, so handelt es sich lediglich um eine Steigerung des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung um 15 %.

In Abbildung 84 ist dargestellt, welche Verteilung von konservierend und weiterhin konventionell bearbeiteten Ackerflächen im Einzugsgebiet der Mulde für die hydrologische Modellierung angenommen wurde.

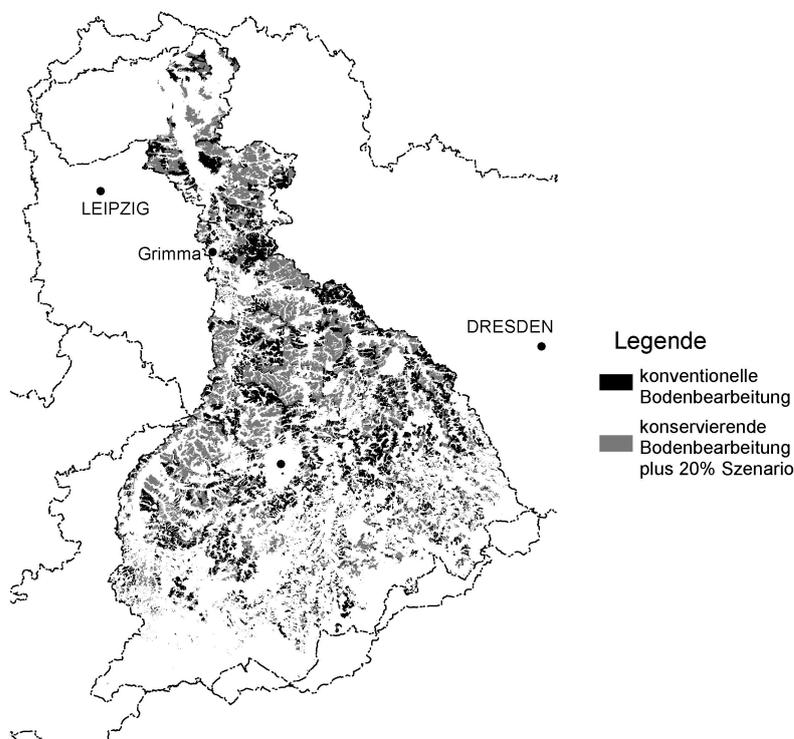


Abbildung 84: Zukunftsszenario der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Mulde (plus 20 %)

Bei der Auswahl der zusätzlich konservierend bearbeiteten Flächen wurden zwei Methoden angewandt. Beim ersten Ansatz wurde unter Beachtung der Eignung der Flächen für den

Wasserrückhalt nach dem Zufallsprinzip 354 km² Ackerfläche selektiert. Beim zweiten Ansatz wurden bevorzugt die Flächen herausgefiltert, die nach Analyse des Wasserrückhaltepotenzials (siehe Kapitel 6) ein besonders großes Speichervermögen besitzen. In Tabelle 14 A) ist aufgeführt, welche Böden insgesamt auf den betrachteten 1.786 km² der Mulde-Einzugsgebietes vertreten sind. Der Vergleich mit Tabelle 14 B) zeigt, dass bei der gezielten Flächenauswahl die Standorte auf konservierende Bodenbearbeitung umgestellt wurden, die ein besonderes gutes Speicherpotenzial besitzen und die Verbesserung zum IST-Zustand besonders groß ist (siehe Tabelle 23).

Die räumliche Verteilung der Ackerflächen im Einzugsgebiet und die Selektion der Ackerflächen nach ihrer Eignung der Flächen für den Wasserrückhalt führt zwangsläufig dazu, dass der angestrebte Anstieg der konservierend bearbeiteten Böden um 20 % nicht in jedem Teileinzugsgebiet erreicht werden kann. Der Zuwachs der konservierenden Bodenbearbeitung von 20 % ist ein einzugsgebietsweiter Mittelwert, der sich nach den ausgewiesenen Potenzialen der Maßnahmenkarte richtet und von Teileinzugsgebiete zu Teileinzugsgebiete zwischen 0 % und 76 % variiert (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Zusammenstellung der konservierend bearbeiteten Ackerflächen im IST-Zustand und beim Szenario plus 20 % (Flächen selektiert nach Senkenpotenzial) für die einzelnen Teileinzugsgebiete der Mulde

Name des Teilgebietes	Gesamtfläche geeigneter Ackerflächen [km ²]	konservierend bearbeitete Ackerflächen im IST-Zustand [km ²]	Anteil der konservierend bearbeiteten Ackerflächen IST-Zustand	konservierend bearbeitete Ackerflächen Szenario plus 20% [km ²]	zusätzlich konservierend bearbeitete Ackerflächen [km ²]	relative Zunahme der konservierend bearbeiteten Ackerflächen	Anteil der konservierend bearbeiteten Ackerflächen Szenario plus 20%
C21	47.3	9.8	21%	20.8	11.0	23%	44%
C22	42.9	12.3	29%	16.4	4.2	10%	38%
C23	50.2	4.0	8%	13.7	9.7	19%	27%
C24	36.0	1.3	4%	16.2	14.9	41%	45%
F31	46.4	13.0	28%	15.1	2.1	5%	33%
F32	35.6	15.1	42%	21.8	6.8	19%	61%
F33	66.2	21.2	32%	21.9	0.7	1%	33%
F34	49.1	18.3	37%	18.3	0.0	0%	37%
F35	35.4	11.3	32%	11.3	0.0	0%	32%
F36	122.8	33.5	27%	49.3	15.8	13%	40%
S15	40.3	9.8	24%	9.8	0.0	0%	24%
S16	12.9	2.0	16%	3.0	1.0	8%	23%
S17	2.9	0.4	12%	0.8	0.5	17%	29%
V1	189.0	75.5	40%	126.3	50.8	27%	67%
V10	142.7	30.8	22%	89.5	58.6	41%	63%
V2	64.5	9.8	15%	30.4	20.6	32%	47%
V3	96.6	20.7	21%	30.7	9.9	10%	32%
V4	90.2	32.9	36%	70.1	37.1	41%	78%
W11	44.6	11.0	25%	19.7	8.7	20%	44%
W12	63.6	29.8	47%	55.6	25.8	41%	87%
W13	64.5	30.2	47%	35.4	5.3	8%	55%
W14	54.0	18.1	33%	23.0	5.0	9%	43%
W18	24.4	10.6	43%	10.6	0.0	0%	43%
Z41	97.8	41.5	42%	70.9	29.4	30%	72%
Z42	73.5	13.5	18%	18.5	5.1	7%	25%
Z43	27.3	4.1	15%	5.4	1.3	5%	20%
Z44	47.1	6.4	14%	11.1	4.7	10%	23%
Z45	71.6	12.3	17%	18.1	5.8	8%	25%
Z46	13.9	0.1	1%	10.6	10.6	76%	77%
Z47	32.4	3.6	11%	12.3	8.7	27%	38%
	1786	503	28%	857	354	20%	48%

Tabelle 14: Verteilung der Bodenklassen, bezogen auf die Gesamtfläche der geeigneten Ackerflächen (1.786 km²) (A), bezogen auf die gezielt ausgewählten Ackerflächen des Szenarios „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“ (350 km²) (B)

A)

Bodenklasse	Bodenklassen der Ackerflächen im IST-Zustand
T13	2%
T14	14%
T3	4%
T3a	17%
T4	2%
T5	14%
T6	1%
T7	37%
T9	9%

B)

Bodenklasse	Bodenklassen der Flächen mit geänderter Bodenbearbeitung
T3a	14%
T7	62%
T9	24%

8.4 Weitere Szenarien und Kombinationen von Szenarien

Weitere denkbare Szenarien, die im Folgenden teilweise modelltechnisch abgebildet wurden, sind:

- Abkopplung aller Siedlungsflächen die mit Mulden- Rigolen-Elementen bewirtschaftet werden könnten.
- Die 100% Umstellung aller geeigneter Standorte auf konservierende Bodenbearbeitung.
- Die Rückkehr zur konventionellen Bodenbearbeitung auf allen Ackerflächen.

8.5 Vorschlag zur Verbesserung der Szenarienerstellung aus hydrologischer Sicht

Bei der Entwicklung der oben vorgestellten Szenarien wurde auf die Ergebnisse der Maßnahmenarten sowie des Wasserrückhaltepotenzials zurückgegriffen. Eine weitere Möglichkeit zur Priorisierung geeigneter Maßnahmenstandorte könnte durch das Einfließen der Konzentrationszeit der einzelnen Teileinzugsgebiete erfolgen (siehe Abbildung 85). Die Konzentrationszeit ist ein Ergebnis bei der Bestimmung des Abflusskonzentrationsverhaltens (siehe Kapitel 5.2.3.1). Vereinfachend kann gesagt werden, dass die Hochwassergefährdung eines Teileinzugsgebietes mit kleiner Konzentrationszeit größer ist, weil mit kurzen Vorwarnzeiten und schnell ansteigenden Wasserständen gerechnet werden muss. Durch die Verknüpfung dieser Information mit dem Senkenpotenzial könnten Flächen als besonders wertvoll für den Hochwasserschutz in der Fläche herausgefiltert werden, wenn sie über viel Speicherpotenzial verfügen und gleichzeitig in hydrologisch schnell reagierenden Bereichen liegen.

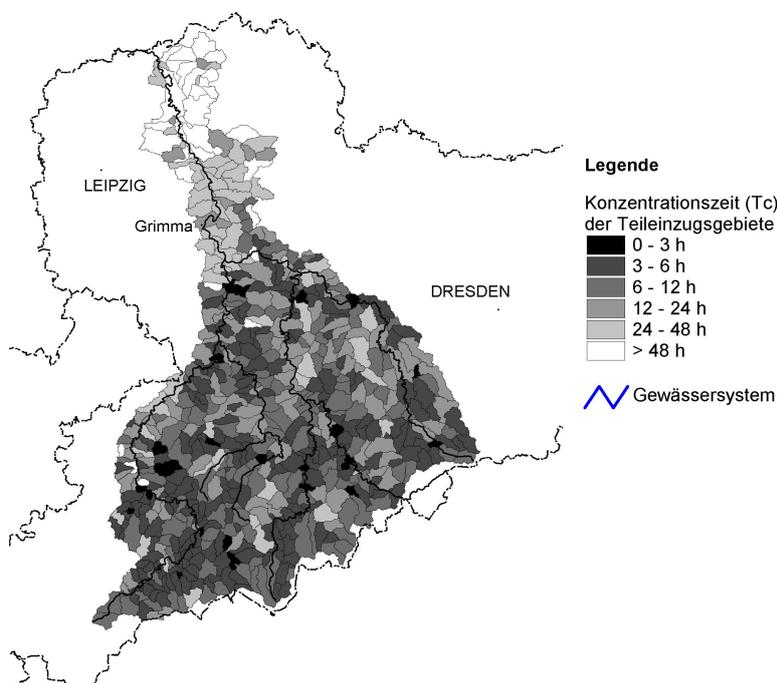


Abbildung 85: Mittlere Konzentrationszeit der Teileinzugsgebiete der Mulde

9 Hydrologische Modellierung

Die modelltechnische Abbildung der Szenarien mit Hilfe eines Niederschlags-Abfluss-Modells dient in dieser Arbeit in erster Linie dem Nachweis der Wirksamkeit der betrachteten Hochwasserschutzmaßnahmen. Die Ergebnisse sollen den Nutzen der Maßnahmen quantifizieren und die Basis für eine zukünftige Optimierung des Hochwasser-Flächenmanagements bilden.

Für die Wahl des geeigneten hydrologischen Modells können generell folgende Kriterien formuliert werden: Zweck der Modellierung, Größe des Untersuchungsgebietes, Betrachtungszeitraum, betrachtete Prozesse, Datengrundlage [NIEHOFF 2001], [DYCK & PESCHKE 1995]. Auf alle hier genannten Kriterien wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits eingegangen (siehe Kapitel 3 und 5). Von besonderem Gewicht für die Modellierungsergebnisse ist die Güte der Daten und die an die Fragestellung angepasste Abbildung der hydrologischen Prozesse. Im Folgenden wird erläutert werden, welche Ansätze und Parametrisierungen gewählt wurden, um die Prozesse der Abflussbildung bei dezentraler Regenwasserbewirtschaftung und konservierender Bodenbearbeitung „angepasst“ abzubilden.

Im Idealfall leitet sich der Modellierungsmaßstab, die damit verbunden Modellvorstellung und letztendlich das Modell (das diese Modellvorstellungen umsetzt) aus den simulierten Prozessen ab. [BLÖSCHL & SIVAPALAN 1995] weisen den verschiedenen hydrologischen Prozessen charakteristische Raum und Zeitskalen zu, denen zufolge die Prozesse auf der Landoberfläche in der Raumskala 10 – 10.000 m² bzw. 1 min bis 1 Stunde stattfinden (siehe auch [NIEHOFF 2001]). [BECKER 1986] der diesen Bereich als Mikro- bzw. untere Mesoskala definiert hat, bezeichnet die Raumeinheiten dieser Ebene als Hydrotope mit annähernd einheitlichen hydrologischen Verhältnissen. Diese Hydrotope werden in verschiedenen Modellen auch als Elementarflächen bezeichnet [BECKER & LAHMER 1999], [HYDROTEC 2002]. In der Landschaft können diese Elementarflächen landwirtschaftliche Schläge oder homogene Siedlungsgebiet sein.

Auch bei sorgfältiger Beachtung der oben genannten Kriterien bleibt der Widerspruch bestehen, der bei einzugsgebietsweiter Betrachtung des Hochwassergeschehens zwischen Beobachtungsskala und Modellierungsskala besteht. Während die Abflussbildungsprozesse auf der Mikroskala beobachtet und im Modell auch nur so beschrieben werden können, beziehen sich die Daten und Teile der Modellvorstellungen auf die Mesoskala (nach [BECKER 1986]). U. a. [BLÖSCHL & SIVAPALAN 1995] haben diese Skalenproblematik beschrieben und darauf hingewiesen, dass für größere Maßstabsebenen die prozessnahen Gleichungen zur Beschreibung der Infiltration und des Wassertransports im Boden noch nicht gefunden wurden (siehe auch [NIEHOFF 2001]).

9.1 Modellauswahl

Unabhängig von der Skalenproblematik, der alle großräumigen Untersuchungen bis jetzt unterliegen (z.B. [NIEHOFF 2001]), hat [FELDWISCH 1999] folgende Kriterien für Modelle formuliert, die Landnutzungs- oder Bewirtschaftungseinflüsse nachzubilden versuchen (siehe auch [DWA 2006] oder [BRONSTERT 1994]).

- Demnach muss das Modell die wichtigsten Teilkomponenten des Wasserhaushaltes abbilden. Hierzu gehört neben den Prozessen an der Oberfläche und im Boden (Abflussbildung) auch die Abflusskonzentration. Häufig wird diese Modelleigenschaft auch mit dem Begriff prozessorientiert umschrieben.
- Das Modell muss die räumliche Variabilität des Einzugsgebietes und der klimatischen Verhältnisse wiedergeben können. Hierzu muss eine Gliederung des Einzugsgebietes nach den Raster- bzw. Polygonverfahren erfolgen [BECKER & KLEEBERG 1999]. Die

Bedeutung dieser Modelleigenschaft wird in Kapitel 10.1.3 noch einmal anhand eines Beispiels verdeutlicht.

- Das Modell muss die zeitliche Dynamik der Hochwasserereignisse abbilden können (siehe Kapitel 5.3.1).
- Und nicht zuletzt muss das Modellkonzept die Abbildung ganzer Einzugsgebiete ermöglichen.

[NIEHOFF 2001] formuliert darüber hinaus die Anforderung, dass im Modell die Anfangsbedingungen definierbar sein müssen.

Unter Beachtung der hier vorgestellten Anforderungen an das Modell wurde das Modell STORM [IPS 2006] ausgewählt.

Während für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft die Eignung des Modells STORM feststand, musste mit Blick auf die konservierende Bodenbearbeitung eine Erweiterung des Modells erfolgen.

Um den zusätzlichen Wasserrückhalt konservierend bearbeiteter Ackerflächen gegenüber gepflügten Flächen modelltechnisch darstellen zu können, müssen die Verschlämmung und die Infiltration über vertikale Makroporen im Modell berücksichtigt werden (siehe Kapitel 7.1.2). Da das Modell STORM diese Prozesse nicht in ausreichend physikalisch begründeter Form abbilden konnte, wurde im Rahmen dieser Arbeit und in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH das Modell hierzu ertüchtigt. Dabei dienten Modellkonzepte aus bestehenden Programmen als Ausgangspunkt. So hat [NIEHOFF 2001] für das Modell WASIM mit Topmodel-Ansatz [SCHULLA & JASPER 1999] Modellansätze für die Verschlämmung und den vertikalen Makroporenfluss entwickelt.

Andere verfügbare Modelle wie beispielsweise Modell EROSION 2D/3D [SCHMIDT et al. 1996] waren bereits in der Lage, die konservierende Bodenbearbeitung befriedigend abzubilden. Darüber hinaus wäre es möglich, mit diesem Modell die hydrologische Wirkung von Maßnahmen zur Flurgestaltung (Maßnahmengruppe C in Tabelle 8) darzustellen [RÜTER 2007a]. Hier besteht jedoch das Problem, dass EROSION 2D/3D für die Anwendung auf der Hangskala konzipiert ist und somit für die Modellierung ganzer Einzugsgebiete nicht in Frage kommt.

Eine Alternative zum Modell STORM, die sich in Zukunft bieten könnte, ist eine Weiterentwicklung des Modells WASIM-ETH mit der Richards-Gleichung. In Zusammenarbeit zwischen dem LfUG und den Entwicklern wurde in WASIM die Möglichkeit geschaffen, Verschlämmung und bevorzugte Fließwege abzubilden. Das Fehlen dieser Prozesse hatte [NIEHOFF 2001] kritisiert und aus diesem Grund die Anwendung von WASIM-ETH mit Richards-Gleichung verworfen.

Mit Hinweis auf [NIEHOFF 2001], [FELDWISCH 1999], [KRAHE et al. 2004] oder das „Register of Ecological Models“ [UNIVERSITÄT KASSEL & GSF 2007] wird an dieser Stelle darauf verzichtet, auf weitere hydrologische Modelle einzugehen.

9.2 Modellkonzept

9.2.1 Kurzvorstellung des hydrologischen Modells STORM

Das Modell Storm ist ein deterministisches, flächendetailliertes, konzeptionelles Modell, dessen Modellansätze als physikalisch begründet bezeichnet werden können.

Seine räumliche Gliederung basiert auf einer Einteilung des betrachteten Einzugsgebietes in Polygone ähnlicher Eigenschaftskombination - die bereits erwähnten Elementarflächen [BECKER & KLEEBERG 1999]. Auf der Ebene der Elementarflächen werden die Prozesse der Abflussbildung simuliert. Hierbei unterscheidet das Modell grundsätzlich die Abflussbildung versiegelter und unversiegelter Flächen. Die Abflussbildung „natürlicher“ Flächen findet im Rahmen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung statt (siehe Kapitel

9.2.2). Dagegen wird für die versiegelten Flächen weiterhin der Abflussbildungsansatz nach der Grenzwertmethode angewendet. Maßgebend für die geometrische Einleitung sind die Informationen zur Landnutzung und den Bodeneigenschaften.

Die Elementarflächen werden zu hydrologischen Einheiten, so genannten Teilgebieten, zusammengefasst. Auf dieser Ebene werden die Prozesse der Belastungsbildung und Abflusskonzentration gesteuert. In Tabelle 15 sind die verwendeten Simulationsansätze aufgeführt:

Tabelle 15: Verwendete Simulationsansätze

Hydrologischer Prozess	Simulationsansatz
Schneeakkumulation und –schmelze	Snow-Compaction-Verfahren
Regionalisierung der Niederschläge	THIESSEN-Verfahren
Interzeption	Überlaufmodell
Aktuelle Evapotranspiration	Ansatz nach OSTROWSKI
Abflussbildung auf versiegelten Flächen	Grenzwertmethode
Abflusskonzentration für den Oberflächenabfluss und horizontalen Makroporenfluss	Zeit-Flächen-Funktion plus Einzelspeicher (Clark-Modell)
Abflusskonzentration für den Interflow und den Basisabfluss	Linearer Einzelspeicher
Abflusskonzentration für versiegelte Flächen	Speicher-kaskade
Abflusstransport im Gerinne	Kalinin-Miljukov-Verfahren
Abflusstransport in Kanälen	Reine Translation

Der Niederschlag, die Temperatur sowie die potentielle Evapotranspiration werden als Zeitreihen eingelesen. Alternativ kann der Temperatur und Verdunstung vereinfachend ein mittlerer Jahresgang der täglichen Verdunstungsrate zugrunde gelegt werden.

Eine ausführliche Beschreibung des Modells mit Informationen zur Handhabung ist in [IPS 2006] enthalten.

9.2.2 Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells in STORM

Die Abbildung des Bodenwasserhaushaltes und damit auch der Abflussbildung auf durchlässigen Flächen im Modell STORM basiert in großen Teilen auf dem von [OSTROWSKI 1982] entwickelten, physikalisch begründeten Bodenspeichermodell auf Grundlage der Massenerhaltung (siehe auch [SCHRÖDER 2000]). Der Boden wird als Speicherelement betrachtet, der sich aus einer oder mehreren Schichten zusammensetzt. Dabei sind die Zuflüsse und Abflüsse aus diesem Speicher Funktionen des Speicherinhalts, d.h. der aktuellen Bodenfeuchte. Der Bodenfeuchte kommt eine zentrale Rolle in dem Modelkonzept zu.

Im Einzelnen verfügt der Bodenspeicher jeder Elementarfläche über die folgenden Zu- bzw. Abflüsse:

- Infiltration an der Oberfläche
- Perkolation durch die Bodenschichten
- Interflow in der Matrix der Bodenschichten
- sowie der laterale Makroporenfluss (hypodermischer Abfluss)

Tabelle 16: Verwendete Simulationsansätze des Bodenwasserhaushalts

Vertikale hydrologische Prozesse	Simulationsansatz
Infiltration	Ansatz nach HOLTAN/ OSTROWSKI
Perkolation	Ansatz von BEAR
Interflow	wie Perkolation
Lateraler Makroporenfluss	Überlaufmodell

Zur Beschreibung der Zu- bzw. Abflussfunktionen des Bodenwasserhaushaltes verwendet das Modell STORM so genannte charakteristische Kennlinien, mit denen das Modell auch die Befüllung und Entleerung anderer Speicherkomponenten steuert. In Tabelle 16 sind die Simulationsansätze aufgeführt, die die Grundlage für die Beschreibung der nicht-linearen Prozesse der Wasserbewegung im Boden sind.

Aus den Teilprozessen Perkolation, Interflow, lateraler Makroporenfluss und Oberflächenabfluss (als Resultierende der vertikalen Prozesse) bilden sich pro Teileinzugsgebiet Abflusskomponenten, die entsprechend den genannten Ansätze (Tabelle 15) retendiert werden.

Im Folgenden werden Modellmodifikationen oder Modellerweiterungen vorgestellt, die insbesondere der Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung dienen. Diese Modellanpassungen repräsentieren die Prozesskenntnis, die sich aus den in Kapitel 7.1.2 vorgestellten Untersuchungen ableiten.

Um die Perkolation des Wassers aus den verschiedenen Bodenschichten und damit die Bestimmung zusätzlich verfügbaren Speicherraumes realistischer abbilden zu können, wurde die Exfiltrationskennlinie in Abhängigkeit der Bodenfeuchte neu definiert. Anhand der Parameter der Wasserretention lassen sich durch die Gleichung nach VanGenuchten/MUALEM ([MUALEM 1976], [VAN GENUCHTEN 1980], (Gl. 3) für verschiedene Matrixpotenziale (in cm) die ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten bestimmen. Parallel dazu erfolgte für jede Bodenart und Landnutzung (differenziert über Lagerungsdichten und Humusgehalte) die Umrechnung der Matrixpotenziale in die dazugehörigen Wassergehalte nach [VAN GENUCHTEN 1980]. Im Vergleich zum ursprünglich in STORM verwendeten Ansatz von BEAR (siehe (Gl. 4) führt die Verwendung des Ansatzes von Van GENUCHTEN/MUALEM dazu, dass eine mengenmäßig relevante Exfiltration erst bei höheren Wassergehalten einsetzt (siehe Abbildung 86). Das bedeutet, dass der Entwässerungsprozess später einsetzt und die Wasserretentionseigenschaften des Bodens realistischer eingeschätzt werden.

$$K(h) = K_s \frac{(1 - |\alpha h|^{n-1} (1 + |\alpha h|^n)^{-m})^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{ml}} \quad l=0,5 \quad m=1-1/n$$

(Gl. 3)

mit:

h = Saugspannung (cm)

K_s = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (cm/d)

l, n, m, α = van-Genuchten-Parameter

$$K(h) = K_s * \left(\frac{\theta(h) - 0,7 * \theta_{pf=1,8}}{\theta_s - 0,7 * \theta_{pf=1,8}} \right)^3$$

(Gl. 4)

mit:

Θ_s = Bodenfeuchte bei Sättigung

Θ_{pf=1,8} = Bodenfeuchte bei Feldkapazität

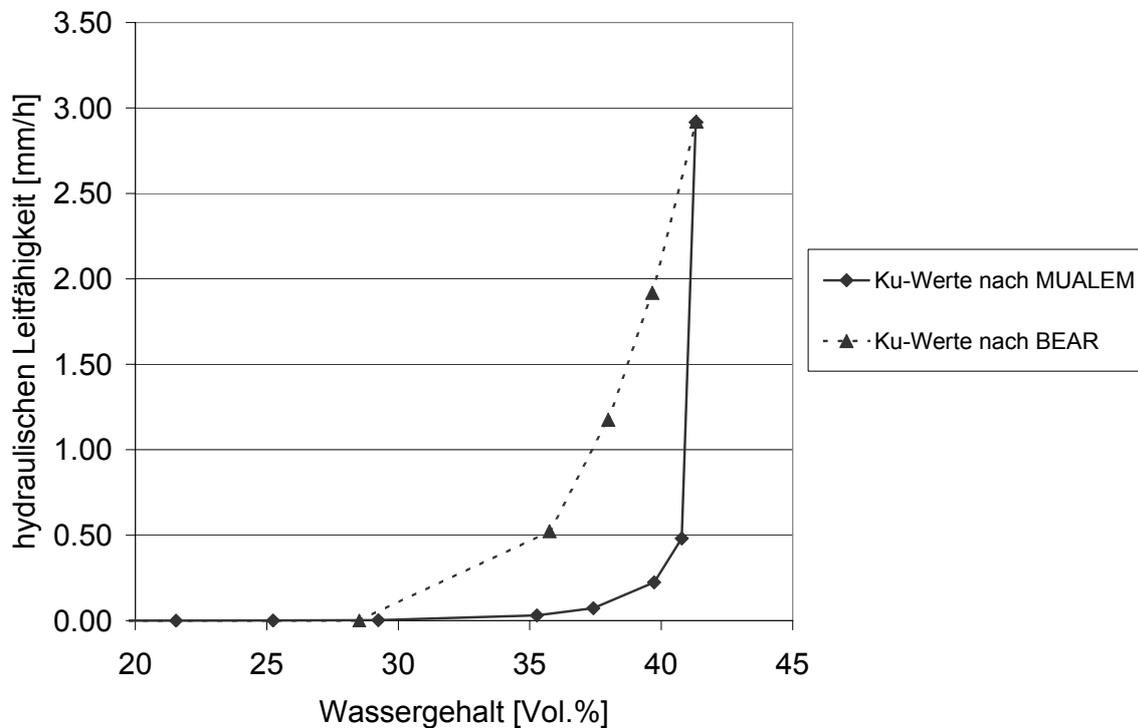


Abbildung 86: Kennlinien der Exfiltration; Bodenart Ut2; Feldkapazität: 35.8 % Wassergehalt; Gesamtporenvolumen: 41,3 % Wassergehalt; konservierende Bodenbearbeitung

Des Weiteren wurde die Infiltrationskennlinie dahingehend verändert, dass sich bei zunehmender Sättigung des Bodens die Infiltration dem Kf-Wert nähert. In dem ursprünglichen Ansatz war eine „Endinfiltrationsrate“ von Null verwendet worden. Mit der Implementierung der Verschlämmung kann von dieser pauschalen Absenkung des Infiltrationsvermögens Abstand genommen werden.

Die Informationen zur Parametrisierung der hier genannten Ansätze sind in Kapitel 5 zu finden oder werden im Folgenden vorgestellt.

Wie in Kapitel 7 werden die Siedlungsgebiete und die landwirtschaftlichen Flächen auch bei der Modellierung separat vorgestellt.

9.3 Modellierung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung

Nachdem in Kapitel 8.2 das betrachtete Siedlungsszenario für das Einzugsgebiet der Mulde erläutert wurde, soll nun vorgestellt werden, welche Eigenschaften die Mulden-Rigolen-Elemente haben müssen, um den gewünschten Entwässerungskomfort in der Siedlungswasserwirtschaft zu gewährleisten. Im Arbeitsblatt der DWA zur Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser [DWA-A 138 2005] werden generell zwei Verfahren zur Bemessung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen vorgeschlagen - das vereinfachte Verfahren mittels statistischer Niederschlagsdaten und das Verfahren mittels Niederschlag-Abfluss-Langzeitsimulation. [SIEKER 2001b] und [SCHNEIDER 1999] diskutieren die beiden Verfahren und geben die Empfehlung, das Nachweisverfahren mittels Langzeitkontinuumssimulation vorzuziehen.

Generelle Zielgröße der Bewirtschaftung ist, die ober- und unterirdischen Speichervolumina der Elemente insgesamt so zu bemessen, dass die Anlagen im Durchschnitt höchstens einmal in 5 Jahren überlastet werden. Diese in [SIEKER et al. 2006a] oder [DWA-A 138 2005] empfohlene Überlastungshäufigkeit von $n = 0,2$ wird in Anlehnung an die Überlastungshäufigkeit existierender konventioneller Trenn- oder Mischsysteme gewählt, deren Überstauhäufigkeit erfahrungsgemäß zwischen $n = 0,5$ und $n = 0,33$ liegt. Da jedoch bei Versickerungsanlagen die Durchlässigkeit des natürlich anstehenden Bodens nur in Grenzen genau bestimmen werden kann, ist ein Sicherheitszuschlag im Sinne der verringerten Überlastungshäufigkeit zu empfehlen.

Ein weiterer bisher wenig beachteter Aspekt kommt hinzu: Wenn ein Grundstück dezentral so bewirtschaftet wird, dass unterhalb der Überlastungsgrenze von $n = 0,2$ kein Oberflächenabfluss vom Grundstück fließt, muss diese Vorgabe sowohl für den versiegelten wie für den unversiegelten Teil des Grundstücks gelten, d. h., auch die unversiegelten Anteile eines Grundstücks müssen durch entsprechende Dimensionierung der MRE so bewirtschaftet werden, dass für sie ebenfalls das Überlastungskriterium von $n = 0,2$ eingehalten wird. Naturgemäß haben jedoch unversiegelte Flächen eine eigene Versickerungsfähigkeit, die bei der Bemessung eventuell zusätzlich erforderlicher Speichervolumina zu berücksichtigen ist.

Die notwendigen Speichervolumina zur Einhaltung der vorgegebenen Überlastungshäufigkeit von $n = 0,2$ wurden mit dem Modell STORM nach dem Verfahren der Langzeitsimulation berechnet. Maßgebliche Einflussgrößen sind dabei die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf-Wert) des anstehenden Bodens und die örtliche Niederschlagscharakteristik, die nicht allein durch die unterschiedlichen Jahresniederschläge sondern auch durch die unterschiedlichen Häufigkeiten und Intensitäten der einzelnen Niederschlagsereignisse bestimmt wird.

Im Folgenden werden die notwendigen Speichervolumina dargestellt, die sich unter Nutzung der langjährigen kontinuierlichen Niederschlagsreihen der Station Dresden ergeben haben. Sie werden für zwei Testflächen von jeweils 0,1 ha für versiegelte und unversiegelte Flächen berechnet. Für die Versickerungsmulde wurde dabei jeweils eine Überlaufhäufigkeit von $n = 1$ zugrunde gelegt, d. h., dass der Überlauf der Mulde in die Rigole einmal jährlich in

Anspruch genommen wird. Das Gesamtelement wird jedoch nur einmal in 5 Jahren überlastet.

Tabelle 17 zeigt im oberen Teil die Kennwerte der Niederschlagsstation und den kf-Wert des anstehenden Bodens, die der Dimensionierung der MRE zugrunde liegen. Im unteren Teil sind die berechneten Speichervolumina der Mulden und Rigolen für die versiegelte Fläche und für die unversiegelte Fläche dargestellt. Demnach müssen für die versiegelte Fläche rund 52 m³ Speichervolumen pro 1.000 m² angeschlossene Flächen (520 m³/ ha) in den Mulden-Rigolen-Elementen bereitgehalten werden. Zusätzlich muss für die Bewirtschaftung der unversiegelten Flächen 14,6 m³ Mulden- und Rigolenvolumens pro 0,1 ha. angeschlossene Fläche bzw. 146 m³ pro ha zur Verfügung stehen.

Die Dimensionierung für alle MRE des Einzugsgebietes kann bzw. muss sich auf die hier dargestellten Annahmen beschränken. Sie kann sich auf den einen angenommenen Kf-Wert ($2,78 \cdot 10^{-6}$ m/s oder 10 mm/h) reduzieren, da die für MRE geeigneten Standorte eine relativ einheitliche hydraulische Leitfähigkeit aufweisen (siehe Kapitel 7.2.4). Andererseits muss sich mit dieser Dimensionierung begnügt werden, da lediglich für die Niederschlagsstation Dresden ausreichend lange historische Regendaten für die Langzeitsimulation zur Verfügung standen.

Tabelle 17: Randbedingungen der Dimensionierung und Speichervolumina der Testflächen

Name der Niederschlagsstation	Dresden
Beginn der Messreihe	1951
Ende der Messreihe	2004
Anzahl der Beobachtungsjahre [a]	54
mittl. Jahresniederschlagshöhe [mm/a]	725
hydraulische Leitfähigkeit (kf-Wert) [m/s]	$2,78 \cdot 10^{-6}$

			m ³ /1000m ²	m ³ /ha
erforderliche Speichervolumina	versiegelte Testfläche	Muldenvolumen	18.16	182
		Rigolenvolumen	33.44	334
		Speichervolumen des Mulden-Rigolen-Elements	51.60	516
	unversiegelte Testfläche	Muldenvolumen	2.88	29
		Rigolenvolumen	11.76	118
		Speichervolumen des Mulden-Rigolen-Elements	14.64	146

9.4 Modellierung der Konservierenden Bodenbearbeitung

Um die hydrologische Wirksamkeit der konservierenden Bodenbearbeitung prognostizieren zu können, ist eine Kenntnis der genauen bodenphysikalischen Wirkungen zwingend erforderlich. In Kapitel 7.1.2 wurde die Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf

den Abflussbildungsprozess bereits beschrieben und diskutiert. Es wurde herausgearbeitet, dass die Verringerung der Oberflächenverschlammung und die erhöhte vertikale Makroporosität entscheidende Prozesse sind, die das verbesserte Infiltrationsvermögen dieser Bodenbearbeitungsform begründen.

Unabhängig davon bestand die Aufgabe, das unterschiedliche Wasserretentionsverhalten mehrjährig und dauerhaft konservierend oder konventionell bearbeiteter Böden zu beschreiben und hieraus für das konzeptionelle Modelkonzept eine adäquate Parametrisierung zu finden.

9.4.1 Parametrisierung der Bodenarten

Die hier vorgestellte Methodik sowie die sich daraus bestimmten Parameter basieren auf den Untersuchungen von [ZACHARIAS & BOHNE 2007; ZACHARIAS & WESSOLEK 2007], die u.a. im Rahmen des DBU-Projektes-Mulde durchgeführt wurden.

Ziel dieser Parametrisierung ist es, für die konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung zutreffende Angaben zu den Wasserretentionseigenschaften der Bodenschichten zu finden. Die in Kapitel 7.1.2 dargestellten bewirtschaftungsabhängigen Eigenschaften der Wasserretention und deren grundlegende Bedeutung für den Bodenwasserhaushalt und die Infiltrationseigenschaften der Standorte machen eine separate Parametrisierung der Bodenarten unter Einbeziehung der Bewirtschaftungsform nötig.

Für die Beschreibung der Wasserretentionseigenschaften wurde die Wasserspannungs-Wassergehalts-Funktion nach [VAN GENUCHTEN 1980] ausgewählt.

Wie bereits in Kapitel 6.2.2.2 erläutert, kommt den bodenartenabhängigen Parametern Feldkapazität und Porosität bei der Beschreibung des Rückhaltepotenzials in der hydrologischen Modellierung eine besondere Bedeutung zu. Während die Porosität (oder das Gesamtporenvolumen) den maximalen Speicher beschreibt, ist die Feldkapazität ein Maß für die langfristige Speicherfähigkeit des Bodens. Definiert ist die Feldkapazität als die Menge, die ein Boden über einen bestimmten Zeitraum hinweg gegen die Schwerkraft zu halten vermag. Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die Feldkapazität keine Materialkonstante ist, sondern neben der Textur auch von verschiedenen anderen Standorteigenschaften (z. B. Grundwasserflurabstand, Lagerungsdichte) abhängig ist.

Der Tensionsbereich, in dem sich der Gleichgewichtszustand von Matrixpotenzial und Gravitationspotenzial einstellt, variiert hierbei über einen weiten Saugspannungsbereich zwischen pF 1,0 (für tonige Substrate) bis zu pF 2,5 (für Sandböden und tonarme Schluffe). In der Praxis wird aus Gründen der Vereinfachung häufig ein Wert von $pF=1,8$ zugrunde gelegt [AG BODENKUNDE 2005]. Aus hydrologischer Sicht ist diese vereinfachte Form der Feldkapazitätsbestimmung problematisch, da in ihr die zeitliche Komponente des Entwässerungsvorgangs bzw. der Wasserretention, beispielsweise während eines Hochwasserereignisses, verloren geht.

Es wurde daher zur Bestimmung der Feldkapazität eine Methode angewandt, die von [ZACHARIAS & BOHNE 2007] vorgeschlagen wurde (siehe Kapitel 6.2.2.2). Die Methodik ermöglicht es, in Abhängigkeit von der Bodenart (Korngrößenverteilung), der Lagerungsdichte, des Flurabstandes und der vorgegebenen Entwässerungszeit den jeweiligen Bodenwassergehalt des Standortes zu bestimmen.

Der Schlüssel zur Berücksichtigung der Bewirtschaftung in der Parametrisierung der Wasserretentionseigenschaften ist eine im Rahmen des DBU-Projektes-Mulde neu abgeleitete Pedotransferfunktion [ZACHARIAS & WESSOLEK 2007], die eine Schätzung der Van Genuchten-Parameter für alle deutschen Bodenarten in Abhängigkeit der Lagerungsdichte ermöglicht. Die differenzierte Parametrisierung der Wasserretentionsfunktion nach Van Genuchten macht den Weg frei zur Berechnung des instationären, gravitativen Wassertransports (Entwässerungsvorgangs) in der ungesättigten Bodenzone mit Hilfe des physikalischen Modells HYDRUS-1D, basierend auf der Richards-

Gleichung (siehe Kapitel 6.2.2.2). Für die konservierend bearbeiteten Standorte wurde generell eine Lagerungsdichte, vergleichbar den Lagerungsdichten natürlicher, unbearbeiteter Böden, angenommen. Für gepflügte Standorte erfolgte eine Schätzung der Lagerungsdichte nach [RAWLS 1983]. Weiterhin erfolgte eine Berücksichtigung differierender Gehalte an organischem Kohlenstoff auf der Grundlage der Pedotransferfunktion von [ADAMS 1973] (vgl. Tabelle 18).

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Abbildung des Entwässerungsverhaltens ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Kf-Wert). Zur Bestimmung dieses wichtigen Bodenparameters steht eine Reihe von Pedotransferfunktionen zur Verfügung. Für die Auswahl der jeweils bestgeeigneten Pedotransferfunktion in Abhängigkeit von der Bodenart wurde den Hinweisen von [TIETJE & HENNINGS 1996] gefolgt.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise kann für jede Bewirtschaftungsform und jede Bodenart ein angepasster Satz Modellparameter generiert werden, der alle wichtigen Einflussfaktoren zur Bestimmung des Wasserretentionsvermögens berücksichtigt (siehe Tabelle 19).

Als Feuchtezustand zu Ereignisbeginn wurde bei der hydrologischen Modellierung der Bodenwassergehalt nach zehntägiger gravitativer Entwässerung festgelegt. Dies ist eine entscheidende Randbedingung, da die Modellierung der Hochwasserentstehung in hohem Maße von der Vorfeuchte des Einzugsgebietes beeinflusst wird [NIEHOFF 2001] und gleichzeitig ein wichtiger Einflussfaktor für die Wirksamkeit infiltrationsfördernde Maßnahmen ist [DWA 2006]. Im DFG-Schwerpunktprogramm „Hydrologie und Regionalisierung“ befassten sich zwei Forschungsgruppen mit der Regionalisierung der Bodenfeuchte. [MAUSER et al. 1999] setzen dabei auf die Kopplung eines Verdunstungsmodells mit Fernerkundungsdaten. [WESSOLEK et al. 1999] führten Geländeuntersuchungen durch, um den Einfluss des Reliefs und kleinräumiger Bodenstrukturen auf die Abflussbildung beschreiben zu können. Eine Übernahme dieser Ergebnisse in die Untersuchungen dieser Arbeit konnte aber allein schon aus Gründen der Datenverfügbarkeit nicht erfolgen.

