

Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten



Im Auftrag des Umweltbundesamtes
Förderkennzeichen 297 24 508
Februar 2001

unter Berücksichtigung

- **der aktuellen Bodenbearbeitung,**
- **des Zustandes der Vegetationsdecke**
- **und möglicher Klimaänderungen**

**Potsdam-Institut
für Klimafolgenforschung e.V.**

Projektleitung

Prof. Dr. Axel Bronstert

Projektbearbeitung

Dipl.-Geoökol. Uta Fritsch

Dipl.-Hydrol. Daniel Katzenmaier

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt das Endergebnis des zu Ende April 1999 verfassten Zwischenberichts dar. Wie schon damals angekündigt, hat sich die Grundstruktur des Aufbaus nur unwesentlich geändert. *Kap. 6* stellt mit seiner Synthese der Einzelresultate aus der Generierung von Landnutzungsszenarien und den hydrologischen Simulationen das Kernstück der Projektbearbeitung dar. Dies war möglich als Konsequenz aus sowohl einer sehr effektiven und harmonischen Zusammenarbeit als auch einer fachlichen und moralischen gegenseitigen Unterstützung. Wir hoffen, mit diesem Bericht einen Beitrag für einen differenzierteren Umgang mit dem Reizthema Hochwasser, deren Ursachen und möglicher Vermeidung zu leisten.

Danken möchten wir Herrn Dr. Morgenschweis und Herrn zur Strassen vom Ruhrverband in Essen, die uns Daten für das Einzugsgebiet der oberen Lenne zur Verfügung gestellt und hilfreiche Anregungen gegeben haben.

Herrn Dr. Göppert vom Ingenieurbüro Wald + Corbe in Hügelsheim, der uns seine Ergebnisse ei-

ner Flussgebietsuntersuchung zur Hochwasserproblematik im Leingebiet zur Verfügung gestellt hat und stets offen für Fragen war.

Frau Biehl vom Tiefbauamt Heilbronn, die uns die Verwendung hochaufgelöster Daten eines kommunalen Niederschlagsmessnetzes im Leingebiet ermöglicht hat.

Herrn Kerndlmaier vom Verband Region Stuttgart für die Bereitstellung von Planungsunterlagen für die Region Stuttgart.

Der Landesanstalt für Umweltschutz in Karlsruhe, die uns Abfluss- und Niederschlagsdaten für die Einzugsgebiete von Lein und Körsch zur Verfügung gestellt hat.

Dem Regionalverband Franken für Regionalplanungsunterlagen für den Heilbronner Raum.

Herrn Dr. Gerd Bürger vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung für die Erstellung der Klimaszenarien.

Besonderen Dank schulden wir Frau Bismuth, die für uns die Zusammenfassung in die französische Sprache übersetzt hat.

Uta Fritsch und Daniel Katzenmaier

Potsdam, im Februar 2001

Inhalt

Abbildungen	XI
Tabellen	XIV
Karten	XVI
Zusammenfassung	XVII
Summary	XXI
Résumé	XXV
Einleitung	
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Vorgehensweise	2
Grundlagen	
2.1 Hochwasserentstehung	5
2.1.1 Übersicht über die Einflussfaktoren	5
2.1.2 Bedeutung hydrologischer Zeit- und Längenmaßstäbe.	8
2.1.3 Raum-, Zeit- und Größenmaßstäbe von Niederschlägen	10
2.1.4 Raum-, Zeit- und Größenmaßstäbe der Abflussprozesse	10
2.1.4.1 Vertikale Wasserbewegung in der Bodenzone.	11
2.1.4.2 Laterale Abflussbildungsprozesse am Hang	12
2.1.4.3 Abflussprozesse auf Einzugsgebietsebene	15
2.1.5 Speichermechanismen der Landschaft	16
2.1.5.1 Vegetation	19
2.1.5.2 Boden.	20
2.1.5.3 Geologie.	21
2.1.5.4 Topographie.	22

2.2 Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung	22
2.2.1 Landnutzung als Teil des ökologischen Systems Landschaft	22
2.2.2 Versiegelung der Bodenoberfläche	24
2.2.2.1 Wirkungsmechanismen	24
2.2.2.2 Parameterisierung	25
2.2.3 Ackerland	26
2.2.3.1 Wirkungsmechanismen und Parameterisierung in der lokalen Skala	26
2.2.3.2 Einflüsse in der Hangskala	37
2.2.4 Grünland	39
2.2.5 Sonderkulturen, Kleingärten und Büsche	40
2.2.6 Wald	41
2.2.6.1 Wirkungsmechanismen	41
2.2.6.2 Parameterisierung	42
2.2.6.3 Neuartige Waldschäden	44
2.3 Einfluss von Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung	44
2.3.1 Grundlagen	44
2.3.1.1 Der Treibhauseffekt	44
2.3.1.2 Klimaänderungen	45
2.3.1.3 Klimamodelle	45
2.3.1.4 Emissionsszenarien des IPCC	45
2.3.1.5 Mögliche Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten	46
2.3.2 Abschätzung der hydrologischen Folgen von Klimaänderungen	47
2.3.2.1 Paläoklimatische Untersuchungen	47
2.3.2.2 Historische Untersuchungen	47
2.3.2.3 Klimaänderungsszenarien	47
2.3.2.4 Nutzung der Aussagen Globaler Zirkulationsmodelle	48
2.3.2.5 Downscaling der Aussagen Globaler Zirkulationsmodelle	48
2.3.3 Mögliche Folgen von Klimaänderungen für die Abflussentstehung	51
2.3.3.1 Einfluss auf die Hochwasserentstehung	51
2.3.3.2 Studien zum Einfluss auf die Abflussentstehung	52
2.3.3.3 Zusammenfassung der Hauptaussagen der vorgestellten Studien	55
2.3.4 Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landnutzung	55
2.3.4.1 Auswirkungen des Anstiegs der CO ₂ -Konzentration auf Pflanzen	55
2.3.4.2 Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landschaft	57
2.4 Landnutzungsszenarien	57
2.4.1 Trends in der Landnutzung	57
2.4.1.1 Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsfläche	58
2.4.1.2 Landwirtschaftlich genutzte Fläche	58
2.4.1.3 Wald und naturnahe Landschaften	61
2.4.2 Landnutzungsänderungen	62
2.4.3 Landnutzungsszenarien	64
2.5 Hydrologische Modellierung	66
2.5.1 Allgemeine Auswahlkriterien für hydrologische Modelle	66
2.5.2 Bedeutung des Zeit- und Längenmaßstabes für die Modellierung	66
2.5.3 Anforderungen an die Simulation von Landnutzungsänderungen	67
2.5.4 Modelle zur Simulation des Einflusses von Landnutzungsänderungen	68
2.5.4.1 Konzeptionelle Modelle	68
2.5.4.2 Physikalisch begründete Modelle	69

2.5.5	Bewertung von Modellergebnissen	71
2.5.5.1	Validierung an gemessenen Hochwasserganglinien	71
2.5.5.2	Validierung an zusätzlichen Informationsquellen	71

Die Untersuchungsgebiete

3.1	Überblick über die drei ausgewählten Einzugsgebiete	73
3.2	Lein	80
3.2.1	Klimatische Verhältnisse	80
3.2.2	Geologie und Böden	80
3.2.3	Gewässer und Grundwasser	81
3.2.4	Vegetation und Landnutzung	81
3.2.5	Bevölkerung und Wirtschaft	82
3.2.6	Hochwasserereignisse	82
3.2.7	Datenlage	83
3.2.7.1	Räumliche Daten	83
3.2.7.2	Meteorologische und hydrologische Daten	84
3.3	Körsch	84
3.3.1	Klimatische Verhältnisse	84
3.3.2	Geologie und Böden	85
3.3.3	Gewässer und Grundwasser	85
3.3.4	Vegetation und Landnutzung	85
3.3.5	Bevölkerung und Wirtschaft	86
3.3.6	Hochwasserereignisse	87
3.3.7	Datenlage	88
3.3.7.1	Räumliche Daten	88
3.3.7.2	Meteorologische und hydrologische Daten	88
3.4	Lenne	88
3.4.1	Klimatische Verhältnisse	88
3.4.2	Geologie und Böden	89
3.4.3	Gewässer und Grundwasser	89
3.4.4	Vegetation und Landnutzung	90
3.4.5	Bevölkerung und Wirtschaft	91
3.4.6	Hochwasserereignisse	91
3.4.7	Datenlage	92
3.4.7.1	Räumliche Daten	92
3.4.7.2	Meteorologische und hydrologische Daten	92

Landnutzungsmodell

4.1	Modellkonzept	93
4.1.1	Bewertung nach Standortfaktoren	93
4.1.2	Nachbarschaftsbeziehungen	94
4.2	Die Module	94
4.2.1	Das Stadterweiterungsmodul	94
4.2.2	Das Ackermodule	96
4.2.3	Das Waldmodul	98
4.2.3.1	Aufforstung	98
4.2.3.2	Windwurf	99
4.2.4	Konkurrierende Berücksichtigung	100

4.3 Landbedeckungsvariationen	100
4.3.1 Berücksichtigung jahreszeitlich bedingter Entwicklungsstadien	100
4.3.2 Modifikationen in der Bewirtschaftung	101

Hydrologisches Modell

5.1 Modellkonzept	103
5.2 Datengrundlage	104
5.2.1 Räumliche Daten	104
5.2.2 Meteorologische und hydrologische Daten	105
5.3 Teilmodelle	105
5.3.1 Interpolation und Korrektur der meteorologischen Daten	105
5.3.2 Interzeption	105
5.3.3 Evapotranspiration	107
5.3.4 Schneemodell	109
5.3.5 Bodenmodell	109
5.3.5.1 Version mit Topmodel-Ansatz	109
5.3.5.2 Version mit Richards-Gleichung	111
5.3.5.3 Bodenparameter beider Versionen	112
5.3.5.4 Diskussion der beiden Versionen	113
5.3.6 Abflusskonzentration	113
5.3.7 Abflussrouting	114
5.4 Güte der Modellierung	114
5.5 Erweiterungen des Modells	115
5.5.1 Makroporenfluss	115
5.5.2 Verschlämmung	116
5.5.3 Versiegelung	118
5.5.4 Dezentraler Rückhalt	120
5.5.5 Grundwasserentzug	120
5.5.6 Übersicht über das erweiterte Bodenmodell	121
5.5.6.1 Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells	121
5.5.6.2 Parameterisierung der Modellerweiterungen	121
5.5.7 Sensitivitätsanalyse für das erweiterte Bodenmodell	124
5.5.7.1 Sensitivität der Makroporenparameter	125
5.5.7.2 Sensitivität der Verschlämmungsparameter	126
5.5.7.3 Sensitivität der Versiegelungsparameter	127
5.5.7.4 Sensitivität des dezentralen Rückhaltes	129
5.5.7.5 Übersicht über die Sensitivität der neuen Modellparameter	130

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

6.1 Hydrologische Modellierung des Ist-Zustandes	133
6.1.1 Lein	133
6.1.1.1 Vorgehensweise	133
6.1.1.2 Simulationsergebnisse	134
6.1.2 Körsch	136
6.1.2.1 Vorgehensweise	136
6.1.2.2 Simulationsergebnisse	136

6.1.3	Lenne	138
6.1.3.1	Vorgehensweise	138
6.1.3.2	Simulationsergebnisse	138
6.2	Exemplarische Sensitivitätsszenarien	140
6.2.1	Szenarien für das Leingebiet	140
6.2.2	Auswirkungen auf das Leingebiet	142
6.2.2.1	Ausdehnung der Siedlungsflächen	142
6.2.2.2	Lage der Siedlungsflächen	144
6.3	Historische Landnutzung	145
6.3.1	Lein	145
6.3.1.1	Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung	145
6.3.1.2	Hydrologische Simulation	146
6.3.2	Körsch	147
6.3.2.1	Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung	147
6.3.2.2	Hydrologische Simulation	148
6.3.3	Lenne	148
6.3.3.1	Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung	148
6.3.3.2	Hydrologische Simulation	149
6.4	Verstädterung	150
6.4.1	Lein	150
6.4.1.1	Landnutzungstrends	150
6.4.1.2	Szenarien	150
6.4.1.3	Hydrologische Auswirkungen	151
6.4.2	Körsch	153
6.4.2.1	Landnutzungstrends	153
6.4.2.2	Szenarien	154
6.4.2.3	Hydrologische Auswirkungen	155
6.4.3	Lenne	156
6.4.3.1	Landnutzungstrends	156
6.4.3.2	Szenarien	157
6.4.3.3	Hydrologische Auswirkungen	158
6.5	Flächenstilllegung	159
6.5.1	Lein	159
6.5.1.1	Kalibrierung des Stilllegungsmoduls an der Lein	159
6.5.1.2	Szenario	161
6.5.1.3	Hydrologische Auswirkungen	162
6.5.2	Körsch	163
6.5.2.1	Szenario	163
6.5.2.2	Hydrologische Auswirkungen	164
6.6	Aufforstung	165
6.6.1	Szenario für das Körschgebiet	165
6.6.2	Hydrologische Auswirkungen	166
6.7	Sturmschäden	167
6.7.1	Szenario für das Lennegebiet	167
6.7.2	Hydrologische Auswirkungen	168
6.8	Mulchsaatszenario	169
6.8.1	Verteilung der Ackerfrüchte im Leingebiet	169
6.8.2	Szenario für das Leingebiet	170
6.8.3	Hydrologische Auswirkungen	171

6.9 Niederschlagsversickerung in Siedlungsgebieten	172
6.9.1 Szenario für das Leingebiet	172
6.9.2 Hydrologische Auswirkungen	174

Auswirkungen von Klimaänderungen

7.1 Erstellung der Klimaszenarien	179
7.1.1 Szenariotechnik	179
7.1.1.1 Statistical downscaling	179
7.1.1.2 Expanded downscaling	180
7.1.2 Szenarien	181
7.2 Hydrologische Modellierung der Auswirkungen	183
7.2.1 Lein	183
7.2.2 Körsch	184
7.2.3 Lenne	184

Diskussion und Ausblick

8.1 Diskussion der Ergebnisse	187
8.1.1 Landnutzungsszenarien	187
8.1.2 Hydrologische Modellierung von Landnutzungsänderungen	188
8.1.3 Hydrologische Modellierung von Klimaänderungen	190
8.2 Ausblick	190
8.2.1 Landnutzungsszenarien	190
8.2.2 Abflussbildung und deren Modellierung	191
8.2.3 Landschafts- und Gewässerschutz	191
8.2.4 Auswirkungen von Landnutzungsänderungen	192
8.2.5 Auswirkungen von Klimaänderungen	192