In Tabelle 19 sind sowohl die Bodenwassergehalte nach zehn Tagen Entwässerung für grundwassernahe (Flurabstand < 150 cm) wie für grundwasserferne Standorte aufgeführt. Das bedeutet u. a., dass bei der Modellierung von grundwassernahen Standorten i. d. R. höhere Startwassergehalte zugewiesen wurden als den grundwasserfernen Standorten mit gleicher Bodenart und Landnutzung. Auch dies ist eine wichtige Anfangbedingung der Modellierung, da häufig die Flurabstände der Standorte nicht in die Bodenwasserhaushaltsmodellierung und in die Wahl der Startwassergehalte einfließen.

Aufbauend auf den Angaben zur aktuellen Landnutzung bzw. den Annahmen des Szenarios für die Landwirtschaft werden vier verschiedene Bodenzustände für die oberflächennahe Bodenschicht angenommen (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Eigenschaften der oberflächennahen Bodenschichten unter Berücksichtigung der Landnutzung – Annahmen für die Parametrisierung

Bodenzustand	Humusgehalt	Lagerungsdichte
Oberboden unter Wiese	2,0 %	mittel
Oberboden unter Wald	5,0 %	gering
Oberboden unter konservierender Bodenbearbeitung	1,7 %	hoch
Oberboden unter konventioneller Bodenbearbeitung	1,5 %	gering

Für die unteren Bodenschichten wurde durchgehend von einem Humusgehalt von 0 % und einer hohen Lagerungsdichte ausgegangen. Die Messungen von [ZACHARIAS 2004] und [ZIMMERLING 2003] zeigen, dass ein signifikanter Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Wasserretentionseigenschaften der Unterbodenmatrix unterhalb der Pflugsohle nicht nachweisbar ist.

Mit den oben aufgeführten Annahmen und der beschriebenen Methodik ergeben sich fünf Modellparametersätze zur Abbildung des Bodenwasserhaushalts, die unter Beachtung der Annahmen für das Landwirtschaftsszenario (siehe Kapitel 8.3) den unversiegelten Flächen im Einzugsgebiet der Mulde zugewiesen wurden (siehe Tabelle 19).

Neben der „Feldkapazität“ (nach neuer Definition) lassen sich unter Verwendung der Wassergehalts-Wasserspannungs-Beziehung nach VAN GENUCHTEN und den von [ZACHARIAS & WESSOLEK 2007] ermittelten van-Genuchten-Parametern für jede Bodenart auch die anderen Kardinalpunkte (permanenter Welkepunkt sowie das Gesamtporenvolumen) der Bodenwasserhaushaltsmodellierung ableiten.

Tabelle 19: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und Wasserretentionsparameter der deutschen Bodenarten unter Berücksichtigung der Landnutzung und Bodenbearbeitung nach [ZACHARIAS & BOHNE 2007]

modellinternes Bodenartenkürzel	Kurzzeichen für die Bodenart nach KA 4	effektive Lagerungs- dichte (Ld) [-]	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) [mm/h]	Porosität (Gesamt- porenvolumen) [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand > 150cm [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand < 150cm [mm/m]	Wassergehalt bei einer Saugspannung pf= 4,2 (Permanenter Welkepunkt) [mm/m]
Oberkrume unter Wiese (2,0 % org. Bodensubstanz)							
101	Ls2	2-3	12,71	460,04	397,90	418,70	167,96
102	Ls3	2-3	4,17	461,24	419,00	431,90	160,38
103	Ls4	2-3	7,08	469,35	416,30	433,20	152,00
104	Lt2	2-3	4,58	470,78	437,90	447,70	206,02
105	Lt3	2-3	4,17	486,08	461,60	468,20	244,62
106	Lts	2-3	3,75	474,97	447,30	455,20	209,73
107	Lu	2-3	9,17	469,84	419,60	436,50	193,29
108	Sl2	3	20,42	441,01	297,90	344,60	50,54
109	Sl3	2-3	16,67	445,43	361,40	388,60	122,35
110	Sl4	2-3	13,33	466,18	381,80	409,00	113,72
111	Slu	2-3	10,83	450,33	363,90	393,60	107,10
112	Ss	3-4	73,96	411,23	149,10	252,20	5,81
113	St2	3	32,92	426,08	246,00	295,20	25,00
114	St3	3	7,08	431,83	366,40	388,70	94,40
115	Su2	3	36,67	439,42	239,40	319,30	26,81
116	Su3	2	26,77	458,10	248,00	309,80	18,87
117	Su4	2-3	13,54	445,57	273,50	334,80	22,61
118	Tl	2-3	2,71	499,10	483,40	487,20	271,26
119	Tt	1-2	2,92	587,25	581,33	580,00	368,39
120	Tu2	2-3	5,21	511,11	491,80	497,30	294,36
121	Tu3	2-3	8,33	493,90	461,40	471,60	255,12
122	Tu4	2	13,54	489,45	441,10	457,40	233,00
123	Uls	2-3	10,21	450,51	369,00	399,00	119,90
124	Us	2-3	6,67	440,09	299,50	361,10	28,81
125	Ut2	2-3	7,71	461,26	375,90	412,10	113,32
126	Ut3	2-3	9,58	466,63	395,60	423,20	152,15
127	Ut4	2-3	8,33	476,48	425,00	442,70	194,20

modellinternes Bodenartenkürzel	Kurzzeichen für die Bodenart nach KA 4	effektive Lagerungs- dichte (L-d) [-]	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) [mm/h]	Porosität (Gesamt- porenvolumen) [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand > 150cm [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand < 150cm [mm/m]	Wassergehalt bei einer Saugspannung pf= 4,2 (Permanenter Weilkepunkt) [mm/m]
128	Uu	2	5,73	459,49	317,10	393,60	37,26
129	Ts2	2-3	2,71	492,96	481,70	483,60	253,92
130	Ts3	2-3	2,80	483,93	467,80	471,00	214,81
131	Ts4	2-3	3,34	484,57	457,40	465,00	182,63
Oberkrume unter Wald (5,0 % org. Bodensubstanz)							
401	Ls2	1-2	17,08	505,78	433,10	456,80	170,09
402	Ls3	1-2	5,42	506,66	457,10	472,60	162,19
403	Ls4	1-2	8,33	512,64	453,10	473,20	153,27
404	Lt2	1-2	5,42	516,51	479,30	490,80	211,92
405	Lt3	1-2	4,17	530,91	505,20	512,60	253,98
406	Lts	1-2	5,00	521,17	488,10	498,80	216,64
407	Lu	1-2	10,83	513,78	458,10	475,90	196,88
408	Sl2	2	39,17	501,07	313,20	374,80	56,46
409	Sl3	2	18,13	503,46	407,40	438,30	136,98
410	Sl4	1-2	17,92	508,28	410,50	442,60	112,29
411	Slu	1-2	17,08	495,80	390,10	423,70	104,61
412	Ss	2-3	120,42	480,73	162,50	288,20	6,53
413	St2	2	36,67	489,22	282,30	338,10	28,09
414	St3	2	7,08	490,99	415,80	441,60	106,26
415	Su2	2	58,23	500,88	254,80	357,60	29,86
416	Su3	1-2	31,25	499,07	273,80	335,00	16,36
417	Su4	1-2	17,08	489,77	294,60	353,80	19,44
418	Tl	1-2	4,17	545,22	525,10	531,30	283,98
419	Tt	1	0,71	617,88	611,79	610,40	380,64
420	Tu2	1-2	8,33	554,07	529,40	537,80	307,68
421	Tu3	1-2	11,25	535,92	497,60	510,20	264,11
422	Tu4	1-2	14,17	529,73	478,80	495,10	238,94
423	Uls	1-2	14,58	496,08	398,90	430,50	117,66
424	Us	1-2	9,17	485,75	320,60	377,80	24,72
425	Ut2	1-2	12,50	503,25	397,80	435,40	109,68
426	Ut3	1-2	15,83	508,62	420,40	450,40	151,19
427	Ut4	1-2	12,92	517,93	454,80	475,20	196,83
428	Uu	1-2	6,67	500,11	352,00	411,70	32,58

modellinternes Bodenartenkürzel	Kurzzeichen für die Bodenart nach KA 4	effektive Lagerungs- dichte (L-d) [-]	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) [mm/h]	Porosität (Gesamt- porenvolumen) [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand > 150cm [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand < 150cm [mm/m]	Wassergehalt bei einer Saugspannung pf= 4,2 (Permanenter Weilkepunkt) [mm/m]
429	Ts2	2	3,44	540,74	529,00	530,90	265,89
430	Ts3	1-2	4,17	529,33	512,50	516,30	222,28
431	Ts4	1-2	4,17	526,69	498,30	506,80	186,50
Oberkrume unter konservierend bearbeiteten Ackerflächen (1,7 % org. Bodensubstanz)							
301	Ls2	3-4	6,88	422,50	374,80	391,60	165,01
302	Ls3	3-4	2,71	422,84	389,40	399,20	157,67
303	Ls4	3	5,83	425,11	378,70	393,70	149,38
304	Lt2	3-4	2,71	433,23	408,20	415,10	199,89
305	Lt3	3-4	3,54	446,09	424,30	430,30	234,88
306	Lts	3-4	1,88	438,70	419,40	423,70	203,12
307	Lu	3	7,50	427,39	383,40	400,00	188,31
308	Sl2	3-4	17,71	408,09	277,30	320,50	47,20
309	Sl3	3-4	10,00	407,16	339,40	361,60	112,54
310	Sl4	3	8,75	418,64	350,00	373,20	114,21
311	Slu	3-4	3,96	412,06	352,00	374,20	108,38
312	Ss	3-4	73,96	402,21	145,00	247,40	5,71
313	St2	3-4	24,17	401,12	242,70	288,20	23,74
314	St3	3-4	5,00	396,53	341,80	360,00	87,21
315	Su2	3-4	25,83	410,12	233,00	301,80	25,30
316	Su3	3	13,33	407,36	246,90	310,60	22,28
317	Su4	3-4	9,17	403,86	259,90	326,40	25,85
318	Tl	3-4	0,83	462,61	455,00	455,00	260,03
319	Tt	3	0,83	510,82	506,00	506,00	335,26
320	Tu2	3	2,08	465,97	454,00	456,50	278,84
321	Tu3	3	5,42	446,13	420,40	428,40	243,10
322	Tu4	3	11,67	436,73	394,80	411,30	223,09
323	Uls	3-4	3,96	412,54	357,10	379,40	120,85
324	Us	3-4	4,17	402,33	288,00	350,50	32,44
325	Ut2	3	2,92	413,40	357,50	385,30	116,41
326	Ut3	3	3,33	418,76	373,70	393,30	151,70
327	Ut4	3	3,75	427,10	391,70	405,30	189,19
328	Uu	3	2,92	407,75	307,80	376,10	43,68
329	Ts2	3-4	0,83	460,89	450,00	451,70	244,92

modellinternes Bodenartenkürzel	Kurzzeichen für die Bodenart nach KA 4	effektive Lagerungs- dichte (L-d) [-]	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) [mm/h]	Porosität (Gesamt- porenvolumen) [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand > 150cm [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand < 150cm [mm/m]	Wassergehalt bei einer Saugspannung pf= 4,2 (Permanenter Weilkepunkt) [mm/m]
330	Ts3	3-4	0,92	445,49	430,00	432,90	207,27
331	Ts4	3	2,51	437,09	411,40	418,20	176,74
Oberkrume unter konventionell bearbeiteten Ackerflächen (1,5 % org. Bodensubstanz)							
201	Ls2	2	14,90	501,95	429,60	453,00	169,97
202	Ls3	1-2	5,42	505,23	455,70	471,20	162,15
203	Ls4	1-2	8,33	518,41	458,40	478,80	153,35
204	Lt2	2	5,00	500,99	464,40	475,60	210,10
205	Lt3	2	4,17	503,19	478,20	485,20	248,38
206	Lts	2	4,38	509,91	477,30	487,60	215,10
207	Lu	2	10,00	502,54	446,90	464,80	196,10
208	Sl2	2	39,17	492,22	310,20	370,40	55,60
209	Sl3	2	18,13	500,36	404,80	435,50	136,21
210	Sl4	1-2	17,92	517,09	418,10	451,20	111,89
211	Slu	1-2	17,08	500,52	394,10	427,90	104,31
212	Ss	2-3	120,42	452,16	150,80	273,60	6,24
213	St2	2-3	35,42	472,87	452,80	459,10	27,30
214	St3	2	7,08	485,03	414,50	438,60	105,08
215	Su2	2	58,23	488,38	247,50	349,50	29,25
216	Su3	1-2	31,25	510,23	280,90	343,80	15,71
217	Su4	1-2	17,08	492,43	296,40	355,50	19,26
218	Tl	2-3	2,71	508,08	492,20	496,10	273,86
219	Tt	1-2	2,92	589,86	583,93	582,60	369,45
220	Tu2	2-3	5,21	511,84	492,60	498,00	294,60
221	Tu3	2	9,79	510,18	472,90	484,90	258,77
222	Tu4	1-2	14,17	513,14	463,30	479,60	236,65
223	Uls	1-2	14,58	495,80	398,70	430,20	117,68
224	Us	1-2	9,17	485,76	320,60	377,90	24,72
225	Ut2	1-2	12,50	497,99	393,30	431,60	110,18
226	Ut3	1-2	15,83	500,65	413,40	443,60	151,46
227	Ut4	1-2	12,92	504,61	442,50	463,20	196,13
228	Uu	1-2	6,67	496,78	346,40	407,70	32,95
229	Ts2	2-3	2,71	510,75	499,30	501,20	258,57
230	Ts3	1-2	4,17	529,21	512,40	516,20	222,26

modellinternes Bodenartenkürzel	Kurzzeichen für die Bodenart nach KA 4	effektive Lagerungs- dichte (L-d) [-]	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) [mm/h]	Porosität (Gesamt- porenvolumen) [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand > 150cm [mm/m]	Wassergehalt nach 10 Tagen Flurabstand < 150cm [mm/m]	Wassergehalt bei einer Saugspannung pf= 4,2 (Permanenter Weilkepunkt) [mm/m]
231	Ts4	3	2,51	535,53	506,80	515,70	187,17
Unterkrumme (Horizonte in eine Tiefe > 0,30 m)							
501	Ls2	3-4	6,88	421,13	373,60	390,40	164,88
502	Ls3	3-4	2,71	422,64	389,20	399,00	157,66
503	Ls4	3	5,83	432,81	385,80	400,90	149,94
504	Lt2	3-4	2,71	431,87	406,90	413,80	199,65
505	Lt3	3	4,17	448,04	424,60	431,20	235,38
506	Lts	3-4	1,88	435,61	416,40	420,70	202,51
507	Lu	3	7,50	432,67	388,40	404,70	189,01
508	Sl2	3-4	17,71	389,30	262,80	304,90	45,26
509	Sl3	3-4	10,00	395,72	329,30	351,00	109,58
510	Sl4	3	8,75	430,76	360,70	383,70	114,21
511	Slu	3-4	3,96	411,68	353,60	374,80	108,39
512	Ss	4-5	52,50	350,03	131,80	219,00	5,12
513	St2	4	0,16	371,31	233,30	274,60	22,20
514	St3	3-4	5,00	381,01	327,70	345,40	84,01
515	Su2	3-4	25,83	386,33	217,50	284,80	24,04
516	Su3	3	13,33	423,76	258,40	317,00	21,15
517	Su4	3	10,00	408,13	258,60	326,60	25,51
518	Tl	3-4	0,83	459,81	454,70	452,20	259,12
519	Tt	2	2,40	560,92	555,16	553,80	357,39
520	Tu2	3	2,08	474,88	462,80	465,30	282,03
521	Tu3	3	5,42	458,56	432,30	440,30	246,42
522	Tu4	3	11,67	455,77	412,60	428,40	226,97
523	Uls	3-4	3,96	411,75	356,40	378,80	120,86
524	Us	3-4	4,17	401,27	287,20	350,10	32,54
525	Ut2	3	2,92	425,96	369,10	394,90	115,73
526	Ut3	3	3,33	431,33	385,50	404,10	151,99
527	Ut4	3	3,75	441,69	405,60	418,60	190,90
528	Uu	3	2,92	425,49	322,80	384,70	41,43
529	Ts2	3-4	0,83	452,07	441,20	443,00	242,30
530	Ts3	3-4	0,92	445,34	429,80	432,70	207,23
531	Ts4	3	2,51	449,13	423,00	430,00	178,40

9.4.2 Makroporenfluss

In Kapitel 6.1.2 wurde kurz auf Literaturquellen verwiesen, die den Prozess der Makroporeninfiltration beschreiben, die mögliche Modellansätze zur Abbildung der präferentiellen Fließwege vorstellen und deren Parametrisierung diskutieren. [ZUIDEMA 1985] und [BEVEN & GERMANN 1980] erläutern die Entstehung von Makroporen und definieren sie (siehe auch [CHEN & WAGNET 1992]). [BRONSTERT 1994] stellt fest, dass die vorliegenden Ansätze nur konzeptionelle Annäherungen darstellen, da die quantitative Beschreibung aufgrund der komplexen Geometrien und der Interaktion mit der Bodenmatrix außerordentlich schwierig ist (siehe auch [SCHRÖDER 2000]).

Folgende Ansätze werden beschrieben:

- Die Makroporosität wird durch veränderte Bodenparameter beschrieben. Das Bodenmodell wird jedoch nicht verändert (z.B. [DURNER 1991]).
- Der Infiltrationsprozess wird in zwei Bereiche eingeteilt „double porosity“ [ZUIDEMA 1985] und getrennt voneinander parametrisiert. Dieser Ansatz wurde zur Erweiterung des STORM Modells verfolgt (s. u.).
- Der dritte und physikalisch am besten begründete Ansatz ist die Anwendung des Konzeptes der kinematischen Welle [GERMANN & BEVEN 1985]. Der Ansatz benötigt Informationen zur Makroporenleitfähigkeit, die nur schwer messbar ist und deshalb die Einsetzbarkeit begrenzt ist. [BRONSTERT 1994] verwendet diesen Ansatz in seinem Modell, wobei die Eingangsparameter reine Eichparameter bleiben.

[SCHNEIDER 1999] beschreibt und diskutiert weitere Makroporenansätze u.a. zur Bestimmung der Verteilung und Größe der Makroporen auf Direktsaatflächen [RAWLS et al. 1996].

Allgemein wird darauf hingewiesen, dass der Makroporenfluss in enger Abhängigkeit zum Feuchtegehalt der umgebenden Matrix steht. Es wird häufig Infiltrationsüberschuss (Überstau) vorausgesetzt [GERMANN & BEVEN 1985]. [NIEHOFF 2001] geht in seinem Ansatz davon aus, dass auch aus der gesättigten Bodenmatrix Wasser in die Makroporen exfiltriert (s. u.). NIEHOFF weist als Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse für den vom ihm entwickelten Ansatz darauf hin, dass insbesondere bei konvektiven Niederschlägen die Änderung des Makroporenvolumens (Produkt aus Makroporendichte und Makroporentiefe) starke Oberflächenabflussänderungen verursacht. Die Sensitivität der Makroporosität bei gleichzeitiger Verschlämmung des Bodens wurde nicht betrachtet.

In Kapitel 7.1.2 wurde dargelegt, dass auf konservierend bearbeiteten Ackerflächen von einem erhöhten vertikalen Makroporenfluss in tiefere Bodenschichten auszugehen ist. [ZIMMERLING 2003] gibt als eine Begründung hierfür die deutlich größere biologische Aktivität (Regenwurmabundanz) auf konservierend bearbeiteten Ackerflächen an. Das Vorhandensein und die Wirkung von vertikalen Makroporen ist eine mögliche Erklärung für Beobachtungen auf konservierend bearbeiteten Landwirtschaftsflächen, die allein auf Grund der hydraulischen Leistungsmerkmale der Bodenmatrix nicht hinreichend beschrieben werden können. So ist der gemessene Oberflächenabfluss bei Beregnungsversuchen auf langjährig konservierend bearbeiteten Böden – trotz höherer Lagerungsdichte und damit kleinerer hydraulischer Leitfähigkeiten der Matrix des Oberbodens – geringer als auf gepflügten Flächen.

Wenn die vertikalen Makroporen bis an die Bodenoberfläche reichen und es zu einem Horton'schen Oberflächenabfluss (Infiltrationsüberschuss) kommt, so kann in ihnen eine schnelle Perkolation des Niederschlagswassers bis in größere Bodentiefen unabhängig von den physikalischen Eigenschaften der Bodenmatrix erfolgen. Dies hat zur Folge, dass bei kürzeren, konvektiven Niederschlägen (Sommerniederschläge) oder auf Böden mit geringer Infiltrationskapazität der Bodenmatrix das Gesamteinfiltrationsvermögen erhöht wird. Gleichzeitig werden über die Makroporen tiefere Bodenschichten und somit zusätzliche Speichervolumina erschlossen. [ZIMMERLING 2003] und [BEISECKER 1994] haben die Zunahme der Makroporosität unter konservierend bearbeiteten Böden mittels

Tracerversuchen nachvollzogen. ZIMMERLING äußert die Vermutung, dass die Makroporen auch für den vertikalen Wassertransport aktiviert werden, wenn sie nicht bis an die Oberflächen reichen (siehe Kapitel 7.1.2).

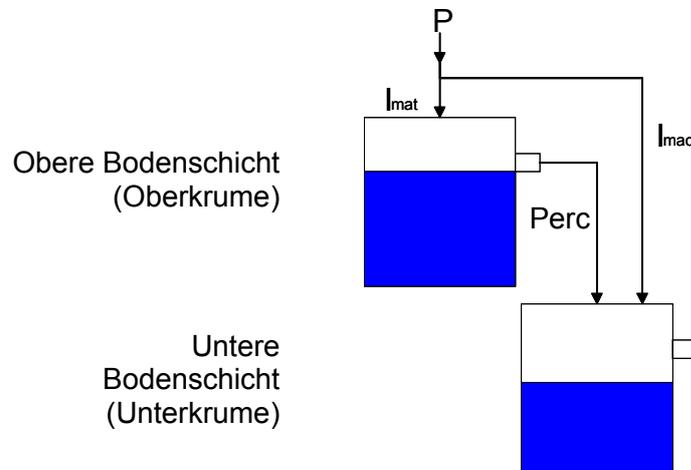


Abbildung 87: Schematisierte Darstellung des Bypass-Ansatzes, P = Niederschlag, I_{mat} = Infiltration in die Bodenmatrix, I_{mac} = Makroporenfluss, $Perc$ = Perkolation in die zweite Bodenschicht

Die Flüsse in den Makroporen können nicht durch die Darcy- bzw. die Richards-Gleichung beschrieben werden, da auf Grund der auftretenden Fließgeschwindigkeiten in den Makroporen der sogenannte Darcy-Bereich, der u. a. eine Laminarität des fließenden Wassers voraussetzt, verlassen wird. Es existiert eine Reihe von Ansätzen zur Beschreibung der Makroporeninfiltration.

Im Falle des konzeptionellen Modells STORM wurde ein einfacher „Bypass“-Ansatz [ANDERSON & BURT 1990] zur Beschreibung des Makroporenflusses verwendet. Die Infiltration wird dabei in zwei Komponenten aufgespalten: Matrixinfiltration I_{mat} und Makroporeninfiltration I_{mac} (vgl. Abbildung 87). Der Teil der Makroporeninfiltration umfließt die obere Bodenschicht und infiltriert direkt in die untergelagerte Schicht. Die Einbindung dieses Ansatzes hat den Vorteil, dass die bisherige Abbildung der bodenfeuchteabhängigen Matrixinfiltration in STORM unverändert bleiben konnte.

Bezüglich der mathematischen Beschreibung des Makroporenanteils wird ein einfacher linearer Ansatz vorgeschlagen. Der Bypass-Ansatz geht davon aus, dass bis zum Erreichen der aktuellen, potentiellen Infiltrationsrate ($pot I_{mat}$), also bis zum Einsetzen des Horton'schen Oberflächenabflusses, ausschließlich die Infiltration über die Bodenmatrix stattfindet (vgl. Gl. 5).

$$I_{mac} = 0 \quad \text{und} \quad I_{mat} = P(t) \quad \text{für} \quad P(t) \leq pot I_{mat}(t)$$

(Gl. 5)

Mit:

P = Niederschlag

I_{mat} = Infiltration in die Bodenmatrix,

I_{mac} = Makroporenfluss,

$Perc$ = Perkolation in die zweite Bodenschicht

Diese Annahme hat zur Folge, dass ein Makroporenfluss erst bei hohen Bodenwassergehalten in der Oberbodenmatrix einsetzt – ein Effekt, der den natürlichen

Verhältnissen nahe kommt und nachbildet, dass Makroporenflüsse zur Induzierung an den Oberflächen in den meisten Fällen einen entsprechenden Überstau benötigen (vgl. (Gl. 6)).

$$I_{mac} = P - pot I_{mat}(t) \quad \text{und} \quad I_{mat} = pot I_{mat}(t) \\ \text{für } P(t) > pot I_{mat}(t) \quad \text{und} \quad (P - pot I_{mat}(t)) \leq \max I_{mac}(t) \\ \text{(Gl. 6)}$$

Die Größe $\max I_{mac}(t)$ in (Gl. 6) repräsentiert die aktuelle maximale Rate, die in den Makroporen abgeführt werden kann. Die potentielle maximale Makroporenflussrate ($pot I_{mac}$ in mm/h) berücksichtigt die Zahl und Größe der vertikalen Makroporen, die bis zur Oberfläche reichen sowie deren hydraulischen Anschluss an die Matrix der unteren Bodenschichten. Beide Größen sind in der Praxis kaum direkt messbar und von Standort zu Standort stark variabel.

Aus diesem Grund muss der im Modell STORM eingeführte Parameter ($pot I_{mac}$) im Kontext mit der Kalibrierung der Oberflächenverschlämmung als Kalibrierungsparameter bestimmt werden. Es ist jedoch möglich, qualitative Unterschiede z. B. durch unterschiedliche Bodenbearbeitung abzubilden. Vereinfachend kann davon ausgegangen werden, dass die Größe der Makroporen je nach Landnutzung und Bodenbearbeitung im Mittel konstant ist. Es wurde daher in STORM eine statische nutzungsabhängige Makroporenflussrate ($pot I_{mac}$) für jede Landnutzung definiert, die jedoch nur ausgeschöpft werden kann, wenn keine Oberflächenverschlämmung vorliegt.

Auftretende Oberflächenverschlämmung führt auch zu einer Reduzierung der zur Verfügung stehenden Makroporen. Die aktuelle maximale Makroporenrate in (Gl. 6) und (Gl. 7) ergibt sich aus der Multiplikation mit dem aktuellen Verschlämmungsfaktor $C_{seal,max}(t)$ (siehe Kapitel 9.4.3). Auf diese Weise wurde die Kopplung des Makroporenansatzes mit dem Ansatz zur Abbildung der Verschlämmung in STORM realisiert. Es bleibt festzuhalten, dass der Anteil des Oberflächenabflusses, der tatsächlich in Makroporen abgeführt werden kann ($\max I_{mac}(t)$), somit keineswegs statisch, sondern eine zeitlich variable Größe ist.

$$I_{mac} = \max I_{mac}(t) \quad \text{und} \quad I_{mat} = pot I_{mat}(t) \\ \text{für } P(t) > pot I_{mat}(t) \quad \text{und} \quad (P - pot I_{mat}(t)) > \max I_{mac}(t) \\ \text{(Gl. 7)}$$

Erst wenn der effektive Niederschlag die Summe aus aktueller Infiltrationsrate (siehe (Gl. 8)) und dem aktuellen maximalen Makroporenfluss überschreitet, kommt es zu Oberflächenabfluss oder oberflächennahen horizontalen Makroporenflüssen. Streng genommen wird über den Parameter $\max I_{mac}(t)$ nur das Eindringen des Oberflächenwassers in die Makroporen beschrieben. Eine separate Steuerung der Makroporenentleerung in die Bodenmatrix der unteren Bodenschichten in Abhängigkeit vom aktuellen Sättigungsdefizit wie es [NIEHOFF 2001] vorschlägt, wurde in dem hier vorgestellten Ansatz nicht berücksichtigt. Es wurde darauf verzichtet, diese Prozesse explizit abzubilden, da hierfür weitere nicht direkt messbare Parameter notwendig sind. Im Einzelnen sind dies der Speicherinhalt der Makroporen sowie die hydraulische Leitfähigkeit der Makroporenwandung. Der Zufluss des Makroporeninhalts in die Bodenmatrix wurde indirekt über eine Korrekturrechnung realisiert. Im Rahmen dieser Korrektur wird der Teil des Makroporenflusses, welcher über das Speichervolumen der unteren Bodenschicht hinausgeht, wieder dem Oberflächenabfluss zugeschlagen. Auf diese Weise wird eine Sättigung zumindest indirekt berücksichtigt. Die Tiefe der Makroporen wurde mit einer mittleren Wurzeltiefe gleichgesetzt.

9.4.3 Verschlämmung

Das Problem der Verschlämmung tritt ein, wenn starke Niederschläge auf unbedeckten Boden fallen und Bodenpartikel durch die Kraft der auftreffenden Regentropfen zerstören.

Durch die Verspülung der Bodenteilchen werden größere Poren im Boden verstopft und damit das Bodengefüge verändert. Bei dieser Oberflächenverschlämmung wird die oberste Bodenschicht komprimiert und es kommt zur Krustenbildung (siehe Abbildung 88).



Abbildung 88: Beispiel für eine verschlammte Ackerfläche

Die Verschlämmung der Böden wird unabhängig von ihrer Bedeutung für den Abflussbildungsprozess als eines der gravierenden Anzeichen einer fortschreitenden Bodendegradation insbesondere auf Ackerflächen bezeichnet [FOHRER 2005].

[SCHRÖDER 2000] beschreibt in detaillierter Form den Prozess und die Einflussfaktoren der Oberflächenverschlämmung. SCHRÖDER benennt verschiedene Stufen des Verschlämmungsprozesses. Im ersten Schritt kommt es zu Zerfall der Bodenaggregate durch die kinematische Energie der Regentropfen oder Luftsprennung, wobei das Aufschlagen der Regentropfen als prägender Mechanismus in gemäßigten Klimaten betont wird. Im zweiten Schritt kommt es zur Materialumlagerung (Einwaschung) der feinen Bodenpartikel durch die Splash-Wirkung der Regentropfen (siehe auch [AKKERMANN 2004]). Die Bodenpartikel füllen die Porenzwischenräume. Im letzten Schritt entsteht Oberflächenabfluss infolge der gesunkenen Infiltrationsrate. Zuletzt kommt es bei zunehmendem Oberflächenabfluss zu Wassererosion, wodurch die Verschlammungsschicht wieder aufgebrochen werden kann, jedoch an anderer Stelle zur Auftragung von Sedimentkrusten führt. [BERKENHAGEN 1998] fügt diesen Prozessen noch den Prozess der Einregelung von Partikeln hinzu. [ROTH et al. 1995] geben an, dass es bereits bei einer Niederschlagsintensität von 5 mm/h aufgrund von Verschlämmung zu Oberflächenabfluss kommt (siehe Abbildung 89).

Generell hängt die niederschlagsbedingte Verschlämmung einer Ackerfläche von einer Reihe verschiedener Prozessgrößen ab. Die wichtigsten Prozessgrößen sind:

- Niederschlag – Der Prozess der Verschlämmung von Böden wird verursacht durch Niederschlagsereignisse hoher Intensität [SCHRÖDER 2000]. Der Zerfall der Bodenaggregate wird durch die mechanische Wirkung der auftreffenden Regentropfen verursacht. Meist wird in Verschlammungsmodellen als zu berücksichtigende Prozessgröße die kinetische Energie des Niederschlags verwendet.
- aktuelle Bodenfeuchte – Die Feuchte der Bodenaggregate bestimmt über die Zerfallsempfindlichkeit bei auftreffenden Niederschlägen. Allerdings liegen hier durchaus widersprüchliche Angaben zur Wirkung der Anfangsbodenfeuchte vor (siehe [AKKERMANN 2004]).
- Bodenart – Die Bodenart wird allgemein als bedeutendster Einflussfaktor für die Verschlämmung angesehen. In Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung und der Gefügestabilität sind die verschiedenen Bodenarten in unterschiedlichem Maße verschlammungsanfällig [HENNING 1994]. Höhere Tongehalte bewirken eine größere Aggregatstabilität und sind damit weniger verschlammungsanfällig. Sinken die Tongehalte unter einen kritischen Wert, so wird die Wirkung der Verschlämmung auf die Infiltrationsrate wiederum reduziert, da nicht genügend Feinmaterial zur Verfügung steht,

um eine dichte Verschlammungsschicht zu erzeugen. Generell gelten Böden mit Tongehalten zwischen 10 % und 30 % als besonders verschlammungsempfindlich.

- Vegetations- und Mulchbedeckung – In Abhängigkeit von der Landnutzung und Bodenbewirtschaftung sowie jahreszeitlich differenzierter Vegetationsentwicklung ergeben sich unterschiedliche Grade der Bodenbedeckung. Hohe Bedeckungsgrade bewirken, dass das Verschlammungsrisiko reduziert wird. Die Pflanzen und Pflanzenreste auf der Bodenoberfläche reduzieren die Aufprallenergie der auftreffenden Regentropfen und wirken damit direkt einer Verschlammung entgegen. Hinzu kommt, dass durch eine verstärkte Mulchbedeckung (beispielsweise im Zuge der konservierenden Bodenbearbeitung) der Humusgehalt der oberen Bodenschicht steigt dadurch wird die Aggregatstabilität verbessert und damit sinkt zusätzlich die Verschlammungsgefahr (siehe auch Kapitel 7.1.2).

[BERKENHAGEN 1998] stellt in seiner Arbeit die exakte morphologische Beschreibung von Verschlammungsschichten in Abhängigkeit von der Bodenart, dem Mikrorelief, der Anfangsfeuchte und der Niederschlagshöhe in den Vordergrund. [SCHRÖDER 2000] setzt dagegen seinen Fokus auf die modelltechnische Abbildung des Verschlammungsprozesses. Das von SCHRÖDER entwickelte Modell H-Kin steuert die Infiltrationsfähigkeit der Verschlammungsschicht in Abhängigkeit von der kinematischen Energie des Niederschlages, der Bodenbedeckung sowie der Stabilität der Bodenoberfläche. Das Ergebnis dieser Routine ist eine exponentielle Abnahme der potenziellen Infiltrationsrate (siehe auch [SCHRÖDER & AUERSWALD 2000]). Das Modell H-Kin wurde mit dem Modell NASIM verknüpft, um die Auswirkung der Verschlammung auf den Gebietsabfluss bestimmen zu können.

In früheren Modellierungsansätzen [SIEKER et al. 2002b] wurde der Versuch unternommen, das veränderte Infiltrationsverhalten nach Umstellung von konventionelle auf konservierende Bodenbearbeitung durch eine Anpassung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (kf-Werte) abzubilden (siehe auch [ZIMMERLING 2003]). Mit Hilfe dieser Vorgehensweise lässt sich das verbesserte Infiltrationsverhalten der konservierenden Bodenbearbeitung darstellen, es stellt jedoch eine vollständige Umkehrung der tatsächlichen Bewirtschaftungseffekte auf die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit dar (vgl. Kapitel 9.4.1). Im Falle kontinuierlicher Modellierungen des Bodenwasserhaushaltes führt dieser Parametrisierungsansatz darüber hinaus zu einer falschen Abbildung des Wassertransportes gerade auch in der ungesättigten Bodenzone und damit zu falschen Prognosen der Anfangsbodenfeuchte.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der Versuch unternommen, eine realistischere Parametrisierung sowohl der bewirtschaftungsbedingten Wasserretentionseigenschaften als auch der hydraulischen Leitfähigkeiten anzuwenden. Tabelle 19 kann entnommen werden, dass aufgrund der höheren Lagerungsdichte konservierend bearbeiteter Böden diese einen deutlich geringeren kf-Wert aufweisen als der gleiche Standort bei konventioneller Bodenbearbeitung. Dies steht auf den ersten Blick im Widerspruch zur allgemein anerkannten verbesserten Infiltrationsfähigkeit konservierend bearbeiteter Ackerstandorte (siehe Kapitel 7.1.2). Der Schlüssel für dieses Verhalten liegt jedoch nicht in den hydraulischen Leitfähigkeiten, sondern vielmehr in der deutlich geringeren Verschlammungsneigung konservierend bearbeiteter Flächen in Kopplung mit einer oft erhöhten Makroporosität. Für die korrekte Modellierung der beiden Bewirtschaftungsformen war es deshalb zwingend erforderlich, einen zusätzlichen Prozess in das Modell STORM zu implementieren, der trotz besserer kf-Werte für die geringere Infiltrationskapazität gepflügter Flächen maßgeblich ist - die Oberflächenverschlammung.

Um die genannten Prozesse in ausreichender Genauigkeit im Modell STORM abbilden zu können, wurde ein konzeptioneller Verschlammungsansatz implementiert. Ausgehend von dem von [NIEHOFF 2001] für WASIM-ETH [SCHULLA & JASPER 1999] entwickelten Verschlammungsmodul erfüllt die hier beschriebene Lösung die folgenden Anforderungen:

- Dynamische (instationäre) Bestimmung des aktuellen Verschlammungsfaktors [-],

- Berücksichtigung der Niederschlagsintensität [mm/h] in jedem Zeitschritt der Berechnung,
- Einbindung des Jahresganges des Bodenbedeckungsgrads [-] in Abhängigkeit von der Landnutzung,
- bodenartenabhängige und landnutzungsabhängig Definition des maximalen Verschlammungsfaktors zur Festlegung der Verschlammungsneigung sowie
- zeitabhängiger Rückgang der Verschlammung infolge biologischer und physikalischer Prozesse.

Der verwendete Ansatz bewirkt bei Eintreffen der entsprechenden Faktoren eine dynamische Abnahme der aktuellen hydraulischen Leitfähigkeit der obersten Bodenschicht und damit eine Reduzierung der Infiltrationsrate, die bisher in STORM ausschließlich eine nichtlineare Funktion der aktuellen Bodenfeuchte war. Die Reduktion der „unverschlammten“ hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt mit Hilfe eines dimensionslosen Faktors ($C_{\text{seal,max}}(t)$) – dem effektiven aktuellen Verschlammungsfaktor. Es gilt der lineare Zusammenhang:

$$K_{f,\text{seal}}(t) = K_f \cdot C_{\text{seal,max}}(t)$$

(Gl. 8)

Neben dem Einfluss auf die Matrixinfiltration führt die aktuelle Verschlammung auch zu einer Verstopfung der Öffnungen der vertikalen Makroporen [BERKENHAGEN 1998]. Es wird angenommen, dass der aktuelle Verschlammungsfaktor auch zur Reduktion der potenziellen Makroporeninfiltrationsrate genutzt werden kann (siehe Kapitel 9.4.2).

Die Berechnung des aktuellen Verschlammungsfaktors erfolgt für jeden Zeitschritt der Modellierung und ist, wie oben dargestellt, eine Funktion der Niederschlagsintensität, der Bedeckung sowie der Bodeneigenschaften und Landnutzung. Die gleichzeitige Abhängigkeit von Landbewirtschaftung und Bodenart macht ein Zusammenführen des Teilfaktors Landnutzung und des Teilfaktors Bodenart in einen maximalen Verschlammungsfaktor nötig. Die Kopplung erfolgt durch die Einführung konstanter Verschlammungsfaktoren, die als Produkt die landnutzungs- und bodenartenbedingte Verschlammungsneigung repräsentieren (C_{use} und C_{soil}). Beide Faktoren sind dimensionslose Parameter, die Werte von 0 bis 1 annehmen können.

Ein kleiner C_{use} -Wert beschreibt eine Landnutzung, die unabhängig vom Bedeckungsgrad aufgrund der Bodenbearbeitung (mechanischer Belastung, Humusgehalt) das Verschlammungsrisiko erhöht. Alternativ kann dieser Parameter im Modell auch deaktiviert werden ($C_{\text{use}} = 1$) und die Verschlammungsgefährdung über den an die Landnutzung gekoppelten Bedeckungsgrad abgebildet werden.

Der C_{soil} -Wert repräsentiert die von der Korngrößenverteilung abhängige Verschlammungsneigung der Bodenarten.

C_{fix} ergibt sich aus dem Produkt des landnutzungsbedingten Verschlammungsfaktors C_{use} und des bodenartenbedingten Verschlammungsfaktors C_{soil} . Es gilt:

$$C_{\text{fix}} = C_{\text{soil}} \cdot C_{\text{use}}$$

(Gl. 9)

Ausgehend vom konstanten Verschlammungsfaktor C_{fix} berechnet sich der aktuelle Verschlammungsfaktor C_{seal} unter Berücksichtigung der aktuellen Niederschlagsintensität und dem Bodenbedeckungsgrad nach folgender Gleichung:

$$C_{\text{seal}}(t) = C_{\text{fix}} + (1 - C_{\text{fix}}) \cdot \frac{C_{\text{cover}}(t) + C_p(t)}{2}$$

(Gl. 10)

Ein C_{fix} -Wert von 1,0 bedeutet demnach, dass zu keinem Zeitpunkt eine Verschlämmung der Bodenoberfläche auftritt. Wird der C_{fix} -Wert auf Null gesetzt, ist der Einfluss Landnutzungs- und der Bodeneigenschaften ausgeblendet und die aktuelle Verschlämmung ist ausschließlich vom Bedeckungsgrad und der Niederschlagsintensität abhängig.

Nach Aussage von [NIEHOFF 2001] sind für C_{fix} Werte zwischen 0,3 und 0,1 bzw. kleiner realistische Annahmen. Eine physikalische oder messtechnische Begründung kann dieser Parametrisierung nicht hinterlegt werden. Die konstanten Verschlämmungsfaktoren (C_{use} und C_{soil}) müssen im Rahmen der Modellierung kalibriert werden. Dabei kann die Verschlämmung nicht isoliert betrachtet werden. Vielmehr steht sie im Kontext des gesamten Infiltrationsprozesses, sodass die Parametrisierung zusammen mit der Kalibrierung der Matrix- und Makroporeninfiltration erfolgt (s. o.).

$C_p(t)$ in (Gl. 10) repräsentiert den von der aktuellen Niederschlagsintensität beeinflussten Teil der Verschlämmung. Entsprechend des Ansatzes von NIEHOFF wirkt bei Intensitäten < 5 mm/h der Niederschlag nicht verschlammend, d. h. $C_p(t)$ wird gleich 1 gesetzt. Bei Niederschlagsintensitäten zwischen 5 mm/h und 15 mm/h wird der Verschlammungsfaktor von 1 auf 0 linear interpoliert (vgl. Abbildung 89).

Der Einfluss fehlender Bodenbedeckung auf die Verschlämmung wird mit Hilfe des aktuellen Bodenbedeckungsfaktors $C_{\text{cover}}(t)$ abgebildet. Abweichend vom Ansatz von NIEHOFF wird davon ausgegangen, dass bei Bodenbedeckungsgraden < 100 % das Verschlammungsrisiko linear zunimmt und bei einer verbleibenden Bodenbedeckung von 30 % die Verschlämmung maximal ($C_{\text{cover}} = 0$) wird (vgl. Abbildung 89).

Die aktuelle Verschlämmung wird während eines Niederschlagsereignisses als irreversibel angesehen. Daraus folgt, dass der effektive aktuelle Verschlammungsfaktor ($C_{\text{seal,max}}(t)$) zum Zeitpunkt t dem Maximum aus Startverschlammungsfaktor und dem maximalen aktuellen Verschlammungsfaktor seit Ereignisbeginn entspricht.

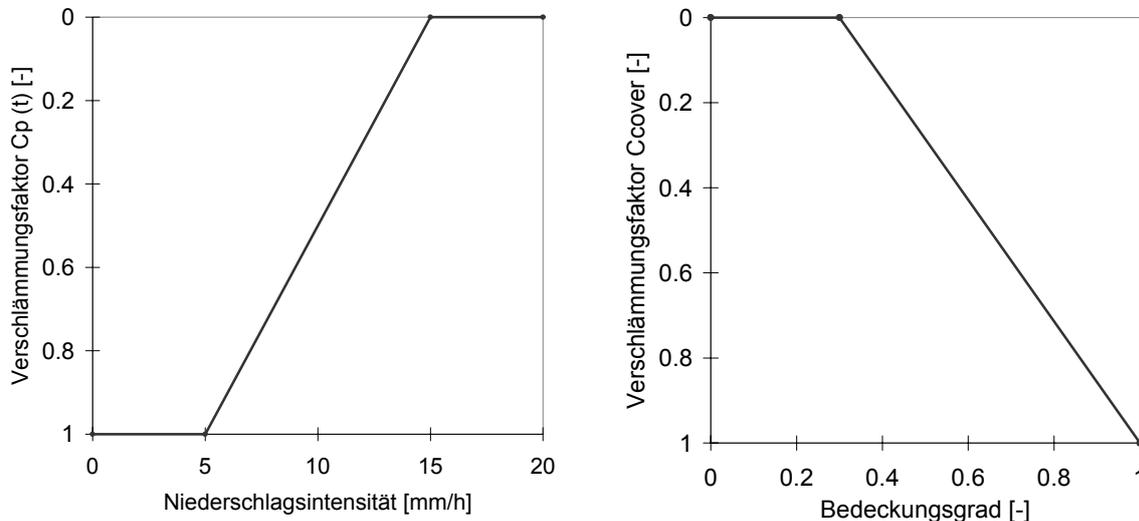


Abbildung 89: Einfluss von Bodenbedeckung und Niederschlagsintensität auf die Verschlammungsfaktoren C_{cover} und C_p (modifiziert nach [NIEHOFF 2001])

Die Verschlammungsschicht nach einem Niederschlagsereignis unterliegt in niederschlagsfreien Phasen verschiedenen Prozessen, die eine Wiederauflockerung dieser Schicht bewirken. Hierzu zählen z. B. biologische Aktivitäten oder Schrumpfungs-Quellungs-Prozesse. Dies hat zur Folge, dass die infiltrationsreduzierende Wirkung der Verschlammungsschicht teilweise rückgebildet wird. Generelle Aussagen über die tatsächliche Ausprägung dieses Rückbildungsprozesses sind kaum möglich, da die beeinflussenden Faktoren standörtlich und zeitlich sehr variabel sind. Dementsprechend wird

der Vorschlag von NIEHOFF aufgegriffen, der für die Rückbildung der Verschlammungsschicht einen einfachen linearen, ausschließlich zeitabhängigen Zusammenhang annimmt (siehe (Gl. 11)). Der aktuelle Verschlammungsfaktor $C_{\text{seal}}(t)$ wird in niederschlagsfreien Zeiten somit für jeden Zeitschritt aus dem Verschlammungsfaktor des vorhergehenden Zeitschrittes berechnet. Die Regenerationsphase endet spätestens mit der Ernte der landwirtschaftlichen Kultur. Für eine Langzeitsimulation ist es erforderlich, die entsprechenden Erntetermine zu definieren. Im Falle der einzelfallbezogenen hydrologischen Modellierung ausgewählter, hochwasserinduzierender Niederschläge kann darauf ggf. verzichtet werden. Dies nicht zuletzt, da eine zeitliche Überlagerung dieser Niederschläge mit einer Beerntung landwirtschaftlicher Kulturen mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann.

$$C_{\text{seal}}(t_n) = C_{\text{seal}}(t_{n-1}) + 0,01 * \frac{\Delta t}{24} * C_{\text{seal}}(t_{n-1})$$

$\frac{\Delta t}{24}$ = aktuelle Zeitschrittweite bezogen auf 24 h

(Gl. 11)

NIEHOFF weist als Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse für den hier angewandten Ansatz darauf hin, dass das Modell besonders sensitiv auf den Verschlammungsfaktor C_{fix} (von NIEHOFF als C_{max} bezeichnet) reagiert. Dies gilt natürlich nur für konvektive Niederschläge, die den Schwellwert der erosiven Niederschlagintensität überschreiten (5 mm/h siehe Abbildung 89).

9.4.4 Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells zur Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung

In den vorangegangenen Erläuterungen ist dokumentiert, welche Parameter den konservierend und konventionell bearbeiteten Böden zugewiesen wurden. Des Weiteren wurde dargestellt, welche zusätzlichen Module in das Modell STORM implementiert wurden. In diesem Zusammenhang wurden eine Reihe von Parametern eingeführt, deren konkrete Festlegung eines Kalibrierungsprozesses bedarf.

Die Parametrisierung der hydrologischen Wirkung der einzelnen Maßnahmen erfolgte im ersten Schritt anhand von überschaubaren Beispielflächen - so genannten Testflächen. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass die Abflussbildungsprozesse und das Speicherverhalten unter einheitlichen Randbedingungen besser bewertet und verglichen und andere sich überlagernde Effekte zunächst ausgeblendet werden können. Erst nach Abschluss dieser Phase, die der Implementierung des vorhandenen hydrologisch-bodenphysikalischen Prozessverständnisses in das Modell diene, wurden ein Teileinzugsgebiet der Mulde und schließlich das Gesamteinzugsgebiet hydrologisch modelliert (siehe Kapitel 5 und 10).

Das Ersatzsystem, das zur Kalibrierung aufgebaut wurde, besteht aus 36 Teilflächen. Jede Teilfläche hatte eine Größe von einem Quadratkilometer und repräsentierte eine der 18 Bodenklassen (siehe Tabelle 1), die zusätzlich entsprechend der Art der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung (konservierend und konventionell) differenziert wurde. In Abbildung 90 ist das beschriebene Ersatzsystem zur Kalibrierung abgebildet. Beim Entwurf dieses Ersatzsystems stand die Abflussbildung der Böden im Vordergrund. Die Aspekte Abflusskonzentration und Abflusstransport wurden daher ausgeblendet.

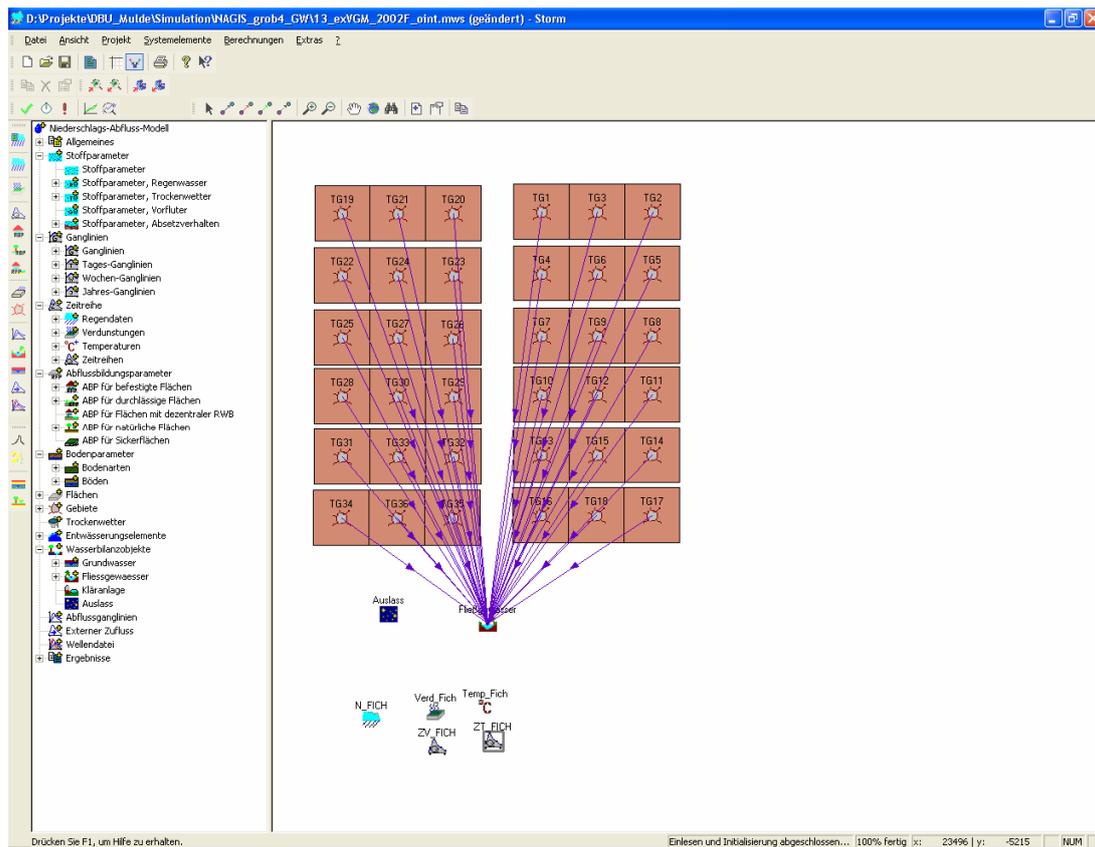


Abbildung 90: Ersatzsystem für die Kalibrierung der Modells STORM

Die Kalibrierung des Modells zur Abbildung des Einflusses der Bodenbearbeitung auf die Infiltrationseigenschaften erfolgte in Anlehnung an die in Kapitel 7.1.2 von [ZIMMERLING 2003] zusammengestellten Literaturangaben und Messergebnisse. ZIMMERLING stellte fest, dass bei mehrjähriger, dauerhafter, konservierender Bodenbearbeitung und bei intensiver Beregnung eine mittlere Erhöhung des Infiltrationsvermögens um 15 % zu erwarten ist. Diese Angabe wurde als Zielgröße für die Kalibrierung der konzeptionellen bodenhydraulischen Parameter der Verschlämmung und Makroporeninfiltration verwendet.

Niederschlag und Anfangsbodenfeuchte:

Für die Kalibrierung wurden Hochwasser erzeugende Naturregen aus den Zeiträumen August 2002 und August/ September 1995 ausgewählt. Für die genannten Hochwasserzeiträume lagen Informationen für verschiedene Messstationen des Einzugsgebietes der Mulde vor. Die Niederschlagshöhen dieser Ereignisse sind in der Tabelle 4 aufgeführt. Die bereitgestellten Niederschlagsdaten erfassen auch das Niederschlagsgeschehen in der Zeit vor dem Hochwasserereignis. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wurde darauf verzichtet, eine Vorregenperiode zu simulieren und stattdessen das Konzept der differenzierten Startwassergehalte (Wassergehalt nach 10 Tage) angewendet. Wie oben beschrieben, ist dieser Startwassergehalt nicht nur bodenartenabhängig, sondern auch an die Art der Bodenbearbeitung gekoppelt. Des Weiteren blieb in diesem Schritt der Kalibrierung der Interflow (lateraler Abfluss in der Matrix) und der horizontale Makroporenfluss (hypodermischer Abfluss) unberücksichtigt, da dies nur im Zuge einer Einzugsgebietsbetrachtung erfolgen kann.

Interzeption und Bedeckungsgrade:

In Tabelle 20 sind die im Jahresverlauf variablen Bedeckungsgrade (in %) und Interzeptionsspeicher (in mm) aufgeführt, die der Modellierung zu Grunde gelegt wurden. Es handelt sich nicht um vollständige Jahresverläufe, da sich die Berechnungszeiträume auf die Sommermonate beschränken. Bei der Wahl der Bedeckungsgrade wurde auf

Literaturangaben zurückgegriffen. Im Parameterkatalog Sachsen des Handbuches für das Computermodell Erosion 2D/3D [SCHMIDT et al. 1996] ist eine Zusammenstellung von Monatswerten der Bedeckungsgrade für die verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen zu finden. SCHMIDT et al. beziehen sich dabei u.a. auf Angaben von [DIKAU 1983] und [BRAEUMER 1992].

Tabelle 20: Jahrgang der Bedeckungsgrade und Interzeption

	Mai	Juni	Juli	August	September
Bedeckungsgrade [%]					
Ackerflächen, konservierend bearbeitet	50%	60%	90%	90%	60%
Ackerflächen, konventionell bearbeitet	30%	40%	50%	50%	20%
Interzeption [mm]					
Ackerflächen (konservierend oder konventionelle bearbeitet)	2.0	2.3	2.3	1.4	0.6

Repräsentative Interzeptionswerte für verschiedene Landnutzungen wurden von [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996] zusammengestellt. Explizit sind dort Werte u.a. von [HOYNINGEN-HUENE 1983] und [MANIAK 1993] aufgeführt. Bei diesem Parameter wurde keine Differenzierung zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung vorgenommen. Zwar ist davon auszugehen, dass die erhöhte Mulchaufgabe konservierend bearbeiteter Flächen den Interzeptionsspeicher geringfügig vergrößert, jedoch fehlten genauere Angaben, um diesen Effekt berücksichtigen zu können.

Sowohl bei der Wahl der Bedeckungsgrade als auch bei der Abschätzung der Interzeption musste von einer mittleren Verteilung der Fruchtarten im Einzugsgebiet ausgegangen werden. Anhaltspunkte zur Verteilung der Anbaufrüchte im Untersuchungsgebiet können den InVeKoS-Daten entnommen werden. Auf eine Auswertung wurde jedoch verzichtet.

Wurzeltiefe, Makroporosität und landnutzungsbezogene Verschlammungsneigung:

Weitere landnutzungsabhängige Parameter sind in Tabelle 21 aufgeführt. Zur effektiven durchschnittlichen Durchwurzelungstiefe wurden Angaben aus [RENGER 1983] herangezogen (siehe auch [LFUG 2002c]).

Wie ausgeführt, sind die potentielle vertikale Makroporenflussrate und die Verschlammungsfaktoren Kalibrierungsparameter. Die beste Übereinstimmung mit den angenommenen Zielgrößen ergab sich bei der Wahl der in Tabelle 21 angegebenen Werte.

Tabelle 21: Parameter der Landnutzung bzw. Bodenbearbeitung

Landnutzung, Bodenbewirtschaftung	Wurzeltiefe [m]	potentielle vertikale Makroporenflussrate pot I_{mac} [mm/h]	landnutzungsbedingter Verschlammungsfaktor C_{use} [-]
Ackerflächen, konservierend bearbeitet	1.0	12.0	0.9
Ackerflächen, konventionell bearbeitet	1.0	0.0	0.4

Bodenartenbezogenen Verschlämmungsneigung:

In Tabelle 22 ist die von der Korngrößenverteilung abhängige Verschlämmungsneigung der Bodenarten aufgeführt. Informationen zur Verschlämmungsneigung der einzelnen Bodenarten wurden der Methodendokumentation nach [HENNING 1994] entnommen.

Tabelle 22: Bodenartenabhängige Parameter der Verschlammung

	bodenartenbedingter Verschlammungsfaktor für schluffige Bodenarten (Lu, Uls, Us, Ut2, Ut3, Ut4, Uu) C_{soil} [-]	bodenartenbedingter Verschlammungsfaktor für alle übrigen Bodenarten C_{soil} [-]
Ackerflächen, konservierend bearbeitet	0.75	0.80
Ackerflächen, konventionell bearbeitet	0.40	0.50

Maximale Infiltrationskapazität:

Für alle Bodenarten der Oberkrume wurde als maximale Infiltrationskapazität 100 mm/h angenommen. Da das Modell STORM einen kennlinienbasierten, bodenfeuchteabhängigen Infiltrationsansatz nach [HOLTAN 1961] verwendet, wird neben der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit die Angabe eines Maximalwertes dieser Infiltrationskennlinie notwendig (siehe Kapitel 9.2.2).

Die Bestimmung der Infiltrationskapazität bei geringen Wassergehalten (Saugspannung bei $pf=4,2$) ist nicht unproblematisch, da je nach Bodenart der Oberkrume bereits kleine Bodenfeuchteänderungen sehr große Saugspannungsänderungen hervorrufen können [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992]. Die Verringerung der Saugspannung führt wiederum zu einer deutlichen Reduktion der Infiltration. Streng genommen ist es daher nicht zulässig, die Bodenfeuchte pro Zeitschritt über die Mächtigkeit der obersten Bodenschicht zu mitteln, wie dies im Bodenwasserhaushaltsansatz von STORM der Fall ist. Die Verwendung mittlerer Bodenfeuchten je Bodenschicht und Zeitschritt kann zu erheblichen Überschätzungen der tatsächlichen Infiltrationskapazitäten führen. Die im Modell verwendete maximale Infiltrationskapazität wurde daher als empirischer Wert definiert, der die Vereinfachungen des Modellansatzes und des Infiltrationsansatzes nach HOLTAN berücksichtigt.

Da sich die modellierten Infiltrationsprozesse im Saugspannungsbereich zwischen $pf=2,0$ und Null bewegen, konnte darüber hinaus davon ausgegangen werden, dass der Parameter der maximalen Infiltrationskapazität nur einen geringfügigen Einfluss auf die modellierten Infiltrationsverläufe hat. Mit Blick auf Langzeitsimulationen, in denen die Trockenphasen nach bzw. vor einem Niederschlagsereignis mit betrachtet werden, sind der Infiltrationsansatz und die hier gewählte Parametrisierung jedoch zu überdenken.

Alle weiteren Bodenartenparameter für die verschiedenen Bewirtschaftungsformen und Standorte sind in Tabelle 19 aufgelistet.

9.4.5 Ergebnisse der Testflächenbetrachtung

Unter Annahme der in Kapitel 9.4.4 beschriebenen Parametrisierung, ergeben sich für die konservierende und konventionelle Bodenbearbeitung folgende Infiltrations- und Speichereigenschaften (siehe Abbildung 91 und Abbildung 92 sowie Tabelle 23).

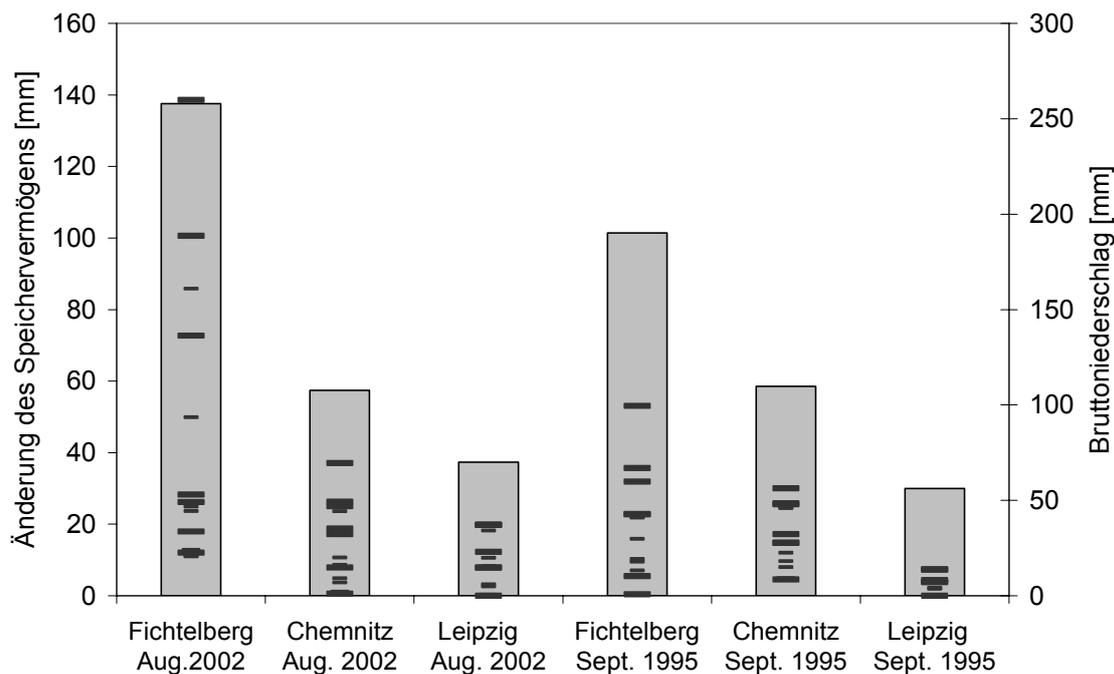


Abbildung 91: Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in mm) sowie die Niederschlagshöhe der Ereignisse an den Messstationen (als Säulen)

Abbildung 91 gibt einen Überblick, welche Niederschlagshöhen (in mm) zusätzlich im Boden gespeichert werden können, wenn Ackerflächen von der konventionellen Bodenbearbeitung auf die konservierende Bodenbearbeitung umgestellt werden. Die hinterlegte graue Säule gibt an, welche Niederschlagssummen die insgesamt sechs verwendeten Niederschlagsreihen enthalten. Jede Markierung (Querstrich) repräsentiert die Auswertung der Simulationsergebnisse für eine der 18 vorgestellten Bodenklassen (siehe Tabelle 1). Die Größe der Markierung in Abbildung 91 ist ein Hinweis auf den Flächenanteil der jeweiligen Bodenklasse im Untersuchungsgebiet. Die breiteren Markierungen stehen für Bodenklassen, die auf mehr als 7 % der Einzugsgebietsfläche zu finden sind. Dies trifft für sieben der 18 Bodenklassen zu (siehe Kapitel 5).

Im Tabelle 23 sind die Änderungen des Speichervermögens noch einmal in tabellarischer Form zusammengestellt. Zusätzlich sind hier die Unterschiede des Infiltrations- und Speichervermögens bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung unter Verwendung weiterer Niederschläge der Station Dresden dargestellt.

Es wird deutlich, dass das zusätzliche Speichervermögen im Boden stark von der Niederschlagsbelastung der einzelnen Ereignisse abhängt. Bei großen Niederschlagssummen, wie sie beispielsweise von der Station Fichtelberg im Erzgebirge während des Ereignisses im August 2002 aufgezeichnet wurden, kann der Unterschied zwischen den beiden Bodenbearbeitungsvarianten besonders ausgeprägt sein. Zum Beispiel kann eine Parabraunerde mit hohem Infiltrationsvermögen (T9; siehe Tabelle 1) in drei Tagen bis zu 138 mm Niederschlag zusätzlich aufnehmen und in tiefere Bodenschichten weiterleiten, weil die geringere Verschlämmung und die zusätzlichen vertikalen Makroporen bei konservierender Bodenbearbeitung zur Wirkung kommen. Die Betrachtung der einzelnen Ereignisse zeigt aber auch die breite Streuung des zusätzlichen Speichervermögens für die verschiedenen Bodenklassen. Im anderen Extrem können die bodenbearbeitungsabhängigen Unterschiede in der Infiltrationskapazität auch gegen Null

tendieren. Dies ist insbesondere auf den Standorten und bei Niederschlagsereignissen der Fall, bei denen bereits unter konventioneller Bodenbearbeitung ein Großteil des Niederschlags vom Boden aufgenommen werden kann.

Die Ergebnisse in Abbildung 91 und Abbildung 92 müssen daher in Relation zum Bruttoniederschlag dargestellt gesehen werden. Hier ist zu erkennen, dass je nach Niederschlagsereignis die mittlere Änderung des zusätzlichen Speichervermögens zwischen 7 % und 16 % der Niederschlagssummen liegt. Die vorausgesetzte Zielgröße der infiltrationserhöhenden Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung von 15 % im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung wurde somit durch die Kalibrierung erreicht.

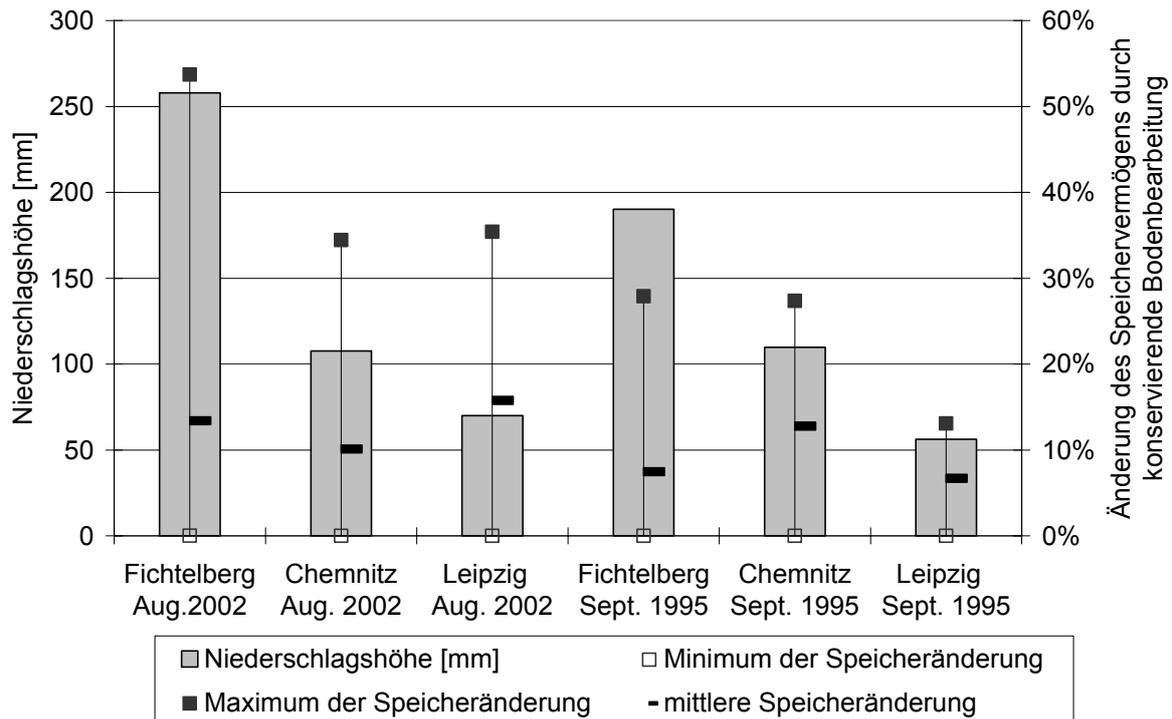


Abbildung 92: Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in Prozent der Bruttoniederschlagshöhe des jeweiligen Ereignisses – Bruttoniederschlag als Säulen)

Tabelle 23: Ergebnisse der Testflächensimulation – Änderung des Speichervermögens konservierend bearbeiteter Böden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (in mm) sowie die Niederschlagshöhe der Ereignisse an den Messstationen

Station	Fichtelberg		Chemnitz		Leipzig		Dresden						
	August 2002	September 1995	August 2002	September 1995	August 2002	September 1995	April 1956	Mai 1978	Juli 1980	März 1981	August 1981	August 1983	
Niederschlagszeitraum													
Bruttoniederschlag [mm]	260	182	110	106	70	54	25	31	59	95	46	143	
Bodenklasse													
GW	-16.4	-4.1	-7.6	10.9	13.1	7.3	0.6	2.3	13.7	0.0	13.3	-0.8	
G0	12.7	10.3	10.6	12.1	11.9	3.8	0.0	0.4	8.7	0.0	12.9	11.6	
G1	23.7	21.8	19.2	24.5	19.7	7.4	0.4	1.8	13.8	0.0	16.5	31.0	
G13	12.7	0.4	0.8	5.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.7	1.4	
G2	12.0	7.1	8.5	14.6	15.0	4.2	0.0	0.5	8.9	0.0	12.7	14.1	
G6	12.7	0.4	0.8	5.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	11.7	1.4	
G8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	
T1	26.2	22.7	25.1	25.6	24.5	7.5	0.4	1.7	14.0	0.0	17.2	31.5	
T13	12.0	0.4	0.5	4.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	11.7	1.1	
T14	11.9	0.4	0.5	4.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	11.7	1.0	
T2	72.7	31.9	18.8	17.3	16.6	4.4	0.0	1.0	10.5	0.0	18.0	15.6	
T3	24.9	22.0	23.8	24.6	22.5	7.5	0.4	1.7	14.0	0.0	17.2	31.1	
T3a	26.5	22.8	26.4	25.9	26.2	7.5	0.4	1.7	14.0	0.0	17.2	31.5	
T4	85.7	15.9	4.8	8.1	5.6	2.3	0.0	0.0	6.2	0.0	11.4	5.5	
T5	18.2	5.4	8.0	14.8	12.3	3.9	0.0	0.2	8.5	0.0	12.9	11.9	
T6	49.9	9.5	3.7	9.8	4.3	2.0	0.0	0.0	5.9	0.0	15.4	5.3	
T7	100.5	35.6	17.1	14.9	12.3	3.9	0.0	0.2	8.5	0.0	12.9	14.4	
T9	138.5	53.1	37.1	30.1	26.2	7.5	0.4	1.7	14.0	0.0	17.2	31.6	

9.5 Erweiterungsvorschläge für das hydrologische Modell

Der hier vorgestellte Modellansatz und die dazu gehörige Parametrisierung der konventionellen und konservierenden Bodenbearbeitung lassen erhebliche Spielräume für Modifikationen und weitergehenden Differenzierungen zu. Einige bereits teilweise angesprochene Vorschläge zur Weiterentwicklung sind:

- Änderung des Infiltrationsansatzes: Statt des zurzeit verwendeten Infiltrationsansatzes nach HOLTAN könnte dieser durch einen modifizierten GREEN-und-AMPT-Ansatz z. B. nach [CHU & MARIÑO 2005] ersetzt werden. Die hierfür notwendigen van-Genuchten-Parameter liegen für jede Bodenart vor (siehe Tabelle 19). Mit diesen Bodenparametern ließe sich die notwendige Saugspannung an der Feuchtefront bestimmen. Der Vorteil dieses Ansatzes wäre, dass die schwer bestimmbare maximale Infiltrationskapazität nicht mehr benötigt wird.
- Generell gehen viele Überlegungen zur Verbesserung des Bodenwasserhaushaltes in die Richtung, die bekannten van-Genuchten-Parameter [ZACHARIAS & WESSOLEK 2007] verstärkt in die Modellansätze einzubeziehen, da auf diesem Wege die physikalische Begründung des Modell wächst [ZIMMERLING 2003]. So könnten unter Anwendung der Beziehung nach MUALEM und van-Genuchten-Parameter eine Exfiltrations- oder Perkolationskennlinie ermittelt werden, die das Entwässerungsverhalten der Böden ggf. besser beschreibt.
- In Kapitel 2.2 wird auf die Abflussbildungsprozesse eingegangen, die zu Hochwasser führen. In der Literatur ([BRONSTERT 1994], [BUTTLE 1994], [HEWLETT & NUTTER 1970]) wird mehrfach darauf verwiesen, dass das Entstehen von Sättigungsflächen (in Kombination mit hohen Vorfeuchten) oder genauer gesagt das Auftreten von Sättigungsüberschuss zu einem Großteil zu Hochwasserabfluss beiträgt. Für die Modellierung der Abflussbildung ganzer Einzugsgebiete ist somit die Identifikation von Sättigungsflächen von besonderer Bedeutung.
Es wäre daher denkbar und sinnvoll, einen Ansatz zur Beschreibung des Sättigungsflächenanteils in das Modell STORM zu integrieren. [BEVEN et al. 1984] haben in seinem Gebietsmodell TOPMODEL den Ansatz der topografischen Indices verwendet. [PESCHKE et al. 1999a] kam unter Verwendung dieses Ansatzes jedoch zu keinen befriedigenden Ergebnissen und schlägt eine andere Methode vor, die auf Informationen zu Bodentyp, Hangneigung und Gewässernähe basiert.
Es ist festzuhalten, dass die Entstehung von Sättigungsflächen auf der Einzugsgebietsskala nur schwer zu simulieren und noch schwieriger kalibrierbar ist. Mit Blick auf die Szenarien ist es wichtig zu betonen, dass bei der Auswahl der Umsetzungsflächen nur Standorte ohne schnelle Abflusskomponenten, also auch außerhalb von Sättigungsflächen, berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass eine verstärkte Infiltration durch schnelle laterale Fließwege für die Abflussreduktion unwirksam wird und das Entstehen von Sättigungsflächen verschärft wird (siehe Kapitel 6).
- Des Weiteren wäre es sinnvoll, wenn den Bodenprofilen in Zukunft geologische oder hydrogeologische Randbedingungen, Stauhorizonte, Grundwasserleiter oder undurchlässiger Untergrund zugeordnet werden könnte.
- Ein Ansatz des vertikalen Makroporenflusses, der die Entleerung der Makroporen beschreibt, könnte eine Verbesserung bedeuten. [BRONSTERT 1994] stellt verschiedene Konzepte vor und verweist insbesondere auf Ansätze von [BEVEN & GERMANN 1980] (siehe Kapitel 9.4.2).

10 Ergebnisse – hydrologische Auswirkungen der Bewirtschaftungsszenarien

In diesem Kapitel fließen die Überlegungen zu den durch die Maßnahmen veränderten Prozessen (Kapitel 7 und 9) und die Annahmen der Szenarientwicklung (Kapitel 8) zusammen. Im Mittelpunkt stehen hierbei die konservierende Bodenbearbeitung und die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Mulden-Rigolen-Elementen, die auf landwirtschaftlichen bzw. urbanen Flächen der Entstehung schneller Abflusskomponenten entgegenwirken. Für das Einzugsgebiet der Mulde wird beispielhaft dargestellt, welche hydrologischen Auswirkungen von der Umsetzung der Szenarien zu erwarten sind.

Eine mögliche Wirkung der oben genannten Maßnahmen auf kommende Hochwasserereignisse wird im Folgenden anhand von zwei Kenngrößen quantifiziert:

- In Kapitel 10.1 wird das aktivierbare Senkenpotenzial als Maß für die hydrologische Wirkung verwendet. Der Begriff Senkenpotenzial wurde bereits in Kapitel 6 eingeführt. Das „Senkenpotenzial“ definiert die Fähigkeit einer Landschaftseinheit, eine bestimmte Wassermenge aufzunehmen (Infiltration) und diese mindestens für die Dauer einer Hochwasserperiode im Boden oder auch künstlichen Speichern zurückzuhalten. Während es im Kapitel 6 um die potenziellen Senkenpotenziale unter idealen natürlichen Landnutzungsbedingungen ging, ist hier das durch veränderte Bewirtschaftung zusätzlich geschaffene Retentionsvolumen gemeint.

Bereits im Ist-Zustand gelangen große Teile des Niederschlages nicht ins Gewässer, sondern werden in Abhängigkeit von der Charakteristik des Ereignisses, des Einzugsgebietes und der Anfangsbedingungen ober- und unterirdisch zwischengespeichert und verdunsten bzw. fließen mit extremer Verzögerung ab. Aus diesem Grund weicht der Abflussbeiwert von Hochwasserereignissen deutlich von 100 % ab. [ENGEL 1994] nennt Abflussbeiwerte von 40 – 50 % bei extremen Hochwassern in den Jahren 1993 und 1995 im Rheineinzugsgebiet. [MERZ & BLÖSCHL 2004] nennen für österreichische Einzugsgebiete Abflussbeiwerte zwischen 10 – 60 %.

Quantifiziert werden soll an dieser Stelle nur das zusätzliche oder aktivierbare Senkenpotenzial. Das Senkenpotenzial, angegeben in Kubikmeter Speichervolumen, soll den Vergleich mit anderen Hochwasserschutzmaßnahmen ermöglichen, die eine Scheitelabflussminderung mit Hilfe von Speichern anstreben (z. B. Poldern oder Talsperren).

- Die Bereitstellung von Speichervolumen im Boden oder oberirdischen Speicher ist ein entscheidender Punkt zur Verminderung der Hochwassergefahr. Aus dem zusätzlich geschaffenen Senkenpotenzial lässt sich jedoch nicht direkt die hydrologische Wirkung auf das Gewässersystem ableiten. Aus diesem Grund wird in Kapitel 10.2 das Abflussverhalten des Mulde-Einzugsgebietes im Ist-Zustand abgebildet und anschließend für die aufgestellten Szenarien die Änderung des Scheitelabflusses an verschiedenen Knotenpunkten des Gewässersystems bestimmt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse müssen im engen Kontext mit den Szenarien interpretiert werden. D. h., dass sie nur unter der Annahme einer gezielten und großflächigen Umsetzung der Maßnahmen zu erwarten sind.

10.1 Bestimmung des aktivierbaren Senkenpotenzials

10.1.1 Rückhaltevermögen dezentraler Bewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten

In Kapitel 9.3 wurde stellvertretend für alle Siedlungsflächen, die im Szenario dezentral bewirtschaftet werden, ein Mulden-Rigolen-Element mittels Langzeitsimulation dimensioniert. Für die einzugsgebietsweiten Berechnungen können nun die ermittelten Speichervolumina aus Tabelle 17 auf die ausgewählten Flächen (siehe Tabelle 12) des Szenarios übertragen werden.

Aus den ermittelten erforderlichen Speichervolumina ergibt sich ein spezifisches mittleres Speichervolumen von rund 360 m^3 je Hektar dezentral bewirtschafteter oder abgekoppelter Fläche, wenn von einem mittleren Versiegelungsgrad von 58 % ausgegangen wird. Der mittlere Versiegelungsgrad wurde als flächengewichtetes Mittel unter Verwendung der von [SIEKER et al. 2001] genannten Versiegelungsgrade für verschiedene Bebauungsstrukturen bestimmt.

Dieses bauliche Speichervolumen kann noch nicht mit dem Rückhaltevolumen der dezentralen Bewirtschaftungsanlagen gleichgesetzt werden. Dieses ergibt sich bei Hochwasser verursachenden Niederschlägen aus der Summe des in Anspruch genommenen baulichen Speichervolumens und dem Versickerungsvolumen während der Dauer des Niederschlags. Die Summe aus Speicherung und stetiger Versickerung wird den Hochwasserabflüssen durch die dezentrale Bewirtschaftung entzogen und stellt die eigentliche Rückhaltewirkung der dezentralen Bewirtschaftung dar. Das auf diese Weise aktivierte Senkenpotenzial ist von der Summe und dem zeitlichen Verlauf der Niederschläge und bei einzugsgebietsweiter Betrachtung auch von der örtlichen Verteilung der Niederschläge abhängig.

Tabelle 24 zeigt im oberen Teil acht Niederschlagsereignisse mit den aufgezeichneten Niederschlagshöhen. Die Ereignisse im August/ September 1995 und im August 2002 haben im Muldegebiet zu Hochwasserabflüssen geführt. Die Niederschlagshöhen dieser beiden Ereignisse wurden an drei für das Einzugsgebiet repräsentativen Stationen (Fichtelberg (Erzgebirge), Chemnitz (Hügellandanteil), Leipzig (Flachlandanteil)) registriert. Die weiteren Niederschlagszeiträume wurden an der Station Dresden gemessen, da keine weiteren Niederschlagsdaten aus dem Muldegebiet vorlagen (siehe Kapitel 5.3.1).

Im unteren Teil der Tabelle 24 sind die sich ergebenden Senkenpotenziale in Prozent des baulichen Speichervolumens ($360 \text{ m}^3/\text{ha}$) angegeben. Es ist zu erkennen, dass das Senkenpotenzial bei gleichem baulichem Speichervolumen dort am höchsten ist, wo die größten Niederschlagshöhen fallen (Fichtelberg). Das Rückhaltevolumen kann im Extrem 925 m^3 je Hektar dezentral bewirtschafteter Siedlungsfläche betragen; mehr als das 2,5-fache des baulichen Speichervolumens. Umgekehrt ist das aktivierte Senkenpotenzial dort am kleinsten, wo die geringsten Niederschlagshöhen auftraten (Leipzig, Dresden). Bei kleinen Niederschlagsereignissen wird das bauliche Speichervolumen mit Werten zwischen $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ und $252 \text{ m}^3/\text{ha}$ noch nicht einmal ausgeschöpft. Daraus lässt sich jedoch nicht folgern, dass die baulichen Speichervolumen der Mulden-Rigolen-Elemente im Raum Leipzig überdimensioniert sind. Das Speichervolumen kann durchaus für kurze Starkregen, die einmal in fünf Jahren auftreten, erforderlich sein.

Damit zeigt sich ein bisher wenig oder gar nicht beachteter Vorteil unverbundener dezentraler Bewirtschaftungsanlagen: Im Hinblick auf den Rückhalt von Hochwasser verursachenden Niederschlägen entfalten sie dort ihre höchste Wirkung, wo der höchste Niederschlag fällt.