Literatur	195
------------------	------------

Anhang	213
---------------	------------

A Datengrundlage	213
A.1 Quellen der räumliche Daten	213
A.2 Definition der CORINE-Landnutzungsklassen	214
A.3 Meteorologische und hydrologische Zeitreihen	216
B Liste der im Projekt entstandenen Veröffentlichungen	219

Abbildungen

Abb. 1.1	Herangehensweise an die Fragestellung	3
Abb. 2.1	Schematische Übersicht über die wichtigsten Steuergrößen einer Hochwasserganglinie	6
Abb. 2.2	Charakteristische Raum- und Zeitskalen einiger hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung	9
Abb. 2.3	Zur Abflussbildung bei Hochwasser beitragende schnelle Fließprozesse am Hang	13
Abb. 2.4	Wirkungsgeflecht von Speicherung, Abflussbildung und Gewässerdurchfluss	18
Abb. 2.5	Übersicht über die saisonale Entwicklung des Blattflächenindex verschiedener Ackerfrüchte im Wasserhaushaltsmodell AKWA-M	28
Abb. 2.6	Überblick der Literaturangaben der Wurzeltiefen für verschiedene Ackerfrüchte	32
Abb. 2.7	Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit von Parabraunerde (Löss)	35
Abb. 2.8	Gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f [m/s] von Tschernosem-Parabraunerde aus Löss und Braunerde aus Flugsand bei unterschiedlicher Bewirtschaftungstechnik	36
Abb. 2.9	Nettophotosynthese von gewöhnlichen C_3 - und C_4 -Pflanzen bei unterschiedlicher CO_2 -Konzentration	56
Abb. 3.1	Flächenanteile der Landnutzung des Leineinzugsgebiets	81
Abb. 3.2	Flächenanteile der Landnutzung im Körscheinzugsgebiet	86
Abb. 3.3	Flächenanteile der Landnutzung des Lenneezugsgebiets	90
Abb. 4.1	Übersicht über die Modellkonzeption	94
Abb. 4.2	Vorgehensweise für ein Verstärkungsszenario	96
Abb. 4.3	Schema der Ertragspotentialberechnung	97
Abb. 4.4	Vorgehensweise für ein Szenario zur Bestimmung von Stilllegungsflächen	98
Abb. 4.5	Vorgehen für die Erstellung von Aufforstungsszenarien	99
Abb. 4.6	Schema der Windwurfgefährdungsklassifizierung	99
Abb. 5.1	Für die hydrologische Modellierung in WaSiM-ETH notwendige räumliche Daten	104
Abb. 5.2	Speicherkonzept des Bodenmodells	110
Abb. 5.3	Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen	116
Abb. 5.4	Einfluss von Bodenbedeckung und Niederschlagsintensität auf die Ausprägung einer Verschlammungsschicht in der Verschlammungsroutine für WaSiM-ETH	118
Abb. 5.5	Modellkonzept zur expliziten Berücksichtigung versiegelter und an die Kanalisation angeschlossener Bereiche innerhalb einer Gitterzelle	119
Abb. 5.6	Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells	121
Abb. 5.7	Sensitivität des Makroporenvolumens beziehungsweise der Makroporenspeicherkonstante	126
Abb. 5.8	Sensitivität des Verschlammungsfaktors für Ackerflächen	127
Abb. 5.9	Sensitivität des Versiegelungsgrades von Siedlungs- bzw. Ackerflächen	128
Abb. 5.10	Sensitivität des Drosselabflusses aus den Mischwasserbecken in Richtung Kläranlage und der Speicherkapazität der Mischwasserbecken	128
Abb. 5.11	Sensitivität der Speicherkapazität des dezentralen Rückhalts	129
Abb. 5.12	Vergleich der Sensitivität verschiedener Speicher in Erweiterungen für das hydrologische Modell WaSiM-ETH	130

Abb. 6.1	Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Lein-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf fünf konvektive und sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren . . .	135
Abb. 6.2	Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Lein am Beispiel (a) eines konvektiven und (b) eines advektiven Niederschlagsereignisses.	135
Abb. 6.3	Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Körsch-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf fünf konvektive und sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen einem und vier Jahren	137
Abb. 6.4	Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Körsch am Beispiel (a) eines konvektiven und (b) eines advektiven Niederschlagsereignisses.	137
Abb. 6.5	Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Lenne-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf sieben advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren	139
Abb. 6.6	Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Lenne am Beispiel eines advektiven Niederschlagsereignisses mit einer Jährlichkeit von etwa 2 Jahren	139
Abb. 6.7	Simulation der hydrologischen Auswirkung verschiedener Besiedlungsanteile im Einzugsgebiet der Lein beispielhaft für (a) ein konvektives und (b) ein advektives Niederschlagsereignis.	142
Abb. 6.8	Simulierte Auswirkung verschiedener Besiedlungsanteile auf die Anteile der Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Lein an der Hochwasserentstehung für (a) fünf konvektive und (b) sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren	143
Abb. 6.9	Simulation der hydrologischen Auswirkung verschiedener räumlicher Verteilungen der Siedlungsflächen im Leingebiet beispielhaft für (a) ein konvektives und (b) ein advektives Niederschlagsereignis	145
Abb. 6.10	Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch mit der erweiterten Version von WASIM-ETH für den Ist-Zustand und einen historischen Zustand aus dem Jahr 1836	148
Abb. 6.11	Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und die Landnutzung im Jahr 1841.	150
Abb. 6.12	Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Verstädterungsszenario mit der Version von WASIM-ETH mit Richards-Gleichung	152
Abb. 6.13	Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und zwei Verstädterungsszenarien mit der erweiterten Version von WASIM-ETH	152
Abb. 6.14	Simulierte Änderung von Abflussmaximum und Abflussvolumen im Einzugsgebiet der Lein als Reaktion auf zwei Verstädterungsszenarien und gemittelt für (a) fünf konvektive und (b) sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren . . .	153
Abb. 6.15	Interpolierte Flächennutzungsentwicklung bis zum Jahr 2050 für das Einzugsgebiet der Körsch	154
Abb. 6.16	Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und zwei Verstädterungsszenarien mit der erweiterten Version von WASIM-ETH	156
Abb. 6.17	Interpolierte Flächennutzungsentwicklung bis zum Jahre 2050 für das Einzugsgebiet der Lenne	157
Abb. 6.18	Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Verstädterungsszenario	159

Abb. 6.19 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Szenario zur möglichen Stilllegung von Ackerfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH	163
Abb. 6.20 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und zwei Szenarien zur möglichen Stilllegung von Ackerfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH	165
Abb. 6.21 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und eine Aufforstung des Gebietes um 50 % relativ zur bestehenden Waldfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH.	167
Abb. 6.22 Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und Windwurf auf 5 % der Waldfläche	169
Abb. 6.23 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Mulchsaatszenario für die 23 % der Einzugsgebietsfläche mit Blattfruchtanbau	171
Abb. 6.24 Bausteine eines Mulden-Rigolen-Elements	174
Abb. 6.25 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und zwei Szenarien zur Niederschlagsversickerung in Siedlungsgebieten bei Anschluss von 1,3 % der Einzugsgebietsfläche	175
Abb. 6.26 Simulierte Änderung von Abflussmaximum und Abflussvolumen im Einzugsgebiet der Lein als Reaktion auf zwei Szenarien zur Niederschlagsversickerung in Siedlungsgebieten und gemittelt für (a) fünf konvektive und (b) sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren	176
Abb. 7.1 Monatlicher Niederschlag in den drei Untersuchungsgebieten für das hydrologische Jahr 1994 und eine Projektion dieses hydrologischen Jahres um etwa 100 Jahre in die Zukunft	182
Abb. 7.2 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097	183
Abb. 7.3 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097	184
Abb. 7.4 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097	185

Tabellen

Tab. 2.1	Charakteristika von Grundwasserleitern in Bezug auf deren möglichen Beitrag zur Hochwasserentstehung	21
Tab. 2.2	Vegetationsbedeckung städtischer Ökosysteme	25
Tab. 2.3	Interzeptionsspeicherkapazität verschiedener land- und forstwirtschaftlicher Bestände	27
Tab. 2.4	Übersicht verschiedener Blattflächenindizes für die wichtigsten Ackerfrüchte	28
Tab. 2.5	Untersuchung des unterschiedlichen Düngeeinflusses auf die Pflanzenentwicklung	29
Tab. 2.6	Mit dem Verdunstungsmodell TRAIN für eine Höhe von 400 m ü. NN berechnete Blattflächenindizes für Landwirtschaft und Alm	30
Tab. 2.7	Vegetationsbedeckungsgrad verschiedener Anbaufrüchte	30
Tab. 2.8	Porenvolumen und Volumen der Porengrößenbereiche in mm	34
Tab. 2.9	Durchmesser und Anzahl von Makroporen sowie daraus abgeschätzte Makroporosität	34
Tab. 2.10	Sichtbare Bioporen (Durchmesser > 1mm) in einer Tschernosem-Parabraunerde aus Löss bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung	36
Tab. 2.11	Literaturwerte des Blattflächenindex (LAI) für Grünland	39
Tab. 2.12	Maximale Wurzeltiefe von Wiesen	40
Tab. 2.13	Literaturwerte des Blattflächenindex (LAI) für Büsche, Obst und Gartenbau	41
Tab. 2.14	Literaturwerte des Blattflächenindex (LAI) für Laubwald	42
Tab. 2.15	Literaturwerte des Blattflächenindex (LAI) für Mischwald	43
Tab. 2.16	Literaturwerte des Blattflächenindex (LAI) für Nadelwald	43
Tab. 2.17	Überblick über die maximalen Wurzeltiefen	43
Tab. 2.18	Klassifikation der Großwetterlagen	50
Tab. 2.19	Änderungen der Klimavariablen Temperatur (T) und Niederschlag (P) sowie des Abflusses (R) bei Verdopplung der CO ₂ -Konzentration	54
Tab. 2.20	Von den GCMs (a) UKHI und (b) xccc ermittelte Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Einzugsgebiet des Rheins für das Jahr 2050	54
Tab. 2.21	Prozessnahe Gleichungen für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf verschiedenen Maßstabsebenen bzw. Fehlen entsprechender Gleichungen auf größerer Maßstabsebene	67
Tab. 3.1	Am Pegel Frankenbach/Lein im Zeitraum von 1980 bis 1997 gemessene Hochwasserscheitel	83
Tab. 3.2	Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Frankenbach/Lein für den Zeitraum von 1968 bis 1998	83
Tab. 3.3	Am Pegel Denkendorf/Körsch gemessene Hochwasserscheitel im Zeitraum von 1983 bis 1997	87
Tab. 3.4	Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Denkendorf/Körsch für den Zeitraum von 1941 bis 1997	88
Tab. 3.5	Am Pegel Bamenohl/Lenne gemessene Hochwasserscheitel im Zeitraum von 1981 bis 1997	91
Tab. 3.6	Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Bamenohl/Lenne	92

Tab. 5.1	Landnutzungsabhängige Parameter zur Berechnung der Interzeption im hydrologischen Modell WaSiM-ETH am Beispiel der Parameterisierung für das Leingebiet.	106
Tab. 5.2	Landnutzungsabhängige Parameter zur Berechnung der Verdunstung im hydrologischen Modell WaSiM-ETH am Beispiel der Parameterisierung für das Leingebiet.	108
Tab. 5.3	Ausgewählte Bodenparameter des Bodenmoduls im hydrologischen Modell WaSiM-ETH .	112
Tab. 5.4	Übersicht über die Parameter der Modellerweiterungen.	122
Tab. 5.5	Landnutzungsabhängige Parameter der Modellerweiterungen am Beispiel der Parameterisierung für das Einzugsgebiet der Lein	122
Tab. 5.6	Übersicht über die Sensitivität der neuen Modellparameter bei unterschiedlichen klimatologischen Randbedingungen	131
Tab. 6.1	Güte der hydrologischen Simulationen für das Leingebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency.	134
Tab. 6.2	Güte der hydrologischen Simulationen für das Körschgebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency.	136
Tab. 6.3	Güte der hydrologischen Simulationen für das Lennegebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency.	138
Tab. 6.4	Erhöhung von Hochwasservolumen und Abflussmaximum für die sechs ausgewählten advektiven Ereignisse bei Zunahme der Siedlungsfläche auf 25 % der Einzugsgebietsfläche und deren Zusammenhang zu Basisabflussanteil, Dauer und Wiederkehrintervall	144
Tab. 6.5	Übersicht über das Eintrittsjahr der Szenarienannahmen für Verstädterung	155
Tab. 6.6	Überblick über das Eintrittsjahr der Szenarienannahmen für Verstädterung	157
Tab. 6.7	Verminderung von Hochwasservolumen und Abflussmaximum für sechs advektive Ereignisse bei einer Anwendung von Versickerungsmaßnahmen auf 54 % der versiegelten Fläche und deren Zusammenhang zu Basisabflussanteil, Dauer und Wiederkehrintervall . .	176
Tab. 7.1	Gebietsniederschlag im hydrologischen Jahr 1994 und für das Klimaszenario 1994*.	181
Tab. A.1	Digitale räumliche Gebietsinformation für die Untersuchungsgebiete.	209
Tab. A.1	Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Lein.	212
Tab. A.2	Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Körsch	213
Tab. A.3	Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Lenne	214

Karten

Karte 3.1	Lage der drei Untersuchungsgebiete im Einzugsgebiet des Rheins	74
Karte 3.2	Topographie der drei Untersuchungsgebiete	75
Karte 3.3	Landnutzung in den drei Untersuchungsgebieten	76
Karte 3.4	Vorherrschende Bodentypen in den drei Untersuchungsgebieten	77
Karte 3.5	Messnetz in den drei Untersuchungsgebieten	78
Karte 3.6	Ortsübersicht der drei Untersuchungsgebiete	79
Karte 5.1	Verteilung des topographischen Index am Beispiel des Einzugsgebietes der Lein.	111
Karte 6.1	Sensitivitätsszenarien für die Bewertung des Siedlungseinflusses für das Einzugsgebiet der Lein	141
Karte 6.2	Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Lein . . .	146
Karte 6.3	Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Körsch .	147
Karte 6.4	Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Lenne .	149
Karte 6.5	Verstädterungsszenario mit 50 % Zunahme an Siedlungsfläche	151
Karte 6.6	Verstädterungsszenario für die Körsch mit einer Siedlungszunahme von 50 % und einer Industriegebietserweiterung um 100 %	155
Karte 6.7	Verstädterungsszenario für die Lenne mit einer Siedlungszunahme von 50 %	158
Karte 6.8	Vergleich der Ertragspotentialbewertung durch SWIM und LUCK.	160
Karte 6.9	Bewertung der Ackerflächen durch LUCK unter Berücksichtigung aller Kriterien.	161
Karte 6.10	Mögliche Auswirkungen der Agenda 2000 auf das Einzugsgebiet der Lein.	162
Karte 6.11	Mögliche Auswirkungen der Agenda 2000 im Körsch-Einzugsgebiet.	164
Karte 6.12	Waldmehrunngsszenario um 50 % im Einzugsgebiet der Körsch	166
Karte 6.13	Windwurfsszenario auf 5 % der Waldfläche	168
Karte 6.14	Räumliche Verteilung der Ackerfrüchte an der Lein.	170
Karte 6.15	Versickerungspotential im Einzugsgebiet der Lein bei Ausschluss der 25 % der Siedlungsflächen mit den höchsten Werten für den topographischen Index als Kriterium für potentiell geringe Grundwasserflurabstände	173

Zusammenfassung

Das gehäufte Auftreten von großen Hochwasserereignissen seit 1990 hat verstärkt die Frage nach der anthropogenen Verantwortung dafür aufgeworfen. Sowohl die Landoberfläche als auch die Flusssysteme weiter Teile Mitteleuropas haben in der Vergangenheit bedeutende Eingriffe erfahren, die zweifellos zu einer veränderten Hochwassersituation in dieser Region geführt haben. Aufgrund der Vielfalt der beteiligten Prozesse und Faktoren gibt es allerdings bislang nur Schätzungen zu den Auswirkungen solcher Veränderungen auf Hochwasser. Besonders die Quantifizierung der Abflussentstehung im Einzugsgebiet, abhängig von der Zusammensetzung und Dichte der Vegetationsdecke sowie dem Zustand der Bodenoberfläche, ist noch immer mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die Relevanz der anthropogenen Nutzung für die Hochwasserentstehung wird anhand von drei charakteristischen Einzugsgebietstypen mit dominierend urbaner, landwirtschaftlicher beziehungsweise forstwirtschaftlicher Landnutzung untersucht. Außerdem werden mit Hilfe von Klimaszenarien, die den Zustand der 2080er Jahre beschreiben, die potenziellen Konsequenzen von Klimaänderungen für die Hochwasserentstehung analysiert.