Tabelle 24: Niederschlagshöhen im Einzugsgebiet der Mulde und aktiviertes Senkenpotenzial bei Hochwasser verursachenden Niederschlägen

Hochwasser-Zeitraum	Ereignis-dauer	Niederschlagshöhe [mm]			
		Station Fichtelberg	Station Chemnitz	Station Leipzig	Station Dresden
August 2002	7d	260	109	70	n.b.
September 1995	10 d	182	106	54	n.b.
April 1956	3 d	n.b.	n.b.	n.b.	24
Mai 1978	3 d	n.b.	n.b.	n.b.	31
August 1981	2 d	n.b.	n.b.	n.b.	46
Juli 1980	6 d	n.b.	n.b.	n.b.	58
März 1981	11 d	n.b.	n.b.	n.b.	95
August 1983	5 d	n.b.	n.b.	n.b.	143

**Senkenpotenzial im Verhältnis zum baulichen Speichervolumen der Mulden-Rigolen-Elemente
(100 % entsprechen 360 m³/ha)**

Hochwasser-Zeitraum	Ereignis-dauer	Station Fichtelberg	Station Chemnitz	Station Leipzig	Station Dresden
August 2002	7d	175%	145%	106%	n.b.
September 1995	10 d	256%	158%	70%	n.b.
April 1956	3 d	n.b.	n.b.	n.b.	198%
Mai 1978	3 d	n.b.	n.b.	n.b.	83%
August 1981	2 d	n.b.	n.b.	n.b.	134%
Juli 1980	6 d	n.b.	n.b.	n.b.	78%
März 1981	11 d	n.b.	n.b.	n.b.	43%
August 1983	5 d	n.b.	n.b.	n.b.	181%

Die Summe des aktivierbaren Senkenpotenzials hängt jedoch nicht nur von der örtlich unterschiedlichen Überregnung sondern auch von der örtlichen Verteilung der Siedlungsflächen innerhalb des Einzugsgebietes ab (vgl. Abbildung 70 und Tabelle 12). Abbildung 93 zeigt die örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials unverteilter dezentraler Bewirtschaftungsanlagen im Einzugsgebiet der Mulde bei ungleichmäßiger Überregnung im August 2002 (Elbehochwasser). Unter der Annahme der Umsetzung des Szenarios für die Siedlungsflächen (siehe Kapitel 8.2), dass heißt bei einer Abkopplung von durchschnittlich 15 % ragen erwartungsgemäß die großen Siedlungsgebiete Chemnitz, Zwickau, Freiberg, Aue, Annaberg-Buchholz oder Glauchau als Schwerpunkte potenziellen Rückhaltevolumens heraus.

Abbildung 94 zeigt eine ähnliche örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials, das während der Hochwasserperiode im August/ September 1995 bei Umsetzung des Szenarios der Regenwasserbewirtschaftung zur Verfügung gestanden hätte.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Aussagen, die [ZIMMERMAN 2005] in Bezug auf die Wirkung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung bei Hochwasserereignissen getroffen hat. ZIMMERMAN stellte ebenfalls fest, dass die Speicherwirkung der dezentralen

Regenwasserbewirtschaftung nur unter Beachtung des örtlichen Zusammentreffens von Niederschlag und den bewirtschafteten Siedlungsgebieten erfolgen kann und somit jedes Ereignis entsprechend seiner räumlichen Überregnung zu anderen Auswirkungen führt (siehe auch Kapitel 7.1.1).

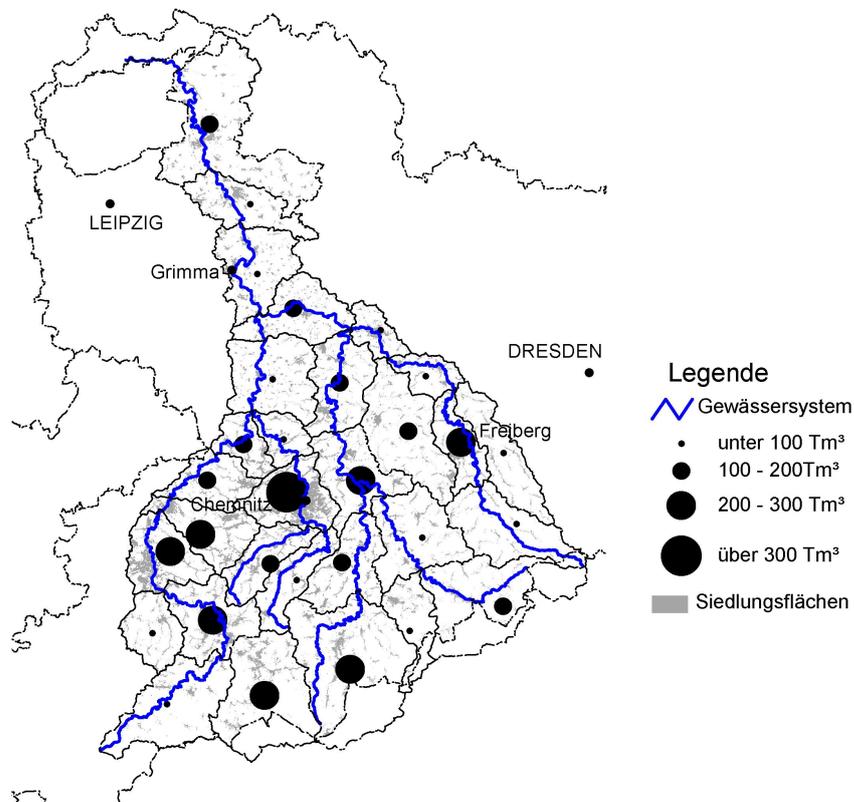


Abbildung 93: Örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials im Einzugsgebiet der Mulde beim Hochwasser im August 2002

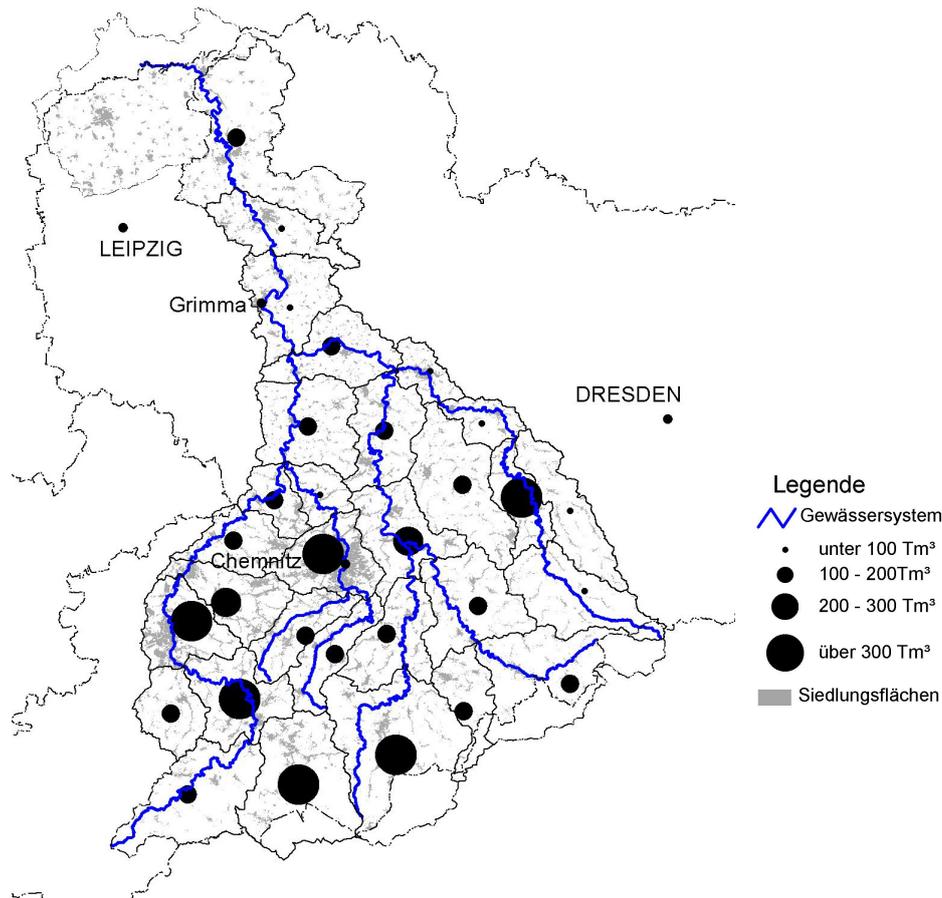


Abbildung 94: Örtliche Verteilung des aktivierbaren Senkenpotenzials im Einzugsgebiet der Mulde beim Hochwasser im September 1995

Abbildung 95 stellt die einzugsgebietsweit summierten Senkenpotenziale von acht in Tabelle 24 aufgeführten Niederschlagsereignissen einander gegenüber. Die Werte schwanken zwischen 0,99 Mio. m³ und 6,23 Mio. m³. Die Ursache für diese Schwankungen liegt in den unterschiedlichen Regendauern, Regensummen und der unterschiedlichen örtlichen Verteilung der Niederschläge. Es muss darauf hingewiesen werden, dass von den acht betrachteten Niederschlagsperioden nur die oben vorgestellten Ereignisse aus den Jahren 1995 und 2002 die ungleichmäßige Überregnung berücksichtigen (siehe Tabelle 24). Die Abbildung 95 verdeutlicht noch einmal, dass die Größe des aktivierten Senkenpotenzials mit zunehmender Niederschlagshöhe der Ereignisse generell zunimmt, die Niederschlagssumme aber nicht die einzige Einflussgröße ist.

Des Weiteren ist in Abbildung 95 dargestellt, welche zusätzlichen Senkenpotenziale aktiviert werden könnten, wenn alle Siedlungsflächen die mit Mulden-Rigolen-Elementen bewirtschaftet werden könnten, abgekoppelt würden. Dieses Szenario erscheint aus heutiger Sicht unrealistisch. Die Werte dienen lediglich dazu, die Grenzen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung als Hochwasserretentionsmaßnahmen aufzuzeigen.

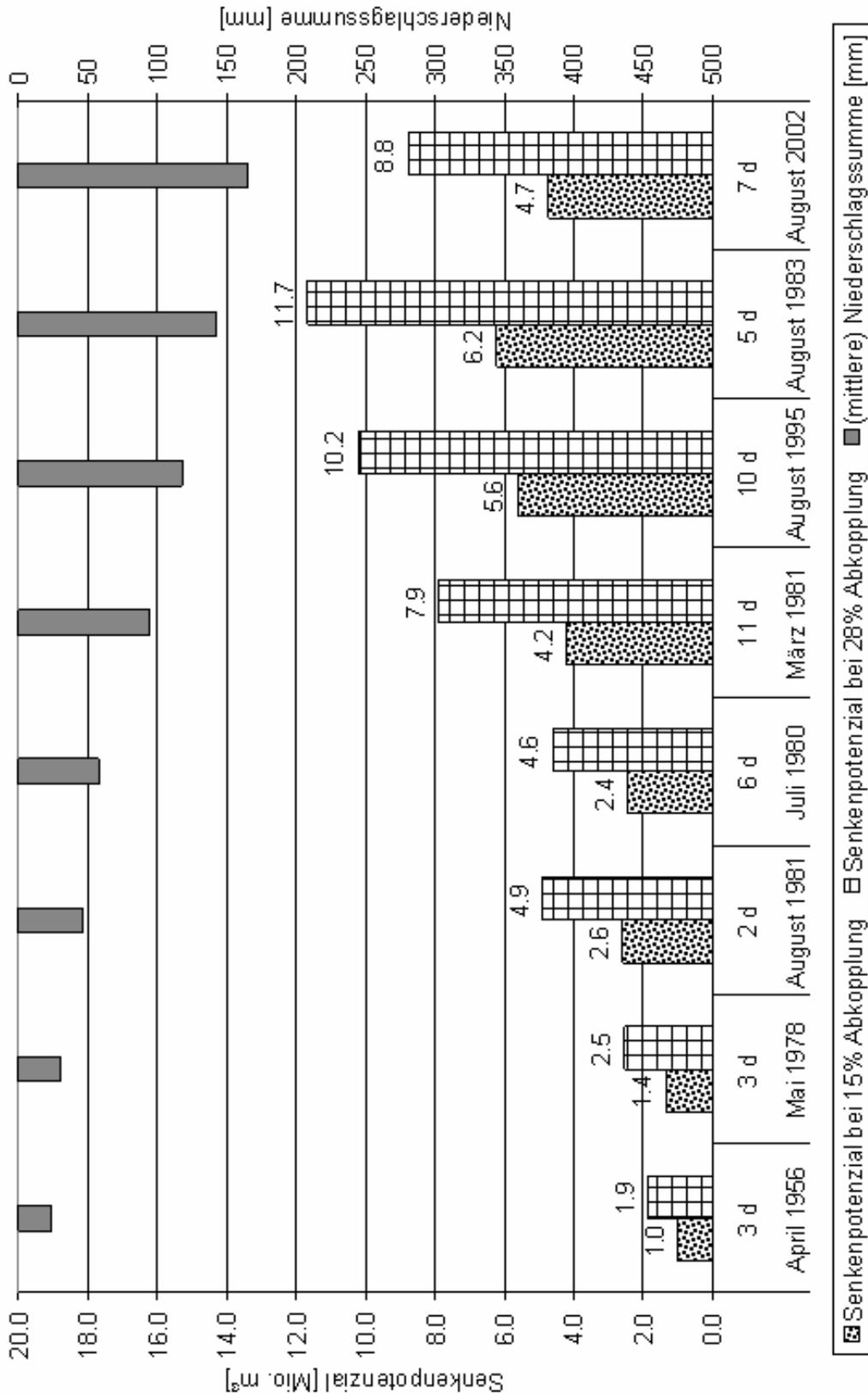


Abbildung 95: Summe des aktivierbaren Senkenpotenzials (in Millionen m³) auf ausgewählten Siedlungsgebieten der Mulde (87 km²) im Verhältnis zum IST-Zustand bei verschiedenen Hochwasserereignissen

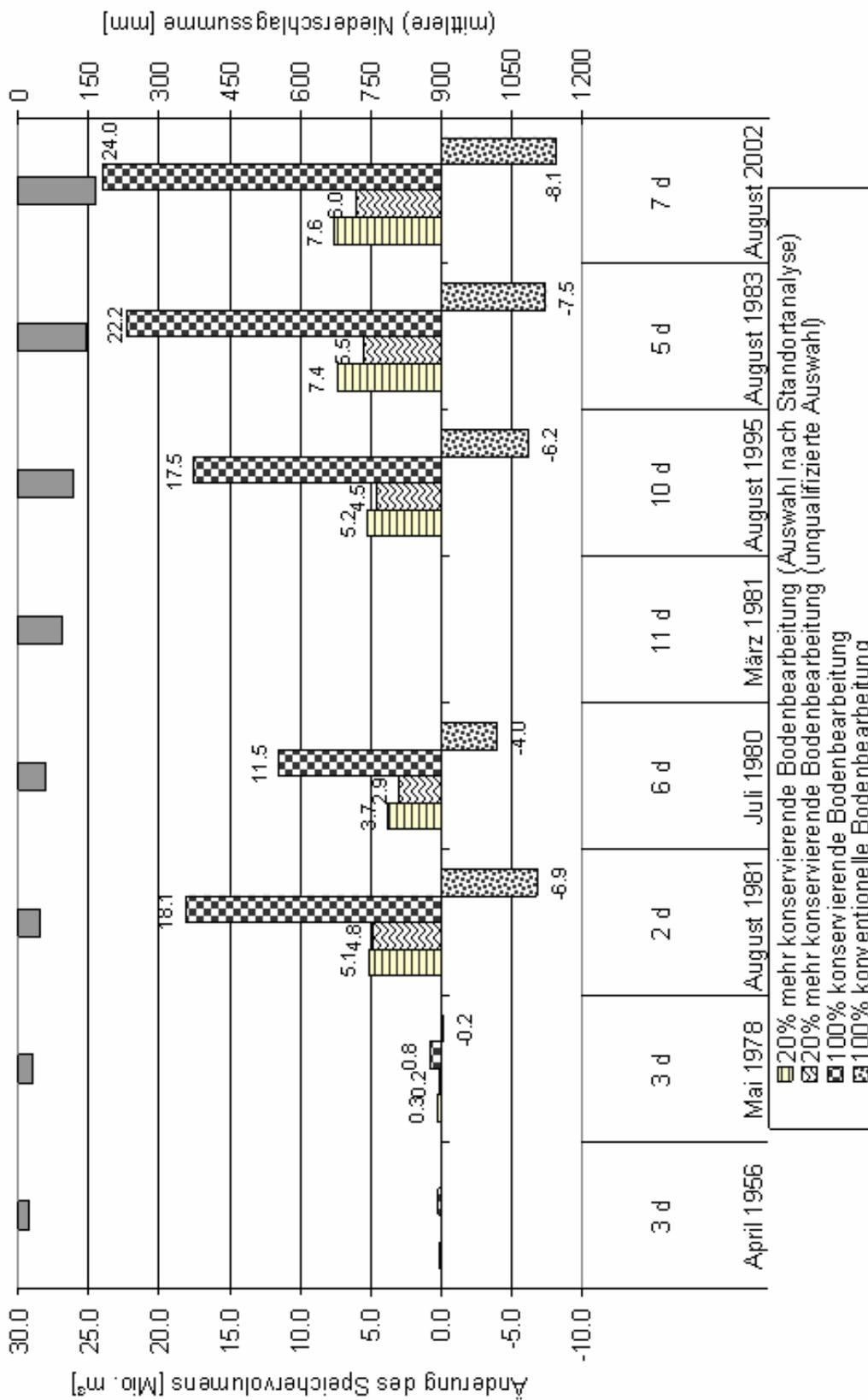


Abbildung 96: Summe des aktivierbaren Senkenpotenzials (in Millionen m³) auf ausgewählten Ackerflächen (350 km²) im Verhältnis zum IST-Zustand verschiedener Hochwasserereignisse

10.1.2 Rückhaltevermögen der konservierenden Bodenbearbeitung auf Ackerflächen

Analog zu den Siedlungsflächen kann das aktivierbare Senkenpotenzial auf ackerbaulich genutzten Flächen im Einzugsgebiet der Mulde bestimmt werden. Grundlage sind die Ergebnisse der so genannten Testflächen, die in Kapitel 9.4.5 vorgestellt wurden sowie das in Kapitel 8.3 entwickelte Szenario, dass eine veränderte Bodenbearbeitung auf 350 km² der Ackerflächen im Einzugsgebiet vorsieht. Das Ziel dieser Betrachtung war eine Einschätzung des zusätzlichen Speichervolumens, das sich durch eine verstärkte Einführung der konservierenden Bodenbearbeitung erschließen lässt.

Bei der Übertragung der Testflächenergebnisse (siehe Tabelle 23) auf die Einzugsgebietsebene ist zu beachten, dass die 18 unterschiedlichen Bodenklassen nicht gleichmäßig verteilt sind und zu sehr unterschiedlichen Anteilen im Einzugsgebiet der Mulde auftreten (vgl. Tabelle 1). Dies gilt umso mehr für die Bodenklassen unter den als geeignet eingestuften Ackerflächen (vgl. Tabelle 14 A in Kapitel 8.3). Des Weiteren ist festzuhalten, dass bei den betrachteten Hochwasserereignissen im September 1995 und im August 2002 die größten Niederschlagshöhen im Erzgebirge (im Süden des Einzugsgebietes) gefallen sind. Hier ist der Anteil der Ackerflächen jedoch deutlich geringer als im Mittel- und Unterlauf des Einzugsgebietes (vgl. Abbildung 83). Somit kommen die besonders großen Differenzen des Speichervermögens zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (siehe Tabelle 23), die vor allem bei großen Niederschlagshöhen auftreten können, nur im begrenzten Umfang zum Tragen. Um die Auswirkungen dieser mehrfach ungleichmäßigen räumlichen Verteilungen erfassen zu können, wurde eine GIS-Analyse durchgeführt.

In Abbildung 96 ist am Beispiel der acht berechneten Hochwasserereignisse (vgl. Tabelle 23) dargestellt, wie sich das Speichervermögen auf den ausgewählten 350 km² Ackerfläche des Muldegebietes gegenüber dem Ist-Zustand verändert. Neben dem in Kapitel 8.3 beschriebenen Szenario, einer 20 %igen Erhöhung des Anteils der konservierenden Bodenbearbeitung, sind dem Ist-Zustand zwei weitere Extremszenarien gegenübergestellt worden. Bei der Auswahl der zusätzlich konservierend bearbeiteten Flächen wurde einmal nach dem Zufallsprinzip (unqualifizierte Auswahl) und einmal gezielt nach der Wasserrückhaltefähigkeit der Ackerflächen (Auswahl nach Standortanalyse) vorgegangen (siehe Kapitel 8.3).

In Abhängigkeit vom jeweiligen Hochwasserereignis könnten bei der Umsetzung des Szenarios bis zu 7,6 Mio. m³ Niederschlag zusätzlich im Einzugsgebiet gespeichert werden und damit dauerhaft der Hochwasserwelle entzogen werden. Eine zusätzliche Aktivierung von Senkenpotenzial im Boden bleibt dann aus, wenn bereits im Ist-Zustand ein Großteil des Niederschlags von den Böden aufgenommen werden kann. Dies trifft insbesondere bei kleinen oder sehr lang andauernden Niederschlägen zu (siehe Ereignis im April 1956 oder in März 1981 in Abbildung 96). Bei diesen Niederschlägen kommt die erhöhte Infiltrationskapazität der konservierenden Bodenbearbeitung nicht zur Entfaltung.

Der Vergleich zwischen den beiden Szenarien mit 20 % mehr konservierender Bodenbearbeitung zeigt, dass durch gezielte Auswahl der geeigneten Standorte das Szenario zusätzlich optimiert werden könnte. Während des Hochwasserereignisses im August 2002 könnten bei qualifizierter Auswahl der Umsetzungsflächen 1,6 Mio. m³ mehr Niederschlag zurückgehalten werden, als bei einer zufälligen Auswahl der Standorte. Es ist jedoch kritisch anzumerken, dass sich damit die Umstellung der Bodenbearbeitung und die Aktivierung der Senkenpotenziale auf einzelne Regionen im Einzugsgebiet beschränken würde. Dies widerspricht dem Bestreben, in möglichst vielen Bereichen des Einzugsgebietes hochwasserwirksames Speichervolumen („Senkenpotenzial“) zu aktivieren.

Die Ergebnisse für das wenig realistisch erscheinende Szenario „100 % konservierende Bodenbearbeitung“ zeigen die Größenordnung des zurzeit ungenutzten, jedoch mit Hilfe der konservierenden Bodenbearbeitung erschließbaren Senkenpotenzials unter den Ackerflächen des Einzugsgebietes auf. Um bis zu 24 Mio. m³ Abflussvolumen würde das Gewässersystem der Mulde bei einem Niederschlagsereignis, das dem im August 2002 ähnlich wäre, entlastet.

Umgekehrt ist festzuhalten, dass eine Rückkehr zu annähernd 100 % konventioneller Bodenbearbeitung die Hochwassersituation während des Hochwassers 2002 verschärft hätte. Es wären rund 8,1 Mio. m³ Niederschlag zusätzlich als schneller Oberflächenabfluss von den betrachteten Ackerflächen den Gewässern zugeflossen.

In Tabelle 25 ist dargestellt, welche mittleren Abflussbeiwerte sich auf den ausgewählten Ackerflächen (1.786 km²) bei den unterschiedlichen Szenarien ergeben. Der verhältnismäßig geringe Abflussbeiwert von knapp 30 % im Ist-Zustand beim Hochwasser im August 2002 ist mit der Standortauswahl im Zuge der Szenarientwicklung zu erklären. Wie beschrieben beschränkte sich die Standortauswahl auf Flächen mit hohen Wasserrückhaltepotenzialen, d. h. hohen Speicherpotenzialen und geringen Abflussbeiwerten. Hinzu kommt, dass im Unterlauf des Mulde-Einzugsgebietes – hier befindet sich ein deutlich größerer Anteil von Flächen mit hohem Wasserrückhaltepotenzial - nicht so extreme Niederschlagshöhen beim Hochwasser 2002 aufgetreten sind wie im Erzgebirge (vgl. Tabelle 4 oder Tabelle 24).

Tabelle 25: Mittlere Abflussbeiwerte auf den betrachteten Flächen

Szenario:	August 2002	September 1995
100% konventionelle Bodenbearbeitung	32,4%	17,4%
IST-Zustand	29,1%	14,4%
100% konservierende Bodenbearbeitung	19,4%	6,2%
20% mehr konservierende Bodenbearbeitung	26,6%	12,3%
20% mehr konservierende Bodenbearbeitung (auf ausgewählten Flächen)	26,1%	12,0%

Wie bei der Auswertung des siedlungswasserwirtschaftlichen Szenarios wurde für die 30 definierten Teileinzugsgebiete (siehe Abbildung 30) das aktivierte Senkenpotenzial berechnet, um den einzugsgebietsspezifischen Einfluss der ungleichmäßigen Verteilung von Umsetzungspotenzialen, Bodenklassen und Überregnung zu verdeutlichen. Abbildung 97 zeigt das entsprechend aufbereitete Ergebnis für das Szenario „20 % mehr konservierende Bodenbearbeitung“ während des Niederschlagsereignisses vom August 2002. In der Abbildung wird die Bedeutung der großen Umsetzungspotenziale und der hohen Wasserrückhaltepotenziale im Mittel- und Unterlauf deutlich sichtbar, die sich insgesamt zu 7.6 Mio. m³ zusätzlichem Speichervolumen summieren. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Niederschlagsereignis im September 1995 (siehe Abbildung 98), bei dem insgesamt 5.2 Mio. m³ zusätzliches Speichervolumen aktiviert werden würde.

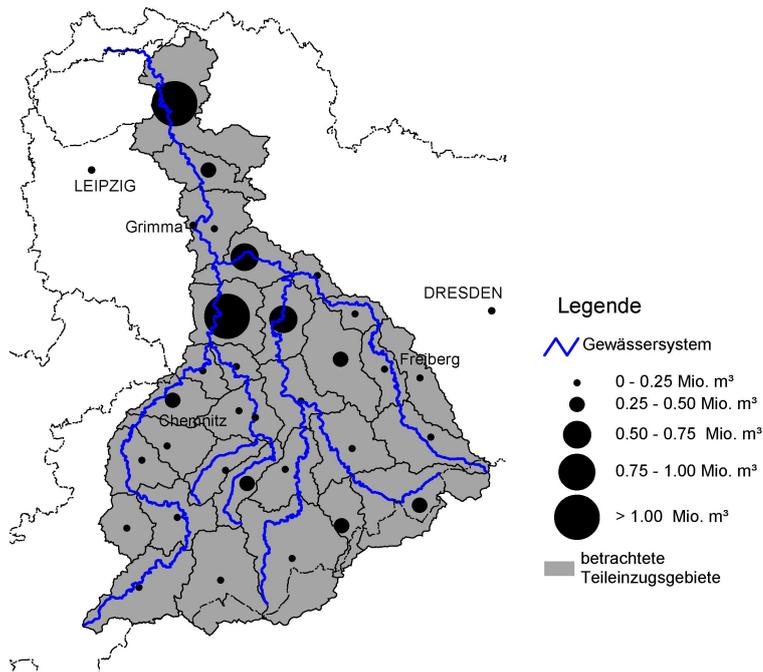


Abbildung 97: Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung; Ereignis August 2002

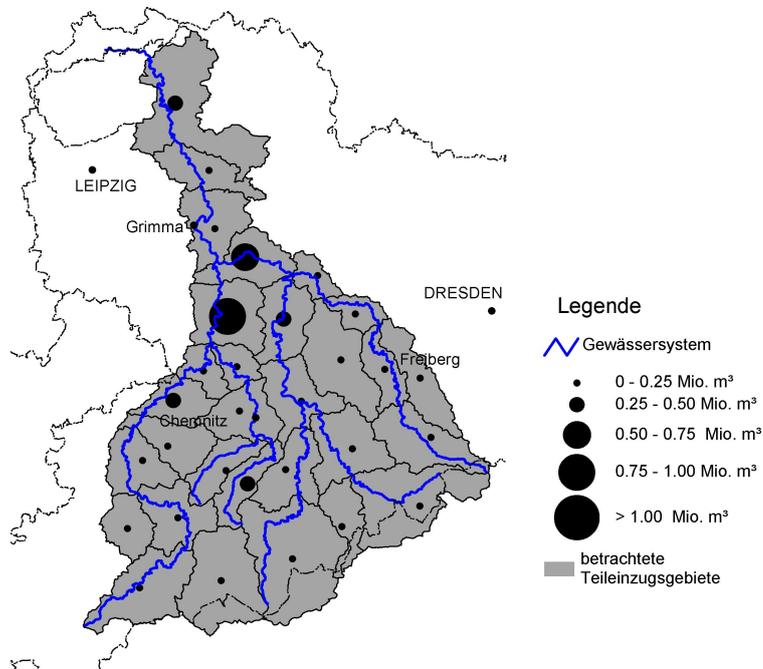


Abbildung 98: Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung; Ereignis September 1995

10.1.3 Weitergehende Betrachtungen zum Rückhaltevolumen

Abbildung 99 repräsentiert die Addition der in Abbildung 93 und Abbildung 97 dargestellten Senkenpotenziale aus dem landwirtschaftlichen Szenario „20 % mehr konservierende Bodenbearbeitung“ und dem siedlungswasserwirtschaftlichen Szenario „15 % mehr dezentrale Regenwasserbewirtschaftung“, die zusammen im Einzugsgebiet der Mulde 12.3 Mio. m³ Senkenpotenzial aktivieren könnten. In diesem konkreten Fall ergänzen sich die Szenarien sehr gut, da die Senkenpotenziale durch landwirtschaftliche Maßnahmen in anderen Bereichen des Einzugsgebietes liegen, als die durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftung erschlossenen Senkenpotenziale. Diese Darstellung unterstreicht die Notwendigkeit, das in Kapitel 6 quantifizierte und lokalisierte potenzielle Senkenpotenzial durch unterschiedliche Maßnahmen und im Bereich verschiedener Landnutzungen zu aktivieren.

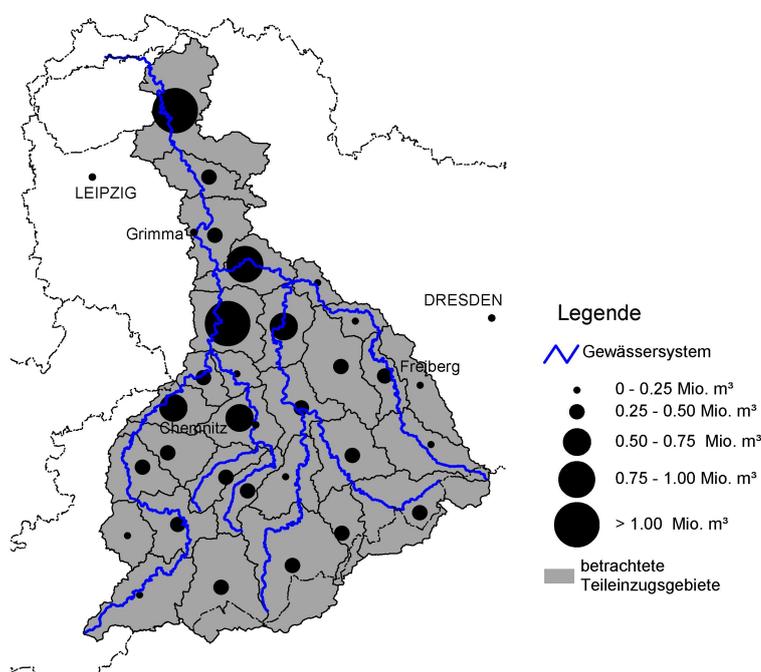


Abbildung 99: Räumliche Verteilung des zusätzlichen Speichervolumens (Senkenpotenzials) - Szenario: 20 % mehr kons. Bodenbearbeitung und 15 % Abkopplung von Siedlungsflächen; Hochwasser August 2002

In den vorangegangenen Abschnitten wurde wiederholt auf die Bedeutung der örtlich ungleichmäßigen Verteilung verschiedener Einflussfaktoren hingewiesen. Insbesondere wurden in diesem Zusammenhang die Überregnung des Einzugsgebietes aber auch die ungleichmäßige Verteilung der Umsetzungspotenziale und Standorteigenschaften genannt. Anhand der beiden folgenden Abbildungen soll beispielhaft verdeutlicht werden, welche Auswirkungen das Außerachtlassen der räumlichen Verteilung auf die Ergebnisse der Senkenpotenzialermittlung haben kann.

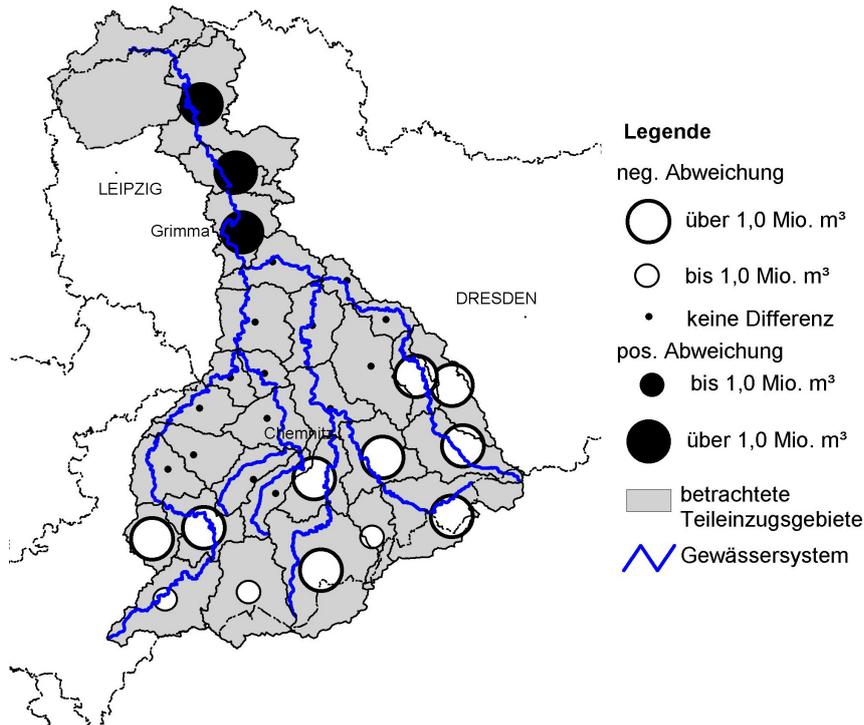


Abbildung 100: Auswirkung der Annahme einer gleichmäßigen Überregnung am Beispiel des Senkenpotenzials beim Hochwasser Aug. 2002 bezogen auf das Szenario „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“

In Abbildung 100 ist zu erkennen, in welchem Maße die Senkenpotenzialbestimmung vom Ergebnis in Abbildung 97 abgewichen wäre, wenn für das gesamte Einzugsgebiet die Niederschlagsdaten der Station Chemnitz verwendet worden wären. Im Norden wäre das Senkenpotenzial überschätzt, dagegen im Süden des Einzugsgebietes deutlich unterschätzt worden. In der Summe wäre das Senkenpotenzial 4,6 Mio. m³ kleiner und damit mehr als 60 % geringer eingeschätzt worden.

Im zweiten Beispiel wurden einheitliche Standorteigenschaften für das gesamte Einzugsgebiet angenommen und die Senkenpotenziale unter der Vorgabe bestimmt, dass überall die Bodenklasse „T7“ (siehe Tabelle 1) vorherrscht. Unter dieser Vereinfachung wäre das Senkenpotenzial in den meisten Teilgebieten überschätzt worden, in der Summe um 4,5 Mio. m³ oder 60 % (siehe Abbildung 101).

Vor diesem Hintergrund muss noch einmal die Abhängigkeit des Senkenpotenzials von der Niederschlagscharakteristik hervorgehoben werden. Außerdem muss bei der Betrachtung von Abbildung 95 und Abbildung 96 das Augenmerk auf die Ergebnisse der Hochwasserereignisse im September 1995 und im August 2002 gelenkt werden. Die Ergebnisse für die anderen Niederschlagsperioden sind aufgrund der Annahme gleichmäßiger Überregnung weit weniger aussagekräftig und als Zusatzinformation zu betrachten.

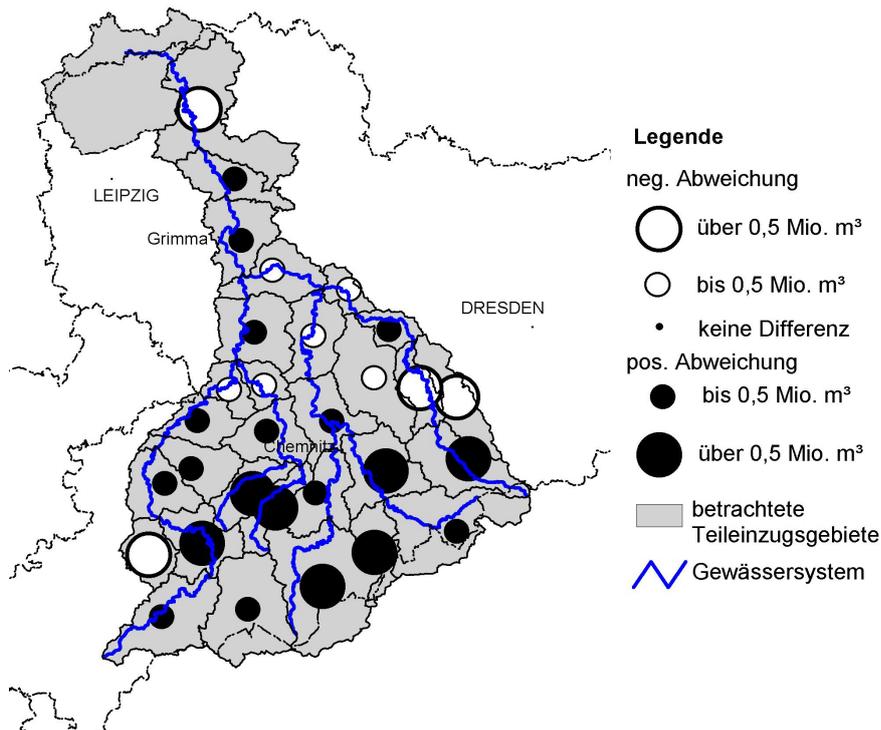


Abbildung 101: Auswirkung der Annahme gleichmäßiger Bodenverhältnisse am Beispiel des Senkenpotenzials beim Hochwasser Aug. 2002 bezogen auf das Szenario „plus 20 % konservierende Bodenbearbeitung“

Es bleibt zu betonen, dass die ermittelten und hier vorgestellten Senkenpotenziale ausschließlich auf Flächen realisiert werden können, die einen langfristigen Rückhalt des infiltrierten Wassers erlauben (langsame Abflusskomponenten).

Aufbauend auf der Standortanalyse in Kapitel 6 wurden bei der Aufstellung der Szenarien gezielt geeignete Flächen ausgewählt (siehe Tabelle 12 - Tabelle 14). Somit sind die hier vorgestellten aktivierbaren Senkenpotenziale nur dann zu realisieren, wenn in Zukunft entsprechend dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz genau die Flächen anders bewirtschaftet werden, die großes Speichervermögen aufweisen. Für die konservierende Bodenbearbeitung setzt dies voraus, dass ausreichend geeignete Standorte (Böden) im Einzugsgebiet vorhanden sind, so wie dies im Einzugsgebiet der Mulde der Fall ist.

Es stellt sich abschließend die Frage, ob mit den Maßnahmen konservierende Bodenbearbeitung auf Ackerflächen und dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten das zusätzlich aktivierbare Senkenpotenzial ausgeschöpft ist oder ob der Boden des Einzugsgebietes darüber hinaus noch Speicherpotenziale bietet, die mit Hilfe anderer Maßnahmen ggf. erschlossen werden können. Einen ersten Hinweis zu dieser Frage liefert Abbildung 57 in Kapitel 6.3.5. Die Grafik verdeutlicht, dass mehr als 60 % der Flächen mit Wasserrückhaltepotenzial ackerbaulich genutzte Fläche sind. Mehr als ein Viertel der geeigneten Standorte zur Retention von Niederschlagswasser im Boden befinden sich unter Wald oder Grünland. Es bleibt zu prüfen, ob durch angepasste Bewirtschaftung auch bei diesen Landnutzungen eine verbesserte Erschließung der ungesättigten Bodenzone im Hochwasserfall möglich ist. Für den Wald ist jedoch anzunehmen, dass bereits im Ist-Zustand ein Großteil des Senkenpotenzials genutzt wird.

Eine Möglichkeit, das Speicherpotenzial der Böden weiter zu erhöhen könnte sein, das Niederschlagswasser in tiefere Bodenzonen zu leiten und dabei nicht nur die natürlichen Prozesse der Matrix- und Makroporeninfiltration zu nutzen, sondern technische Verfahren anzuwenden. Wie Erfolg versprechend dieser Ansatz ist kann auf der Basis der hier vorgestellten Ergebnisse nicht beantwortet werden. Während die konservierende

Bodenbearbeitung im Grunde eine Reaktivierung des natürlichen Bodenwasserhaushalts befördert, würden solchen Maßnahmen den Bodenwasserhaushalt künstlich verändern. Unter diesen Randbedingungen muss eingehend geprüft werden, ob die in Kapitel 6 ausgewiesene Standorte, die von langsamen Abflussprozessen geprägt sind, nach wie vor gültig sind.

10.2 Hydrologische Auswirkungen auf das Gewässersystem

Die in Kapitel 10.1 vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf Bestimmung von Speichervolumina (Senkenpotenziale), die sich durch Maßnahmen in der Fläche im Bereich der Landwirtschaft und im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft systematisch erschließen lassen. Welche Hochwasserscheitelreduktion durch die geschaffenen Speichervolumina bei den konkreten Ereignissen im September 1995 und August 2002 zu erwarten ist, kann wie bei konventionellen Hochwasserspeichern nur im Rahmen einer hydrologischen Flussgebietsmodellierung unter Einbeziehung des Gewässersystems ansatzweise bestimmt werden.

Die hier vorgestellte Modellierung des Mulde-Einzugsgebietes dient ausschließlich dem hydrologischen Vergleich der aufgestellten Bewirtschaftungsszenarien mit dem Referenzzustand und nicht einer realitätsnahen, detaillierten Nachbildung tatsächlich abgeflossener Hochwasserganglinien, wie es bei der Aufstellung von Hochwasservorhersagemodellen zu fordern ist [SCHUMANN 2007]. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung wurde bewusst auf die Abbildung bestimmter Elemente im Gewässersystem verzichtet, die das Hochwassergeschehen jedoch erheblich beeinflussen können. Hierzu zählen insbesondere die Speicherbauwerke (Talsperren, Rückhaltebecken) aber auch die exakte Gewässermorphologie mit seinen Engstellen (Brücken, Durchlässe, Wehre). Eine Einbindung dieser Elemente wäre mit einem erheblichen Datenbedarf verbunden gewesen, der mit der hier verfolgten Fragestellung in keiner ausgewogenen Relation gestanden hätte (vgl. Kapitel 5).

Eine deutliche Verbesserung der Wirkungsanalyse würde sich mit einer kontinuierlichen Langzeitsimulation und anschließenden extremwertstatistischen Auswertung der gewonnenen Ergebnisse erzielen lassen. Die hierfür erforderlichen, angesichts der Ausdehnung des Einzugsgebietes extrem umfangreichen Datengrundlagen, standen für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Somit beschränkt sich diese hydrologische Betrachtung, wie bereits die Bestimmung des Senkenpotenzials, auf die Einzeluntersuchung der Hochwasserereignisse im September 1995 und August 2002.

10.2.1 Referenzzustand – Kalibrierung und Validierung des Modells

Für die hydrologische Modellierung des Einzugsgebietes im Referenzzustand wurden Daten zur Landnutzung im Ist-Zustand mit konventioneller Bewirtschaftung (siehe Kapitel 8.1), zu den Böden im Ist-Zustand, zur Orographie und zum Gewässersystem genutzt und aufbereitet (siehe Kapitel 5). In Kapitel 5 wurde darüber hinaus die modelltechnische Gliederung des Einzugsgebietes (Teileinzugsgebiete und Elementarflächen) vorgestellt. Des Weiteren finden sich hier auch erste Angaben zur gewählten Parametrisierung des Modells, die in Kapitel 9 mit den maßnahmenspezifischen Angaben zum Bodenwasserhaushalt und Speichervermögen vervollständigt wurden.

Wie in Kapitel 5 bereits erläutert, wurde zunächst ein Teileinzugsgebiet der Mulde, der Lungwitzbach, betrachtet und kalibriert. Die Kalibrierung baut auf den Ergebnissen der Diplomarbeit von [BAHR 2006] auf. Im Rahmen der Kalibrierung wurden insbesondere die Retentionsparameter der Abflusskomponenten angepasst. Hierzu gehören neben den Retentionskonstanten des Oberflächenabflusses auch die Retentionsparameter für den horizontalen Makroporenfluss (oberflächennaher lateraler Abfluss in präferentiellen Fließwegen), den Interflow (lateraler Abfluss in der Bodenmatrix) sowie den Basisabfluss, die in Abhängigkeit der Teileinzugsgebietsgröße gewählt wurden.

Das Ergebnis der Kalibrierung für das Einzugsgebiet des Lungwitzbaches ist in Abbildung 102 dargestellt. Die Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Abflussganglinie ist nur in Abschnitten befriedigend. Dies kann der Güte der Niederschlagsdaten zugeschrieben werden. Da keine Regionalisierung des Niederschlags vorlag (siehe [HABERLANDT et al. 2005]), wurde eine gleichmäßige Überregnung mit den Werten der Station Chemnitz angenommen. Der Gebietsniederschlag ist somit nur ansatzweise abgebildet. Des Weiteren muss davon ausgegangen werden, dass eine detailliertere Abbildung des Gewässernetzes mit ggf. vorhandenen, jedoch nicht bekannten Kleinspeichern oder Retentionsflächen in den Auen zur Verbesserung der Modellierungsergebnisse beigetragen hätte.

Ein ebenfalls unbeachteter Aspekt in dieser hydrologischen Modellierung sind die Speicher- und Entlastungsbauwerke der Siedlungsentwässerung. Die Entlastungsabflüsse aus der Misch- und Trennkanalisation werden von Pegeln kleinerer Einzugsgebiete, wie dem des Lungwitzbaches, teilweise als separate Hochwasserspitzen erfasst und können somit nur bei Berücksichtigung dieser Bauwerke abgebildet werden. ([SIEKER et al. 2006d], [ZIMMERMAN 2005]).

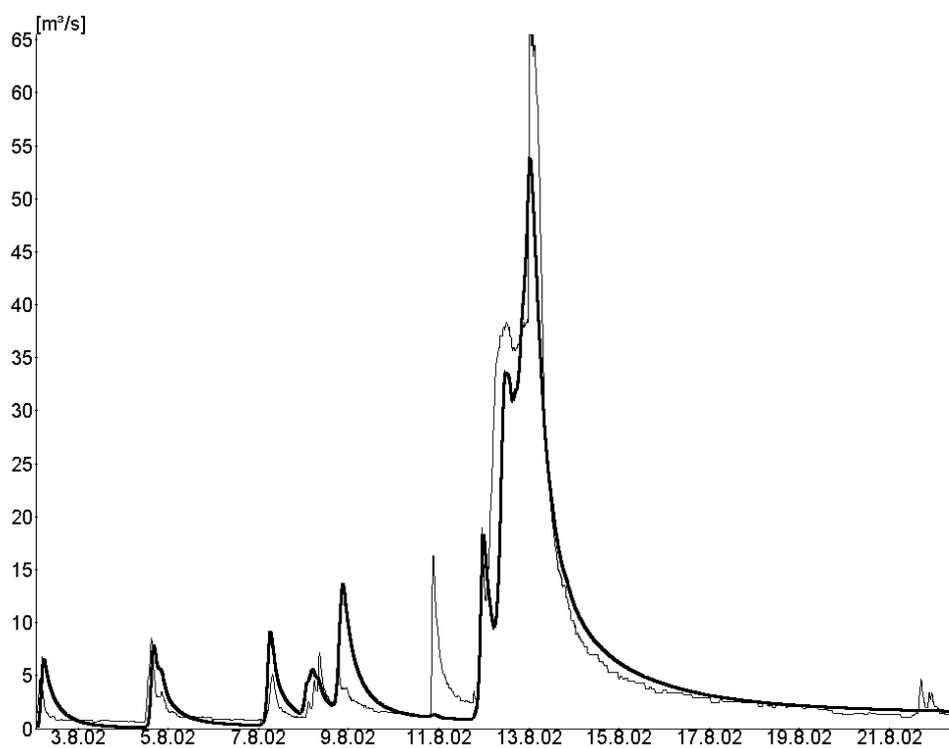


Abbildung 102: Gemessene und berechnete Abflussganglinie am Pegel Niederlungwitz während des Hochwassers im August 2002 (fette Linie: STORM-Berechnung; dünne Linie: gemessene Pegelganglinie)

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Parametrisierung des Modells für den Lungwitzbach wurde das STORM-Ersatzsystem für die Mulde aufgestellt und kalibriert (siehe Abbildung 33). Abbildung 103 zeigt das Ergebnis der Modell-Kalibrierung für das „gesamte“ Einzugsgebiet (5.564 km² - vgl. Abbildung 27). Als Kalibrierungspegel wurde der Pegel Golzern gewählt, da für diesen Pegel Abflussdaten mit hoher zeitlicher Auflösung vorlagen (siehe Kapitel 5.3.2). Der Vergleich der berechneten Ganglinie mit den gemessenen Abflusswerten zeigt eine für die hier betrachtete Fragestellung ausreichende Übereinstimmung, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass die zahlreichen Speicherbauwerke des Einzugsgebietes [LFUG 1997a] nicht Teil des STORM-Ersatzsystems sind (s.o.).

Es ist zu vermuten, dass durch das Fehlen der Speicherbauwerke im Ersatzsystem die Abweichung der modellierten Abflüsse an weiter oben gelegenen Gewässerpunkten größer ist, als am Pegel Golzern im Unterlauf der Mulde, da sich im Mittel- und Oberlauf der Mulde das Gros der Speicher und Talsperren befinden.

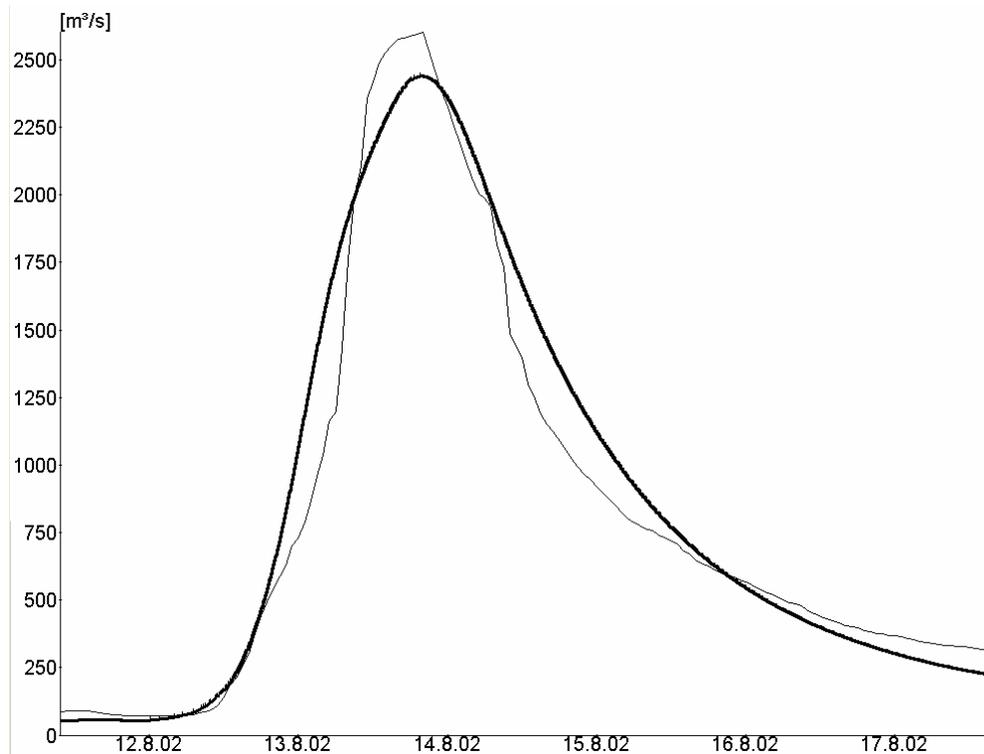


Abbildung 103: Gemessene und berechnete Abflussganglinie am Pegel Golzern (unterhalb der Stadt Grimma) während des Hochwassers im August 2002 (fette Linie: STORM-Berechnung; dünne Linie: Pegelganglinie)

10.2.2 Szenarien

Ausgehend von den oben dargestellten Referenz-Zuständen wurden die STORM-Modelle so umgestellt, dass die in Kapitel 8.2 und 8.3 vorgestellten Szenarien hydrologisch berechnet werden konnten. Hierzu wurden die in Kapitel 9 erläuterten Modellansätze verwendet und auf die ausgewählten Flächen angewandt.

In Abbildung 104 bis Abbildung 106 sind die durch die Modellierung prognostizierten Veränderungen des Abflusses zusammengestellt, die sich unter Annahme der betrachteten Szenarien ergeben. Die folgenden Abbildungen enthalten eine Fülle von Informationen und sollen daher kurz in ihrem Konzept erläutert werden. Die Abszisse repräsentiert einen aus sechs Gewässerknotenpunkten bestehenden Flusslängsschnitt. Die ausgewählten Gewässerpunkte entsprechen den Gebietsauslässen der gleichnamigen Teileinzugsgebiete (vgl. Abbildung 30). Der Längsschnitt verläuft vom Unterlauf der Vereinigten Mulde (Knoten V2), flussaufwärts über den Pegel Golzern (Knoten V3) bis zur Einmündung der Freiburger (Knoten V10), weiter bis zum Zusammenfluss der Zwickauer Mulde mit dem Fluss Chemnitz (Knoten C21) und endet im Mittellauf der Chemnitz. Der Knoten C22 befindet sich unterhalb der Stadt Chemnitz und der Knoten C23 oberhalb. Neben der Bezeichnung der Knotenpunkte sind auf der Abszisse die kumulierte Einzugsgebietsfläche und die Kilometrierung zu finden. Demnach hat der betrachtete Gewässerverlauf eine Gesamtlänge von 117 Kilometern. Die Einzugsgebietsfläche kumuliert sich von 136 km² auf 5.102 km².

Als Flächen sind in den Diagrammen die kumulierten aktivierten Senkenpotenziale in Millionen Kubikmetern dargestellt, wie sie bereits in der Summe bzw. in ihrer räumlichen Verteilung in Kapitel 10.1 vorgestellt wurden. Dem Senkenpotenzial wurde die prozentuale Abflussscheitelminderung bzw. -erhöhung an den einzelnen Gewässerpunkten gegenübergestellt. Des Weiteren ist in den Diagrammen zu sehen, welchen Umfang die untersuchten Szenarien bezogen auf die Gesamtflächen haben, d.h. wie viel Fläche in den einzelnen Teileinzugsgebieten auf konservierende Bodenbearbeitung zusätzlich umgestellt wurde bzw. wie groß die Siedlungsflächen sind, die dezentral bewirtschaftet werden. Auf diese Weise kann ein direkter Bezug zwischen Maßnahme und hydrologischer Wirkung hergestellt werden.

In Abbildung 104 sind die Berechnungsergebnisse für das Szenario „20 % mehr konservierende Bodenbearbeitung auf ausgewählten geeigneten Ackerflächen“ dargestellt (siehe Kapitel 8.3). Es ist zu sehen, dass der Anteil der konservierend bearbeiteten Ackerflächen in den betrachteten Teilgebieten um 4,4 bis 7,2 % zunimmt. Bei einem Anteil der geeigneten Ackerflächen zwischen 25 und 37 % bezogen auf die Gesamtfläche, entspricht dies der besagten Erhöhung der konservierenden Bodenbearbeitung um durchschnittlich 20 %.

Im Einzugsgebiet der Chemnitz kommt es infolge der Umsetzung des Szenarios zu einer deutlichen Abflussscheitelreduktion von 5,5 bis zu 7,8 %. Nach dem Zusammenfluss mit der Zwickauer Mulde ist eine Abflussscheitelreduktion von nur noch 0,8 bis 1,6 % zu verzeichnen, und im Verlauf der Vereinigten Mulde wird der Spitzenabfluss im Vergleich zum Referenzzustand durchgehend um ca. 2 % reduziert.

Bei genauer Betrachtung von Abbildung 104 fällt auf, dass die Abflussscheiteländerungen erwartungsgemäß mit dem Anteil der zusätzlich konservierend bearbeiteten Böden korrelieren. Besonders deutlich wird dies an den drei oberen (rechten) Gewässerkonten. Je mehr Ackerflächen im Verhältnis zur Gesamtfläche auf infiltrationsfördernde Bodenbearbeitung umgestellt werden, desto größer sind die Auswirkungen auf die maximalen Hochwasserabflüsse im Gewässer.

Gleichzeitig ist zu erkennen, dass mit zunehmender Einzugsgebietsgröße die Auswirkungen des Szenarios auf den Abfluss im Gewässer kleiner werden. So ist die geringe Abflussscheitelreduktion am Zusammenfluss der Chemnitz mit der Zwickauer Mulde zum einen auf den geringen Anteil der Bodenbearbeitungsänderung in deren Einzugsgebiet (3,2 %) zurückzuführen, zum anderen verzehnfacht sich bei dem Hochwasser 2002 der Abfluss der Chemnitz durch den Zusammenfluss mit der Mulde. Das gemeinsame Einzugsgebiet ist mehr als viermal größer als das der Chemnitz. Bei der Überlagerung der beiden Teilwellen verwischen die positiven Effekte der veränderten Abflussbildung; sie werden durch die Retentionsprozesse im Gewässernetz über einen längeren Abschnitt der Hochwasserganglinie verteilt und schlagen sich somit im Scheitelwasserstand weit weniger nieder. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass im unteren Gewässerverlauf (Knoten V10, V3 und V2) die Reduktion des Scheitelwasserstandes bedingt durch hier beschriebenen Abflusskonzentrationsprozesse nicht weiter fortschreitet, obwohl sich die Einzugsgebietsfläche durch den Zufluss der Freiberger Mulde und die Einzugsgebiete der Vereinigten Mulde noch mal um den Faktor 2,5 erhöht. Die Erklärung hierfür muss in der räumlichen Verteilung des Senkenpotenzials gesucht werden (siehe Kapitel 10.1). Das durch die konservierende Bodenbearbeitung aktivierte Senkenpotenzial befindet sich schwerpunktmäßig im Unterlauf von Zwickauer-, Freiberger- und Vereinigter Mulde. In Abbildung 104 ist dies anhand des steilen Anstiegs des kumulierten Senkenpotenzials zu erkennen. Dieses zusätzliche Speichervolumen bewirkt, dass die Scheitelabflussreduktion sogar geringfügig größer ist als am Zusammenfluss von Chemnitz und Zwickauer Mulde.

Des Weiteren fällt auf, dass die erzielte Reduktion der maximalen Wasserstände beim Hochwasser 1995 und beim Hochwasser im August 2002 sehr ähnlich ausfallen. Die Scheitelreduktion des Hochwassers im September 1995 ist teilweise größer, da es sich um ein deutlich kleineres Hochwasserereignis gehandelt hat (siehe Tabelle 4) und somit die

positive Wirkung des aktivieren Senkenpotenzials mit deutlich geringeren Spitzenabflüssen überlagert wird.

In Abbildung 105 sind auf die oben beschriebene Weise die Ergebnisse der Extremszenarien „vollständige Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung“ und „vollständige Rückkehr zur konventionellen Bodenbearbeitung“ im Vergleich zum Referenzzustand dargestellt. Die Ergebnisse bestätigen den in Abbildung 104 festgestellten Zusammenhang zwischen Änderung des Abflussscheitels und dem Anteil der anders bewirtschafteten Ackerflächen. Darüber hinaus quantifiziert Abbildung 105 die theoretischen Potenziale der konservierenden Bodenbearbeitung als Hochwasserschutzmaßnahme und zeigt auf, dass selbst im Unterlauf der Vereinigten Mulde die Hochwasserspitzenabflüsse um 6,6 bis 8,6 % reduziert werden könnten, wenn nichtwendende Bodenbearbeitungsverfahren zum dauerhaften Standard der Bodenbearbeitung werden würden. Die hier getroffene Aussage gilt natürlich nur für Standorte und Einzugsgebiete mit ausreichend vorhandenem aktivierbarem Senkenpotenzial, die zuvor durch die Erstellung der Potenzialkarten identifiziert werden müssen (Kapitel 6). Die im Vergleich zu den anderen Szenarien geringe Veränderung des Scheitelabflusses im Oberlauf der Chemnitz beim Szenario „100 % konventionelle Bodenbearbeitung“ ist mit dem kleinen Anteil der konservierenden Bodenbearbeitung im Referenzzustand (2,9 % Teilgebietsfläche) zu erklären. Somit bedeutet eine Umstellung auf 100 % konventioneller Bodenbearbeitung keine extreme Veränderung der Bewirtschaftungsverhältnisse.

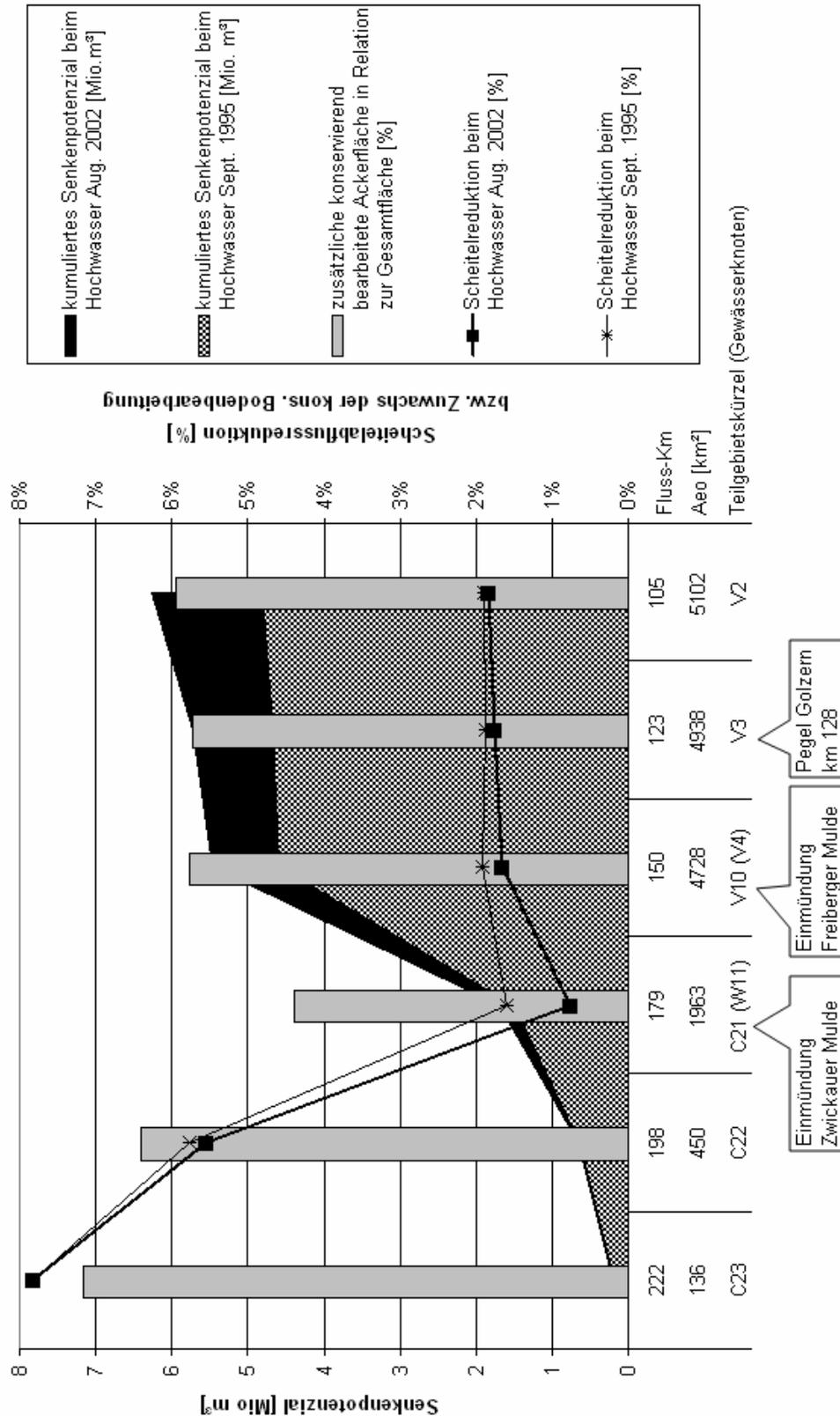


Abbildung 104: Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung des Szenarios „20 % mehr konservierende Bodenbearbeitung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002

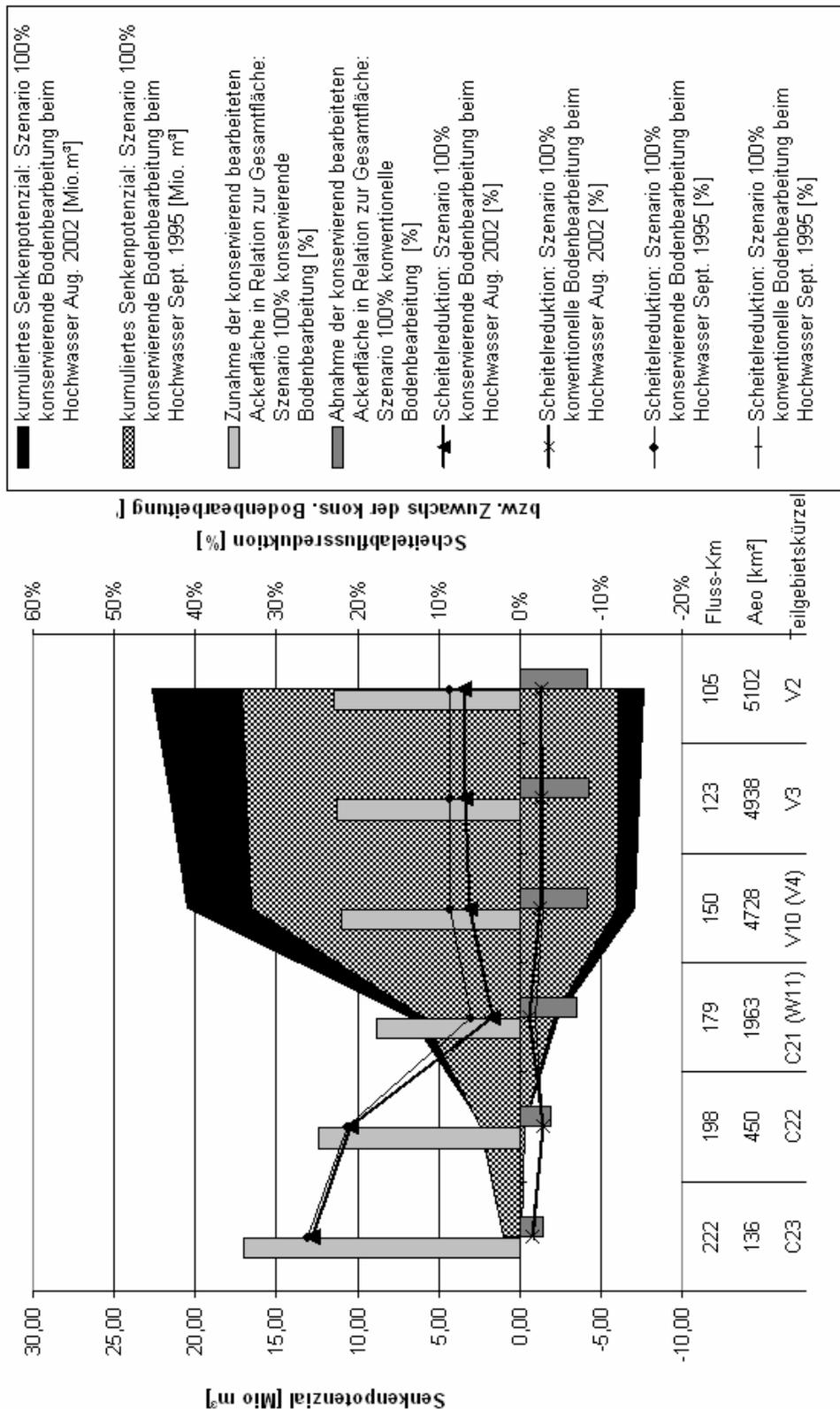


Abbildung 105: Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „100 % konservierende bzw. 100 % konventionelle Bodenbearbeitung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002

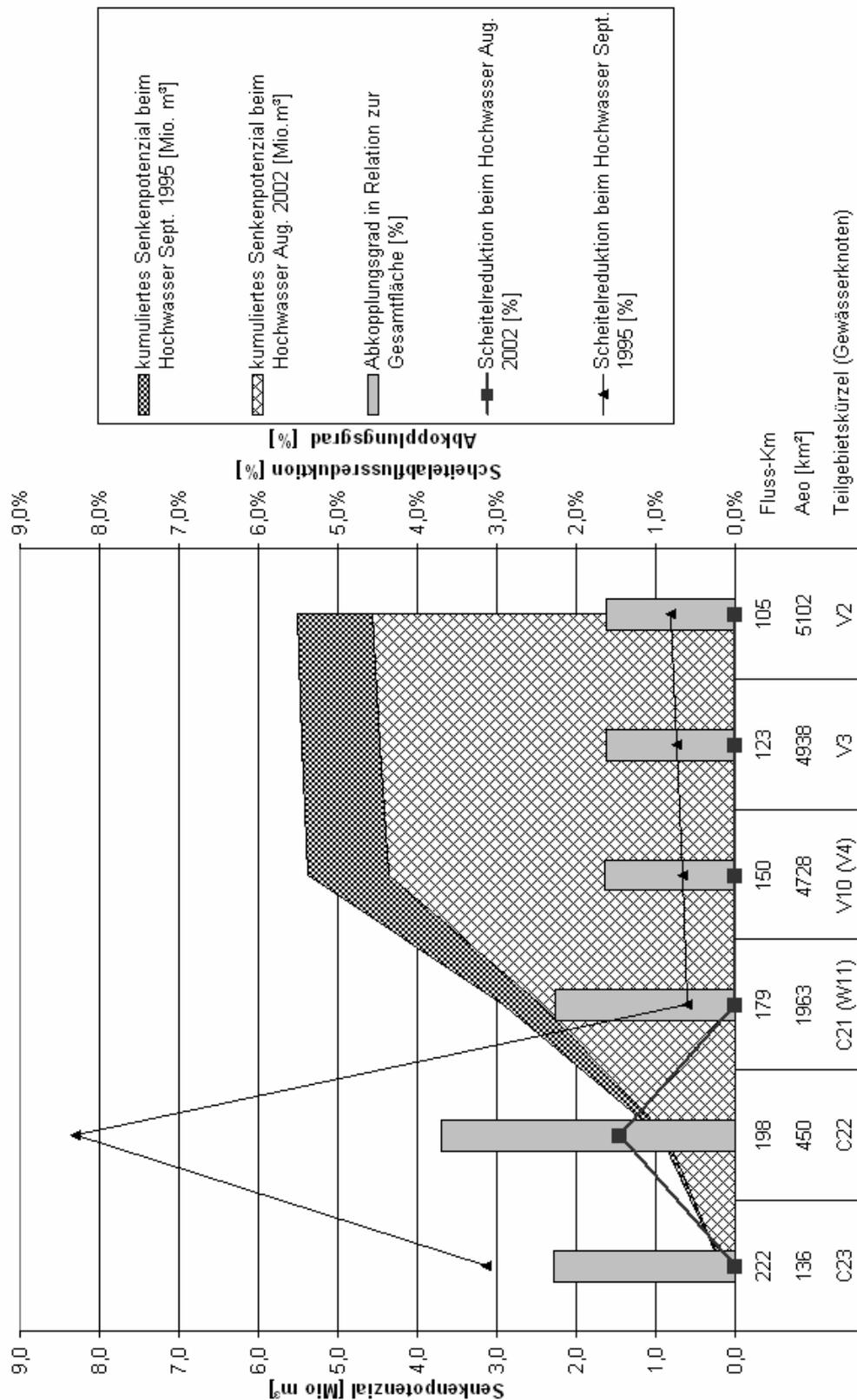


Abbildung 106: Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „15 % Abkopplung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002

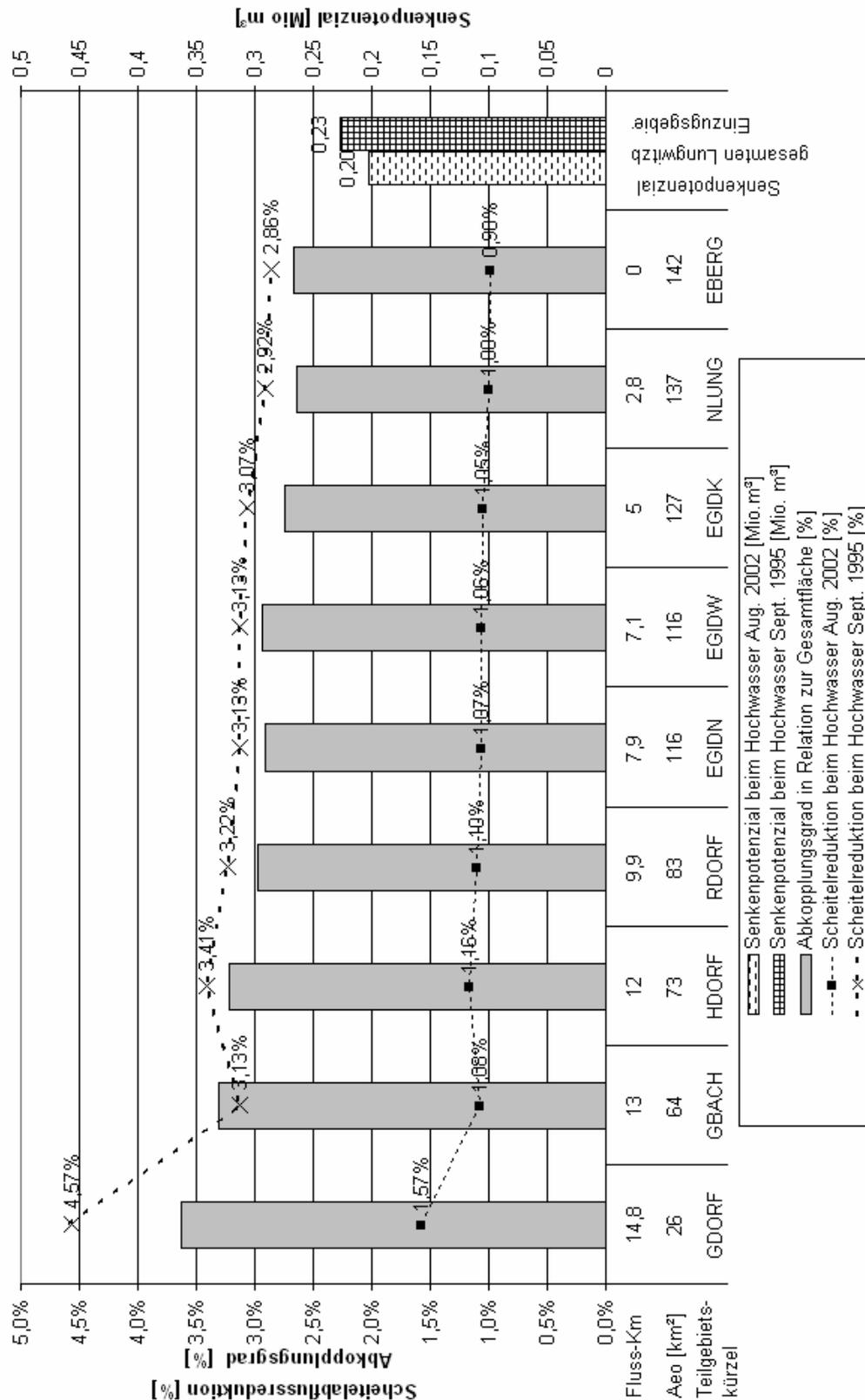


Abbildung 107: Reduktion des Scheitelabflusses an ausgewählten Gewässerpunkten des Lungwitzbaches und das entsprechende kumulierte Senkenpotenzial bei Umsetzung der Szenarien „15 % Abkopplung“ beim Hochwasser September 1995 und August 2002

In Abbildung 106 sind die Ergebnisse der hydrologischen Berechnungen für das Szenario „15 % Abkopplung von Siedlungsflächen von der konventionelle Regenwasserableitung“ dargestellt. Es fällt auf, dass die Reduktion der Hochwasserscheitel im Unterlauf sehr klein ist (zwischen 0 und 1 %). In diesem Zusammenhang ist es wichtig, erneut die Anteile der verändert bewirtschafteten Flächen an der Gesamtfläche der Teileinzugsgebiete zu beachten. Es wird deutlich, dass der gewählte realisierbare Abkopplungsgrad von 15 % und insbesondere der Anteil der Siedlungsflächen in den Einzugsgebieten der meisten Teilgebiete nicht ausreichen, um den Hochwasserscheitel im Unterlauf zu beeinflussen. Anders stellt sich die Situation am Knoten C22 dar. Aufgrund des großen Umsetzungspotenzials dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in der Stadt Chemnitz konnte in diesem Gewässerabschnitt der Hochwasserscheitel beim Hochwasser 1995 um mehr als 8 % reduziert werden. Beim Hochwasser 2002 betrug die Scheitelminderung nur noch 1,5 %.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Hochwasser im Jahre 1995 und 2002 weist darauf hin, dass bei extremen Hochwasserereignissen die Abfluss reduzierende Wirkung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung zurückgehen kann. Diese Aussage gilt insbesondere für Gewässerabschnitte mit großem Einzugsgebiet und entsprechend großem Anteil „natürlicher“ Flächen. Am Beispiel des Lungwitzbaches kann gezeigt werden, dass die positive Wirkung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung durchaus auch bei lang anhaltenden Hochwasser erzeugenden Niederschlägen mit zunehmender Einzugsgebietsgröße bestehen bleibt (siehe Abbildung 107). Entscheidend für dieses Resultat ist, dass in diesem Einzugsgebiet entlang des gesamten Flusslängsschnittes der Siedlungsflächenanteil und damit auch der Abkopplungsgrad höher ist als im Unterlauf der Mulde (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 19).

10.3 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorangegangenen Ergebnisse zeigen, dass beide Kenngrößen, das aktivierbare Senkenpotenzial und die Hochwasserscheiteländerung entlang der Gewässer von Niederschlagsereignis zu Niederschlagsereignis variabel sind. Neben den Anfangsbedingungen und der Niederschlagshöhe, -intensität bzw. -dauer sind insbesondere die räumliche Verteilung des Niederschlages und das räumliche Zusammentreffen von Niederschlag und Umsetzungspotenzialen von entscheidender Bedeutung.

Es gilt die Einschränkung, dass es sich hierbei um Einzelfallbetrachtungen zweier Hochwasserereignisse handelt, die beide im Sommer auftraten. Somit zeigen die hier dargestellten Ergebnisse nur beispielhaft die Grenzen und Möglichkeit des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes auf.

Eine bessere Bewertungsgrundlage könnte durch eine Langzeitsimulation geschaffen werden. Im Rahmen einer Langzeitsimulation würde eine Vielzahl unterschiedlicher Niederschlagskonstellationen in Kombination mit den verschiedensten Eingangsbedingungen (Vorfeuchten) berechnet. Aus der Gesamtheit dieser Ergebnisdaten ließe sich nach statistischer Auswertung ein objektiveres Bild der Wirkungen erzielen.

Bei der Bewertung der hydrologischen Auswirkungen von Abkopplungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten muss Klarheit darüber bestehen, dass durch die Rückführung zur natürlichen Abflussbildung und ggf. darüber hinaus nur die hydrologischen Effekte beeinflusst werden können, die zuvor durch die Versiegelung und ungedrosselte Ableitung in unerwünschter Weise entstanden sind. Das Problem besteht darin, für das konkrete Einzugsgebiet und den betrachteten Gewässerknoten diese negative Wirkung in Abhängigkeit der Niederschlagscharakteristik zu quantifizieren. Im [DWA 2006] werden die Einflussfaktoren genannt, die den Einfluss der Urbanisierung oder anderer anthropogener Veränderungen auf das Hochwassergeschehen bestimmen.

Als Faktoren werden

- die Größe der Siedlungsflächen in Verhältnis zur Gesamtfläche,
- der Versiegelungsgrad,
- die Abflussbereitschaft (Standorteigenschaften) des natürlichen Einzugsgebietes,
- die Lage der Siedlungsfläche im Einzugsgebiet,
- und die Niederschlagscharakteristik genannt (siehe Kapitel 2.3.1).

Die Reihe der Faktoren verdeutlichen, dass eine pauschale Aussage zur negativen Auswirkung der Urbanisierung und Regenwasserableitung bzw. umgekehrt über die Wirksamkeit der Regenwasserbewirtschaftung (als Gegenmaßnahmen) nicht möglich ist. An dieser Stelle muss erneut der Vorschlag gemacht werden, eine Langzeitsimulation durchzuführen, die das ereignisabhängige Zusammentreffen der Abflusskomponenten aus natürlichen und urbanen Teilgebieten widerspiegelt. Die Vorgehensweise, einen „maßgebenden“ (Modell)-Regen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße zu wählen und als Grundlage für den Wirkungsnachweis zu verwenden, wird ihrem Zweck nicht gerecht, da diese Methodik eine gleichmäßige Überregnung impliziert, welche wiederum zu einer statischen Überlagerung der Abflusskomponenten führt (vgl. [ZIMMERMAN 2005] in Kapitel 7.1.1). Das verwendete Simulationsmodell muss die Fähigkeit besitzen, die Entwässerungsverhalten der Siedlungsflächen abzubilden und gleichzeitig über Niederschlagsdaten verfügen, die der Kleinräumigkeit des Entwässerungssystem in Siedlungsgebieten entsprechen. Das in dieser Arbeit aufgestellte Modell zur Abbildung des Flussgebietes der Mulde kann diesen Ansprüchen nur sehr eingeschränkt genügen.

Im Gegensatz zu den Siedlungsflächen kann bei der Umsetzung von infiltrationsfördernden Maßnahmen auf landwirtschaftliche Flächen in den meisten Einzugsgebieten davon ausgegangen werden, dass die Reduktion des Abflussvolumens sich insbesondere auf den Scheitel der Hochwasserwelle auswirkt [DWA 2006]. Zurückzuführen ist dies auf die in Kapitel 2.3.2 beschriebene Tatsache, dass landwirtschaftliche Flächen in der Regel die Landnutzung der Einzugsgebiete in Deutschland dominieren und somit die Hochwasserwellenform von der Abflusskonzentrationscharakteristik dieser Flächen geprägt ist.