Hauptziel der vorliegenden Untersuchung ist es, anhand von verschiedenen Einzugsgebieten exemplarisch den Einfluss der Landnutzung auf die Abflussbildung bei Hochwasser darzustellen. Hierfür wurden drei mesoskalige Einzugsgebiete im deutschen Teil des Rhein-Einzugsgebietes ausgesucht, deren Größe (zwischen 100 und 500 km²) durch die Unterdrückung lokaler Effekte Verallgemeinerungen zulässt, aber trotzdem noch eine eindeutige Zuordnung von Ursache und Wirkung ermöglicht. Un-

ter diesen Gesichtspunkten wurden die Einzugsgebiete folgender Flüsse ausgewählt: *Lein* als Repräsentant einer landwirtschaftlichen Nutzung, *Körsch* als typisch urbanes Gebiet und obere *Lenne*, deren überwiegend bewaldetes Einzugsgebiet als naturnah gilt.

Untersuchungsgebiete

Das überwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der *Lein* liegt südwestlich von Heilbronn und nimmt eine Fläche von 115 km² ein. Es ist sanft gewellt und fällt von Südwesten nach Nordosten flach ab.

Das urban geprägte Einzugsgebiet der *Körsch* befindet sich im Süden von Stuttgart. Es hat eine Fläche von 127 km², die sanft von Westen nach Osten hin abfällt. Der Flusslauf der Körsch hat sich im Laufe der Zeit tief in die sonst flache Hochebene eingeschnitten.

Die vorwiegend forstwirtschaftlich genutzte *Lenne* ist ein Zufluss der Ruhr und entspringt im Rothaargebirge. Das ausgewählte Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den Oberlauf bis zum Pegel Bamenohl. Dieses Gebiet ist 455 km² groß und stark reliefiert.

Landnutzungsmodell

Zu Projektbeginn existierte kein zugängliches und zufriedenstellendes Modell für die Generierung von Landnutzungsszenarien. Deshalb wird diese Aufgabe für die vorliegende Untersuchung durch die Erstellung eines eigenen Verfahrens bearbeitet. Ziel bei der Erstellung von Landnutzungsszenarien ist dabei nicht nur die Berücksichtigung eines Zielwerts in Form von veränderten prozentualen Flä-

chennutzungsverhältnissen, sondern auch die Einbeziehung von Lage und Topologie (Beziehung der Flächen zueinander) der verschiedenen Nutzungen. Diese lagegetreue Spezifizierung der Flächen ist zur Beurteilung der hydrologischen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen von besonderer Wichtigkeit. Die prozentuale Bestimmung der Änderungen (Szenarioziel) ist in der entwickelten Methode nicht enthalten. Sie wird aus externen Prognosen entnommen. Kernstück der Szenariotechnik stellt vielmehr die Disaggregation der Landnutzungsänderungen auf die Fläche dar.

Das für das Projekt entwickelte, rasterbasierte Verfahren zur Szenarioerstellung LUCK (Land Use Change scenario Kit) berücksichtigt sowohl Standortfaktoren als auch die Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Flächen als Kriterien für eine Nutzungskonversion. Dabei werden auch typische Nutzungsmuster und die Wirkung von Entwicklungsachsen in der Landschaft (z.B. Straßen, Bahnlinien) in Betracht gezogen. Das daraus resultierende *Veränderungspotenzial* für jede Rasterzelle ist die Basis für die darauffolgende iterativ angelegte Landnutzungsänderungsmethode. Deren Ergebnisse dienen direkt als Inputdaten für die hydrologische Modellierung.

Hydrologische Modellierung

Für die hydrologische Modellierung von Landnutzungs- und Klimaänderungen wurde in der vorliegenden Studie das deterministische und flächendifferenzierte Modell WASIM-ETH ausgewählt, welches eine ausgewogene Mischung aus physikalisch begründeten und konzeptionellen Ansätzen darstellt. WASIM-ETH wurde ursprünglich dafür konzipiert, den Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten zu simulieren, weswegen große Sorgfalt auf die Interpolation der meteorologischen Eingangsgrößen sowie die Modellierung der Verdunstung verwendet wurde. Um den Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung noch besser als bisher berücksichtigen zu können, wurde das Bodenmodell im Rahmen dieses Projektes um verschiedene Aspekte wie die explizite Berücksichtigung von Makroporenfluss, Verschlammung, Versiegelung mit Anschluss an eine Kanalisation und von dezentralen Rückhalten ergänzt.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

Für die Untersuchungsgebiete wurden Szenarien erstellt, welche die Veränderung aller drei Hauptlandnutzungskategorien – versiegelte, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen – abdecken.

Für alle drei Gebiete wurden Verstädterungsszenarien berechnet. Neben einer zukünftigen Versiegelungszunahme wurde anhand von historischen Karten aber auch das Ausmaß der Versiegelung in der Mitte des 19. Jahrhunderts berücksichtigt. Der historische Zustand diente außerdem zur Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung. Dabei wurde verglichen, wie gut das Landnutzungsmodell die Entwicklung vom historischen Zustand bis zur heutigen Situation nachzeichnet.

Der Einfluss einer veränderten landwirtschaftlichen Nutzung bzw. Bodenbearbeitung wurde anhand von Flächenstilllegung und der Umstellung auf Mulchsaat untersucht.

Veränderungen im Waldanteil wurden mittels Aufforstung von landwirtschaftlichen Grenzertragsstandorten und Windwurf infolge von Stürmen durchgeführt.

Exemplarische Ergebnisse der hydrologischen Modellierung für die drei Untersuchungsgebiete sind folgende:

- (1) Am Beispiel der Lein konnte gezeigt werden, welche große Bedeutung die *lagegetreue Darstellung der Landnutzung* im hydrologischen Modell insbesondere bei kleinräumig auftretenden Niederschlägen z.B. aus Gewitterzellen hat. Die Lage eines fiktiven Siedlungszentrums hatte bei der Modellierung einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Höhe der Hochwasserspitze als auch auf die Gestalt der Hochwasserganglinie.
- (2) Eine Zunahme der *Siedlungsflächen* im Einzugsgebiet der Lein um 50% hätte den Simulationen zufolge je nach Rahmenbedingungen sehr unterschiedliche Auswirkungen: selbst bei gleichem Wiederkehrintervall des Hochwassers von etwa 3 Jahren schwankt danach die Zunahme des Hochwassermaximums zwischen 0% für ein *langanhaltendes zyklonales Niederschlagsereignis* mit hoher Vorfeuchte und beinahe 30% für einen *intensiven Gewitterregen* bei geringer Vorfeuchte.

- (3) Wie das Beispiel des Lennegebietes illustriert, ist *Waldbestand* entgegen der nach wie vor weit verbreiteten Meinung kein Indiz für einen per se geringen Beitrag zur Hochwasserentstehung. Richtig ist, dass ein natürlicher Wald bessere Speichereigenschaften (Interzeption, Streuspeicher) aufweist als andere Landnutzungen und Waldböden oft gute Infiltrationseigenschaften besitzen. Da aber Wälder in Mittelgebirgen häufig auf geringmächtigen Böden stocken, sind Waldflächen insbesondere in Kombination mit geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert für *rasche unterirdische Abflussbildung*.
- (4) Die Anwendung eines *Mulchsaatszenarios* für die Lein hat ergeben, dass die *Unsicherheit der Modellierung von Makroporendynamik* während konvektiver Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten weit größer ist als der mutmaßliche Einfluss des Mulchsaatverfahrens auf die Hochwasserentstehung in der *Mesoskala*. Inwiefern dies ein Artefakt des Modellansatzes ist, bedarf, soweit möglich, der experimentellen Überprüfung.
- (5) Die starke hochwasserverschärfende Wirkung von *Versiegelung* bei *kurzen und intensiven Gewitterniederschlägen kleiner Jährlichkeit* konnte beispielsweise für das Einzugsgebiet der Körsch demonstriert werden. Dort wäre den Simulationen zufolge das Abflussmaximum eines im Jahr 1992 aufgetretenen konvektiven Ereignisses im Siedlungszustand des Jahres 1836 (1,3% Siedlungsfläche) nur rund ein Sechstel so groß gewesen wie im Ist-Zustand (25% Siedlungsfläche).
- (6) Prinzipiell unterliegen gezielt eingesetzte *Versickerungsmaßnahmen für versiegelte Flächen in Siedlungsgebieten* denselben Einschränkungen, wie sie für die Auswirkungen des Einflusses der Versiegelung selbst formuliert worden sind. Dies haben Simulationen für das Leingebiet gezeigt. Der Nutzen von Versickerungsmaßnahmen ist dementsprechend groß während intensiver konvektiver Niederschläge mit geringer Vorfeuchte, deutlich kleiner aber hingegen für langanhaltende advektive Niederschläge mit hoher Vorfeuchte, da dann die Aufnahmefähigkeit sowohl des natürlichen Bodens als auch der Versickerungsanlage zurückgeht.

Die anhand der hydrologischen Modellierung gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch nicht auf die Einzugsgebiete von Lein, Körsch und Lenne beschränkt, sondern lassen auch die Ableitung allgemein gültiger kausaler Zusammenhänge zu:

- (1) Bedeutung der *Niederschlagscharakteristika*:
 - (a) *Niederschlagsintensität*
Der Einfluss der Landoberfläche ist für *konvektive* Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten größer als für *advektive* Niederschlagsereignisse mit meist deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten.
 - (b) *Niederschlagsvolumen*
Je größer das Niederschlagsvolumen, desto geringer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (2) Bedeutung der *Anfangsbedingungen*:
Je trockener das Gebiet zu Beginn des Ereignisses, desto größer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (3) Bedeutung der *Infiltrationsbedingungen*:
Liegt die Infiltrationskapazität in derselben Größenordnung wie die Niederschlagsintensität, dann ist der Einfluss von Änderungen der Landoberfläche für die Hochwasserentstehung am größten.
- (4) Bedeutung der *Geomorphologie*:
Stellt die Durchlässigkeit der Bodenoberfläche keine Begrenzung für die Infiltration dar, so ist der *Gesteinsuntergrund* der entscheidende Faktor für die Hochwasserentstehung. Die Landnutzung übt dann nur einen sehr geringen Einfluss auf die Abflussbildung aus.
- (5) Bedeutung der *Ereignisgröße*:
Die Höhe des Abflussmaximums oder dessen *Jährlichkeit* als Maß für die Größe eines Hochwasserereignisses ist ein nur bedingt tauglicher Indikator für die Stärke des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung. Die *Jährlichkeit* sagt weder etwas über die meteorologischen Randbedingungen eines Hochwassers aus noch über die räumliche Verteilung der Hochwasserentstehung im Gebiet.
- (6) Bedeutung der *räumlichen und zeitlichen Skala*:
In Gebieten von bis zu mehreren hundert Quadratkilometern können sowohl konvektive als auch advektive Niederschlagsereignisse zu Hochwassern führen.

In den großen Flussgebieten Mitteleuropas entstehen Hochwasser hingegen vor allem als Folge großräumiger und langanhaltender zyklonaler Regenfälle – unter Umständen in Kombination mit Schneeschmelze. Für diese Art von Ereignissen ist der Einfluss der Landoberfläche geringer als für konvektive Starkniederschläge. Konvektive Niederschlagsereignisse sind in großen Gebieten aufgrund deren lokalen Charakters von untergeordneter Bedeutung.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

Die hydrologischen Modellierungsergebnisse zeigen, dass pauschale Aussagen zum Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung aufgrund der entscheidenden Bedeutung der *Randbedingungen* unzulässig sind. Zu diesen Randbedingungen zählen in erster Linie Gebiets- und Ereigniseigenschaften, die Witterung vor dem Ereignis sowie der räumliche und zeitliche Maßstab, über den Aussagen getroffen werden. Dies wurde in der vorliegenden Studie konsequent berücksichtigt, in der Vergangenheit aber häufig vernachlässigt.

Allgemein gilt aber, dass die Landnutzung einen deutlichen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben kann. Dies gilt am meisten für *versiegelte Flächen*, die insbesondere bei intensiven Gewitterregen in der Regel eine starke *Abflussverschärfung* bewirken. Bei langanhaltenden advektiven Niederschlägen ist deren negativer Einfluss in der Regel zwar geringer, kann aber dennoch abhängig von den Randbedingungen auch für den Hochwasserverlauf in großen Flussgebieten relevant sein und sollte daher nicht vernachlässigt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung fließen in das Projekt LAHOR ein, das sich mit dem Einfluss der Landoberfläche und von Ausbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet beschäftigt. LAHOR ist Bestandteil der INTERREG Rhein-Maas-Aktivitäten (IRMA) der Europäischen Union.

Auswirkungen von Klimaänderungen

Die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung werden anhand eines

Verfahrens (*expanded downscaling*) untersucht welches erlaubt, das Klimasignal eines in der Vergangenheit aufgetretenen hydrologischen Jahres durch ein zukünftiges Klimasignal zu ersetzen, ohne dessen Witterungsverlauf zu ändern. Mit Hilfe dieses Kunstgriffs ist es möglich, das hydrologische Jahr 1994 direkt einem hydrologischen Jahr 1994* gegenüberzustellen, dem das Klima des Zeitraums von 2070 bis 2097 aufgeprägt wird, wie es von einem Globalen Zirkulationsmodell simuliert wurde.

Für alle drei Gebiete ergibt sich im Szenario-Zustand für das letzte Drittel des 21. Jahrhunderts neben einer Erwärmung eine deutliche *Verschiebung des Niederschlagsregimes* sowie ein ungefähr 20prozentiger *Rückgang des Jahresniederschlags* für die betrachteten Ausschnitte des Rheingebietes. Der Rückgang des Jahresniederschlags ist in erster Linie die Folge einer drastischen Abnahme der Niederschläge in den Sommermonaten. Die Verschiebung im Niederschlagsregime setzt sich zusammen aus einer tendenziellen Abnahme der Niederschläge insbesondere im November und Dezember sowie einer Zunahme vor allem in den Monaten März und April. Entsprechend wird in Zukunft mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit für Weihnachtshochwasser und einem gesteigerten Auftreten von Frühjahrshochwassern zu rechnen sein. Außerdem weisen die Klimaszenarien auf eine zunehmende Variabilität im Bereich von Starkniederschlägen und damit auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Niederschläge hin.

Zusätzlich zu den *lokalen* Folgen einer zukünftig vermehrten Entstehung von *Frühjahrshochwassern* infolge *ergiebiger advektiver Niederschläge* hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Hochwassersituation im *gesamten Rhein-Einzugsgebiet*. Damit stiege die Wahrscheinlichkeit, dass derartige niederschlagsbedingte Hochwasser im deutschen Teil des Rheingebietes mit *Schneeschmelzabflüssen* aus den Alpen zusammentreffen.

Stichworte

Hochwasser, Landnutzungsänderung, Klimaänderung, Landnutzungsszenarien, Klimaszenarien, Hydrologische Modellierung, Versiegelung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft

Summary

The frequent occurrence of several extreme flood events since 1990 has brought up an ongoing debate about the human impact on this phenomenon. There is no doubt that changes of land-use as well as river training activities in great parts of Central Europe have lead to an altered flood situation in this region. Due to the diversity of the processes and factors involved, so far their consequences on flood generation can only be estimated. Up to what extent composition and density of the vegetation cover as well as soil surface conditions are likely to affect storm runoff generation in the catchment, is still uncertain.

The relevance of anthropogenic land-use on flood generation is investigated by means of three study areas, which represent three different characteristic land-use patterns with either dominantly urban, agricultural or forestal structure. In addition to that, climate scenarios are developed, describing the situation round the year 2080. These scenarios lead to an analysis of potential consequences of climate change on flood generation.

The main goal of this study is to scrutinize exemplarily the influence of land-use on storm runoff generation by the help of three mesoscale Rhine tributaries. Due to a suppression of local effects, their size (100 to 500 km²) allows a generalization of results and nevertheless enables definite assignments of cause and effect relationships. With respect to these aspects, the following catchments have been chosen for this study: the *Lein* catchment representing the agricultural land-use type, the *Körsch* catchment as a heavily urbanized area and the upper part of the *Lenne* river, which is mainly covered by forest.

Study areas

The catchment of the *Lein* is predominantly under agricultural land-use. It is situated southwest of Heilbronn and covers an area of about 115 km². Its terrain slopes gently from southwest towards northeast.

The urbanized catchment of the *Körsch* river is situated south of Stuttgart. Its area size amounts to 127 km², sloping from west to east. The river bed of the *Körsch* has incised into the shallow high plateau in the course of time.

The predominantly forestally used *Lenne* is a tributary to the Ruhr river and arises in the Rothaargebirge mountains. The study area is localized in the headwater area of the Ruhr up to the gauge Bamenohl. The area has a size of 455 km² and is characterized by a dynamic relief.

Land-Use-Model

At the beginning of this project, no satisfying method for the generation of spatially distributed land-use scenarios was available. Coping with this task, an own approach has been developed, that aims not only at a shift in percentages of land-use share. It also takes into account the explicit position and interaction of the areas with different land-use types. The model provides a method for a spatial transformation of overall trends concerning land-use changes into spatially distributed land-use patterns. The overall trends are obtained from external analysis. The topology of different land-use units with regard to their position within the river network and their interrelation to adjacent areas plays a major role for the evaluation of the impact of land-use changes on runoff generation.

The developed approach for scenario generation LUCK (Land-Use Change scenario Kit) considers the site characteristics of each pixel as well as its neighbourhood relationships as a criterion for land-use change. Typical land-use patterns and the influence of development axes like roads or railways are included in the analysis. These criteria form the potential of each pixel to be subject to changes. Since land-use changes happen successively, the procedure tries to imitate this by an iterative proceeding. The results are used as input data for the hydrological modelling.

Hydrological modelling

For simulating the impact of land-use and climate changes on flood runoff, the deterministic and spatially distributed hydrological model WASIM-ETH has been chosen, because of its well-balanced mixture of physically based and conceptual modelling approaches. Originally, WASIM-ETH was designed to model the influences of climatic changes on the water balance of river basins. Therefore great care was given to the interpolation of meteorological input data as well as to the modelling of evapotranspiration. In order to improve the representation of land-surface conditions on flood-runoff generation within the model, it has been extended during this project to cover relevant phenomena like macropore flow, soil siltation, decentralized retention, and surface sealing in combination with a connection to the sewer system.

Impact of land-use changes

The land-use scenarios which have been generated for the study areas, cover changes in all three main land-use categories: built-up areas, agriculturally used areas and forested areas.

For all the three study areas, urbanization scenarios have been calculated. Besides a growth of built-up areas in the future, historical conditions in the middle of the 19th century have been considered with the help of digitized historical maps. The historical conditions also serve for a validation of the scenario technique for urbanization. Thereby, starting from the historical situation, the present conditions are simulated with the land-use scenario model, and compared to the actual present situation.

The influence of an altered agricultural use or a change in management practices have been taken

into account by scenarios for the establishment of set-aside areas and mulching instead of conventional tillage.

Changes in the share of forest have been considered by means of an afforestation scenario for marginal revenue sites and a storm hazard scenario.

Exemplary results of the hydrological impact simulations for the three study areas are as follows:

- (1) For the Lein catchment, the importance of a *spatially distributed representation* of land-use within the hydrological model could be demonstrated. This is especially true for the small-scale variability of thunderstorms. The position of an imaginary settlement exerted a substantial influence on the magnitude on the flood peak as well as the shape of the flood hydrograph.
- (2) According to the simulations, a 50% increase in *settlement area* in the Lein catchment would induce very different responses, depending on the boundary conditions: even for events with the same return period of approximately 3 years, the increase in peak runoff varied between 0% for a long advective rainfall event accompanied by high antecedent soil moisture and almost 30% for a short and intensive thunderstorm with low antecedent soil moisture.
- (3) A *forest stand* is, in contrary to a still widely spread opinion, not necessarily a synonym for flood mitigation. This is illustrated by the example of the Lenne catchment. There is no doubt that normally a natural forest stand shows better storage conditions (interception, litter storage) as other land-uses and that soils under forests quite often feature good infiltration conditions. But since forests in Central Europe often grow in mountainous regions with thin soils and low-permeable bedrock, they are predestined for *sub-surface stormflow*.
- (4) The application of a *mulching technique scenario* for the Lein has shown that the *uncertainty* inherent in the modelling of *macropore dynamics* during convective events is higher than the presumable influence of mulching on flood generation at the *mesoscale*. There is a need for experimental verification whether this is reality or simply an artefactum of the model approach.

- (5) The strongly flood-aggravating effect of *sealing* for *short and intensive thunderstorms with a small return period* was demonstrated exemplarily for the Körsch catchment. According to the simulations for the settlement situation in 1836 (1,3% of settlement area), the runoff maximum of a convective event in the year 1992 would have been six times smaller than for the present situation (25% of settlement area).
- (6) In principle, the effect of selective *infiltration measures conducted for sealed parts of settlement areas* are subject to the same limitations as stated for the influence of built-up areas themselves. This is shown by simulation results for the Lein catchment. Their benefit is consequently high for intensive convective precipitation with low antecedent soil moisture, and significantly smaller for long-lasting advective precipitation with high preceding soil moisture, because the storage capacity of both the natural soil and the infiltration measures are depleted.

The results of the hydrological simulations are not restricted to the three catchments of Lein, Körsch and Lenne, but also allow the derivation of generally valid causal coherences:

- (1) Relevance of *precipitation characteristics*:
- (a) *Precipitation intensity*
The influence of land-cover is stronger for convective events with high rainfall intensities than for advective events with mostly much lower precipitation intensities.
- (b) *Precipitation volume*
The bigger the precipitation volume, the minor is the influence of land-cover on storm runoff generation.
- (2) Relevance of the *initial boundary conditions*:
The drier the catchment is at the beginning of the event, the greater is the influence of land-cover on storm runoff generation.
- (3) Relevance of the *infiltration conditions*:
If the magnitude of infiltration capacity is equivalent to the magnitude of precipitation intensity, then the influence of land-cover matters most for storm runoff generation.
- (4) Relevance of *geomorphology*:
If the permeability of the soil surface does not represent a limitation for infiltration, then the

geological properties are the crucial factor for storm runoff generation. Consequently land-cover then only exerts a marginal influence on runoff generation.

- (5) Relevance of *event-scale*:

The magnitude of the runoff maximum or its *return period* respectively are no suitable indicators for the influence of land-cover on floods. The *return period* does not tell anything about the meteorological boundary conditions of a flood nor does it provide an insight in the spatial distribution of storm runoff generation processes in a catchment.

- (6) Relevance of the *spatial and temporal scale*:

In mesoscale areas of up to several hundred square kilometres, both convective and advective rainfall events may cause floods.

In the *large* river basins of Central Europe, floods normally occur as a consequence of widely spread and long-lasting cyclonic rainfall events – potentially in combination with snow melt. For this kind of events the influence of land-cover is smaller than for convective rain storms. In these large areas, convective rainfall events are of minor relevance, because of their local character.

Effects of land-use changes

As the results of the hydrological modelling show, sweeping statements about the impact of land-use on flood generation are illegitimate, because of the major importance of the boundary conditions. The most important boundary conditions are the area and event characteristics, the actual weather process before the event and both the spatial and temporal scale. In this study, these factors have been considered consequently, but in the past they have often been disregarded.

Nevertheless it is generally valid that land-use can exert a significant influence on flood generation. This is especially true for built-up areas, which cause a strong flood aggravation in particular as response to intensive thunderstorms. For long-lasting advective rainfall events, their negative influence is generally less dramatic, but nevertheless it can be relevant for the flood process also in large river basins, again depending on the boundary conditions. Therefore they need to be taken notice of.

The results of this study contribute to the project LAHOR, which is dealing with the influence of land-cover and river training measures on the flood situation in the Rhine basin. Being a part of the INTERREG Rhine-Maas Activities (IRMA), LAHOR is funded by the European Union within the INTERREG II C program.

Impact of climate change

The impact of possible climate changes on storm runoff generation is investigated using a proceeding (expanded downscaling) for transferring a climate signal from a historical hydrological year to a future signal, without changing its actual weather process. Applying this method, a confrontation of the hydrological year 1994 with a hydrological year 1994* is possible, considering the climate of the period from 2070 to 2097, which has been calculated by a global circulation model.

For all three study areas, the scenario-situation during the last third of the 21st century shows (besides a heating tendency) a significant shift of the precipitation regime as well as an approximately 20% decrease of the annual precipitation for the investigated tributaries to the Rhine river. The decline

of the annual precipitation is mainly induced by a drastic decrease during the summer months. The shift of the precipitation regime consists of a decrease of precipitation especially in November and December, and an increase mainly in March and April. Correspondingly, for the future a smaller potential for flood generation around christmas and a more frequent occurrence of floods during spring can be expected. Moreover, the climate scenarios indicate a higher variability in the range of heavy rainfall and therefore a increasing probability for the occurrence of extreme precipitation events.

In addition to the *local* consequences of a prospected more frequent generation of floods during springtime caused by large amounts of rainfall, this could also effect the flooding situation of the *whole Rhine basin*. This is due to an increasing probability for a coincidence of rainfall-induced floods in the german part of the Rhine river and snowmelt coming from the Alps.

Keywords

flood, land-use change, climate change, land-use scenarios, climate scenarios, hydrological modeling, surface sealing, agriculture, forestry

Résumé

Depuis 1990 on constate que l'occurrence des inondations de grande ampleur augmente. Cela soulève la question de la responsabilité humaine. Dans le passé la surface du sol ainsi que les systèmes fluviaux ont été soumis à des interventions importantes qui ont conduit sans aucun doute vers une modification du rythme des inondations dans cette région. Parce qu'il y a une grande diversité de processus et facteurs associés, il n'y a jusqu'ici que des hypothèses quand aux conséquences de telles modifications sur les inondations. La quantification des effluents qui se forment dans le bassin versant, qui dépend de la composition et de la densité de la couverture végétale et de l'état de la surface de sol, est encore réalisée avec de grandes incertitudes.

L'influence de l'activité humaine sur la formation des crues est examinée au moyen de trois types de bassins versants caractéristiques: l'utilisation de sol y est à prédominance soit urbaine, soit agricole, soit forestière. En outre, à l'aide de scénarios de climat qui décrivent l'état des années 2080, les conséquences potentielles d'un changement du climat sur la formation des crues sont analysées.

L'objectif principal de cette étude est d'illustrer de façon exemplaire au moyen des différents bassins versants, l'influence de l'utilisation des terres sur la formation des crues. Pour cela trois bassins versants d'une échelle mesoscalaire ont été choisis dans la partie allemande du bassin Rhénan. Les bassins diffèrent de façon marquée par l'utilisation des terres et par leurs dimensions (entre 100 et 500 km²). Ils permettent par la suppression des effets locaux des généralisations, mais admettent quand même une attribution distincte de cause et d'effet. Les bassins versants des fleuves suivants ont été choisis: La

Lein caractéristique d'une utilisation agricole, la *Körsch* comme zone typiquement urbaine et la *Lenne* dont le bassin versant est caractérisé essentiellement par une utilisation forestière, et est considéré comme quasi-naturel.

Régions d'étude

Le bassin versant de la *Lein* caractérisé par une utilisation agricole se trouve au sud-ouest de Heilbronn et a une surface de 115 km². Il s'écoule du sud-ouest vers le nord-est.