[NIEHOFF 2001] bestätigt die Einschätzung, dass pauschale Aussagen zur Wirkung dezentraler Maßnahmen unzulässig sind. Er begründet dies mit der starken Abhängigkeit von den Randbedingungen und nennt in diesem Zusammenhang explizit die Vorgefuchte (oder den Sättigungsgrad), die den Einfluss dezentraler Maßnahmen maßgeblich beeinflusst. Indirekt unterstreicht NIEHOFF damit die Forderung nach Langzeitsimulationsberechnungen, um ein breites Spektrum möglicher Hochwasser mit unterschiedlichen Randbedingungen betrachten zu können. NIEHOFF bemängelt in diesem Zusammenhang die fehlende jedoch notwendige hochaufgelöste Datengrundlage insbesondere für große Hochwasserereignisse. Es kann festgehalten werden, dass die hohen Anforderungen an die Datenbasis in dieser Arbeit wie auch in vorangegangenen Untersuchungen nach wie vor stark limitierend wirken (siehe auch [VERWORN & HARMS 1984]).

Für das hier betrachtete Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen und unter Berücksichtigung der oben genannten Einschränkungen kann festgestellt werden, dass sowohl in Bezug auf die Maßnahme in der Landwirtschaft wie in der Siedlungswasserwirtschaft eine starke Abhängigkeit der hydrologischen Auswirkungen von dem Verhältnis aus Fläche mit veränderter Bewirtschaftung zur Gesamtfläche besteht. Diese Aussage wird durch andere Untersuchungen zu dezentralen Rückhaltemaßnahmen gestützt [KRAHE et al. 2004], [DWA 2006], [KIRCHBACH et al. 2002].

Insbesondere bei den Maßnahmen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung besteht die Gefahr, dass bei einem zu geringen Anteil von Siedlungsflächen positive Auswirkungen auf den Hochwasserscheitel ausbleiben. Neben dem Mangel an Umsetzungspotenzialen in

vielen Teileinzugsgebieten der Mulde muss bei den Maßnahmen in Siedlungsgebieten beachtet werden, dass deren Abflussspitzen nicht immer mit dem Abflussscheitel der landwirtschaftlichen und anderen natürlichen Flächen zusammenfallen. Dies ist ein Prozess, der anhand von Pegelaufzeichnungen nachvollzogen werden kann. Im Rahmen der Modellierung tritt er umso deutlicher auf, wenn vereinfachend mit einer gleichmäßigen Überregnung gerechnet werden muss und das urbane Entwässerungssystem im Simulationsmodellmodell nur ansatzweise oder gar nicht abgebildet wird [SIEKER et al. 2006d].

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass mit zunehmender Einzugsgebietsgröße die prozentuale Veränderung des Hochwasserscheitels kleiner wird. Dieser Effekt ist unabhängig vom Anteil der Flächen mit veränderter Bewirtschaftung zu beobachten. Dieses Ergebnis bestätigt einen in der Literatur mehrfach beschriebenen Prozess, der die Wirkung aller Maßnahmen zur Verminderung des Hochwasservolumens betrifft [WOOD et al. 1990], [DWA 2006], [NIEHOFF 2001]. Durch die Überlagerung von Abflussganglinien sowie durch Retentionsprozesse im Gewässer und auf den Vorländern verwischen die Effekte der einzelnen Speichermaßnahmen bezogen auf die Abflussänderung. Je weiter sich der Beobachtungspunkt (Pegel oder Gewässerknoten) im Unterlauf eines großen Einzugsgebietes befindet, umso stärker wird die Abflussreduktion der Maßnahmen über einen größeren Zeitraum der Hochwasserganglinie verteilt und damit die Reduktion des Abflussvolumens immer schwerer erkennbar.

Des Weiteren ist bei der Auswertung der Ergebnisse der hydrologischen Modellierung zu erkennen, dass in einigen Fällen die Hochwasserscheitelreduktion mit der Wiederkehrwahrscheinlichkeit des Ereignisses sinkt. Dies gilt jedoch nicht für alle Szenarien und Gewässerabschnitte. Die Abhängigkeit der Hochwasserscheiteländerung von der Jährlichkeit ist beim Szenario „Abkopplung von Siedlungsflächen“ besonders ausgeprägt. Die Ergebnisse der Szenarien für die landwirtschaftlichen Flächen zeigen, dass der Einfluss der Jährlichkeit des Ereignisses besonders stark bei Teileinzugsgebieten mit geringem Anteil von Flächen mit veränderter Bewirtschaftung auftritt. Dies ist plausibel, denn es kann davon ausgegangen werden, dass sich der oben beschriebene Effekt der Ganglinienüberlagerung von verändert und unverändert bewirtschafteten Flächen bei Ereignissen großer Jährlichkeit verstärkt.

Eine eingehende Untersuchung des Einflusses der Jährlichkeit des Niederschlages auf das Abflussverhalten konnte, wie erwähnt, nicht näher untersucht werden, da die hierzu notwendige Information zu langjährigen, ungleichmäßigen Überregnungen nicht vorliegt. Die Tatsache, dass es sich bei dem untersuchten Einzelereignis um ein Extremereignis (im August 2002) handelte, lässt vermuten, dass auch bei Ereignissen mit hoher Jährlichkeit eine Wirkung der Maßnahmen in der Fläche zu erwarten ist. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass das Extremereignis im August 2002 nicht in allen Teilen des Einzugsgebietes aus 100-jährigen Niederschlägen gespeist wurde. Das uneinheitliche Auftreten des hier beschriebenen Prozesses spiegelt sich in den Ergebnissen anderer Untersuchungen zum dezentralen Hochwasserschutz wider.

[ZIMMERMAN 2005] konnte bei der Untersuchung des Glems-Einzugsgebietes in Baden-Württemberg für kleine und mittlere Niederschlagsereignisse (Jährlichkeit 1 bis 50 Jahre) keinen Zusammenhang zwischen der Jährlichkeit des Ereignisses und der Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen herstellen und verweist auf die Bedeutung der ungleichmäßigen Überregnung. Die Untersuchungsergebnisse von [NIEHOFF 2001] bzw. [KATZENMAIER et al. 2001] bestätigen diese Beobachtung zumindest für Ereignisse kurzer Wiederkehrzeit. NIEHOFF betont, dass die unterschiedliche Vorfeuchte sich wesentlich stärker auswirkt. Dagegen kommt die DWA-Arbeitsgruppe HW 4.3 „Dezentraler Hochwasserschutz“ [DWA 2006] zu der Schlussfolgerung, dass die prozentuale Wirkung dezentraler Maßnahmen mit zunehmender Jährlichkeit abnimmt und begründet dies mit dem begrenzten verfügbaren Speichervolumen.

Einen weiteren Hinweis auf die Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit gibt die Größe der Senkenpotenziale, die bei unterschiedlichen Niederschlägen in den Anlagen zur dezentralen

Regenwasserbewirtschaftung aktiviert werden können. In Abbildung 95 ist zu sehen, dass die Summe des Senkenpotenzials mit der Niederschlagshöhe des Ereignisses zunächst ansteigt. Im Extremfall, d.h. bei Ereignissen mit hoher Niederschlagshöhe und großer Intensität wie beim Hochwasser im August 2002, ist das aktivierbare Senkenpotenzial jedoch begrenzt. An diesem Punkt wird deutlich, dass die Maßnahmen in der Fläche, vergleichbar mit anderen Maßnahmen zur Reduktion des Hochwasserabflussvolumens, in ihrer Wirkung eine Obergrenze besitzen, die erreicht wird, wenn die Speicherkapazität (in diesem Fall der Mulden-Rigolen-Elemente) überschritten wird. Die Schlussfolgerungen aus den Projekten DEFLOOD [KRAHE et al. 2004] und LAHoR [BRONSTERT 2003] widersprechen der Abhängigkeit von der Größe des Ereignisses nicht, weisen jedoch auch darauf hin, dass in vielen Fällen katastrophale Hochwasser die Summe mittlerer Ereignisse in den Nebenflüssen sind. [NIEHOFF 2001] (LAHoR-Projekt) kommt zu dem Schluss, dass die Jährlichkeit des Hochwasserereignisses kein geeignetes Maß für die Wirkung von Maßnahmen in der Fläche ist.

Aus diesen Überlegungen heraus erschien es sinnvoll, die aktivierbaren Senkenpotenziale in der Fläche zu betrachten und zu quantifizieren, da sie von der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Prozesse im Gewässersystem sowie der Lage der Maßnahmen zum Gewässer unabhängig sind. Die Einführung des Senkenpotenzials bietet eine vereinfachte Möglichkeit, verschiedene Maßnahmen des Hochwasserschutzes einander gegenüber zu stellen.

Die Betrachtung des Senkenpotenzials entbindet natürlich nicht von der Pflicht, die oben aufgeführten hydrologischen Zusammenhänge zu beachten und auch weiterhin jedes Einzugsgebiet als Einzelfall zu betrachten. Dies gilt insbesondere mit Blick auf eine konkrete Maßnahmenplanung. Zur Wirkungsabschätzung bezogen auf die Abflüsse im Gewässer ist das Senkenpotenzial keine adäquate Kenn- und Vergleichsgröße.

Auf eine Umrechnung der Hochwasserscheiteländerungen in Wasserstandsänderungen wurde in dieser Arbeit verzichtet. Zum einem fehlten teilweise die notwendige Wasserstand-Abfluss-Beziehung (W-Q-Beziehung) für die betrachteten Gewässerknoten. Zum anderen ergeben sich zusätzliche Unsicherheiten, die aus der Unschärfe der W-Q-Beziehung resultieren. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass bei der Umrechnung der Abflüsse in Wasserstände die Differenzen zwischen Referenzzustand und Szenario kleiner werden [DWA 2006].

Über die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse hinaus können zusammenfassend folgende Aussagen getroffen werden:

- Die hier vorgestellten Effekte der Maßnahmen in der Fläche auf Hochwasserereignisse können nur erzielt werden, wenn die Maßnahmen auf geeigneten Standorten mit ausreichend Wasserrückhaltepotenzial umgesetzt werden (siehe Kapitel 6). Alle Standorte, die zu schnellen unterirdischen Fließvorgängen in Richtung Gewässer tendieren, dürfen bei der Aufstellung der Szenarien nicht berücksichtigt werden, da für diese Flächen, die in Kapitel 9 entwickelten Ansätze nicht gelten. Mit anderen Worten, eine fundierte hydrologische Modellierung der Maßnahmen kann nur auf der Grundlage einer genauen vorgeschalteten Standortanalyse durchgeführt werden. Dies gilt insbesondere für die konservierende Bodenbearbeitung, die ihre Speicherwirkung nur im Rahmen der natürlich vorgegebenen Standorteigenschaften entfalten kann. Für die Übertragung auf andere Einzugsgebiete bedeutet dies, dass erst nach einer Analyse des Wasserrückhaltepotenzials eine Einschätzung abgegeben werden kann, ob das Konzept des vorbeugenden flächenhaften Hochwasserschutzes ein Erfolg versprechender Ansatz ist.
- Die methodischen Ansätze und die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass die hydrologischen Auswirkungen einer veränderten Bodenbearbeitung auf Ackerflächen quantifizierbar sind. Die gewählten Modellansätze sowie die dazugehörigen Parametersätze erwiesen sich als geeignet, die unterschiedlichen Infiltrationsprozesse bei der konventionellen und der konservierenden Bodenbearbeitung abzubilden.

- Bei lang andauernden (advektiven) Niederschlägen mit geringer Intensität kommt die erhöhte Infiltrationskapazität der konservierenden Bodenbearbeitung nicht zur Entfaltung, da bereits im Ist-Zustand ein Großteil des Niederschlags von den Böden aufgenommen werden kann. Hierbei wird jedoch vorausgesetzt, dass die betrachteten Ackerflächen nicht bereits durch Vorregen verschlammte sind. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt [NIEHOFF 2001] bei der Betrachtung der konservierenden Bodenbearbeitung.
- Die vorliegende Arbeit hat auch gezeigt, dass Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung eine positive Nebenwirkung auf die Rückhaltung Hochwasser verursachender Niederschläge haben können. Diese Aussage gilt bei Anwendung der hier betrachteten unverbundenen Mulden-Rigolen-Elemente. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Wirkung dieser Maßnahmen auf den Hochwasserscheitelabfluss an mehr einschränkende Bedingungen geknüpft ist als die hydrologische Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung.
- Mit Blick auf die Verbesserung des momentanen Hochwasserschutzes reicht es nicht aus, in neu erschlossenen Siedlungsgebieten das Konzept der Regenwasserbewirtschaftung umzusetzen. Vielmehr muss das Ziel sein, auch bestehende Siedlungsgebiete von der Misch- bzw. Trennkanalisation abzukoppeln.
- Die Wirkung auf die Spitzenabflüsse von extremen, überregionalen Hochwasserereignissen ist begrenzt. Das bedeutet, dass für einen ausreichenden Hochwasserschutz weiterhin auch konventionelle Hochwasserschutzmaßnahmen zur Anwendung kommen müssen. Allerdings sind die Speichervolumina, die durch Maßnahmen in der Fläche im Boden aktiviert werden können so groß, dass sie erheblich dazu beitragen können, die Be- bzw. Überlastung von Hochwasserschutzbauwerken zu vermeiden oder zu vermindern.
- Der Bestimmung des aktivierbaren Senkenpotenzials wird in dieser Arbeit ein großer Wert beigemessen. Auf diese Weise können beispielsweise konventionelle Maßnahmen der Retention (Talsperren und Polder) und die Maßnahmen des vorbeugenden flächenhaften Hochwasserschutzes trotz ihrer grundsätzlich unterschiedlichen Ansätze miteinander verglichen werden und ggf. dem Senkenpotenzial ein äquivalenter ökonomischer Nutzen zugewiesen werden.
- Die berechneten Senkenpotenziale erfüllen die Vorgabe, dass die hierfür genutzten Flächen den Niederschlag dauerhaft zurückhalten. Damit ist das durch dezentrale Maßnahmen geschaffene Speichervolumen hochwertiger einzuschätzen als das Retentionsvolumen zentraler, technischer Speicherbauwerke. Zentrale Anlagen geben spätestens beim Abfließen der Hochwasserwelle ihr Speichervolumen ins Gewässer ab und verlängern damit die Dauer des erhöhten Gewässerabflusses. Für das Senkenpotenzial trifft dies definitionsgemäß nicht zu (vgl. Kapitel 6). Die Speicherung im Boden verfügt darüber hinaus über den Vorteil, dass es im Verlauf eines Niederschlagsereignisses zu einer stetigen Entleerung in tiefere Bodenschichten kommt und auf diese Weise das Speichervolumen mit zunehmender Ereignisdauer wächst.
- Es kann festgehalten werden, dass sich durch die Maßnahmen in der Landwirtschaft wie auch im Bereich der Siedlungsgebiete bei Umsetzung der aufgestellten realistischen Szenarien signifikante Senkenpotenziale in der Fläche aktivieren lassen. Für das Einzugsgebiet der Mulde mit seinen Standorteigenschaften, seiner Landnutzung und der charakteristischen Überregnung aus den Zeiträumen September 1995 und August 2002 ergaben die hier durchgeführten Berechnungen Senkenpotenziale von bis zu 12,3 Mio. m³. Ein Vergleich dieser erzielbaren Volumina mit dem Gesamtvolumen der im Mulde-Einzugsgebiet vorhandenen Talsperrenvolumina zeigt, dass es sich um eine wasserwirtschaftlich durchaus relevante Größenordnung handelt.
- Die Addition der Senkenpotenziale aus dem Bereich der urbanen und ackerbaulich genutzten Flächen kann, wie oben beschrieben, bei der Betrachtung der Hochwasserscheitelminderung nicht vorgenommen werden. Da die landwirtschaftlichen

und siedlungswasserwirtschaftlichen Szenarien unterschiedliche Abflussprozesse beeinflussen, kann nicht davon ausgegangen werden, dass deren Retentionswirkung an den betrachteten Pegeln zum gleichen Zeitpunkt auftreten und sich damit nicht vollständig überlagern.

- Aus den zusammengestellten Beobachtungen kann gefolgert werden, dass die Bereitstellung von ausreichend (möglichst viel) Speichervolumen in Anlagen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung oder unter konservierend bearbeiteten Böden grundlegende Voraussetzung dafür ist, dass diese Maßnahmen sichtbare Auswirkung auf die Hochwasserabflüssen auch größerer Einzugsgebiete haben. Das bedeutet, dass auf möglichst vielen Flächen die Bewirtschaftung umgestellt werden sollte (siehe hierzu auch [KRAHE et al. 2004] und [DWA 2006]).
- Da der zeitliche und räumliche Verlauf zukünftiger Starkniederschlagsperioden nur kurzfristig vorhersehbar ist, ist es von Vorteil, dass die Maßnahmen in der Fläche ihr Senkenpotenzial über große Teile des Einzugsgebietes verteilen können. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass zumindest ein Teil des Senkenpotenzials bei jedem Hochwasserereignis unabhängig von der Lage der Entstehungsgebiete genutzt werden kann. Ein Nachteil ist sicherlich, dass die in dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen und auf landwirtschaftlichen Flächen geschaffenen Senkenpotenziale (bisher) ungesteuerte Speicher repräsentieren und nicht gezielt auf die Kappung von Hochwasserscheiteln optimiert werden können, sondern die Hochwasser-Basisabflüsse positiv beeinflussen.

Unabhängig von der wichtigen Frage nach der Änderung der Hochwasserscheitel darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die im Einzugsgebiet kumulierten Senkenpotenziale in jedem Fall positive Auswirkungen haben.

- In Kapitel 7.1 wurde bereits darauf eingegangen, dass die Maßnahmen aus der Siedlungswasserwirtschaft sich positiv auf die hydraulische Belastung bestehender Entwässerungsnetze auswirken. Als Synergieeffekte der konservierenden Bodenbearbeitung wurden mehrfach der Erosionsschutz und die Verbesserung des Bodenwasserhaushaltes erwähnt. In der Praxis ist zu beobachten, dass durch diese Eigenschaften die Aussichten einer tatsächlichen Umsetzung steigen. In diesem Punkt kann möglicherweise der entscheidende Vorteil des vorbeugenden flächenhaften Hochwasserschutzes gegenüber konventionellen Retentionsmaßnahmen liegen. Anlässlich des 10-jährigen Jahrestages der Oderflut von 1997 wurde der Politik vorgeworfen, von den angekündigten 6.000 ha Überschwemmungsfläche nur 115 ha (weniger als 2 %) an der Oder bisher geschaffen zu haben. Die Gründe sind vielfältig. Die Baukosten mögen eine wichtige Rolle hierbei spielen. Die Einrichtung von Überschwemmungsflächen stellt aber auch einen massiven Eingriff in die Besitz- und Nutzungsverhältnisse an dem konkreten Gewässerabschnitt dar, der von den Betroffenen nicht widerstandslos hingenommen wird, zumal Nutznießer dieser Maßnahme diese Einschränkungen nicht erfahren. Bei der Umsetzung der Maßnahmen auf urbanen und ackerbaulich genutzten Flächen treten diese Konflikte nicht auf.
- Beide Maßnahmen haben darüber hinaus deutlich positive Auswirkungen auf die Gewässerqualität, da mit ihnen eine Reduktion der Oberflächenabflüsse und damit verbundenen Stoffeinträge in die Gewässer verbunden ist. Sie leisten somit einen wichtigen Beitrag für die Erreichung der Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Im Hinblick auf die diskutierten Klimaveränderungen kann zusätzliche auf den zu erwartenden positiven Einfluss der vorgestellten Maßnahmen auf die Niedrigwasserabflüsse hingewiesen werden.

11 Hinweise zur Umsetzung

Er ist davon auszugehen, dass die Frage nach der Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen noch weit komplexer als die konzeptionell-physikalische Beschreibung der Hochwasserentstehung und deren Beeinflussung ist. Der Grund dafür ist, dass neben den hydrologischen Zusammenhängen hierbei zunehmend soziologische, rechtliche, ökologische und vor allem ökonomische Randbedingungen an Bedeutung gewinnen. Diese Aspekte, bezogen auf den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz in ihrer Gesamtheit zu beleuchten und übertragbare Umsetzungsstrategien zu entwickeln, ist Aufgabe weiterführender Arbeiten (siehe Kapitel 13). In diesem Kapitel können lediglich Hinweise gegeben werden, welche Randbedingungen zur Umsetzung flächenhafter Hochwasserschutzmaßnahmen zurzeit bestehen.

Aus heutiger Sicht kann festgehalten werden, dass eine einzugsgebietsweite Betrachtung in der Phase der Maßnahmenumsetzung nicht sinnvoll ist. Im Rahmen des Planungsprozesses ergeben sich Fragenstellungen, für die es nur auf lokaler Ebene Lösungsansätze gibt:

Gründe für das Wechseln der Raumskala sind u.a., dass mögliche Nutzungskonflikte nur auf lokaler Ebene erkannt werden. Die Praxis zeigt, dass das Auflösen dieser Konflikte durch das Herausarbeiten von Synergien zwischen Landwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft, Naturschutz und Ökonomie nur auf lokaler Ebene stattfinden kann. Eine multikriterielle Bewertung kann dazu dienen, das Szenario mit dem größten Nutzwert objektiv zu ermitteln [ZIMMERMAN 2005], [SIEKER 2001b]. Dieses Vorgehen setzt jedoch voraus, dass Zielgrößen definiert werden und eine möglichst große Bandbreite realistischer Szenarien zuvor entwickelt worden sind. Auf diesem Wege können aus Szenarien umsetzungsfähige Varianten entstehen.

Das hier vorgestellte Konzept zur einzugsgebietsweiten, systematischen Identifikation der Potenziale in der Fläche kann somit nur ein Ausgangspunkt einer konkreten Maßnahmenplanung sein. Die erarbeiteten Potenzial- und Maßnahmenkarten für die Landwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft sind, vergleichbar mit hydrologischen Kennwerten oder klassifizierten Landnutzungsdaten, eine weitere aufbereitete Grundlage. Sie geben aufschlussreiche Hinweise über die Eigenschaften des Einzugsgebietes und die Handlungsoptionen. Das Konzept dieser Arbeit und seine Ergebnisse sollen als Instrument begriffen werden, das die Potenziale zusätzlichen Speichervermögens aufzuzeigen hilft und zur verstärkten, gezielten einzugsgebietsweiten Umsetzung infiltrationsfördernder Maßnahmen in der Landwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft beitragen kann.

Als Zielgruppen für die bereitgestellten Informationen kommen Planer, Entscheidungsträger Betroffene und Interessengruppen aus folgenden Bereichen in Frage:

- Wasserwirtschaft (zuständige Abteilung der Umweltministerien und Umweltfachbehörden sowie untere Wasserbehörden und Planer)
- Siedlungswasserwirtschaft (zuständige Abteilung der Umweltministerien und Umweltfachbehörden, untere Wasserbehörden sowie Institutionen der Stadtentwässerung, Planer und ggf. Grundstückseigentümer)
- Landwirtschaft (Landwirtschaftsministerien bzw. zuständige Abteilung der Umweltministerien, landwirtschaftliche Fachbehörden und Landwirtschaftsämter sowie Landwirte)
- Raumordnung (oberste Raumordnungs- und Landesplanungsbehörden z.B. Landesinnenministerien, regionale Planungsverbände, kommunale Planungsstellen)
- Naturschutz (zuständige Abteilung der Umweltministerien und Umweltfachbehörden, unteren Naturschutzbehörden, Naturschutzverbände sowie Planer und ggf. Grundstückseigentümer)

Im Folgenden soll kurz dargestellt werden, welche rechtlichen und planerischen Instrumentarien den genannten Fachdisziplinen zur Verfügung stehen und wie sich der vorbeugende, flächenhafte Hochwasserschutz in die bestehenden Aktivitäten integrieren ließe.

11.1 Einbindung in die wasserwirtschaftliche Planung

Sowohl im Bereich des Wasser- wie im Naturschutzrecht liegt die Rahmengesetzgebungskompetenz beim Bund. Der Bund gibt mit dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) den rechtlichen Rahmen für die verbindliche Gesetzgebung der Länder vor. Die Bundesregierung hat von ihrer „Rahmen-Kompetenz“ Gebrauch gemacht und nach dem Elbehochwasser 2002 das so genannten Hochwassergesetz erlassen (siehe Kapitel 1.1). Dieses Gesetz verankert und unterstreicht den Gedanken des vorbeugenden Hochwasserschutzes insbesondere im Wasserhaushaltsgesetz aber auch im Baugesetzbuch und Raumordnungsgesetz (ROG).

Wichtig ist zu betonen, dass die rechtlichen Einflussmöglichkeiten des Bundes damit erschöpft sind. Der Bund kann sich finanziell, beispielsweise im Rahmen der „Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK), an der Bewältigung der Aufgaben des Hochwasserschutzes beteiligen. Die Umsetzung aller Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes sind jedoch Recht und Aufgabe der Länder [LÜBBE 2002]. Die Länder können in dem ihnen vorgegebenen Rahmen entscheiden, wo sie die Schwerpunkte des Hochwasserschutzes legen, folglich ist die Wassergesetzgebung der Länder uneinheitlich. Im Folgenden wird beispielhaft auf die Instrumentarien eingegangen, die der Freistaat Sachsen in der Neufassung seines Wassergesetzes festgelegt hat [SÄCHSWG 2004]. Es sei vorweg betont, dass die hier vorgestellten gesetzlichen Vorgaben des Freistaates Sachsen über die Anforderung der Rahmengesetzgebung hinausgehen und andere Länder deutlich niedrigere Ziele in ihren Wassergesetzen festgelegt haben.

Das [SÄCHSWG 2004] benennt neben dem operativen Hochwasserschutz vier Instrumentarien für den Bereich der planerischen Hochwasservorsorge [GRÄFE 2007]:

- Ausweisung von Überschwemmungsgebieten (§100) als Teil der Flächenvorsorge.
- Gefahrenhinweiskarten: In diesen Karten werden im Maßstab 1:100.000 Überschwemmungsgefährdung und das Schadenspotential bei Extremhochwasser dargestellt. Sie sollen den Katastrophenschutzbehörden einen Überblick verschaffen und der Raumplanung als Grundlage für das Erkennen von Interessenkonflikten und Schwerpunkten des Hochwasserschutzes bzw. der Hochwasserabwehr dienen.
- Hochwasserschutzkonzepte mit Gefahrenkarten (§ 99 b): Die Konzepte sehen eine eingehende Analyse der bestehenden Hochwassergefährdung vor. Dies beinhaltet die Betrachtung vergangener Hochwasserereignisse und die Darstellung des derzeitigen Schutzniveaus. Hieraus werden für ein definiertes Schutzziel Maßnahmen abgeleitet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in einem vergleichsweise großen Maßstab (1:10.000). Die Zielgruppen sind die Träger von Hochwasserschutzmaßnahmen, Genehmigungsbehörden und Betroffene. In der Zwischenzeit wurden für alle Gewässer erster Ordnung in Sachsen insgesamt 47 Hochwasserschutzkonzeptionen erstellt. Die dabei entstandenen Maßnahmenvorschläge wurden im Rahmen einer landesweiten Priorisierung ausgewertet [SMUL 2005a]. Dabei fällt auf, dass unter den rund 1.600 Maßnahmenvorschlägen mit einem geschätzten Investitionsbedarf von ca. 2 Milliarden Euro keine flächenhaften Maßnahmen zu finden sind. Dies verwundert nicht, da die Handlungsempfehlungen zur Bearbeitung der Hochwasserschutzkonzeptionen eine Betrachtung dieser Maßnahmen nicht vorsah.

Eine Möglichkeit den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz in die momentane wasserwirtschaftliche Planung zu integrieren wäre, für die 47 Lose der Hochwasserschutzkonzeptionen Maßnahmenkarten zu erstellen. Auf diese Weise könnte unter Berücksichtigung der bereits identifizierten Defizite und Schadensschwerpunkte

Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den urbanen und ackerbaulich genutzten Flächen ergriffen werden.

- Hochwasserentstehungsgebiete (§100 b): Die Ausweisung so genannter Gebiete zielt auf die Erhaltung und Verbesserung des natürlichen Rückhaltevermögens ab. Dieses Instrumentarium stellt in der deutschen Wassergesetzgebung bisher ein Novum dar und ist deshalb hervorzuheben, weil es zugleich einen ersten Schritt in Richtung flächenhaften Hochwasserschutzes jenseits der Gewässer darstellt. Als Hochwasserentstehungsgebiete werden zusammenhängende Flächen per Rechtsverordnung festgelegt, die bei Starkniederschlägen oder bei Schneeschmelze in kurzer Zeit starke oberirdische Abflüsse erzeugen können. Bei der Ausweisung dieser Gebiete wird zurzeit eine Methodik entwickelt, die in Teilen auf dieselben Ansätze zurückgreift, die in dieser Arbeit bei der Ermittlung des Wasserrückhaltepotenzials verwendet wurden. [MERKER 2007] nennt als Einflussfaktoren für die Bestimmung der Hochwasserentstehungsgebiete das häufige Auftreten von Starkniederschlägen und das Auftreten schneller dominanter Abflussprozesse, die mit dem Wissensbasierten System FLAB ermittelt werden (siehe Kapitel 6.2).

Eine zweite Möglichkeit, den vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutz in die wasserwirtschaftliche Planung zu integrieren, ist somit den Hochwasserentstehungsgebieten so genannte Hochwasserminderungsgebiete hinzuzufügen (siehe Kapitel 6.4 und 12.2). Das Sächsische Wassergesetz verlangt, dass Eingriffe in den Wasserhaushalt von Hochwasserentstehungsgebieten kompensiert werden müssen (§ 100 b Abs. 4 und 5). Hierzu würden sich Maßnahmen in Gebieten mit hohem Wasserrückhaltepotenzial anbieten. Es sollte jedoch nicht bei der Nutzung der Hochwasserminderungsgebiete als Ersatz- und Ausgleichsflächen bleiben. Vielmehr ist anzustreben, den in Kapitel 6 vorgestellten Ansatz der Hochwasserminderungsgebiete als weiteres Instrumentarium in die Gesetzgebung mit aufzunehmen.

[RÜTER 2007b] merkt an, dass mit den von der EU-Wasserrahmenrichtlinie geforderten Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen zwei weitere Planungsinstrumente in die Wassergesetze der Länder aufgenommen wurden. Mit Hilfe dieser Instrumente könnten Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes in der Fläche durchgesetzt werden. [PANEBIANCO 2002] stellt fest, dass diese Instrumente im Sinne des flächenhaften Hochwasserschutzes nicht zur Anwendung kommen. Das kann damit begründet werden, dass die EU-Wasserrahmenrichtlinie den Hochwasserschutz nicht explizit als Zielgröße nennt. Auf der anderen Seite kann die Nutzung dieser Instrumentarien sehr wohl in Betracht gezogen werden, da die konservierende Bodenbearbeitung wie auch die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung einen Schutz vor Stoffeinträgen ins Gewässer und somit das Ziel der EU-Wasserrahmenrichtlinie („der gute ökologische Zustand“) unterstützen.

Als Fazit kann gesagt werden, dass die gesetzlichen Möglichkeiten, den vorbeugenden flächenhaften, Hochwasserschutz zu fördern, begrenzt sind. Des Weiteren fällt auf, dass in den Gesetzen und Ausführungsvorschriften der vorbeugende Hochwasserschutz mit dem Freihalten von Retentionsräumen gleichgesetzt wird. Das von der [LAWA 2003] geforderte Hochwasser-Flächenmanagement wird bislang auf die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten reduziert. [PANEBIANCO 2002] und [RÜTER 2007b] lenken daher den Fokus auf die Instrument der Raumplanung (siehe Kapitel 11.2).

11.2 Werkzeuge der räumlichen Planung als Umsetzungsinstrument

Neben den wasserwirtschaftlichen und rechtlichen Planungsinstrumenten können Instrumente der Raumordnung und Landesplanung sowie der Bauleitplanung dazu genutzt werden, Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes durchzusetzen.

Die rechtlichen Grundlagen der Raumordnung sind das Raumordnungsgesetz (ROG) des Bundes sowie die Gesetze zur Raumordnung und Landesplanung der Länder. Ziel der Raumordnung ist es, die unterschiedlichen Anforderungen an den Raum (die Landschaft)

aufeinander abzustimmen. Als Instrumente stehen hierzu der Landesentwicklungsplan (LEP) und die Regionalpläne zur Verfügung. Der Landesentwicklungsplan bietet auf Landesebene die Möglichkeit, Vorranggebiete, Vorbehaltsgebietes und Eignungsgebiete festzulegen. Die Regionalplanung bezieht sich auf Landesteile; im Freistaat Sachsen sind es fünf Planungsregionen. Die Regionalpläne ermöglichen die Konkretisierung der Ziele des Landesentwicklungsplanes und gehen auf regionale Besonderheiten ein. [PANEBIANCO 2002] zieht als Fazit, dass die Regionalplanung einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten kann. Gleichzeitig weist PANEBIANCO darauf hin, dass die Wirksamkeit stark eingeschränkt ist, weil die festgesetzten Ziele und Grundsätze nur behördeninterne Verbindlichkeit besitzen.

Die Bauleitplanung muss sich den Zielen der Raumordnung anpassen. Die Instrumente der Bauleitplanung sind der Flächennutzungsplan (vorbereitende Bauleitplanung) und der Bebauungsplan (verbindliche Bauleitplanung). Diese liegen nach Baugesetzbuch (BauGB) in der Planungshoheit der Gemeinden. Die Bauleitplanung hat die Möglichkeit, Maßnahmen des flächenhaften Hochwasserschutzes umzusetzen und dabei auch verbindlich Einfluss auf private Personen zu nehmen. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Bewirtschaftung urbaner Flächen und ist nur bei der Anlage von Neubaugebieten eine realistische Handlungsoption.

[RÜTER 2007b] und [HENZE 2005] kommen nach ihrer Analyse am Beispiel des Freistaates Sachsen und nach einer Literaturrecherche zu dem Schluss, dass die vorhandenen Potenziale der räumlichen Gesamtplanung in aller Regel nur unzureichend ausgeschöpft werden. Als Grund für die vorhandenen Umsetzungsdefizite nennt RÜTER eine mangelnde Abstimmung zwischen den Fachdisziplinen und das Fehlen geeigneter Datengrundlagen. In diesem Punkt kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit ein Fortschritt erzielt werden.

Auf weitere Ausführungen zur Verknüpfung des vorbeugenden Hochwasserschutzes mit der Raumplanung wird an dieser Stelle verzichtet und neben der oben genannten Literatur auf die Ereignisse des ELLA-Projektes verwiesen [HEILAND & FEIDEN 2006] (siehe auch [HEILAND & DAPP 2001], [BÖHM et al. 1998]).

11.3 Werkzeuge zur Maßnahmenumsetzung in der Siedlungswasserwirtschaft

Die im Rahmen dieser Untersuchung vorgeschlagenen siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen stellen aus hydrologischer und ökonomischer Sicht eine Alternative zur strikten Ableitung des anfallenden Oberflächenwassers auf versiegelten und unversiegelten Siedlungsflächen dar. Um die Eingangs genannten negativen Auswirkungen der Regenwasserableitung, z. B. die Hochwasserverschärfung, zu vermeiden, ist es wichtig, diese Maßnahmen auf möglichst allen Siedlungsflächen anzuwenden, die in Zukunft entstehen.

Mit Blick auf die Verbesserung des momentanen vorbeugenden Hochwasserschutzes muss das Ziel sein, das Konzept der Regenwasserbewirtschaftung (Versickerung, Rückhaltung und ggf. gedrosselter Ableitung) auch in bestehenden Siedlungsgebieten umzusetzen, die im Ist-Zustand an die Misch- bzw. Trennkanalisation angeschlossen sind.

Auf die planerischen Instrumente und technischen Regelwerke, die bei Umsetzung der Maßnahmen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung Anwendung finden, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Es sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, die alle Aspekte der praktischen Umsetzung beleuchten (u.a. [SIEKER et al. 2006a], [GEIGER & DREISEITL 1995], [DWA-A 138 2005]).

[SIEKER 2001b] gibt einen umfassenden Überblick über die rechtlichen und planerischen Instrumentarien zur Durchsetzung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. SIEKER betont, dass in Deutschland diesbezüglich sehr unterschiedliche Regelungen zu finden sind. In Sachsen obliegt die Abwasserbeseitigung den Gemeinden. Damit ist die Aufstellung eines Abwasserbeseitigungsplanes verknüpft ([SÄCHSWG 2004] § 63); die konkrete Verpflichtung einen Generalentwässerungsplan zu erarbeiten, in dem die

Bewirtschaftung des Niederschlagswassers festgelegt werden könnte, existiert nicht. Mit dieser wasserrechtlichen Festlegung ist es Aufgabe und Recht der Gemeinden, die Regenwasserbewirtschaftung in ihren Satzungen festzuschreiben oder durch entsprechende Beitrags- und Gebührensatzungen Anreize zu schaffen. Als Beispiel stellen [SIEKER et al. 2006a] die „Satzung über die naturnahe Bewirtschaftung des Niederschlagswassers in der Gemeinde Dahlwitz-Hoppegarten“ vor.

Auch wenn in den letzten Jahren im Bereich der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung beachtliche Fortschritte gemacht wurden, bleibt festzuhalten und darauf zu hoffen, dass ein Umdenken in den Kommunen, bei den Behörden, bei den Planern sowie bei den Bürgern weiter um sich greifen muss. Die Chancen dafür stehen objektiv gesehen nicht schlecht, wenn häufig genug die Eigeninteressen der Gemeinden an Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung herausgestellt werden (siehe Kapitel 7.1.1).

11.4 Werkzeuge zur Maßnahmenumsetzung in der Landwirtschaft

Auch in der Landwirtschaft besteht ein Eigeninteresse daran, die in Kapitel 7.1.2 vorgestellte konservierende Bodenbearbeitung umzusetzen und auf das Pflügen von Ackerböden zu verzichten. Insbesondere der Schutz vor Wassererosion wurde in diesem Zusammenhang mehrfach betont und erläutert.

Wie bei den Maßnahmen im Bereich der Siedlungsgebiete, kann auch bei der Durchsetzung der konservierenden Bodenbearbeitung nicht direkt auf gesetzliche Regelungen zurückgegriffen werden, die die Umsetzung dieser Maßnahme verlangen. Es gibt jedoch gesetzliche Vorgaben, die eine Änderung der Bodenbewirtschaftung als Zielsetzung formulieren. Das Bundes-Bodenschutzgesetz [BBODSCHG 1998] legt fest, dass bei der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung durch eine „gute fachliche Praxis“ die Vorsorgepflicht erfüllt wird (§§ 7 und 17). Die „Grundsätze für die Durchführung der guten fachlichen Praxis“ [BMVEL 2005] werden vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) erarbeitet. Das BMELV gibt die Empfehlung, die konservierende Bodenbearbeitung umzusetzen. Eine konkrete Verpflichtung erwächst hieraus jedoch nicht.

Ein wirksames Umsetzungsinstrument stellen die Förderprogramme dar, die von der Europäischen Union und den einzelnen Bundesländern aufgelegt werden. Diese Förderkulisse befindet sich seit 2003 in einer Umbruchphase. Mit der Reform der „Gemeinsamen Agrarpolitik“ (GAP) wird die Höhe der gewährten Direktzahlungen an die Einhaltung verbindlicher Vorschriften geknüpft. Die so genannte Cross-Compliance [EU 2003] bedeutet, dass nur noch die Landwirte mit einer Förderung in voller Höhe rechnen können, die u.a. im Bereich des Erosionsschutzes konkrete Maßnahmen ergreifen. Ein expliziter Hinweis auf die konservierende Bodenbearbeitung ist in der Cross-Compliance jedoch nicht enthalten.

Der Freistaat Sachsen ist zurzeit damit befasst, das Förderinstrument „Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum“ (EPLR) aufzubauen [SMUL 2007a]. Es basiert auf dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER). Teil des EPLR ist der Schwerpunkt II zur „Verbesserung der Umwelt und der Landschaft“ [SMUL 2007b]. In diesem Schwerpunkt werden flächenbezogenen Agrarumweltmaßnahmen (UM) gefördert, zu denen als stoffeintragsminimierende Bewirtschaftung auch die konservierende Bodenbearbeitung gehört.

Das Besondere dieses Förderinstrumentes ist, dass als Förderbedingung eine dauerhafte konservierende Bodenbearbeitung gefordert wird und dass die Förderung an eine so genannte „Gebietskulisse Wasserrahmenrichtlinie / Hochwasserschutz“ geknüpft ist. Mit der Festlegung einer Gebietskulisse wird die Förderung räumlich auf die Bereiche konzentriert, die gemessen an den Zielen der Wasserrahmenrichtlinie und des Hochwasserschutzes von besonderer Bedeutung sind. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dazu beitragen, diese Gebietskulisse so zu definieren, dass der vorbeugende flächenhafte Hochwasserschutz

gezielt in den Bereichen mit hohem Senkenpotenzial gefördert und somit verstärkt umgesetzt wird.

In anderen Bundesländern werden die Formen der schonenden Bodenbearbeitung ebenfalls gefördert. Im Bayern können Landwirte das bayerische Kulturlandschaftsprogramm KULAP in Anspruch nehmen [AUERSWALD 2002]. In Baden-Württemberg wird im Rahmen des Programms Marktentlastungs- und Kulturlandschaftsausgleich (MEKA II), die Mulchsaat gefördert.

Ein weiteres Instrumentarium, mit dem landwirtschaftliche Maßnahmen durchgesetzt werden können, ist das Flurbereinigungsgesetz [FLURBG 1997]. Mit diesem Gesetz kann unter Mitwirkung von Grundstückseigentümern und den Trägern öffentlicher Belange ländlicher Grundbesitz neu geordnet werden und im Zuge dessen Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes realisiert und gefördert werden. Die Finanzierung der Maßnahmen wird vom Land, den Eigentümern als Teilnehmergeinschaft und zu einem großen Teile über die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) vom Bund getragen [KREMER 2006].