Le bassin versant de la *Körsch* qui est marqué par une forte urbanisation se trouve au sud de Stuttgart. Sa surface est de 127 km² et descend doucement de l'ouest vers l'est. Le lit de la *Körsch* s'est creusé profondément au cours du temps dans le haut plateau.

La *Lenne* située dans une zone à prédominance forestière est un affluent de la Ruhr et provient de la montagne »Rothaargebirge«. La région d'étude se limite du cours supérieure jusqu'à l'étiage de Bame-nohl. Cette région a une surface de 455 km² avec un relief fort.

Modèle d'utilisation de sol

Au début du projet, aucun modèle accessible et satisfaisant pour la mise en place de scénarios d'utilisation des sols n'existait. Par conséquent, l'étude présentée est réalisée par l'élaboration d'une procédure propre. l'objectif de l'élaboration de scénarios d'utilisation des terres est avec cela non seulement la prise en considération d'une valeur d'objectif sous forme de relations d'utilisation des terrain selon un pourcentage modifiées, mais aussi l'inclusion du endroit et de la topologie (relations des sur-

faces les uns aux autres) des différentes utilisations. Cette spécification en reproduction fidèle des surfaces est pour l'évaluation des conséquences hydrologiques des variations d'utilisation des sols d'une importance particulière. La détermination des modifications en pourcentage (objectif de scénario) n'est pas incluse dans la méthode développée. Elle est conclue par des pronostics externes. Le cœur de la technique de scénario représente plutôt la désagrégation des modifications d'utilisation des terres en relation vers leurs surface.

La procédure développée pour le projet de formulation des scénarios LUCK (Land Use Change scenario Kit), basé sur une grille, prend en considération les facteurs de site ainsi que les relations avec des différentes surfaces proches comme critères d'une conversion d'utilisation. Des modèles d'utilisation typiques et l'effet des axes de développement dans le paysage (par exemple routes, lignes de chemin de fer) sont aussi pris en compte. Le résultat potentiel de changement pour chaque grille est la base de la méthode suivante conçu itératif du changement de l'utilisation des sols. Ces résultats servent directement comme données d'entrée pour la modélisation hydrologique.

Modélisation hydrologique

Pour la modélisation hydrologique des changements d'utilisation de sols et du climat de l'étude présentée, le modèle déterministe et différentiel en surface WASIM-ETH a été choisi. Ce modèle représente une combinaison équilibrée des approches physiques et conceptuelles. WASIM-ETH a été conçu à l'origine pour la simulation des influences des changements climatiques sur le bilan hydrologique des bassins fluviaux. C'est pour cette raison que l'interpolation des données de base météorologique ainsi que la modélisation de l'évaporation ont été faites avec grand soin. Jusqu'à présent, pour mieux pouvoir prendre en considération l'influence de l'utilisation des sols sur la formation des crues dans le cadre de ce projet, le modèle de sol était complété par d'autres aspects comme la prise en compte des effluents macropores, le dragage, le scellement avec le raccordement à une canalisation et une rétention décentralisée.

Conséquences des modifications d'utilisation des terres

Pour les zones d'étude, des scénarios ont été établis, couvrant la modification des trois catégories principales de l'utilisation de sols-surfaces scellées, utilisation forestière et agricole.

Pour chacune de ces trois zones, des scénarios d'urbanisation ont été calculés. En plus d'une future augmentation de scellement, l'ampleur du scellement au milieu du 19ème siècle a aussi été pris en compte d'après des cartes anciennes. L'état des lieux historique a en plus servi à la validation de la technique de scénario pour l'urbanisation. Aussi a-t-on pu étudier la question suivante: Y a-t-il une bonne corrélation entre le modèle d'utilisation des sols et le développement de l'état historique jusqu'à la situation actuelle.

L'influence d'une utilisation agricole ou d'un travail de sol modifié a été examinée au moyen d'une mise en repos de la terre et de l'adaptation sur la semence de paillis.

Des modifications de la portion forestière ont été effectuées par un boisement des terrains agricoles marginaux et par un jet de vent suite à des orages.

Les résultats exemplaires de la modélisation hydrologique pour les trois zones d'étude sont les suivants:

- (1) À l'aide de l'exemple de la Lein il a pu être démontré l'importance qu'a la représentation en reproduction fidèle de l'utilisation des sols dans le modèle hydrologique en particulier concernant les précipitations qui ont lieu à petite échelle comme les cellules d'orage. La situation d'un centre d'agglomération fictif a eu, lors de la modélisation, une influence considérable sur la hauteur de la pointe de la droite d'inondation ainsi que sur la forme de l'hydrographe.
- (2) Une augmentation d'environ 50% des surfaces urbaines dans le bassin versant de la Lein aurait, après les simulations selon des conditions générales, des conséquences très différentes, même si l'on considère que l'inondation a lieu environ tous les 3 ans: l'augmentation du maximum de la crue varie entre 0% pour un événement de précipitation à caractère cyclonique de longue durée avec une pré-humidité élevée et presque 30%

pour une intensive pluie d'orage avec une faible pré-humidité.

- (3) Comme l'exemple de la région de la Lenne l'illustre, la forêt n'est pas, contrairement l'opinion très répandue, un indice pour une faible contribution à la formation des crues. Il est correct qu'une forêt naturelle montre une capacité de stockage importante (interception, stockage dans la litière de paille) comme les autres utilisations des terres et que les sols forestiers possèdent souvent une bonne qualité d'infiltration. Puisque les forêts en zone de montagnes sont fréquemment sur des sols d'épaisseur limitée, les surfaces forestières, en particulier lorsqu'elles sont combinée avec une roche d'une faible capacité d'infiltration, ont des caractéristiques favorisant un écoulement souterrain rapide.
- (4) L'application d'un scénario de semence dans la paille pour la Lein a montré que l'incertitude de la modélisation de la dynamique des macropores dépend des événements convectifs avec une forte intensité de précipitation, avec une influence plus grande que celle supposée dans la pratique de la semence dans la paille sur la formation des crues à une échelle mesoscale. Savoir dans quelle mesure cela est un artefact à l'approche de modèle demande, si possible, un réexamen expérimental.
- (5) L'effet renforçant des crues d'un scellement avec des orages courts et intensifs d'une fréquence annuelle inférieure pouvait être démontré pour le bassin de la Körsch. Après les simulations, le débit maximum d'un événement convectif apparu en 1992 aurait été un sixième moins grand si l'urbanisation était identique à celle de 1836 (1,3 % zone d'habitation) que dans l'état actuel (25 % zones d'habitation).
- (6) En principe les mesures d'infiltration sont soumises de façon ponctuelle pour des surfaces scellées dans les zones urbaines, aux mêmes restrictions que celles formulées pour les conséquences de l'influence du scellement lui-même. Les simulations pour le bassin de la Lein ont montré cela. Leurs bénéfices sont conformément grands pendant des précipitations convectives intensives avec une faible pré-humidité, mais clairement plus petit pour les précipitations advective de longue durée avec une pré-humidité

élevée, puisque la réceptivité du sol naturel ainsi que de l'installation d'infiltration diminue.

Les constatations faites grâce la modélisation hydrologique ne sont cependant pas limitées aux bassins versants de la Lein, de la Körsch et de la Lenne, mais permettent aussi la déduction de liens causaux valables:

- (1) L'importance du caractère de la précipitation:
 - (a) *L'intensité de la précipitation*
L'influence de la surface du terrain et pour les événements de précipitation convective est plus élevée que pour les événements advectifs avec des intensités de précipitation généralement clairement plus faibles.
 - (b) *Volume de précipitation*
Plus le volume de précipitation est grand, plus l'influence de la surface du terrain sur la formation des crues est faible.
- (2) Importance des *conditions initiales*:
Plus que la région est sèche au début de l'événement, plus l'influence de la surface de terrain sur la formation des crues est importante.
- (3) Importance des *conditions d'infiltration*:
Si la capacité d'infiltration est dans le même ordre de grandeur que l'intensité de précipitation, l'influence des modifications de la surface du terrain pour la formation des crues est plus importante.
- (4) Importance de la *géomorphologie*:
Si la perméabilité de la surface de sol pour l'infiltration ne représente pas de limitation, le sous-sol de roche est un facteur crucial pour la formation des crues. L'utilisation des terres n'exerce alors qu'une influence très faible sur la formation du débit.
- (5) Importance de l'ampleur de l'événement:
La grandeur maximum du débit ou la période de retour comme étalon pour la dimension d'un événement d'inondation est seulement un indicateur d'une valeur limitée pour mesurer l'ampleur de l'influence de l'utilisation du terrain sur la formation des crues. La période de retour ne donne pas des informations sur les conditions météorologiques locales ni sur la distribution spatiale de la formation de la crue dans la région.
- (6) Importance de l'échelle *temporaire et spatiale*:
Dans ces régions, des événements de précipita-

tion convective aussi bien qu'advective peuvent conduire à des inondations sur une surface jusqu'à plusieurs centaines des kilomètres carrés. Dans les grands bassins fluviaux d'Europe centrale, des inondations sont formées surtout suite à des précipitations cyclonales étendues dans l'espace et de longue durée – parfois en combinaison avec la coulée de neige. Pour ce genre d'événements, l'influence de la surface du terrain est plus faible que pour des fortes précipitations convectives. Les événements de précipitations convectives sont dans de grandes régions, et ce de par leur caractère local, d'une importance subordonnée.

Conséquences du changement du climat

Les conséquences de possibles changements climatiques sur la formations des crues sont examinées au moyen d'une procédure (expanded downscaling) qui permet de remplacer le signal de climat apparu dans le passé d'année hydrologique par un signal de climat futur, sans modification au cours de temps. À l'aide de cette manipulation, il est possible de confronter directement l'année hydrologique de 1994 hydrologische à une année hydrologique de 1994* à laquelle le climat de la période de 2070 d'ici 2097 est appliqué, tel qu'il a été simulé par un modèle de circulation globale.

Pour chacune des trois régions on constate pour la situation du scénario pour le dernier tiers du 21ème siècle en plus d'un réchauffement, un décalage signifiant du régime de précipitation ainsi qu'une

diminution d'environ 20% de la précipitation annuelle pour les parties examinées du bassin Rhéna. La diminution de la précipitation annuelle est principalement la conséquence d'un abaissement radical des précipitations dans les mois d'été. Le décalage dans le régime de précipitation est composé d'une diminution tendancielle des précipitations surtout en novembre et en décembre ainsi d'une augmentation pendant les mois de mars et d'avril. À l'avenir Il faudra donc compter sur une plus faible probabilité pour les inondations de Noël et une apparition plus fréquente des inondations au printemps. En outre les scénarios de climat indiquent une variabilité croissante dans le secteur des précipitations fortes et donc une probabilité augmentée pour l'apparition de précipitations extrêmes.

En plus des conséquences locales d'une formation plus fréquente des crues dans l'avenir, suite à des précipitations advectives abondantes, cela aurait aussi des conséquences négatives sur la situation concernant les inondations dans tout le bassin versant du Rhin. De cette façon, la probabilité augmenterait que des inondations dues à des précipitations dans la partie allemande du bassin Rhéna joignent la coulée de neige venant des Alpes.

Mots clés

Inondations, crues, modification d'utilisation des terres, changement climatique, scénarios d'utilisation des terres, scénarios de climat, modélisation hydrologique, scellement, agriculture, sylviculture

Einleitung

1.1 PROBLEMSTELLUNG

In den letzten Jahren trat das Problem der *Hochwasser* und der damit verbundenen Schäden sowohl in Deutschland als auch in anderen Staaten immer stärker in die öffentliche Diskussion. Das gehäufte Auftreten von großen Hochwasserereignissen seit 1990 hat verstärkt die Frage nach der anthropogenen Verantwortung dafür aufgeworfen. Der Mensch hat durch Gewässerausbau, Veränderung der Landnutzung und des Klimas Einfluss auf das natürliche System genommen. Flächenversiegelung, Flurbereinigung und Waldschäden sind nur einige der Folgen dieses anthropogenen Eingriffs (z.B. KLEEBERG & ROTHER, 1996; LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER, 1995; MENDEL et al., 1997). Der Klimawandel, verursacht durch eine erhöhte CO₂-Konzentration, bringt den Aussagen verschiedener Studien zufolge eine Veränderung des Niederschlagsregimes in Europa mit sich, was einen entscheidenden Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben kann (BULTOT et al., 1988; BULTOT et al., 1992; ARNELL & REYNARD, 1996; GELLENS & ROULIN, 1998).

Die Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen Klima und Wetterlage, Extremniederschlag und Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes und dem Wellenablauf im Flussnetz sind bislang nur teilweise geklärt. Besonders die Quantifizierung der Abflussentstehung im Einzugsgebiet ist noch immer

mit großen Unsicherheiten behaftet. Inwieweit die Zusammensetzung und Dichte der Vegetationsdecke und der Zustand der Bodenoberfläche die Infiltration von Starkniederschlägen dominieren, ist nach wie vor umstritten. Fraglich bleibt auch, wie stark die anthropogen und/oder natürlich geprägte Gliederung und Bedeckung eines Einzugsgebietes die Abflusskonzentration steuern.

Über Eingriffe in die Struktur des Einzugsgebietes nehmen anthropogene Veränderungen auf direktem Weg Einfluss auf die Hochwasserentstehung. In kleineren, bebauten Einzugsgebieten ist dieser Effekt am größten, weil hier durch Versiegelung erhöhte Einzelabflüsse zu Hochwasserereignissen akkumuliert werden können. Über die Land- und Forstwirtschaft wirkt der anthropogene Einfluss auf die Landschaft über die Siedlungen hinaus. Unsachgemäße Bodenbearbeitung, falsche Düngung, Befahrung mit schweren Fahrzeugen und die Auswahl interzeptionsschwacher Pflanzen können zu Einschränkungen des Infiltrations- und Speichervermögens des Bodens führen (ENGEL, 1997: 11). Veränderungen der Abflussbildung und Abflussbeschleunigung sind die möglichen Folgen. Der Effekt solcher Änderungen auf das Hochwasserregime ist bislang noch nicht zufriedenstellend untersucht worden.

1.2 ZIELSETZUNG

Ziel dieser Studie ist es, durch die exemplarische Quantifizierung des Einflusses von Landnutzungs-

und Klimaänderungen auf den Hochwasserabfluss von Flussgebieten zur Klärung der oben genannten

Wissensdefizite beizutragen. Anhand von drei charakteristischen Einzugsgebietstypen mit dominierend urbaner, landwirtschaftlicher beziehungsweise forstwirtschaftlicher Landnutzung soll die Relevanz der anthropogenen Nutzung untersucht werden. Außerdem sollen mit Hilfe von Klimaszenarien, die den Zustand der 2080er Jahre beschreiben, die potenziellen Konsequenzen von Klimaänderungen für die Hochwasserentstehung analysiert werden. Dafür wurden Nebenflüsse des Rheins im mesoskaligen Maßstabsbereich gesucht (bis ca. 1000 km²), deren Größe durch die Unterdrückung lokaler Effekte eine Verallgemeinerung zulassen, aber trotzdem noch eine eindeutige Zuordnung von Ursache und Wirkung ermöglichen. Unter diesen Gesichtspunkten wurden die Einzugsgebiete folgender Flüsse ausgewählt: *Lein* als Repräsentant einer landwirtschaftlichen Nutzung, *Körsch* als typisch urbanes Gebiet und obere *Lenne*, deren überwiegend bewaldetes Einzugsgebiet als naturnah gilt.

Exemplarisch werden für diese drei Untersuchungsgebiete Landnutzungsszenarien entworfen und mit einem detaillierten Modell ihre hydrologischen Eigenschaften erfasst. Die Szenarien sollen den politischen Rahmenvorstellungen über die Entwicklung der Landwirtschaft, des ländlichen Raumes im allgemeinen und der Siedlungsentwicklung gerecht werden. Insbesondere die Berücksichtigung der Landnutzungsmuster und der Vegetationszustand sowie deren Interaktionsbedingungen stehen dabei im Vordergrund. Ein weiteres Ziel stellt die Verbesserung der Parameterisierung der Landnutzung für deren Berücksichtigung im Modell dar.

Das hydrologische Modell sollte sowohl in der Lage sein, die ganzjährigen hydrologischen Einzugsgebietsbedingungen als auch speziell die Abflussverhältnisse von Hochwasserereignissen widerzuspiegeln. Dafür muss das Modell an den gewählten Maßstab angepasst sein und eine genügend detaillierte Parameterisierung der Landnutzung gewährleisten.

1.3 VORGEHENSWEISE

Eine umfassende Literaturübersicht in *Kap. 2* stellt die Grundlage der Studie dar. Sie dokumentiert den Stand der Forschung zu den Themen Hochwasserentstehung, den Einfluss von Landnutzung und Klima hierauf, Landnutzungsszenarien und hydrologische Modellierung. Einen Überblick über die Einflussfaktoren der Hochwasserentstehung gibt *Abb. 2.1*, S. 6, welche die Abhängigkeit von Gebietsgröße und Jährlichkeit des Ereignisses sowie die wichtigsten Steuergrößen für natürliche Einzugsgebiete zusammenfasst.

Im Anschluss daran werden die drei ausgewählten Einzugsgebiete vorgestellt (*Kap. 3*). Dabei werden die naturräumlichen Gegebenheiten, die anthropogene Inanspruchnahme der Landschaften und die Datenlage beschrieben.

Die Fragestellung der Studie wird mit einem modellbetonten Vorgehen bearbeitet, das sich in die zwei Schwerpunkte Erstellung von Landnutzungs-

szenarien einerseits und hydrologische Modellierung andererseits gliedert.

In *Kap. 4* werden die Grundprinzipien des Modells für die Erstellung der Landnutzungsszenarien erläutert. Zunächst werden aus den Landnutzungstrends Szenarioziele festgelegt, die anschließend लागу umgesetzt werden. Ausschlaggebend dafür ist die *Konvertierungseignung* und die *Nachbarschaftsanalyse* der bereits bestehenden Nutzungen.

Die *hydrologische Modellierung* erfolgt mit dem deterministischen flächendifferenzierten Modell WaSiM-ETH, das in *Kap. 5* ausführlich beschrieben wird. Die Kriterien, die zur Auswahl des verwendeten Modells führten, werden im *Kap. 2.5* formuliert. Die im Rahmen des Projekts entstandenen Erweiterungen des ursprünglichen Modells und deren Sensitivität für die vorliegende Fragestellung werden in *Kap. 5.5* vorgestellt.

Abb. 1.1, S. 3 gibt einen Überblick über die eingehenden Daten und die Arbeitsschritte.

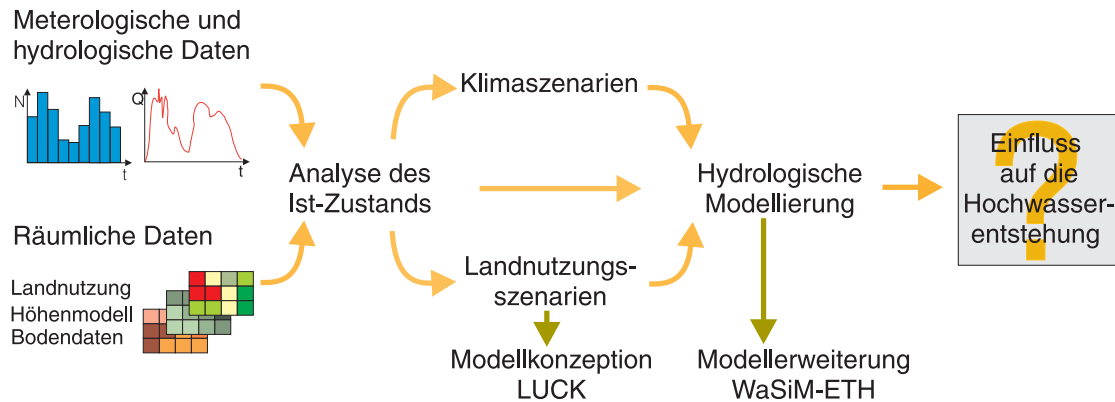


Abb. 1.1 Herangehensweise an die Fragestellung

Die Ergebnisse der *Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung* werden in Kap. 6 dargestellt. Dabei wird zunächst die hydrologische Modellierung des Ist-Zustandes für die drei Einzugsgebiete beschrieben. Anschließend werden für das Einzugsgebiet der Lein exemplarische Sensitivitätsszenarien berechnet, welche die Größen- und Lageeffekte von Siedlungen betrachten. Die historischen Bedingungen für die drei Einzugsgebiete dienen anschließend einerseits für die Validierung der in Kap. 4.2.1 beschriebenen Szenariotechnik für Verstädterung und werden andererseits als Szenarien für die hydrologische Modellierung benutzt (Kap. 6.3). Der Einfluss der Verstädterung, ausgehend von den heutigen Bedingungen, wird in Kap. 6.4 für alle drei Gebiete dargestellt. Flächenstilllegung von Ackerland ist ein Phänomen der heutigen Zeit und wird deshalb hinsichtlich ihrer hydrologischen Auswirkung in Kap. 6.5 überprüft. Exemplarisch werden schließlich für das Körschgebiet ein Aufwaldungsszenario (Kap. 6.6) und für das Areal der oberen Lenne ein Sturmschadensszenario (Kap. 6.7) zur Bewertung der Rolle des Waldes für

die Hochwasserentstehung gezeigt. Eine Modifikation von Bewirtschaftstechniken stellen exemplarisch für das Leingebiet das Mulchszenario auf Ackerflächen (Kap. 6.8) und die Modellierung der Wirksamkeit von Versickerungsmaßnahmen für Siedlungsflächen in Kap. 6.9 dar.

Klimaszenarien kommen in Kap. 7 zur Anwendung und werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Hochwasserverhältnisse in den drei Einzugsgebieten dargestellt.

Mit Hilfe einer kritischen Diskussion der gewonnenen Ergebnisse bei der Generierung von Landnutzungs-szenarios und der hydrologischen Modellierungen wird mit Kap. 8 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf den weiterhin bestehenden Forschungsbedarf gegeben.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung fließen in das Projekt LAHOR ein, das sich mit dem Einfluss der Landoberfläche und von Ausbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet beschäftigt. LAHOR ist Bestandteil der INTERREG Rhein-Maas-Aktivitäten (IRMA) der Europäischen Union.

Grundlagen

2.1 HOCHWASSERENTSTEHUNG

2.1.1 Übersicht über die Einflussfaktoren

Nach DYCK & PESCHKE (1995) ist ein Hochwasser die zeitlich begrenzte Anschwellung des Durchflusses über den Basisdurchfluss, die eine für jeden Durchflussquerschnitt zu bestimmende Grenze überschreitet. Die wichtigsten Kenngrößen eines Hochwassers sind Scheitel/Durchflussmaximum, Fülle/Volumen und Dauer. Umfassend beschrieben wird der Ablauf eines Hochwasserereignisses an einem betrachteten Durchflussquerschnitt durch die Hochwasserganglinie. Variablen einer Hochwasserganglinie wiederum sind – allgemeiner formuliert – das *Wasservolumen* in m^3 , welches während des Ereignisses zum Abfluss kommt, und dessen *zeitliche Verteilung*. Gesteuert werden diese Variablen durch zwei Gruppen von Faktoren: *hydroklimatische* und *physiographische*.

Die wichtigsten Faktoren, die sich aus den hydroklimatischen und physiographischen Ereignis- bzw. Gebietsmerkmalen für den Verlauf einer Hochwasserganglinie ergeben, sind in *Abb. 2.1*, S. 6 aufgeführt. Zusätzlich zu den Ereignis- und Gebietsei-

genschaften wird den Bedingungen *vor* dem Hochwasser, entsprechend ihrer Bedeutung für den Hochwasserverlauf, ein zentraler Platz in der Darstellung eingeräumt. Zur groben Charakterisierung der *Ausgangsbedingungen* werden diese in Anlehnung an die Systemhydrologie als Füllungszustände verschiedener *hydrologischer Speicher* beschrieben. Wichtige Funktionen dieser Speicher sind im Hinblick auf die Hochwasserentstehung (1) deren prinzipielles Fassungsvermögen, (2) deren Füllungs- und Entleerungsverhalten und (3) deren aktuelles Fassungsvermögen zu Beginn des Ereignisses.

Die räumliche Anordnung der Faktoren im Diagramm soll außerdem auf die Mittelstellung der Ausgangsbedingungen zwischen Gebietscharakteristika und Ereignischarakteristika hinweisen. Während die Kapazität der dargestellten Speicher sich unmittelbar aus den physiographischen Gebietsmerkmalen ergibt (gekennzeichnet durch Verbindungslinien), wird deren Füllungsgrad vor dem Ereignis vom Zusammenwirken von hydroklimatischen Faktoren und Gebietscharakteristika bestimmt.

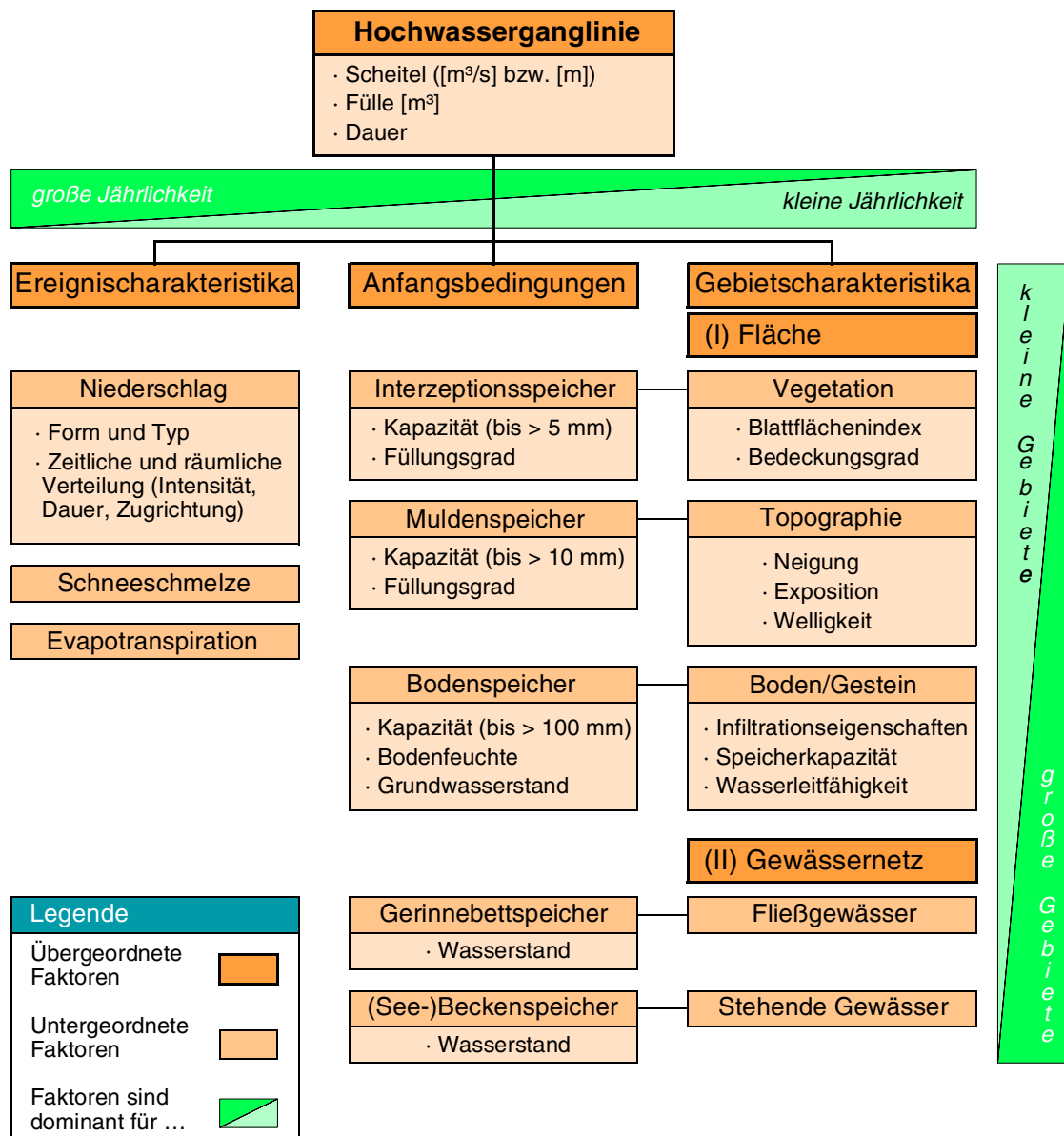


Abb. 2.1 Schematische Übersicht über die wichtigsten Steuergrößen einer Hochwasserganglinie für natürliche Einzugsgebiete in Abhängigkeit von der Gebietsgröße und der Jährlichkeit des Ereignisses (eigene Darstellung unter Verwendung von Informationen aus HERRMANN, 1992, BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995 und DYCK & PESCHKE, 1995; Speicherkapazität aus INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS, 1999)

Auf die Darstellung der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen hydroklimatischen und physiographischen Faktoren wird aus Gründen der Übersichtlichkeit ebenso verzichtet wie auf die Beschreibung von Hochwasserereignissen, die nicht auf Nieder-

schlag und/oder Schneeschnmelze zurückzuführen sind.