11.5 Werkzeuge zu Maßnahmenumsetzung in der naturschutzfachlichen Planung

[PANEBIANCO 2002] bezeichnet den Naturschutz und die Landschaftspflege als wichtige Fachplanung, um Maßnahmen des flächenhaften Hochwasserschutzes umzusetzen. Als Instrumentarien liefert das Bundesnaturschutzgesetz [BNATSCHG 2002] das Landschaftsprogramm, den Landschaftsrahmenplan sowie den Landschaftsplan. [RÜTER 2007b] weist darauf hin, dass es in Sachsen vollständige Überlappungen von Landschaftsplanung und der räumlichen Gesamtplanung gibt (vgl. Kapitel 11.2).

[RÜTER 2007b] hat für den Bereich der Naturschutzes aufgezeigt, welche lokalen, einzelfallbezogenen Planungsmethoden angewendet werden sollten, um Hochwasserschutzmaßnahmen im Bereich der Landwirtschaft in Einklang mit dem Naturschutz zu bringen. Um die Synergien zwischen Naturschutz und Hochwasserschutz aufzuzeigen, stellten [RÜTER & REICH 2007] die Retentionsfunktion der Landschaft anderen Landschaftsfunktionen (natürliche Ertragsfunktion, Biotopfunktion, Grundwasserdargebotsfunktion) gegenüber. Vor diesem Hintergrund bewerteten sie den Einfluss unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maßnahmen.

RÜTER stellt fest, dass die Verknüpfung mit den Zielen des Naturschutzes erst im Rahmen des Planungsprozesses stattfinden kann, da die konzeptionelle Betrachtung auf mesoskaliger Ebene, methodisch mit der naturschutzfachlichen Planung nicht vereinbar ist. Um bereits frühzeitig naturschutzfachliche Aspekte in die großräumige Betrachtung hineinragen zu können, wurden im Rahmen des DBU-Projektes Mulde [SIEKER et al. 2007a] so genannte Maßnahmensteckbriefe erstellt, die standortunabhängig eine erste Bewertung aus wasserwirtschaftlicher, ökonomischer und nicht zuletzt naturschutzfachlichen Sicht enthalten.

12 Schlussfolgerungen

12.1 Schlussfolgerungen aus hydrologischer Sicht

In Kapitel 2.1 wurden zwei Fragen aufgeworfen, die den Ansatz des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes zumindest teilweise in Zweifel ziehen, insbesondere wenn es sich um Ereignisse großer Jährlichkeit in großen Einzugsgebieten handelt. Auf diese Fragen soll nun vor dem Hintergrund der vorgestellten Methodik und Ergebnisse eingegangen werden.

1) In Kapitel 10.3 wurde diskutiert, welchen Einfluss die Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses auf die Wirkung dezentraler Maßnahmen hat. Auch wenn es hier keinen eindeutigen Zusammenhang geben mag, so bleibt unstrittig, dass mit steigenden Niederschlagsvolumen pro Ereignis der Bedarf an Speichervolumen im Einzugsgebiet zunimmt. In dem Moment, in dem die erschlossenen Speichervolumina im überregneten Teil des Einzugsgebietes erschöpft sind, beginnt die Gefahr von schädlichen Auswirkungen zunächst auf den betroffenen Flächen und dann in den darunter liegenden Teilen des Gewässersystems.

Die Konsequenz, die hieraus für eine Verbesserung des Hochwasserschutzes gezogen werden kann ist möglichst viel Speichervolumen zu schaffen oder existierendes Volumen während Hochwasserereignissen nutzbar zu machen, damit der „Versagensfall“ erst bei möglichst hohen Jährlichkeiten und damit sehr selten eintritt.

Mit dem aktivierten existierenden Speicher ist in dieser Arbeit das Senkenpotenzial im Boden gemeint. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass mit zunehmendem Niederschlagsvolumen auch die Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes in der Lage sind, signifikante Speichervolumina zu aktivieren. Es muss an dieser Stelle jedoch betont werden, dass auch die konventionelle Form von Hochwasserspeichervolumen, wie Talsperren, Rückhaltebecken und Polder einen Teil dieser Aufgabe übernehmen müssen.

Bei der Schaffung von zusätzlichem Speicher muss auf die Wirtschaftlichkeit und Machbarkeit der Maßnahmen besonderen Wert gelegt werden. Hier bieten sich die in dieser Arbeit betrachteten Maßnahmen in der Fläche (Mulden-Rigolen-Elemente und konservierende Bodenbearbeitung) im besonderen Maß an, da die Änderung der Bewirtschaftung quasi als Nebeneffekt dem Hochwasserschutz dient und somit ohne Zusatzkosten realisiert wird. Die Maßnahmen, die den Bodenspeicher nutzen, haben gegenüber künstlichen Speichern den Vorteil, dass sie je nach Dauer des Ereignisses zusätzliches Speichervolumen erschließen, indem sie die bereits infiltrierten Wassermengen in tiefere Bodenschichten weiterleiten. Dieser Vorteil kommt natürlich nur auf Standorten mit entsprechendem Wasserrückhaltepotenzial zum Tragen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zeigt auf, wie auf systematische Weise möglichst viel Senkenpotenzial in einem Einzugsgebiet unter Beachtung der bestehenden Nutzung und naturräumlichen Ausstattung erschlossen werden kann (siehe Kapitel 12.2).

2) Die Tatsache, dass mit Größe des Einzugsgebietes die Wirkung vermindernder Volumen verringernder Maßnahmen sinkt, konnte bestätigt werden. Dies trifft auch dann zu, wenn der Anteil der Hochwasser vermindernden Maßnahmen im Verhältnis zum Gesamtgebiet nicht wie üblich abnimmt, sondern gleich bleibt (siehe Abbildung 104).

Der Grund für diesen hydrologischen Zusammenhang ist, dass mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes die Bedeutung der Prozesse der Abflussbildung zunehmend von den Prozessen der Abflusskonzentration überlagert wird.

Der abnehmende Einfluss Hochwasser vermindernder Maßnahmen im Verhältnis zur Einzugsgebietsfläche wird häufig auch damit begründet, dass in großen Einzugsgebieten

lang andauernde Niederschläge mit den für sie typischen gleichmäßigen und großflächigen Überregnungen für die Hochwasserentstehung verantwortlich sind. Dass jedoch bei diesen Niederschlägen mit immer weniger Horton'schem Oberflächenabfluss zu rechnen ist und somit infiltrationsfördernde Maßnahmen in der Fläche nicht mehr greifen können (siehe u.a. [VERWORN & HARMS 1984], [NIEHOFF 2001], [CASPARY 2001]) gilt nur für natürliche Flächen mit unbeeinflussten Infiltrationskapazitäten. Für die versiegelten Siedlungsflächen gilt dies in keinem Fall, da hier der Prozess unabhängig von der Art des jeweiligen Niederschlagsereignisses ist (siehe Abbildung 63 bis Abbildung 65 in Kapitel 7.1.3.1). Auf landwirtschaftlichen Flächen kann es ebenfalls schon bei geringen Intensitäten zu Oberflächenabfluss kommen, jedoch nur dann, wenn diese Flächen verschlämmt und somit wie „quasi-versiegelt“ reagieren [ROTH et al. 1995].

Des Weiteren wird vielfach die Meinung vertreten, dass die Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße umso mehr für die Maßnahmen in Siedlungsgebieten gilt, da hier die Bauwerke entsprechend der Abflussreaktion urbaner Gebiete auf kurze Starkregen mit hoher Intensität bemessen werden [DWA 2006] und dies die maßgebenden Niederschläge kleiner Gebiete sind. Dies gilt für die konventionelle Stadtentwässerung mit seinen Speichervolumen in Kanälen und Becken. Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen jedoch, dass dies auf die Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung nicht zutrifft. Auch wenn diese Maßnahmen, ihrer eigentlichen Bestimmung entsprechend, gemäß den Dimensionierungsvorgaben der Siedlungswasserwirtschaft bemessen werden, sind sie trotzdem in der Lage, während lang anhaltender Niederschläge einen Großteil des Niederschlages zu speichern. Den „Versickerungsanlagen“ kommt dabei ihre namensgebende Eigenschaft zugute, dass sie die Dauer der Niederschlagsperiode zur kontinuierlichen Entleerung in den Untergrund nutzen. Diese Feststellung lässt sich jedoch nur auf Bewirtschaftungsanlagen übertragen die aus der Sicht des Hochwasserschutzes auf geeigneten Standorten errichtet wurden. Die hierfür notwendige Standortanalyse ist Teil der vorgestellten Vorgehensweise (siehe Kapitel 12.2).

Der im Allgemeinen zutreffende Einfluss der Einzugsgebietsgröße auf die Wirkung von dezentralen und zentralen Speichermaßnahmen sollte nicht zum Anlass genommen werden, die hier betrachteten Maßnahmen ausschließlich dem Hochwasserschutz kleiner Einzugsgebiete zuzuordnen und bei großen Einzugsgebieten nur auf die Maßnahmen des Gewässerausbaus (Deiche, Schutzmauern, Querschnittsaufweitungen) zu setzen.

Wie bei den konventionellen Speicherbauwerken sollten auch die Maßnahmen in der Fläche als Instrument wahrgenommen werden, Hochwasserschutzbauwerke im Unterlauf entlasten und einen aufwendigen Objektschutz in den Teileinzugsgebieten des Oberlaufes ggf. vermeiden. Auch wenn die Maßnahmen des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes gerade für den Unterlauf großer Einzugsgebiete nicht die alleinige Lösung der bestehenden Hochwasserschutzdefizite darstellen, so gehören sie doch in den Maßnahmenkatalog einer integrierten Hochwasserschutzkonzeption eines Flusseinzugsgebietes.

Es gilt die Aussage, dass alle Maßnahmen zur Reduzierung des Abflussvolumens grundsätzlich positiv im Sinne des Hochwasserschutzes zu bewerten sind. [OSTROWSKI 2002] verweist darauf, dass ein Deichversagen (Deichbruch) nicht nur vom Wellenscheitel durch Überströmung, sondern auch wegen des allmählichen Aufweichens bewirkt wird und dass hierbei die Einstaudauer maßgeblich ist. Des Weiteren hebt OSTROWSKI hervor, dass die Retentionswirkung von gesteuerten Rückhalteräumen in hohem Maße vom Volumen der Hochwasserwelle abhängt.

Nicht zuletzt sollte an dieser Stelle berücksichtigt werden, dass jedes noch so große Einzugsgebiete aus vielen kleinen Einzugsgebieten besteht, die in Ihrer Summe das Schadenspotenzial entlang der Hauptgewässer teilweise übersteigen. Im Mulde-Einzugsgebiet ist z. B. davon auszugehen, dass der Schwerpunkt der Schadenspotenziale an den Nebengewässern zu finden ist, da sich hier das Gros der Siedlungsflächen befindet.

Darüber hinaus ist aus methodischer Sicht eine Betrachtung des Gesamteinzugsgebietes unerlässlich, um die Potenziale des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes identifizieren zu können (siehe Kapitel 12.2).

12.2 Schlussfolgerung mit Blick auf die Umsetzung

Die Diskussion in Kapitel 10.3 hat gezeigt, dass sich auf der Basis dieser Modellierungsergebnisse eine Reihe von Hinweisen ergeben, jedoch keine allgemeingültigen Aussagen bezüglich der Wirkung flächenhafter Hochwasserschutzmaßnahmen festgelegt werden können. Es wurde mit dieser Arbeit den vorangegangenen Untersuchungen eine weitere Betrachtung für ein Einzugsgebiet auf der Mesoskala hinzugefügt, die dazu beiträgt, die hydrologische Bedeutung und die Grenzen dezentraler Maßnahmen besser zu quantifizieren und generellen Bedenken hinsichtlich ihrer Wirkung entgegenzutreten.

Eine wesentliche Leistung dieser Arbeit ist die Vorstellung einer auf andere mesoskalige Einzugsgebiete übertragbare Vorgehensweise. Diese Methodik wurde beispielhaft auf das Einzugsgebiet der Mulde angewendet und kann als eine nützliche und nach Einschätzung des Autors eine unerlässliche Grundlage für ein integrales Handlungskonzept gewertet werden. Diese Arbeit leistet damit einen praktischen Beitrag zur Integration dezentraler, flächenhafter Maßnahmen in Hochwasserschutzkonzeptionen, in denen die anderen Komponenten (Hochwasservorsorge, Technischer Hochwasserschutz und andere dezentrale Maßnahmen) nicht fehlen dürfen.

Diese Arbeit greift eine Forderung vorangegangener Untersuchungen (z. B. DEFLOOD) auf, die ebenfalls zu dem Schluss gekommen sind, dass nur großflächige Änderungen der Flächenbewirtschaftung im Sinne des Hochwasserschutzes (Wasserretention) von signifikanter Wirkung sind [DWA 2006]. Die Umsetzung großflächiger Änderungen des menschlichen Nutzungsverhaltens verlangt nach einer über längere Zeiträume festgelegten Strategie, die nur auf der Basis großräumiger Analysen entwickelt werden kann [KOEHLER 2006]. Ohne eine dem Planungsprozess vorgeschaltete Standortanalyse kann es zu Fehleinschätzungen hinsichtlich der Wirkung der betrachteten Maßnahmen kommen.

Eine auf Teileinzugsgebiete beschränkte Untersuchung läuft Gefahr, dass die Standorte mit besonderem Wasserrückhaltepotenzial aus der Betrachtung herausfallen, dass die Gesamtheit der Umsetzungspotenziale nicht erfasst wird und dass keine für das ganze Einzugsgebiet geltende und damit langfristige Strategie entwickelt werden kann. Nicht zuletzt bleibt übergeordneten Institutionen bei einer Teilgebietsbetrachtung der Überblick über die Defizite und Potenziale verwehrt, was das Aufstellen einer landesweiten Priorisierung und Förderstrategie hemmt. Vor der Umsetzung konkreter Maßnahmenplanungen könnte in einem ersten Schritt der Ansatz zur Bestimmung des theoretischen Wasserrückhaltepotenzials dazu verwendet werden, eine flächendeckende Identifikation der potentiellen Hochwasserminderungsgebiete durchzuführen. Dies wäre eine konsequente Ergänzung zur Ausweisung Hochwasserentstehungsgebieten, wie sie bereits im §100b des sächsischen Wassergesetzes [SÄCHSWG 2004] vorgesehen ist. Die Hochwasserminderungsgebiete könnten beispielsweise als Ausgleichsflächen für unvermeidbare Eingriffe in den Wasserhaushalt von Hochwasserentstehungsgebiete dienen.

Anhand der Abbildung 108 soll noch einmal in komprimierter Form dargestellt werden, was die Kernpunkte dieses Konzeptes zur einzugsgebietsweiten Implementierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen sind. Die Abbildung greift hierzu die in Abbildung 2 eingeführte Struktur dieser Arbeit auf.

Im Mittelpunkt der Abbildung stehen die Konzeptbausteine, die mit ihren Schlagworten bezeichnet wurden. Der Ausgangspunkt ist die Bestimmung der Senkenpotenziale als Maß für das theoretische Wasserrückhaltepotenzial. Parallel hierzu findet die Erstellung der Maßnahmenkarten für die urbanen und ackerbaulich genutzten Flächen statt. Aus der Kombination dieser Karten, die beide eine flächendeckende Analyse des Einzugsgebietes

auf der Basis ausschließlich breitenverfügbarer Gebietsinformationen darstellen (siehe Spalte „Datenbasis“ in Abbildung 108), können realistische Szenarien entwickelt werden. Mit Hilfe der entwickelten Modellansätze kann sich daran die Modellierung von Referenzzustand und Szenarien anschließen, woraus sich dann Aussagen zur Wirkung der Maßnahmen ableiten lassen.

Der Baustein „Umsetzung“ ist nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit. Er wurde in das Schaubild aufgenommen um anzudeuten, dass sich an die hier vorgestellte Vorgehensweise die Planungsphase von Hochwasserschutzmaßnahmen in der Fläche anschließen könnte und sollte. Die Zeitachse verdeutlicht, dass die einzelnen Bausteine aufeinander aufbauen. Des Weiteren muss festgehalten werden, dass die hier skizzierten Arbeitsschritte noch zum Bereich der Vorstudien, d.h. zur hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Grundlagenermittlung, gezählt werden müssen. Dazu passt die genannte Meso- bis untere Makroskala.

Aus den formulierten Fragen kann abgeleitet werden, welche Fragestellungen in den einzelnen Abschnitten dieser Arbeit nachgegangen wurde und welche Antworten beispielhaft für das Einzugsgebiet der Mulde gegeben werden.

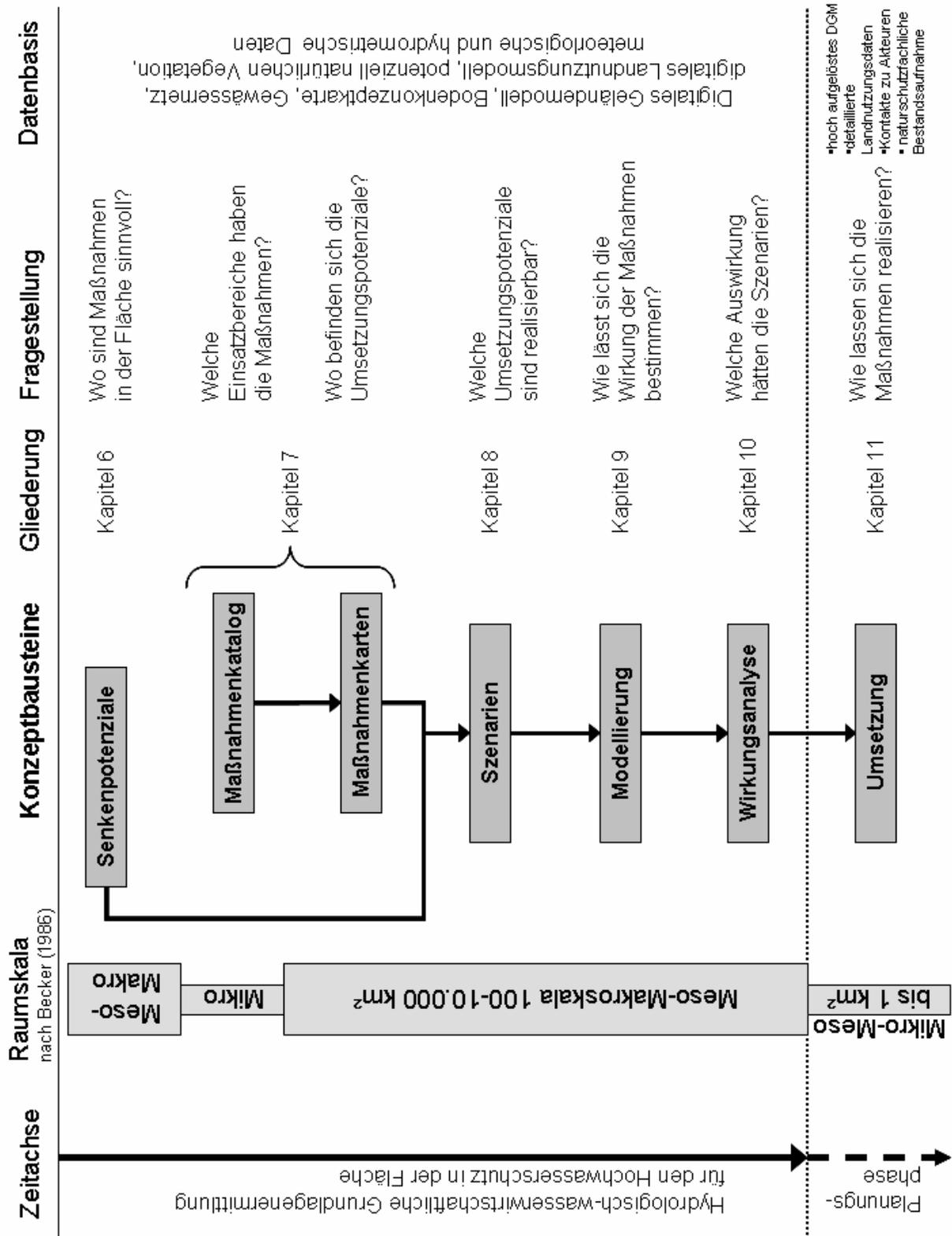


Abbildung 108: Konzeptbausteine zur einzugsgebietsweiten Implementierung flächenhaften Hochwasserschutzmaßnahmen

13 Ausblick

In den verschiedenen Abschnitten dieser Arbeit sind Aspekte des vorbeugenden, flächenhaften Hochwasserschutzes angesprochen und diskutiert worden, die nicht oder nur teilweise betrachtet werden konnten.

Hierzu zählt sicherlich die Frage nach der Umsetzung der betrachteten Maßnahmen. So wichtig das vorgestellte Konzept zur Potenzial- und Wirkungsanalyse auch sein mag - entscheidend ist, dass diese Maßnahmen tatsächlich flächendeckend zur Anwendung kommen. Nur so ist den vom Hochwasser bedrohten Menschen gedient. Die praktischen Erfahrungen mit der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und der konservierenden Bodenbearbeitung sind so umfangreich, dass es weniger um das Schließen siedlungswasserwirtschaftlicher oder landwirtschaftlicher Wissenslücken geht. Vielmehr besteht die Aufgabe, diesen Teilbereich des Hochwasserschutzes in bestehende Konzepte so gut zu integrieren, dass er zu einem gleichberechtigten Teil der gesellschaftlichen Aufgabe Hochwasserschutz wird. Die erarbeiteten Potenzial- und Maßnahmenkarten stellen einen ersten Schritt dar, können jedoch nicht die Aufgaben lösen, die sich auf lokaler Ebene ergeben.

Des Weiteren muss eingestanden werden, dass eine Beschränkung auf die Maßnahmen Mulden-Rigolen-Elemente und konservierende Bodenbearbeitung in der praktischen Umsetzung in vielen Fällen nicht akzeptabel ist. Als Erweiterung des hier vorgestellten Konzeptes wäre daher eine Betrachtung weiterer Maßnahmen wünschenswert. Hierbei muss jedoch die Skalenebene beachtet werden, auf der die betrachteten Maßnahmen ihren Hochwasser vermindern Effekt erzielen. In der Regel wird somit eine Ausweitung des Maßnahmenkataloges mit einer Verkleinerung der Maßstabebene einhergehen (siehe [DWA 2006] oder [RÜTER 2007a]). Unabhängig von der Maßstabebene, auf der die Modellierung der hydrologischen Wirksamkeit erfolgen muss, sollte zuvor eine einzugsgebietsweite Bestimmung des Wasserrückhaltepotenzials erfolgen.

Mit Blick auf die Wirkungsanalyse wäre es wünschenswert, weitergehende Untersuchungen anzustellen. Die Modellierung des Abflussverhaltens infiltrationsfördernder Bewirtschaftung mittels Langzeitsimulation kann zu einem Erkenntnisgewinn führen, wenn dabei die ungleichmäßige Überregnung und die Detailliertheit der urbanen Entwässerungssysteme berücksichtigt werden. Im Rahmen einer solchen Simulation könnten möglichst viele Randbedingungs-Niederschlags-Kombinationen abgebildet werden, die Ausgangspunkt kommender Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit sind. In diesem Zusammenhang ist die korrekte Abbildung der Bodenfeuchte und ihre räumliche Verteilung zu Ereignisbeginn von zentraler Bedeutung. Hier könnten in Zukunft Fernerkundungsverfahren bei der Erfassung behilflich sein [KLEEBERG et al. 1999].

Genauso wie eine genaue Abbildung der Entwässerungssysteme die Wirkungsanalyse urbaner Bewirtschaftungsmethoden beeinflusst, ist auch zu erwarten, dass die Dränagen als landwirtschaftliche Entwässerungssysteme die Wirkung der Maßnahmen auf Ackerflächen verändern. In der Literatur sind uneinheitliche Angaben zur Wirkung von Dränagen auf den Hochwasserabfluss zu finden [AKKERMANN 2004], [VAN DER PLOEG & SIEKER 2000], [VAN DER PLOEG et al. 2001], [HARMS & SIEKER 1986], [DWA 2006]. In weitergehenden Untersuchungen wäre es daher angebracht, die Dränage von Ackerflächen genauer zu betrachten und sich dabei nicht auf Teileinzugsgebiete und einzelne Zeiträume zu beschränken. Auch hier wäre es sinnvoll, das Instrument der Langzeitsimulation einzusetzen. Die Verfügbarkeit einer ausreichend detaillierten Datengrundlage wirkt in diesem Punkt wahrscheinlich limitierend. Über die reine Betrachtung der dränierter Flächen im Ist-Zustand und der möglichen Forderung nach deren Rückbau hinaus, sollte in diesen Untersuchungen der Frage nachgegangen werden, ob eine gezielte Steuerung der Dränagen positive Effekte für den Hochwasserschutz haben können. Mögliche Steuergrößen könnten dabei die aktuelle Bodenfeuchte und die aktuelle Niederschlagsvorhersage sein.

Nicht zuletzt könnte den in dieser Arbeit betrachteten Maßnahmen eine Funktion im Landschaftswasserhaushalt zukommen, die über das Ziel des Hochwasserschutzes hinausreichen. Die Prognosen der Klimaforscher weisen darauf hin, dass es zu signifikanten Änderungen der Temperatur und Niederschlagscharakteristiken kommen wird. Den Ergebnissen des sächsischen Klimamodells WEREX zufolge wird in der Dekade 2031-2040 im Mittel- und Unterlauf des Mulde-Einzugsgebietes 15 – 30 % weniger Sommerniederschlag fallen als in der Referenzperiode 1981/2000 [SMUL 2005b]. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der sommerlichen Starkniederschläge zu. Diese Klimaveränderungen können dazu führen, dass sich auf den landwirtschaftlichen Flächen im Tiefland und Lößgürtel des Mulde-Einzugsgebietes die Produktionsbedingungen infolge verlängerter Trockenperioden verschlechtern. Gleichzeitig kann es zu extremen Niedrigwasserständen mit gravierenden gewässerökologischen Folgen kommen. Vor dieser Klimakulisse ist es von besonderem Interesse, ob eine vermehrte Infiltration und Speicherung von Niederschlagswasser während Starkregenereignissen diese Trockenphasen wenigstens teilweise kompensieren kann. Eine größere zusätzliche Motivation zur Umsetzung der konservierenden Bodenbearbeitung wäre kaum vorstellbar und hätte wiederum positive Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft.

Würde sich die positive Wirkung der Maßnahmen auf Trockenperioden in künftigen Untersuchungen bestätigen, käme der Karte des Wasserrückhaltepotenzials eine weitere Bedeutung zu. Die Gebiete mit hohem Rückhaltepotenzial könnten als „Bodenwasservorkommensgebiete“ bezeichnet werden, in denen die Gefahr von Ernteaussfällen infolge Dürre bei geänderter Bodenbewirtschaftung eingegrenzt werden kann. Unter diesen Randbedingungen könnte es für die Landwirtschaft wirtschaftlich sein, Maßnahmen zu ergreifen, die die Infiltration und insbesondere den Bodenspeicher gezielt „künstlich“ erweitern. Dies käme dann wiederum auch dem Hochwasserschutz zugute.

14 Literatur

Adams, R. (1996). Dezentrale Versickerung von Niederschlagsabflüssen in Siedlungsgebieten - Umsetzung von Maßnahmen und Anlagen in die Praxis -. Sieker F. (Hrsg.), Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Band 14, SUG-Verlag, Hannover.

Adams, W. A. (1973). "The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils" *J. Soil Sci.*, S. 10 - 17.

AdV (2003). Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem ATKIS - Objektartenkatalog (ATKIS - OK), 01.07.2003, Version 3.2, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

AG Bodenkunde (1994). Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.

AG Bodenkunde (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.

Akkermann, M. (2004). Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Universität Hannover, Hannover.

Altermann, M. & Ruske, R. (1997). "Geologie und Böden" in: Feldmann, R. et al, Regeneration und nachhaltige Landnutzung. Konzepte für belastete Regionen, Springer Verlag, S. 8 - 12, Berlin, Heidelberg, New York.

Anderson, M. G. & Burt, T. P. (1990). "Subsurface runoff" in: Anderson, M. G. & Burt, T. P., Process studies in hillslope hydrology John Wiley & Sons, , S. 365 - 400. , Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.

Assmann, A. (2001). "Dezentraler, integrierter Hochwasserschutz - vom Konzept zur Planung" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Beiträge zum Workshop der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, S. 197 - 217, Berlin.

Assmann, A. & Gündra, H. (1999). "Die Bedeutung integrierter Planungsverfahren für die Umsetzung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 43. Jahrg., S. 160-164.

Assmann, A., Lemke, J. & Kirsch, J. (1999). Ausarbeitung einer vereinfachten Methodik zur Ermittlung von Retentionsräumen am Beispiel der oberen Modau. Abschlußbericht, Heidelberg.

ATV-DVWK (2003). ATV-DVWK-Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe HW-3.2 "Hochwasser": Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 64 S., Hennef.

Auerswald, K. (2002). "Landnutzung und Hochwasser" in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, S. 67 - 76, München.

Bahr, C. (2006). Hydrologische Modellierung zur Abschätzung des Einflusses einer veränderten Regenwasserbewirtschaftung auf landwirtschaftlichen Flächen und in Siedlungsgebieten auf das Abflussverhalten im Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Fachbereich Wasserwirtschaft und Hydroinformatik.

- Bandermann, S. (2001).** "Untersuchung zur Niederschlagsbewirtschaftung am Beispiel einer saarländischen Gemeinde und Auswirkungen auf die Hochwasserneubildung" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Beiträge zum Workshop der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, S. 111 - 139, Berlin.
- Bandermann, S. (2002).** "GIS-gestützte Planung von Abkopplungsmaßnahmen" in: Bartz, W. J., Kontakt und Studium - Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten (Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Neue Entwicklungen), expert-Verlag.
- Bandermann, S. (2006a).** Datenerfassung, Datenauswertung und GIS-Anwendung zu Abkopplungsmaßnahmen in der Siedlungswasserwirtschaft, DWA-Seminar: Abkopplungsmaßnahmen in der Siedlungswasserwirtschaft, 21. Februar 2006 in Dortmund.
- Bandermann, S. (2006b).** "Development of a new infiltration-drainage-system (IDS) to combine rain- and groundwater management for a polder area in Herne (NRW, Germany) - abstract submitted", Novatech, Lyon 2007.
- Baumgartner, A. & Liebscher, H.-J. (1996).** Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, 2. Auflage Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- BBodSchG (1998).** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG), S. 208, Deutscher Taschenbuchverlag, München.
- BBR (2001).** Siedlungs- und Verkehrsflächenzunahme 1997 - 1999 nach Landesteilen. Veröffentlichung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR). www.bbr.bund.de.
- Becker (1986).** "Neue Anforderungen und Lösungen bei der großflächigen hydrologischen Modellierung" *Wasserwirtschaft, Wassertechnik*, Jg. 26, S. 150-152.
- Becker, A. & Kleeberg, H.-B. (1999).** "Wasserhaushalt/ Gesamtmodellierung" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 27 - 42, Weinheim.
- Becker, A. & Lahmer, W. (1999).** "GIS-basierte großskalige hydrologische Modellierung" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 115 - 129, Weinheim.
- Becker, M., Geretshauer, G., Spengler, B. & Sieker, H. (2005).** "A stormwater management information system for the catchment area of the River Emscher", 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August 2005, Copenhagen/ Denmark.
- Becker, M., Pfeiffer, E. & Raasch, U. (2002).** "Möglichkeiten der Abflussbewirtschaftung in urbanen Gebieten" in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz am 24. und 25. Oktober 2002.
- Beese & Teepe (2002).** "Land- und Forstwirtschaft" in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz am 24. und 25. Oktober 2002, S. 3 - 8.
- Behrendt, H., Bach, M., Opitz, D. & Pagenkopf, W.-G. (2004).** "Maßgebliche anthropogene Einflüsse auf die Wasserqualität" in: Becker, A. & Lahmer, W., Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Weißensee Verlag, S. 42 - 58, Berlin.

- Beisecker, R. (1994).** Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stickstoffverlagerung eines Löß- und Sandbodens. Bork, H.-R. et al, *Bodenökologie und Bodengenese*, Heft 12, Fachgebiet Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Berkenhagen, J. (1998).** Die Morphologie von Oberflächenverschlammungen bei variierten Entstehungsbedingungen und ihre Bestimmung mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie. Renger, M. et al, *Bodenökologie und Bodengenese*, Heft 30, Fachgebiet Bodenkunde, Institut für Ökologie & Biologie, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Bernhardt, A., Haase, G., Mannsfeld, K., Richter, H. & Schmidt, R. (1986).** "Naturräume der sächsischen Bezirke" *Sächs. Heimatblätter* Nr. 32, S.145-192 bzw. S.193-228.
- Beuge, P., Greif, A., T. Hoppe, A. Kluge, M. Martin, U. Mosler, R. Strake, J. Alfaro, B. Anders, K. Behrens, N. Grunwald, M. Haurand, A. Knöchel, A. Meyer, H. Potgeter, Staub, S. & Stocker, M. (1999).** Die Schwermetallsituation im Muldesystem, Band I bis III, Freiberg, Hamburg.
- Beven, K. (1984).** "Infiltration into a class of vertically non-uniform soil" *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 29, S. 425 - 434.
- Beven, K. (1991).** "Scale consideration" in: Bowles, D. S. & O'Connell, P. E., *Recent advances in the modelling of hydrologic systems*, Kluwer Academic Publishers, S. 357 - 371, Dordrecht.
- Beven, K. & Germann, P. (1980).** The role of macropores in the hydrology of field soils. Report, August 1980, Report No 69, Institute of Hydrology, Wallingford Oxon.
- Beven, K. & Kirkby, M. J. (1979).** "A physically-based variable contribution area model of basin hydrology" *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, S. 43 - 69.
- Beven, K., Kirkby, M. J., Schoffield, N. & Tagg, A. (1984).** "Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 69, S. 119 - 143.
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R. & Freer, J. (1995).** "TOPMODEL" in: Singh, V. P., *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, S. 627 - 668, Highlands Ranch, Colorado.
- Beven, K. J. & Germann, P. F. (1982).** "Macropores and water flow in soils" *Water Resource Research*, 18, S. 1311-1325.
- Blöschl, G. (1996).** Scale and Scaling in Hydrology, Wiener Mitteilungen, Wasser - Abwasser- Gewässer, Band 32, Wien.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995).** "Scale issues in hydrological modelling: a review." *Hydrological Processes*, S. 312 - 329.
- BMVEL (2005).** Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.
- BNatSchG (2002).** Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege in der Fassung vom 25.03.2002, BGBl. I, S. 1193, zuletzt geändert d. Art. 40 G v. 21.06.2005, BGBl. I, S. 1818.
- Böhm, H. R., Heiland, P., Dapp, K. & Mengel, A. (1998).** Anforderungen des vorsorgenden Hochwasserschutzes an Raumordnung, Landes-/Regionalplanung, Stadtplanung und die Umweltfachplanungen -Empfehlungen für die Weiterentwicklung, UBA-Texte 45/99, Berlin.
- Bohne, K. (2005).** An Introduction into applied soil hydrology, Catena Verlag GmbH.

- Bold, S. & Spengler, B. (2006).** "Einfluss befestigter Flächen auf den Hochwasserabfluss der Emscher" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 19.07, S. 75 - 82.
- Braden, H., Blanke, T. & Böttcher, S. (1999).** "Regionalisierung der Verdunstung" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 130 - 149, Weinheim.
- Braeumer, K. (1992).** Allgemeiner Pflanzenbau, 3. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Bronstert, A. (1994).** Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Nr. 46, Karlsruhe.
- Bronstert, A. (2003).** LAHoR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet, IRMA-Code3/DU/1/002. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Bericht Nr. II-18 der KHR, Lelystad - Niederlande.
- Bronstert, A. (2005a).** Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 13.05, Hennef.
- Bronstert, A. (2005b).** "Einfluss von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt, insbesondere auf die Hochwasserentstehung" in: ATV-DVWK Landesverband Bayern et al, Internationales Symposium "Wasserwirtschaft in der Fläche" am 27./28 Januar 2005 in München.
- Bronstert, A., Demuth, N. & Meuser, A. (1999).** "Einfluß von Versiegelungen mit anschließender Versickerung des Niederschlagswassers auf den Wasserhaushalt von Hängen" *Wasser & Boden*, 51. Jahrgang, S. 9-14.
- Bronstert, A., Vollmer, S. & Ihringer, J. (1995).** "Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten" *Wasser & Boden*, 47. Jahrgang, S. 29-46, Parey Verlag, Berlin.
- Bronstert, A., Wittenberg, H. & Niehoff, D. (2005).** "Abfluss von Urbanflächen" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 40 - 46, Hennef.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2002).** Einfluss der Landnutzung und der Ausbaumaßnahmen auf den Hochwasserabfluss im Rhein. Bericht Nr. 1363, Koblenz.
- Burt, T. P. (1987).** "Slopes and slope processes" *Prog. Phys. Geog.*, Vol. 11, S. 590 - 611.
- Buttle, J. M. (1994).** "Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins" *Progress in Phys. Geogr.*, S. 16-41.
- Büttner, U. (2004).** Die größten Hochwasser im Gebiet der Mulden, Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- Büttner, U., Fügner, D. & Winkler, U. (2001).** "Das Hochwasser am 5./6. Juli 1999 im Raum Marienberg im Erzgebirge" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 45, S. 102 - 112.
- 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.*, S. 101-110.
- Carter, M. R., Sanderson, J. B., Ivany, J. A. & White, R. P. (2002).** "Influence of rotation and tillage on forage maize productivity, weed species, and soil quality of a fine sandy loam in the coolhumid climate of atlantic Canada" *Soil Tillage Res.*, Vol. 67, S. 85 - 98.

- Caspary, H. J. (2001).** "Zusammenhang zwischen der Verschärfung des Hochwasserrisikos in Südwestdeutschland seit Mitte der siebziger Jahre und einem veränderten Winterklima" *GAIA*, 10. Jahrgang, S. 286 - 293, oekom verlag.
- Chen, C. & Wagenet, R. J. (1992).** "Simulation of water and chemicals in macropores. Part I: Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow" *Journal of Hydrology*, Vol. 130, S. 105 - 126.
- Chu, X. & Mariño, M. A. (2005).** "Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall" *Journal of Hydrology*, S. 195 - 207.
- Demuth, N. & Hiltbold, A. (1993).** "Preferential Flow: Eine Übersicht über den heutigen Kenntnisstand" *Pflanzenernährung und Bodenkunde*, S. 479-484, VCH, Weinheim.
- DICTUC (1996).** *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos guía de diseño.* Direccion de Investigaciones Cientificas y Tecnologicas - Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Santiago de Chile.
- Diekkrüger, B. (1999).** "Bodenwasser" in: Kleeberg, H.-B. et al, *Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH*, S. 54 - 67, Weinheim.
- Dikau, R. (1983).** "Der Einfluss von Niederschlag, Vegetationsbedeckung und Hanglänge auf den Oberflächenabfluss und Bodenabtrag von Meßspazellen" *Geomethodica*, Vol. 8, S. 149 - 177.
- Dunne, T. (1978).** "Field studies of hillslope flow processes" in: Kirkby, M. J., *Hillslope Hydrology*, John Wiley, S. 227 - 293, Chichester.
- Durner, W. (1991).** Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden, *Bayreuther bodenkundliche Berichte*, Band 20.
- DWA-A 138 (2005).** DWA-Arbeitsblatt DWA-A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 59, Hennef.
- DWA (2006).** DWA-Themen - Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung, Arbeitsbericht der DWA Arbeitsgruppe „Dezentraler Hochwasserschutz“. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 109, Hennef.
- DWD (1997).** *KOSTRA-Atlas*, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- DWD (2005).** *KOSTRA-2000*, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995).** *Grundlagen der Hydrologie*, 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Edwards, W. M., Shipitalo, M. J., Owens, L. B. & Norton, L. D. (1990).** "Effects of *Lumbricus terrestris* L. burrows on hydrology of continuous no-till corn fields" *Geoderma*, S. 73.
- EEA (2004).** *Impacts of Europe's changing climate.* EEA Report No 2/2004, European Environment Agency, Copenhagen.
- Eissmann, L. (1995).** "Sachsen" in: Benda, L., *Das Quartär Deutschlands*, Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Engel, H. (1994).** *Das Hochwasser 1993/94 im Rheingebiet*, BfG, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Engel, H. (1999).** *Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet - Extremereignisse zwischen Dez. 1993 und Febr. 1995*, 1-17 KHR, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).

- Engel, H., Krahé, P. & Wilke, K. (2002).** Das Auguthochwasser 2002 im Elbegebiet, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Ernstberger, H., Linnenweber, C. & Fischer, J. (2003).** "Ermittlung signifikanter Belastungen - Anwendung der LAWA-Signifikanzkriterien" *Wasserwirtschaft*, Jg. 52, S. 20 - 23.
- Eshleman, K. N., Pollard, J. S. & Kuebler-O'Brian (1993).** "Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separation" *Water Resources Res.*, Vol. 29 (10), S. 3079 - 3093.
- ESRI (1998).** ArcView GIS, Vers. 3.1, Environmental Systems Research Institute, Inc. .
- Etzenberg, C. (1998).** Zur Regionalisierung der Abflussbildung, Bestimmung flächenspezifischer Abflussbeiträge aus Gebietseigenschaften. Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau.
- EU (2003).** Verordnung (EG) Nr. 1782/2003 des Rates vom 29. September 2003 (mit gemeinsamen Regeln für Direktzahlungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik - Cross Compliance).
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2002).** <http://www.fao.org/ag/AGS/AGSE/main.htm>.
- Feldwisch, N. (1999).** Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss - Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze. DVWK, Materialien, 7/1999.
- Feldwisch, N., Mollenhauer, K. & Schrenk, G. (2002).** "Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss kleiner Einzugsgebiete" *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, Jahrgang 49, S. 355-362.
- Flerchinger, G. N., Walts, F. J. & Bloomsburg, G. L. (1988).** "Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, S. 561 - 565, ASCE.
- FlurbG (1997).** Flurbereinigungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. März 1976 (BGBl. I S. 546), zuletzt geändert durch Gesetz vom 12. August 2005.
- Fohrer, N. (2005).** "Bodenveränderungen und ihre Konsequenzen für die Wasser- und Stoffströme in der Landschaft" in: Bayern, D. L., Internationales Symposium "Wasserwirtschaft in der Fläche" am 27./ 28. Januar 2005 in München, S. 85 - 90.
- Frielinghaus, M. (1998).** "Bodenbearbeitung und Bodenerosion" in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft - KTBL, Arbeitspapier 266, Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlußfolgerungen für die gute fachliche Praxis, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- Frielinghaus, M., Höflich, G., Joschko, M., Rogasik, H. & Schäfer, H. (1997).** "Auswertung eines Langzeitexperimentes zur konservierenden Bodenbearbeitung auf Sandböden und Einschätzung des Erfolgs" *Archiv Acker- Pflanzenbau. Bodenkd.*, S. 383-402.
- Fuhrmann, S., Kosubek, K.-H., Mittring, P. & Streit, U. (1999).** "Entwicklung von GIS-Werkzeugen für die Regionalisierung" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 371 - 388, Weinheim.