Um der Unterschiedlichkeit der jeweils beteiligten Prozesse gerecht zu werden, muss im Hinblick auf die Hochwasserentstehung konsequent zwischen (I) flächenhaften und (II) das Gewässernetz

betreffenden Gebietscharakteristika unterschieden werden. Diese *prozessorientierte* Sichtweise deckt sich jedoch nicht mit der *dynamikorientierten* mathematischen Behandlung der Hochwasserentstehung in Black-Box-Modellen oder konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modellen (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997). Hieraus ergeben sich auch Abweichungen in der Terminologie, die für die Fragestellung von Bedeutung sind und deswegen kurz erläutert werden sollen:

Nach IHRINGER (1992) wird der gesamte Niederschlag-Abfluss-Prozess für die Black-Box-Modellierung in die »Teilprozesse« *Abflussbildung* und *Abflusskonzentration* zerlegt. Der Prozess der Abflussbildung beschreibt dabei »die Aufteilung eines Niederschlagsereignisses in den abflusswirksamen Niederschlag (Effektivniederschlag) [...] und in den Gebietsrückhalt. [...] Der Anteil des abflusswirksamen Niederschlags wird über den Abflussbeiwert beschrieben, der einen gebiets- und ereignisspezifischen Parameter darstellt«. Demgegenüber wird als *Abflusskonzentration* »das Zusammenfließen des abflusswirksamen Niederschlags im Einzugsgebiet bis zu einer betrachteten Gewässerstelle« bezeichnet. Die Definition für *Abflussbildung* gilt in der zitierten Weise allerdings lediglich für Black-Box-Modelle, wo Direktabfluss ausschließlich als Überschuss verschiedener Verlustansätze – meist empirischer Infiltrationsgleichungen – gebildet wird. In komplexeren konzeptionellen Modellen kann auch der Bodenspeicher zum Direktabfluss beitragen. Gemeinsam ist beiden Modelltypen, dass die *Abflussbildung* in erster Linie als *vertikale* Prozessfolge aufgefasst wird, *laterale* Fließvorgänge auf und unter der Bodenoberfläche dahingegen ebenso durch die *Abflusskonzentration* repräsentiert werden wie die Fließvorgänge im Gerinne eines Teileinzugsgebietes.

In Übereinstimmung mit ZUIDEMA (1985) wird der Begriff der *Abflussbildung* für die weitere Argumentation *prozessorientiert* definiert »als der Vorgang, der den Niederschlag von der Bodenoberfläche bis in das Gerinne transportiert«. Diese Definition ermöglicht die im weiteren verfolgte getrennte Betrachtung von Prozessen außerhalb des Gewässernetzes sowie deren Einfluss auf die *Abflussbildung bei Hochwasser* einerseits und von Prozessen im und am Gewässernetz sowie deren Einfluss auf den *Ablauf der Hochwasserwelle* andererseits. Als

Abflussprozesse werden dabei sämtliche an der Abflussbildung oder dem Wellenablauf im Gerinne beteiligten Fließprozesse bezeichnet.

Eine weitere begriffliche Ungenauigkeit stellt die in der deutschsprachigen Literatur häufige Verquickung von *Abflussbildungsprozessen* und *Abflusskomponenten* dar. Hierauf wird in Kap. 2.1.4 in Zusammenhang mit der Beschreibung der verschiedenen Abflussbildungsprozesse eingegangen.

Abb. 2.1, S. 6 weist außerdem darauf hin, dass die Maßgeblichkeit der beteiligten Einflüsse auf die Hochwasserganglinie am Gebietsauslass wesentlich von der Größe des Hochwasserereignisses und der Größe des Einzugsgebietes abhängt. Im allgemeinen gilt hierfür folgender Zusammenhang (DYCK, 1997; KOEHLER, 1996):

- (1) Mit zunehmender Größe/Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses nimmt der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften ab.
- (2) Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße tritt der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften gegenüber den Eigenschaften des Gewässernetzes in den Hintergrund.

Mit flächenhaften Gebietseigenschaften sind hier wiederum in Abgrenzung zum Gewässernetz sämtliche physiographischen Einflussfaktoren gemeint, die die *Abflussbildung* beeinflussen. Im folgenden zählen zu diesen Eigenschaften auch die anthropogenen Eingriffe wie Flurbereinigung oder Urbanisierung sowie gezielte Einflussnahmen zur Verminderung und Verzögerung der *Abflussbildung* bei Hochwasser, auch wenn sie linienhafte Landschaftselemente wie Straßen oder Raine betreffen.

Entscheidende Folge des genannten Zusammenhangs ist, dass sich die in Abb. 2.1, S. 6 aufgeführten Einflussfaktoren nur in Verbindung mit dem räumlichen und zeitlichen Maßstab, in dem sie untersucht werden, bewerten lassen, da sich auch die Untersuchungsmethoden in den verschiedenen Maßstabsbereichen voneinander unterscheiden. Gleiches gilt für die Untersuchung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen. Auf die in der Hydrologie als *Skalenproblematik* angesprochene Maßstabsabhängigkeit der jeweils beobachtbaren Prozesse und der zugehörigen Untersuchungsmethoden bzw. Modell-

vorstellungen wird in *Kap. 2.1.2* näher eingegangen.

Aus dem Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren und Ereignis- bzw. Gebietsgröße geht außerdem hervor, dass der Einfluss flächenhafter Gebietsscharakteristika in kleinen Gebieten und für kleine Ereignisse aufgrund der dort stärksten Wirkung auf die Hochwasserentstehung besser zu quantifizieren ist als für größere Ereignisse bzw. in größeren Gebieten. Mit dem sich daraus für die Simulation von Landnutzungsänderungen ergebenden Dilemma setzt sich die vorliegende Studie auseinander.

2.1.2 Bedeutung hydrologischer Zeit- und Längenmaßstäbe

Wie BLÖSCHL & SIVAPALAN (1995) ausführlich darstellen, sind sowohl hydrologische Prozesse als auch deren Beobachtung/Messung und Modellierung an charakteristische Zeiten und Längen gebunden, die gegeneinander abgegrenzt werden können. Dies erlaubt eine Zuordnung der Prozesse, Arbeitstechniken und Modelle zu verschiedenen Maßstabs- oder – in Anlehnung an den englischen Begriff *scale* – Skalenbereichen (siehe *Abb. 2.2*, S. 9).

Im Idealfall sind *Prozessmaßstab*, *Beobachtungsmaßstab* und *Modellierungsmaßstab* identisch. Eine bewusste Beachtung verlangen die einer Fragestellung zugrunde liegenden *Skalenbereiche* dahingegen insbesondere dann, wenn entweder der

Beobachtungs- bzw. Modellierungsmaßstab nicht mit dem Maßstab des beobachteten bzw. simulierten Prozesses übereinstimmen, oder wenn anhand von Erkenntnissen, die in einem Maßstabsbereich über Prozesse gewonnen wurden, Aussagen über diese Prozesse in einem anderen Maßstabsbereich gemacht werden sollen. Mit der Schaffung von Übergängen zwischen den einzelnen Skalen(bereichen) beschäftigt sich der Forschungsbereich der *Regionalisierung* (KLEEGERG & CEMUS, 1992). Die Übertragung von Information vom kleineren zum größeren Maßstab wird dabei als *upscaling* angesprochen, solche vom größeren zum kleineren als *downscaling* (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995).

Bei der Untersuchung bzw. Nachbildung hydrologischer Prozesse ist der von den natürlichen Gegebenheiten bestimmte *Prozessmaßstab* vorgegeben. Der *Beobachtungsmaßstab* hingegen ergibt sich aus der Fragestellung, der dafür verfügbaren Messtechnik sowie den finanziellen Möglichkeiten. Der *Modellierungsmaßstab* wiederum richtet sich nach den simulierten Prozessen und den verfügbaren Daten sowie nach der Prozesskenntnis und deren Umsetzung im Modell. Je nachdem, ob die beteiligten Prozesse, deren Beobachtung oder deren Modellierung im Zentrum der Betrachtung stehen, ergeben sich, wie *Abb. 2.2*, S. 9 zeigt, daraus unterschiedliche Grenzen für die voneinander trennbaren Skalenbereiche.

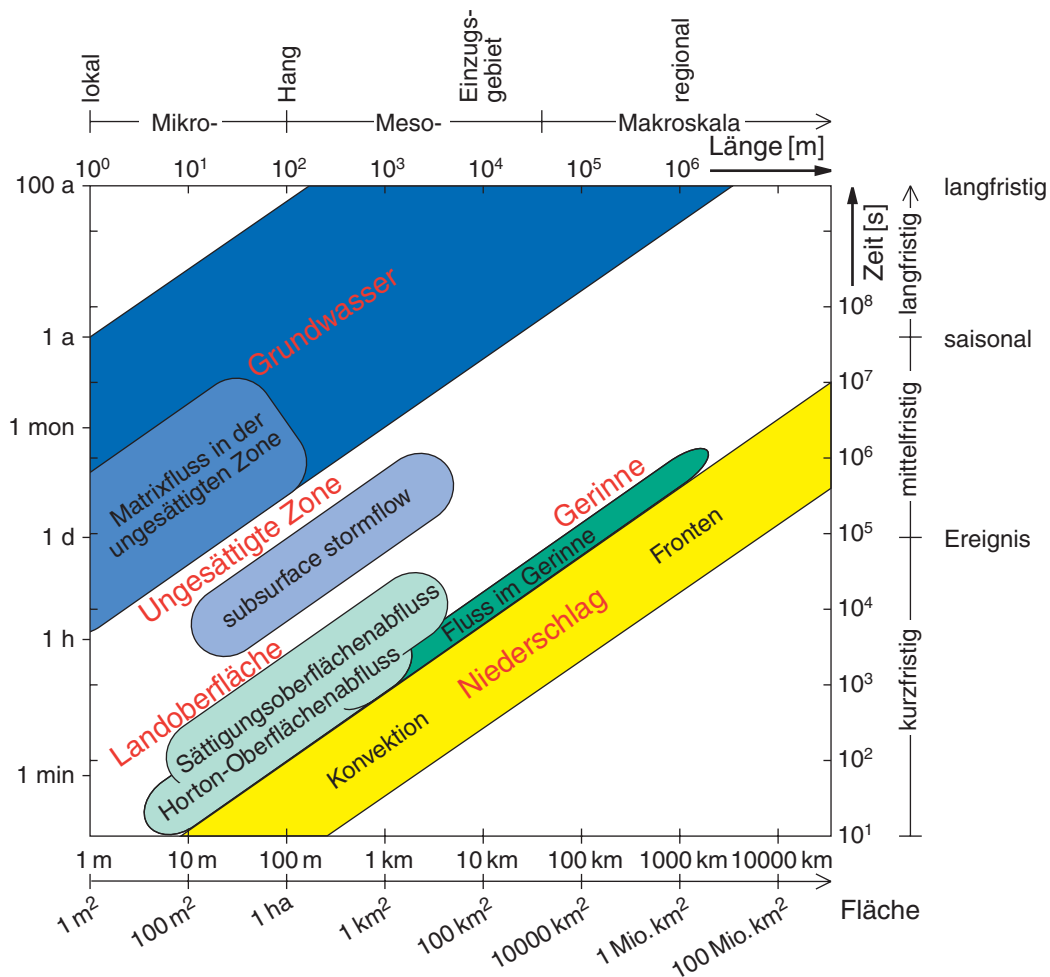


Abb. 2.2 Charakteristische Raum- und Zeitskalen einiger hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung (Prozessskalen nach BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995; Raumskalen nach BECKER, 1992; Zeitskalen nach KLEEGERG & CEMUS, 1992; Arbeitsskalen nach DOOGE, 1986 aus BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995)

Die von BECKER (1986, 1992) eingeführte Einteilung der *Modellierungsmaßstäbe* in die drei räumlichen Größenklassen Mikro-, Meso- und Makroskala basiert im wesentlichen auf der Zuordnung verschiedener *Modellvorstellungen* zu der Gebietsgröße, für die diese Modellvorstellungen entwickelt wurden. Den umgekehrten Weg geht DOOGE (1986), der die Modellierungs-/Arbeitsskalen nach charakteristischen Gebietsgrößen (lokale Skala, Hang-, Einzugsgebietsskala und regionale Skala) und Zeiträumen (Ereignisskala, saisonale und langfristige Skala) einteilt, die typischerweise Gegenstand von *Modellanwendungen* sind. Schlussfolgerungen, die sich aus der auch von PLATE (1992) aufgegriffenen

modellorientierten Skaleneinteilung für die Bewertung von Modellen auf ihre Tauglichkeit zur Beantwortung der vorliegenden Fragestellung ergeben, werden in Kap. 2.5 angesprochen.

Zunächst jedoch sollen die Prozessmaßstäbe im Vordergrund stehen, wie sie in Abb. 2.2, S. 9 exemplarisch für einige Prozesse dargestellt sind. Als Kriterien für charakteristische Zeit- bzw. Raumskalen hydrologischer Prozesse werden dabei (a) deren Dauer bzw. räumliche Ausdehnung, (b) deren Periodizität (sofern vorhanden) und (c) deren Korrelationslänge herangezogen (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995).

Eine zeitliche Eingrenzung der am Entstehen und am Ablauf von Hochwassern beteiligten Prozesse auf den *Ereigniszeitraum* ist aufgrund des *Einflusses der Ausgangsbedingungen* nicht möglich. Hierauf weisen KLEEBERG & ROTHER (1996) implizit hin, die feststellen, dass außergewöhnliche Hochwasser in größeren Gebieten als Folge von Niederschlägen meist nur in Verbindung mit hoher Vorbodenfeuchte oder rascher Schneeschmelze entstehen können. Eine erhöhte Neigung zu Hochwassern kann sich über Monate hinweg ausbilden (z.B. durch anhaltend kühle und feuchte Witterung oder Schneeakkumulation im Winterhalbjahr), sich aber ebenso bei geänderten Bedingungen – abhängig von den Speichereigenschaften des Gebietes – über Monate hinweg erhalten, was auch als Beharrungsvermögen oder *Persistenz* bezeichnet wird (DYCK & PESCHKE, 1995). Kenngrößen für die Füllungszustände der Speicher vor dem Hochwasser sind in Abb. 2.1, S. 6 aufgeführt. Sie sind verknüpft mit den mittelfristigen Schwankungen der Witterungsbedingungen, der Fließprozesse in der ungesättigten Zone bzw. im Grundwasser und der daraus resultierenden Fließvorgänge im Gerinne.