- Gänsrich, C. & Wollenweber, I. (1995).** Retention - Eine Methodenuntersuchung zur Planungspraxis, Schriftenreihe des Institutes für Landschaftspflege und Naturschutz am Fachbereich für Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover, Arbeitsmaterialien 30.
- Geiger, W. & Dreiseitl, H. (1995).** Neue Wege für das Regenwasser, Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten, Oldenbourg-Verlag, München.
- Germann, P. & Beven, K. (1985).** "Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores" *Water Res. Res.*, S. 990 - 996, Vol. 21.
- Germann, P. F. (1981).** Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt in hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 51.
- Gerold, G., Cyffka, B., Suttmöller, J., Krüger, J.-P. & Busch, G. (1999).** "Regionalisierung der Abflußbildung über die Aggregation homogener Flächen unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und der Digitalen Reliefanalyse (Programm SARA)" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 191 - 204, Weinheim.
- Gräfe, H. (2007).** "Hochwassernachrichten- und Alarmdienst - 5 Jahre nach der Flut -" in: Messe Leipzig, Vortrag auf der Terratec am 7. März 2007.
- Green, W. H. & Ampt, C. A. (1911).** "Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils" *J. Agric. Sciences*, Bd. 4, S. 1 - 24.
- Grünewald, U., Kleeberg, H.-B. & Disse, M. (2002).** "Nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser" *KA - Abwasser, Abfall*, Jg. 49, S. 1328 - 1329, Hennef.
- Grünewald, U., Merz, B., Streitz, W. & a., u. (2003).** Hochwasservorsorge in Deutschland - Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV).
- Gutknecht, D. (1996).** "Abflussentstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen." *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, S. 134-144.
- Haase, G., Barsch, H., Hubrich, H., Mannsfeld, K., Schmidt, R. & a., u. (1991).** Naturraumerkundung und Landnutzung. Geochorologische Verfahren zur Analyse, Kartierung und Bewertung von Naturräumen, Beiträge zur Geographie, Bd. 34, Akademie-Verlag, Berlin.
- Haase, G. & Mannsfeld, K. (2002).** Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen. Deutsche Akademie für Landeskunde, Forschungen zur deutschen Landeskunde, Band 250, Selbstverlag, Flensburg.
- Haase, G. & Richter, H. (1965).** "Bemerkungen zum Entwurf der Karte „Naturräumliche Gliederung Nordsachsens 1:200 000“" *Exkursionsführer zum Symposium zu Fragen der Naturräumlichen Gliederung vom 27. Sept. bis 2. Okt. 1965 in Leipzig*, S. 21-31, Berlin.
- Haberlandt, U., Klöcking, B., Krysanova, V. & Becker, A. (2001).** "Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components - a case study in the Elbe River Basin" *Journal of Hydrology*, S. 35 -53, Elsevier.
- Haberlandt, U., Schumann, A. & Büttner, U. (2005).** "Räumliche Niederschlagsschätzung aus Punktmessungen und Radar am Beispiel des Elbehochwassers 2002 " *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 49, S. 56 - 68, Koblenz.
- Hach, G. & Hörtl, W. (1989).** "Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhalte-, Wasserreinhalte- und Speicherfähigkeit in der Landschaft." *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, Jg. 30, S. 8 - 21.

- Hachum, A. Y. & Alfaro, J. F. (1980).** "Rain infiltration into layered soils: prediction" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, S. 311 - 319, ASCE.
- HAD (1999).** Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Hammann, T. (2000).** Entwässerungssysteme landwirtschaftlicher Nutzflächen und deren Wirkung auf den Nitrataustrag in Abhängigkeit von den Bodenformen im Einzugsgebiet der mittleren Mulde. Diplomarbeit, Universität Trier.
- Harms & Sieker (1986).** Langzeitsimulation zur Untersuchung des Einflusses von Melioration auf den Hochwasserabfluß. Abschlußbericht Lottostiftung 13/82, Institut für Wasserwirtschaft Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.
- Harms, R. W. (1986).** Auswirkungen der Urbanisierung auf den Hochwasserabfluss kleiner Einzugsgebiete. DVWK, Schriften, Bd. 75, Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Heiland, P. & Dapp, K. (2001).** "Fortschritte beim vorsorgenden Hochwasserschutz durch die Raumordnung" *Raumforschung und Raumordnung*, S. 337-350.
- Heiland, P. & Feiden, K. (2006).** "Einzugsgebietsweite Strategie und Umsetzung regionaler Bausteine - Ergebnisse aus drei Jahren ELLA" in: Jüpner, R., Beiträge zur Konferenz „Strategien und Instrumente zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“, November 23.-25. 2006 in Tangermünde, Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte, Shaker Verlag, Band 6, Aachen.
- Helfricht, K. & Helfricht, J. (2002).** Die Jahrtausendflut 2002 in Sachsen, Husum Druck- und Verlagsgesellschaft mbH u. Co. KG, Husum.
- Hennings, V. (1994).** Methodendokumentation Bodenkunde, Geologisches Jahrbuch, Reihe F, 31, Schweizerbart, Stuttgart.
- Henningsen, D. & Katzung, G. (1998).** Einführung in die Geologie Deutschlands, Enke Verlag, Stuttgart.
- Henze, S. (2005).** Beitrag der Regionalplanung zum vorbeugenden Hochwasserschutz in Sachsen. Diplomarbeit, Institut für Landschaftspflege und Naturschutz, Universität Hannover.
- Hermann, A., Schöniger, M. & Sommerhäuser, M. (1999).** "Regionalisierung von Abflusskomponenten, Verweilzeiten und Speichervolumen im Wesereinzugsgebiet" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 205 - 217, Weinheim.
- Herrmann, A. (1992).** "Abflussbildung in Oberflächengewässern" in: Kleeberg, H.-B., Regionalisierung in der Hydrologie, VCH, S. 291 - 303, Weinheim.
- Herzhoff, M. (1998).** "Hochwasser und Versiegelung. Entwicklung, Ursachen und Impulse" *Wasserwirtschaft* 88.
- Hewlett, J. D. & Hibbert, A. R. (1967).** "Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas" in: Scopper, W. E. & Lull, H. W., Proceedings of the International Symposium of Forest Hydrology, Pergamon, S. 275 - 290, Norwich.
- Hewlett, J. D. & Nutter, W. L. (1970).** "The varying source area of streamflow from upland basins" in: American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, S. 65 - 83, New York.
- Hirt, U. (2003).** Regional differenzierte Abschätzung der Stickstoffeinträge aus punktuellen und diffusen Quellen in die Gewässer der mittleren Mulde. Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, UFZ-Bericht - Dissertation, Nr. 3/2003.
- Holtan, H. M. (1961).** "A concept for infiltration estimates in watershed engineering" *U.S. Department of Agriculture, publications ARS*, S. 41 - 51.

- Horn, R. (1999).** "Unterbodenverdichtung - gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen?" *Wasser & Boden*, 51. Jahrg., S. 15-18.
- Horton, R. E. (1933).** "the role of infiltration in the hydrologic cycle" *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol 14, S. 446 - 460.
- Hoyningen-Huene, J. v. (1983).** Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen, Schriftenreihe des DVWK (Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt), Heft 57, S. 1 - 53.
- Hydrotec (2002).** Handbuch Programm NASIM, Version 3.1.0, Hydrotec GmbH, Aachen.
- Hydrotec (2005).** Zeitflächenfunktion, NASIM-ArcView-Extention, Version 1.2.3, Aachen.
- IKSR (2001).** Rheinatlas 2001 - Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Köln.
- Intergraph Corp. (2004).** GeoMedia Professional, Version 5.2.
- IPS (2006).** Programmbeschreibung STORM, Version 2006 CR, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Hoppegarten.
- Irrgang, S. (2002).** "Waldstruktur und Waldverteilung - Optimierung der Funktion des Waldes für den Landschaftswasserhaushalt und den vorbeugenden Hochwasserschutz" in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz am 24. und 25. Oktober 2002, S. 156 - 176.
- Jin, Z. (2005).** Development of a Transparent Knowledge-Based Spatial Decision Support System for decentralised Stormwater Management Planning - Case study: Selection of On-Site Stormwater Management Measures of Urban Catchments: Chemnitz and Emscher Region, Germany, Dissertation - Fakultät Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover.
- Jin, Z., Sieker, F., Bander mann, S. & Sieker, H. (2005).** "Development of a GIS-based Expert System for on-site Stormwater Management", 10th International conference on Urban Drainage (ICUD), 21.-26. August 2005, Copenhagen.
- Jordan, H. (1988).** Hydrogeologie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Katzenmaier, D., Fritsch, U. & Bronstert, A. (2001).** "Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und dezentraler Versickerung auf die Hochwasserentstehung" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Beiträge zum Workshop der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, S. 327 - 357, Berlin.
- Kirchbach, v. H.-P., Franke, S. & Biele, H. (2002).** Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung Flutkatastrophe 2002 (Kirchbachbericht), 16. Dezember 2002.
- Kirnbauer, R., Pirkl, H., Haas, P. & Steidl, R. (1996).** "Abflussmechanismen - Beobachtungen und Modellierung" *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48. Jahrgang, S. 15 - 26.
- Kirnbauer, R. & Steidl, R. (1995).** "Abflussentstehung auf unterschiedlichen Böden" *Wasser & Boden*, 47. Jahrgang.
- Kleeberg, H.-B., Mauser, W., Peschke, G. & Streit, U. (1999).** Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, Weinheim.
- Kleeberg, H.-B. & Rother, K.-H. (1996).** "Hochwasserflächenmanagement in Flußeinzugsgebieten" *Wasser & Boden*, 48. Jahrgang.

- Klotz, S., Henle, K. & Feldmann, R. (1997).** "Vegetation und Fauna" in: Feldmann, R. et al, Regeneration und nachhaltige Landnutzung. Konzepte für belastete Regionen, Springer Verlag, S. 21 - 26, Berlin, Heidelberg, New York.
- Koehler, G. (1992).** "Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet" *Wasser und Boden*, S. 11-15.
- Koehler, G. (1998).** "Überörtliche Auswirkung der Abkopplung von Siedlungsflächen auf die Hochwasserabflüsse am Beispiel der Rems", Beitrag zum Workshop der Deutsche Bundesstiftung Umwelt "Hochwasserreduzierung durch dezentrale Maßnahmen?" am 15./16.5.1998, Weiskirchen, Saarland.
- Koehler, G. (2006).** "Dezentraler Hochwasserschutz - Einführung und Grundlagen" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 19.07, S. 5 - 17.
- Krahe, P., Herpertz, D., Eberle, M., Busch, N., Buiteveld, H., Naef, F., Helbig, A. & Beersma, J. (2004).** Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Einflusses dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen auf den Abfluss des Rheins (DEFLOOD), November 2004, 1-21 der KHR, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad.
- Krein, A. (2000).** "Der Einfluss des Bodens auf die Wellenform und den Stofftransport bei Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, S. 19-27.
- Kremer, R. (2006).** "Möglichkeiten zur Umsetzung dezentraler Maßnahmen im Rahmen der Flurneuordnung" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 17.06, S. 125 - 129.
- Krönert, R. (1997).** "Landnutzung und Landnutzungsänderungen" in: Feldmann, R. et al, Regeneration und nachhaltige Landnutzung. Konzepte für belastete Regionen, Springer Verlag, S. 27 - 34, Berlin, Heidelberg, New York.
- KTBL (1993).** Definition und Einordnung von Verfahren der Bodenbearbeitung und Bestellung - Arbeitsblatt-Nr. 0236. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft - Arbeitsgruppe "Bodenbearbeitung und Bestellung", Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- KTBL (1998).** Arbeitspapier 266, Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlußfolgerungen für die gute fachliche Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- Kunkel, R. & Wendland, F. (2004).** "Naturräumliche Bedingungen im Elbegebiet" in: Becker, A. & Lahmer, W., Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Weißensee Verlag, Berlin.
- Lange, P. (2005).** Entwicklung einer GIS-gestützten Methodik zur automatischen Identifizierung erheblich veränderter Gewässerabschnitte unter Verwendung von Landnutzungsdaten. Dissertation, Rheinisch Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- LAWA (1995).** Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz, Hochwasser - Ursachen und Konsequenzen, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- LAWA (2000).** Wirksamkeit von Hochwasservorsorge- und Hochwasserschutzmaßnahmen. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Schwerin.
- LAWA (2003).** Instrumente und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser im Auftrag der Umweltministerkonferenz.

- LfUG (1992).** Geologische Übersichtskarte des Freistaates Sachsen 1:400.000 (GÜK 400). Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- LfUG (1997a).** Talsperren, Wasserspeicher und Rückhaltebecken im Freistaat Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Materialien zur Wasserwirtschaft, inkl. Gewässerkarte.
- LfUG (1997b).** Tätigkeitsbericht 1994 - 1996 des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (2002a).** Hydrologisches Handbuch, Teil 3, Gewässerkundliche Hauptwerte. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Materialien zur Wasserwirtschaft, Stand: Januar 2002.
- LfUG (2002b).** Stauanlageverzeichnis 2002 - Talsperren, Wasserspeicher und Rückhaltebecken im Freistaat Sachsen, Stand: November 2002.
- LfUG (2002c).** Vorläufiger Kurzbericht über die meteorologisch-hydrologische Situation beim Hochwasser im August 2002, 02.12.2002, Version 5, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (2003).** Einfluss des August Hochwassers 2002 auf das Grundwasser. Materialien zur Wasserwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (2004).** Ereignisanalyse - Hochwasser August 2002 in den Osterzgebirgsflüssen. Materialien zur Wasserwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (2005).** HQT nach Allgemeiner Extremwertverteilung, Wahrscheinlichkeitsgewichtete Momentenmethode (AE,WGM), Dresden.
- LfUG (2007a).** http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/natur-landschaftsschutz_328.html. "Color-Infrarot-(CIR-)Biotoptypen- und Landnutzungskartierung".
- LfUG (2007b).** http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/wasser_5634.html. "Überschwemmte Flächen im Freistaat Sachsen - Hochwasser August 2002 (Bearbeitungsstand: 11/2005)".
- LfUG (2007c).** http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/wasser_13012.html. "Informationsplattform Hochwasserschutz des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie".
- Lübbe, E. (2002).** "Vorbeugender Hochwasserschutz - Förderung im Überblick" in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz am 24. und 25. Oktober 2002, S. N272 - N279.
- Maniak, U. (1993).** Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure, 3. Auflage, Braunschweig.
- Mannsfeld, K. & Richter, H. (1995).** Naturräume in Sachsen, Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Band 238.
- Marks, R., Müller, M. J., Hartmut, L. & Klink, H.-J. (1992).** Anleitung zur Bewertung des Leitungsvermögens des Landschaftswasserhaushaltes, Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Band 229, 2. Auflage.
- Mauser, W., Schädlich, S., Strasser, U., Taschner, S. & Wege, C. (1999).** "Regionalisierung von aktueller Verdunstung und Bodenfeuchte mit Flächenparametern aus Fernerkundungsdaten" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 249 - 265, Weinheim.

- Mehlhorn, J. & Leibundgut, C. (1999).** "Die Modellierung des Abflußprozesses mit tracerhydrologisch ermittelten Verweilzeiten und Abflußkomponenten" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*.
- Mendel, H. G. (2000).** Elemente des Wasserkreislaufs. Bundesanstalt für Gewässerkunde, K., Analytica Verlag, Berlin.
- Merker, H. (2007).** "Hochwasserentstehungsgebiete in Sachsen - Methodisches Vorgehen" in: Messe Leipzig, Vortrag auf der Terratec am 7. März 2007.
- Merz, B. & Bárdossy, A. (1998).** "Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment" *Journal of Hydrology*, Vol. 212 - 213, S. 304 - 317.
- Merz, B. & Bronstert, A. (2005).** "Infiltrationsüberschuss" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 11 - 15, Hennef.
- Merz, R. & Blöschl, G. (2004).** "Regionalisation of flood risk in Austria" in: Brath, A. et al, Hydrological risk. Proceedings of a European Science Foundation Workshop, Bologna, Italy 24-25 October 2003, Editoriale Bios, Castrolibero, S. 353-368.
- Meulenberg, M., Krahe, P., Herpertz, D., Buiteveld, H., Busch, N., Engel, H., Helbig, A., Naef, F. & Wilke, K. (2004).** Development of Methodologies for the Analysis of the Efficiency of Flood Reduction Measures in the Rhine Basin on the Basis of Reference Floods (DEFLOOD) - Executive Summary IRMA-SPONGE Project 1, November 2004, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR).
- Mualem, Y. (1976).** "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media" *Water Res. Res.*, S. 513 - 522.
- Musgrave, G. W. & Holtan, H. M. (1964).** "Infiltration" in: Chow, V. T., Handbook of applied hydrology, McGraw-Hill, Section 12, New York.
- Naef, F. (2000).** Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihrer Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich. Bericht Nr. B003, Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.
- Naef, F., Scherrer, S. & Weiler, M. (2002).** "A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change" *Journal of Hydrology*, S. 74 - 79.
- Niehoff, D. (2001).** Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation, Potsdam.
- Nirupama, N. & Simonovic, S. (2004).** "Is Urbanization Increasing Flood Risk? An Ontario Assessment" *Ecclectica magazine*, www.ecclectica.ca, Canada.
- Nitzsche, O., Krück, S., Schmidt, W. & Richter, W. (2001).** "Reducing soil-erosion and phosphate losses and improving soil biological activity through conservation tillage systems" in: Garcia-Torres, L. et al, 1st World Congress on Conservation Agriculture, 1-5 October, 2001, S. 185-189, Volume II, Madrid.
- Ostrowski, M. (1982).** Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Aachen, Nr. 42, Aachen.
- Ostrowski, M. W. (1992).** "Ein universeller Baustein zur Simulation hydrologischer Prozesse" *Wasser & Boden*, S. 755-760.
- Ostrowski, M. W. (2002).** "Vorsorgender Hochwasserschutz in Flüssen und Auen " in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz 24./25.10.2002, Osnabrück.

- Panebianco, S. (2002).** "Raumplanerische Aspekte zur Umsetzung des vorbeugenden Hochwasserschutzes" in: Sieker, F. et al, Endbericht zum Forschungsvorhaben: "Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße" AZ 15877, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Februar 2002.
- Pearce, A. J., Stewart, M. K. & Sklash, M. G. (1986).** "Storm runoff generation in humid headwater catchments, 1. Where does the water come from?" *Water Resources Res.*, Vol. 22, S. 1263 - 1272, American Geophysical Union.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Müller, G., Töpfer, J. & Zimmermann, S. (1999a).** Das wissenschaftliche System FLAB - ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung, IHI-Schriften, Heft 10, Zittau.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Zimmermann, S., Töpfer, J. & Müller, G. (1999b).** "Die Abflussbildung in Abhängigkeit von der wirksamen Kombination flächenvariabler Einflussfaktoren und vom Gebietszustand" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 267 - 281, Weinheim.
- Potter, K.-W. (1991).** "Hydrological impacts of changing land management practices in a moderate-sized agriculture catchment" *Water Resources Research*, Vol. 27, p. 845-855.
- Rasmussen, K. J. (1999).** "Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review" *Soil Tillage Res.*, S. 3 - 14.
- Rawls, W. J. (1983).** "Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content" *Soil Sci.*, Vol. 135, S. :123 - 125.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. & Logsdon, S. D. (1996).** "Estimations of macropore properties for no-till soils" *ASAE Trans*, Jg. 39, S. 91 - 95.
- Renger, M. (1983).** Bodenwasserbewegung in der ungesättigten Zone bei landwirtschaftlichen Flächen und unter Berücksichtigung von Grünland, DVWK-Fortbildungslehrgang, Braunschweig.
- Richards, L. A. (1931).** "Capillary conduction of liquids through porous mediums" *Physics*, No. 1, S. 318 - 333.
- Richmann, A., Hoffmann, M. & Gretschel, M. (2006).** "Möglichkeiten zur Abschätzung des Schadenpotenzials im Landkreis Stendal" in: Jüpner, R., Beiträge zur Konferenz „Strategien und Instrumente zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“, November 23.-25. 2006 in Tangermünde, Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte, Shaker Verlag, Band 6, Aachen.
- Rode, M. (1995).** Quantifizierung der Phosphorbelastung von Fließgewässern durch landwirtschaftliche Flächennutzung. Justus-Liebig-Universität, I. f. L., Boden und Landschaft, Bd. 1, Gießen.
- Rode, M. & Wenk, G. (2005).** "Zwischenabfluss" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 19 - 21, Hefen.
- Röder, M. & Beyer, C. (2002).** "Abflussbildung und vorbeugender Hochwasserschutz in der Landes- und Regionalplanung. Dargestellt am Beispiel Sachsens." *Naturschutz und Landschaftsplanung*, Jg. 34 (7), S. 197-202.
- Roth, C., Helming, K. & Fohrer, N. (1995).** "Oberflächenverschlammung und Abflussbildung auf Böden aus Löß und pleistozänen Sedimenten" *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, S. 43 - 53, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.

- Röttcher, K., Koehler, G. & Kleeberg, H.-B. (2006).** Dezentraler Hochwasserschutz, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 17.06.
- Röttcher, K., Koehler, G. & Kleeberg, H.-B. (2007).** Dezentraler Hochwasserschutz, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig, Heft 19.07.
- Röttcher, K. & Tönsmann, F. (1999).** Umsetzung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen am Beispiel der Bauna. Forschungsbericht, Dezember, Band 8, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Kassel.
- Rüter, S. (2007a).** Biotopverbund und Abflussretention in der Agrarlandschaft – Modellanalytische Untersuchungen zum Einfluss von Saumstrukturen am Beispiel des sächsischen Lösshügellandes, Dissertation, Universität Hannover.
- Rüter, S. (2007b).** "Umsetzung des Ziel- und Maßnahmenkonzeptes" in: Sieker, F. et al, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen“ AZ 21467, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Rüter, S., Lülff, M. & Reich, M. (2006).** "Planung und Modellierung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen auf Grundlage der CIR-Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung" *Wasserwirtschaft*, S. 27 - 33.
- Rüter, S. & Reich, M. (2007).** "Multifunctional measures to combine flood protection and nature conservation in agricultural watersheds" in: Herrmann et al, Flood protection with stakeholders in small catchments.
- SächsWG (2004).** Sächsisches Wassergesetz S. 482ff, Sächs GVBl.
- Salvucci, G. D. & Entekhabi, D. (1994).** "Explicit expressions for Green-Ampt (Delta function diffusivity) infiltration rate and cumulative storage" *Water Resources Res.*, S. 2661 - 2663.
- Sartor, J. (1998).** "Mögliche Einflüsse der Bebauung auf den Hochwasserabfluß" *Wasserwirtschaft* 88.
- Sartor, J. (2001).** "Die Bedeutung der Wasserbilanz in der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Beiträge zum Workshop der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, S. 287 - 308.
- Scheffer & Schachtschabel (1992).** Lehrbuch der Bodenkunde, 13., durchgesehene Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Scherrer, S. & Naef, F. (2003).** "A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland" *Hydrological Processes*, S. 391 - 401.
- Schmidt, J., von Werner, M., Michael, A. & Schmidt, W. (1996).** Erosion 2D/3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- Schmidt, P. A., Hardtke, H.-J., Eisenhauer, D.-R. & Wilhelm, E. (2005).** Zwischenbericht zum DBU-Projekt "Hochwasserschutz und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche in Durchbruchstätern des Osterzgebirges, TU Dresden, Institut für Allgemeine Ökologie und Umweltschutz, Dresden.
- Schmidt, P. A., Hempel, W., Denner, M., Döring, N., Gnüchtel, A., Walter, B. & Wendel, D. (2002).** Potentielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1 : 200 000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege, Dresden.

- Schmidt, W.-A. (2001).** "Beitrag der Landwirtschaft zum Hochwasserschutz" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Beiträge zum Workshop in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, S. 219 - 236, Berlin.
- Schmidt, W.-A. (2006).** "Möglichkeiten der Hochwasserminderung in der Landwirtschaft" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 19.07, S. 5 - 17.
- Schmidt, W. & Michael, A. (1999).** "Bodenabtrag und Wasserinfiltration auf Einzelflächen und in Einzugsgebieten in Sachsen bei Bodenbearbeitung mit und ohne Pflug" *Mittlg. Deutsch. Bodenkdl. Gesellsch.*, Band 91, S. 79 - 82.
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F. & Scherrer, S. (2006).** "Identifying runoff processes on the plot and catchment scale" *Hydrology and Earth System Science Discussions*, No. 3, S. 2063 - 2100.
- Schneider, F. (1999).** Messtechnische Untersuchung und modelltechnische Beschreibung des Speicher- und Abflussverhaltens von Mulden-Rigolen-Systemen. Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover.
- Schrader, S. (1999).** "Bodentiere als "ecosystem engineers" in Agrarökosystemen" *Wasser&Boden*, 51. Jahrg., S. 48-51.
- Schröder, R. (2000).** Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten, Bonner Geographische Abhandlungen, ASGARD-Verlag, Sankt Augustin.
- Schröder, R. & Auerswald, K. (2000).** "Modellierung des Jahresganges der verschlammungsinduzierten Abflussbildung in kleinen, landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten" *Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung*, Jg. 41, S. 167 - 172, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Schüler, G. (2006).** "Dezentraler Wasserrückhalt im Wald in Abhängigkeit des Standortpotenzials" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz, Heft 17.06, S. 131 - 160.
- Schulla, J. & Jasper, K. (1999).** Modellbeschreibung WaSiM-ETH, ETH-Zürich.
- Schumann, A. (1999).** "Direktabfluss" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 68 - 78, Weinheim.
- Schumann, A. (2007).** <http://mulde.hydrology.rub.de/de/index.html>. "Forschungsprojekt "Entwicklung integrativer Lösungen für das operationelle Hochwassermanagement am Beispiel der Mulde", Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen des BMBF-Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema "Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse" (RIMAX) - Förderzeitraum: 01.07.2005 - 31.06.2008".
- Schwarze, R. (2004).** "Regionalspezifische Analysen in der Festgesteinsregion" in: Becker, A. & Lahmer, W., Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Weißensee Verlag, S. 183 - 205, Berlin.
- Schwarze, R. (2005).** "Abflussbildung in Mittelgebirgseinzugsgebieten mit Festgesteinsaquiferen, Fallbeispiel: Wernersbach" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 89 - 96, Hefen.

- Schwarze, R., Dröge, W. & Opherden, K. (1999).** "Regionalisierung von Abflusskomponenten, Umsatzräumen und Verweilzeiten für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 345 - 369, Weinheim.
- Seidler, C. (2005).** DFG-Bündelprojekt: Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung, Teilprojekt: Prozess- und skalenbezogene Erfassung und Modellierung der Bildung schneller Abflusskomponenten Sei 528/4-2. Endbericht, Internationales Hochschulinstitut Zittau (IHI).
- Selker, J. S., Duan, J. & Parlange, J. Y. (1999).** "Green and Ampt infiltration into soils of variable pore size with depth" *Water Resources Res.*, S. 1685 – 1688.
- Semmel, H. & Horn, R. (1995).** "Auswirkungen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physisch-mechanische Kenngrößen von rekultivierten Böden" in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft - KTBL, Einführung in die Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- Sieker, F. (2006).** "Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten als Beitrag zur Minderung extremer Hochwasserabflüsse in beliebig großen Einzugsgebieten" *GWF - Wasser/ Abwasser*, 147. Jahrgang, S. 310-314.
- Sieker, F., Adams, R., Huhn, V. & Stecker, A. (1996).** Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (Grundlagen, Leitfaden und Anwendungsbeispiele), 1. Auflage, expert-Verlag GmbH.
- Sieker, F., Bandermann, S., Lilienthal, A., Sommer, H., Sieker, H. & Zimmerman, U. (2001).** Endbericht zum Forschungsvorhaben: "Innovative Hochwasserreduzierung durch dezentrale Maßnahmen am Beispiel der Saar", gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Sieker, F., Bandermann, S. & Zimmerman, U. (2002a).** Hochwasserreduzierung durch dezentrale siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet der Saar. Abschlussbericht zum IRMA-Projekt Nr. 1/DU/2/038, Februar 2002, Universität Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau.
- Sieker, F., Kaiser, M. & Sieker, H. (2006a).** Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich (Grundlagen und Ausführungsbeispiele), Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.
- Sieker, F., Schlottmann, P. & Zweynert, U. (2006b).** Ökologische und ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen dem Konzept der konventionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, Teil II: Hydraulisch vollständige Abkoppelungsmaßnahmen in Bestandsgebieten und dezentrale Bewirtschaftungsmaßnahmen in Erweiterungs- und Neubaugebieten, Endbericht zum Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes, FKZ 203 26 391, Hannover.
- Sieker, F., Schmidt, W.-A., v.d. Ploeg, R., Burde, M. & Sieker, H. (2002b).** Endbericht zum Forschungsvorhaben: "Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße" AZ 15877, Februar 2002, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Sieker, F., Sieker, H., Zimmerman, U. & Sommer, H. (2004).** "Vorbeugender Hochwasserschutz als Nebenwirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 48, S. 185-188, Koblenz.

- Sieker, F., von Haaren, C., Reich, M., Jasper, J. & Schmidt, W.-A. (2007a).** Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen“ AZ 21467, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Sieker, F., Zimmerman, U. & Sommer, H. (2005a).** "Entwicklung eines Planungsinstrumentes zur flächenbezogenen Regenwasserbewirtschaftung unter besonderer Berücksichtigung des vorbeugenden Hochwasserschutzes" *Wasserwirtschaft*, Jg. 95, S. 7 - 14, Vieweg & Sohn / GWV Fachverlage, Wiesbaden.
- Sieker, F., Zweynert, U. & Sieker, H. (2006c).** "Zielgrößen und Anforderungen an zukünftige Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Neubau-, Erweiterungs- und Sanierungsgebieten. Teil I: Die Jahreswasserbilanz als maßgebendes Planungskriterium" *GWf - Wasser/ Abwasser*, 147. Jahrgang, S. 658-667.
- Sieker, H. (2001a).** "Bewertung von Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung im Hinblick auf Kosten und Wirkung" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Beiträge zum Workshop der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Saarlouis am 15./16. Juni 2000, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Sieker, H. (2001b).** Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technische Universität Darmstadt, Mitteilungen, Heft 116, Darmstadt.
- Sieker, H. (2002).** "GIS-gestützte Potenzialanalyse zum vorbeugenden Hochwasserschutz" in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 20. Osnabrücker Umweltgespräch - Vorbeugender Hochwasserschutz am 24. und 25. Oktober 2002, S. 209 - 220.
- Sieker, H., Sieker, F., Zweynert, U. & Schlottmann, P. (2007b).** "Zielgrößen und Anforderungen an die künftige Regenwasserbewirtschaftung in Neubau-, Erweiterungs- und Sanierungsgebieten. Teil II: Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen dem Konzept der dezentralen Bewirtschaftung und der herkömmlichen Regenwasserableitung im Trennsystem" *GWf Wasser/Abwasser*, 148. Jahrgang, S.59-70, GWf Wasser/Abwasser, Oldenbourg.
- Sieker, H., Wilcke, D., Jakobs, F. & Deckert, A. (2006d).** Flussgebietsmodell und Hochwasserschutzkonzeption für die Oos und den Grobbach, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH. Gutachten, unveröffentlicht, Stadt Baden-Baden, Fachbereich Planen und Bauen, Fachgebiet Tiefbau.
- Sieker, H., Zimmerman, U., Scheibel, M. & Förster, M. (2005b).** "DAYWATER - ein Entscheidungshilfesystem für die Bewirtschaftung von Regenwasser" *Wasserwirtschaft*, 95., Vieweg&Sohn / GWV Fachverlage, Wiesbaden.
- Simunek, J., van Genuchten, M. T. & Sejna, M. (2005).** Code for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated porous media. US Salinity Laboratory, USDA, ARS.
- SMUL (2005a).** Ergebnisse der landesweiten Priorisierung von Hochwasserschutzmaßnahmen 2005 - 2008, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- SMUL (2005b).** Klimawandel in Sachsen - Sachstand und Ausblick, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- SMUL (2007a).** Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007 - 2013 (EPLR), Entwurf vom 19.7.2007, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft.

SMUL (2007b). Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007 - 2013 (EPLR) Schwerpunkt II - Verbesserung der Umwelt und der Landschaft, Förderrichtlinie Agrarumweltmaßnahmen und Waldmehrung - RL AuW/2007 -, Entwurf vom 8. Mai 2007, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Staatliches Amt für Landwirtschaft Pirna.

SMUL (2007c). http://www.smul.sachsen.de/de/wu/aktuell/foerderung/5_44.htm. "Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des Ländlichen Raumes (ELER)".

SMUL (2007d). http://www.smul.sachsen.de/de/wu/aktuell/foerderung/5_238.htm. "Das Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum (EPLR)".

Sommer, H. (2007). Behandlung von Straßenabflüssen - Anlagen zur Behandlung und Filtration von Straßenabflüssen in Gebieten mit Trennsystem, Neuentwicklungen und Untersuchungen. Dissertation, 23.04.2007, Leibniz Universität Hannover.

Stauss, M. (1999). Auswirkungen dezentraler Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung auf die Hochwasserentwicklung - dargestellt an elementaren Flächen. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover.

Stecker, A. (1997). Anwendung der Mulden-Rigolen Kombination zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in urbanen Entwässerungssystemen. Sieker F., Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Band 16, SuG-Verlag, Hannover.

Stecker, A. & Bander mann, S. (1996). Auswahl und Klassifizierung relevanter Einflussfaktoren auf die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und Anwendung des Geographischen Informationssystems IDRISI als Planungshilfe, Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 37, SuG-Verlag, Hannover.

Tietje, O. & Hennings, V. (1996). "Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes" *Geoderma*, Vol. 69, S. 71 – 84.

Trefflich, A. (1997). "Klimatologische Kennzeichnung" in: Feldmann, R. et al, Regeneration und nachhaltige Landnutzung. Konzepte für belastete Regionen, Springer Verlag, S. 13 - 17, Berlin, Heidelberg, New York.

UBA (2004). Hintergrundpapier: Flächenverbrauch, ein Umweltproblem mit wirtschaftlichen Folgen, Umweltbundesamt, Berlin.

Uhlenbrook, S. (1999). Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet., Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, Freiburg.

Uhlenbrook, S. (2005). "Sättigungsüberschuss" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 16 - 18, Hhenf.

Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C. (1997). "Abflussbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen" *Wasser & Boden*, Jg. 49, S. 13-22.

Universität Kassel & GSF (2007). <http://eco.wiz.uni-kassel.de/ecobas.html>. "Register of Ecological Models (REM) der Universität Kassel und des GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH".

US-EPA (2005). National Management Measures Guidance to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas, DC 20460, EPA-841-B-05-004. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington.

USDA (2006). Keys to Soil Taxonomy, Tenth Edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

- van den Bygaart, A. J., Fox, C. A., Fallow, D. J. & Protz, R. (2000).** "Estimating earthworminfluenced soil structure by morphometric image analysis" *Soil Sci. Soc. Am. J.*, S. 982 - 988.
- van der Ploeg, R. R., Ilsemann, J., Hermsmeyer, D. & Machulla, G. (2001).** "Eine geänderte Landnutzung in der Nachkriegszeit als Mitverursacher der Hochwasserprobleme in Deutschland?" in: Heiden, S. et al, Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Erich Schmidt Verlag, S. 151-180, Berlin.
- van der Ploeg, R. R. & Sieker, F. (2000).** "Bodenwasserrückhalt zum Hochwasserschutz durch Extensivierung der Dränung landwirtschaftlich genutzter Flächen" *Wasserwirtschaft*, 90, S. 28-33.
- van Genuchten, M. T. (1980).** "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils" *Soil Science Soc. Am. J.*, S. 892 - 898.
- Verworn, H.-R. & Harms, R. W. (1984).** "Urbanisierung und Hochwasserabfluss" *Wasser & Boden*, S. 418 - 425.
- Vischer, D. (1993).** "Versiegelung der Landschaft - größere Hochwasser?" *Gas/ Wasser/ Abwasser*, 73. Jahrgang, S. 280 - 283.
- Wassmann, H., Sieker, H. & Jannotta, M. (1997).** Wasserwirtschaftliche Rahmenbedingungen für eine gewässer- und landschaftsverträgliche städtebauliche Entwicklung auf dem Barnim im Nordosten Berlins. Gutachten, im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin.
- Weiler, M., Scherrer, S., Thoma, C., Fackel, P. & Naef, F. (2000).** "The potential to influence runoff processes by changes in land use" in: Bronstert, A. et al, Proceedings of the 'European Conference on Advances in Flood Research', Vol.1, PIK Report No.65, Potsdam.
- Wendland, F. & Kunkel, R. (1999).** "Der Landschaftswasserhaushalt im Elbeinzugsgebiet (Deutscher Teil)" *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 43. Jahrg., S. 226-233.
- Wendling, U. (1995).** "Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung." *Wasserwirtschaft*, Jg. 85.
- Wessolek, G., Gross, J. & Renger, M. (1999).** "Vergleichende Untersuchungen zur Regionalisierung des Bodenwasserhaushalts bei unterschiedlichen Nutzungen, Reliefbedingungen und Maßstäben" in: Kleeberg, H.-B. et al, Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 - 1998), Forschungsbericht/ Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 390 - 403, Weinheim.
- Wilcke, D., Sieker, F., Jin, Z. & Sieker, H. (2007).** "Nachweis des Rückhaltevermögens dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten bei hochwasserverursachenden Niederschlägen" *KA - Abwasser, Abfall*, Jg. 54, S. 249 - 259.
- Williams, J. R., Ouyang, Y., Chen, J.-S. & Ravi, V. (1998).** Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Application of Selected Mathematical Models, Volume II, EPA/600/R-97/128b, United States Environmental Protection Agency (EPA).
- Wittenberg, H. (1974).** Der Einfluß zunehmender Bebauung auf den Hochwasserabfluß. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Mitteilungen, Heft 4.
- Wittenberg, H., Schöniger, M. & Schwarze, R. (2005).** "Grundwasserabfluss" in: Bronstert, A., Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft in der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 22 - 39, Hennef.
- Wood, E. F., Sivapalan, M. & Beven, K. (1990).** "Similarity and scale in catchment storm response" *Reviews of Geophysics*, Vol. 28 (1), S. 1 -18.

- Zacharias, S. (2004).** Konservierende Bodenbearbeitung und Hochwasserschutz - Bodenphysikalische Aspekte. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe, Jg. 9, Heft 10, S. 53 - 63.
- Zacharias, S. & Bohne, K. (1997).** "Replacing the field capacity concept by an internal drainage approach - A method for homogeneous soil profiles" *SCIENCES of SOILS*, www.hintze-online.com/sos/1997/Articles/Art2.
- Zacharias, S. & Bohne, K. (2007).** "Approach to a re-evaluation of field capacity from a soil-hydrological view" *J. Plant Nutrition and Soil Sci*, (accepted).
- Zacharias, S. & Wessolek, G. (2007).** "Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention" *Soil Science Soc. Am. J.*, (accepted).
- Zacharias, S. & Wilcke, D. (2007).** "Methodische Ansätze zur Ermittlung von Flächen mit hohem Wasserrückhaltepotenzial" in: Röttcher, K. et al, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Dezentraler Hochwasserschutz, Beiträge zur Seminar am 4./ 5. Juni 2007 in Leipzig, S. 157 - 165.
- Zepp, H. (1992).** "Abflußregulationsfunktion" in: Marks, R. et al, Anleitung zur Bewertung des Leitungsvermögens des Landschaftswasserhaushaltes, Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Trier.
- Zimmerling, B. (2003).** Begegnungsversuche zum Infiltrationsverhalten von Ackerböden nach der Umstellung der konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitung (Dissertation). Bachmann, J. et al, Horizonte - Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde, Band 5, Institut für Bodenkunde, Universität Hannover.
- Zimmerling, B. & Schmidt, W.-A. (2002a).** "Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Wasserinfiltration" in: Sieker, F. et al, Endbericht zum Forschungsvorhaben: "Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße" AZ 15877, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Februar 2002.
- Zimmerling, B. & Schmidt, W. (2002b).** "Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung zum vorbeugenden Hochwasserschutz" *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, Jahrgang 7, S. 23-51.
- Zimmerman, U. (2005).** Integrierte siedlungswasserwirtschaftliche Planung; Eine einzugsgebietsweite Betrachtung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten im Hinblick auf eine nachhaltige und optimierte Sanierungsstrategie. Dissertation, 01.04.2005, Universität Hannover.
- Zimmermann, S. (1999).** Regionalisierung in der Hydrologie. Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau.
- Zuidema, P. K. (1985).** Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Vischer, H., Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 79.
- Zweynert, U., Wilcke, D. & Sieker, F. (2006).** "Dezentrale siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz - Größenordnungen potentieller Rückhaltevolumen und deren Auswirkung auf gesamte Flusseinzugsgebiete" in: Jüpner, R., Beiträge zur Konferenz „Strategien und Instrumente zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“, November 23.-25. 2006 in Tangermünde, Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte, Shaker Verlag, Band 6, Aachen.