2.1.3 Raum-, Zeit- und Größenmaßstäbe von Niederschlägen

Großen Einfluss auf das Entstehen von Hochwasser haben die charakteristischen Skalen der Niederschlagstypen. Wie Abb. 2.2, S. 9 zeigt, sind *konvektive* Niederschläge an sowohl zeitlich als auch räumlich andere Skalenbereiche gebunden als *zyklonale* Niederschläge. Der räumliche Bezug hat zur Folge, dass konvektive Starkniederschläge, deren Auftreten meist auf eine Fläche von wenigen Quadratkilometern beschränkt ist, auch nur in kleinen Einzugsgebieten zu größeren Hochwassern führen können (KLEEBERG & ROTHER, 1996; VERWORN & HARMS, 1984). Umgekehrt müssen großflächige zyklonale Niederschläge, die in großen Flussgebieten zu Hochwasser führen, nicht auch in kleineren oberstrom gelegenen Nebenflüssen extreme Abflussverhältnisse hervorrufen. Dies sollte bei der Übertragung von Erkenntnissen zur Hochwasserabflussbildung aus kleinen Gebieten auf den Hochwasserverlauf in größeren Gebieten unbedingt beachtet werden.

Die saisonalen/mittelfristigen Schwankungen der hydroklimatischen Einflüsse sind dafür verantwortlich, dass sich im Jahresverlauf die Randbedingungen für die Hochwasserentstehung deutlich voneinander unterscheiden. Zu den Randbedingungen gehören neben dem Vorherrschen bestimmter Niederschlagstypen und -formen auch der Entwicklungszustand der Vegetation sowie der tendenzielle Füllungszustand des Bodenspeichers zu einer bestimmten Jahreszeit. Konsequenz hieraus ist, dass sowohl die Art der Belastung der Speicher im Einzugsgebiet als auch die Wirksamkeit der Speichermechanismen tendenziell einem jahreszeitlichen Gang unterworfen sind.

Häufig wird auch die Größe eines Niederschlagsereignisses, ausgedrückt als *Jährlichkeit* oder *Überschreitungswahrscheinlichkeit* und bezogen auf eine bestimmte Niederschlagsdauer, als Zeitskala interpretiert (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995). Die Skalendefinition bezieht sich hierbei auf das mittlere Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen.

Intensität und *Dauer* eines Niederschlagsereignisses – und damit auch dessen *Jährlichkeit* – haben einen starken Einfluss darauf, welche Gebietseigenschaften und wie sehr die Gebietseigenschaften den Hochwasserverlauf prägen. Ursachen hierfür sind zum einen die Auffüllung der verschiedenen, in Abb. 2.1, S. 6 genannten, Speicher je nach Ausgangsbedingungen, sobald die Niederschlagsintensität den Auslauf aus einem betrachteten Speicher pro Zeiteinheit übersteigt. Zum anderen führen Ereignisse höherer *Jährlichkeit* auch zur Aktivierung zusätzlichen Speicherraums v.a. im und am Gewässernetz, wobei prinzipiell jegliches Ansteigen des Wasserspiegels im Gewässer eine Speicherung (*channel storage*) darstellt, deren Wirksamkeit wesentlich vom Gerinnequerschnitt abhängt. Einen sprunghaften Zuwachs an Speichervolumen mit steigender Niederschlagsmenge bzw. -jährlichkeit bewirken z.B. Ausuferungen und Vorlandüberflutungen.

2.1.4 Raum-, Zeit- und Größenmaßstäbe der Abflussprozesse

Ebenso wie für die Einschätzung der *hydroklimatischen* Einflussfaktoren ist für die Bewertung der

physiographischen Einflüsse eine Verknüpfung der getroffenen Aussagen mit den zugehörigen Maßstabsbereichen der beteiligten Prozesse unerlässlich. Zur Unterscheidung *räumlicher Skalenbereiche* der Fließprozesse im Einzugsgebiet bieten sich die in Abb. 2.2, S. 9 vertretenen Arbeitsskalen nach DOOGE (1986) an, da sie hydrologische Teilsysteme voneinander abgrenzen, denen jeweils charakteristische hydrologische Prozesse zugeordnet werden können.

Relevante *Zeitskala* für die im folgenden beschriebenen *Abflussprozesse* ist der *Ereignismaßstab*. Saisonale Einflüsse werden implizit als Anfangs- und Randbedingungen bzw. Ausgangsbedingungen (siehe oben) berücksichtigt.

2.1.4.1 Vertikale Wasserbewegung in der Bodenzone

Die kleinste räumliche Einheit nach DOOGE (1986) ist die *lokale Skala*, die mit einer Größenordnung von ungefähr 1 m² den Betrachtungsmaßstab für die *vertikalen* Fließprozesse darstellt, die in einem *Pedon*/Bodenmonolith als Grundeinheit der Bodenzone ablaufen (SCHACHTSCHABEL et al., 1992).

Sowohl im Hinblick auf die Bildung schneller/ereigniswirksamer Abflusskomponenten als auch für den längerfristigen Wasserhaushalt mit Grundwasserneubildung und Evapotranspiration im Jahresverlauf kommt der Bodenzone eine Schlüsselstellung zu, da deren Eigenschaften über den weiteren Weg des Niederschlages entscheiden, der zuvor bereits durch Interzeptionsvorgänge beeinflusst worden sein kann (RAWLS et al., 1992). Aus diesem Grund scheint eine eingehendere Betrachtung der Wasserbewegung im Boden und an der Bodenoberfläche sinnvoll.

Die wichtigsten Parameter des Bodens für die vertikalen Fließprozesse in einem Bodenmonolith sind dessen *Wasseraufnahmefähigkeit*, *Wasserleitfähigkeit* und dessen *Wasserhaltevermögen* (RAWLS et al., 1992). Die mit der Aufteilung des Niederschlages in der lokalen Skala assoziierten Prozesse sind einerseits die Evapotranspiration als Senke für die Hochwasserentstehung und andererseits die Infiltration bzw. die daran anschließende Bodenwasserbewegung.

Zur Unterscheidung verschiedener jeweils dominanter Einflüsse auf das Bodenwasser werden in der Bodenzone verschiedene *Porensysteme* unterschieden:

In der Bodenkunde bzw. für Wasserhaushaltsbetrachtungen ist die Unterteilung in Grob-, Mittel- und Feinporen bzw. in Sickerwasser, pflanzenverfügbares Haftwasser und nicht verfügbares Haftwasser führende Poren gebräuchlich (SCHACHTSCHABEL et al., 1992). Für Untersuchungen der Abflussbildung hat sich die von Beven & Germann (1982) eingeführte Zweiteilung des Porensystems in *Mikroporen* (Poren der Bodenmatrix) und *Makroporen* bzw. in von Kapillarkräften beeinflusste und nicht maßgeblich von Kapillarkräften beeinflusste Poren durchgesetzt. Die damit verbundene Vereinfachung ist mit dem Begriff *double-porosity approach* belegt. BEVEN & GERMANN (1982) ordnen den Makroporen, die als diskrete, langgestreckte Hohlräume beschrieben werden, einen Äquivalentdurchmesser von größer 3 mm zu, was einem Matrixpotential von größer -0,1 kPa bzw. einer kapillaren Steighöhe von kleiner 1 cm entspricht. GERMANN (1990) räumt allerdings ein, dass auch Grobporen mit Durchmessern größer 30 µm bei ausreichender Länge bereits eine den Makroporen ähnliche Prozessdynamik ermöglichen. Bisher wurde bei der Festlegung eines Mindestdurchmesser von Makroporen keine Einigung erzielt (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997).

Analog zur Definition von Mikro- und Makroporen wird auch zwischen Mikro- und Makroporenfluss unterschieden:

(1) *Mikroporenfluss/Matrixfluss (micropore flow)*

Über die Wasserbewegung in den Mikroporen und damit auch über deren Aufnahmefähigkeit für Wasser bei gegebener Wasserleitfähigkeit-scharakteristik und Speicherkapazität entscheiden in erster Linie die aktuelle Bodenfeuchte und der davon abhängige Gradient des hydraulischen Potentials (HARTGE & HORN, 1991).

(2) *Makroporenfluss (macropore flow)*

Makroporen können nach ZUIDEMA (1985) ausgeprägt sein als Wurzelgänge, als Gänge von Würmern oder größeren Bodentieren wie Mäusen oder Maulwürfen oder auch als Schrumpfrisse in feinkörnigen Böden bzw. Klüfte infolge

physikalischer Verwitterung. Anthropogen entstehen Makroporen bei der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung. Genauso trägt intensive Bodenbearbeitung aber auch zur Zerstörung zusammenhängender Makroporen bei (BEVEN & GERMANN, 1982). Erosiv erweiterte Makroporen sowie in lateraler Richtung überdurchschnittlich gut miteinander verbundene Makroporen werden auch als *pipes* bezeichnet (ANDERSON & BURT, 1990).

Obwohl CHEN & WAGENET (1992) zufolge Makroporen lediglich 0,2 bis 5% des Gesamtbodenvolumens ausmachen, können sie aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit innerhalb kurzer Zeit bedeutende Wassermengen ableiten. Die Fließgeschwindigkeiten in Makroporen von bis zu 25 cm/s (BOUMA et al. in ZUIDEMA, 1985) ermöglichen einen 100–400 mal größeren Fluss als in der Bodenmatrix (BRONSTERT, 1994). Ob Makroporenfluss entsteht, hängt vom Feuchtegehalt der umliegenden Matrix, von der Beschaffenheit der Makroporenwandung und von der zur Verfügung stehenden Wassermenge in der Makropore ab. Nach BEVEN & GERMANN (1982) kann bereits in relativ trockenen Böden Makroporenfluss auftreten, was unter anderem auf hydrophobe Effekte an der Porenwandung zurückzuführen ist.

Für die *Infiltration*, also den Eintritt von Wasser in die Erdrinde (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1994), können bei geringer Durchlässigkeit allein die Eigenschaften der Bodenoberfläche entscheidend sein (BURT, 1989). In der Regel sind die Prozesse Infiltration und Bodenwasserbewegung jedoch nicht voneinander zu trennen, da sie wechselseitig voneinander abhängen (RAWLS et al., 1992). Reichen Makroporen bis an die Oberfläche, so ermöglichen sie eine rasche Infiltration und – abhängig von deren wirksamer Länge – eine effektive *Tiefenperkolation*. Diese kann weite Teile der Matrix des Oberbodens umgehen, was auch als *bypass flow* bezeichnet wird (ANDERSON & BURT, 1990).

2.1.4.2 Laterale Abflussbildungsprozesse am Hang

In der *Hangskala* (Größenordnung Hektar) nach DOOGE (1986) gewinnen laterale Abflussbildungsprozesse an Bedeutung. Die für die Hangskala bedeutsamen Prozesse sind geprägt durch die *Heterogenität* des Untergrundes und die *Variabilität* der kleinräumig wechselnden Feuchtebedingungen. Heterogenität und Variabilität sorgen dafür, dass die Reaktion eines Hanges auf ein Niederschlagsereignis immer eine integrale Reaktion verschiedener, ineinander übergehender Fließmechanismen darstellt. Dem wird die bis heute übliche schematische Zuordnung von Wasseranteilen nach der Raschheit der Abflussreaktion zu den Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss nicht gerecht (GUTKNECHT, 1996).

Da die Begriffe zur Beschreibung der Abflussbildungsprozesse am Hang durch die englischsprachige Literatur geprägt sind und bislang z.T. keine klar definierten Übersetzungen existieren, wurden als Referenz für die eigene Terminologie die englischen Begriffe in Klammern hinzugefügt. Aufgrund der verschiedenen Herangehensweisen an die Fragen der Hydrologie im Hangmaßstab (*hillslope hydrology*) haben sich verschiedenste Begriffe für die Beschreibung der beobachteten Phänomene herausgebildet, die den Blick dafür verstellen, dass sich sämtliche unterirdischen Fließprozesse als Wasserbewegung in Poren unterschiedlichen Durchmessers beschreiben lassen. Bei der folgenden und in Abb. 2.3, S. 13 illustrierten Darstellung der im Ereignismaßstab wirksamen Abflussbildungsprozesse am Hang wurde deshalb eine Reduktion dieser Begriffsvielfalt versucht, die sich an Veröffentlichungen von BURT (1989), ANDERSON & BURT (1990), ZUIDEMA (1985), DUNNE (1978), GUTKNECHT (1996), BUTTLE (1994) und BONELL (1993, 1998) orientiert.

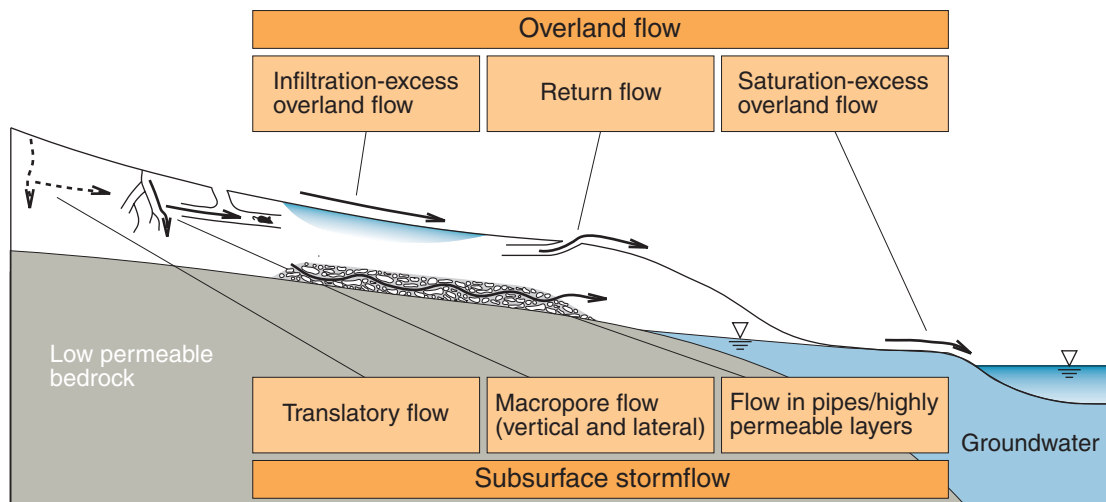


Abb. 2.3 Zur Abflussbildung bei Hochwasser beitragende schnelle Fließprozesse am Hang

Missverständnisse ergeben sich außerdem aus der im deutschen Sprachgebrauch weit verbreiteten unscharfen Trennung zwischen *Abflussbildungsprozessen* und *Abflusskomponenten*. Abflussbildungsprozesse sind Fließprozesse, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle im Einzugsgebiet beobachten lassen. Eine Abflusskomponente ist ein Wasservolumen im Gerinne, welches einem bestimmten Herkunftsraum bzw. der Wirkung bestimmter Abflussbildungsprozesse zugeordnet wird. Häufig wird damit der in den meisten Fällen nicht gerechtfertigte Eindruck erweckt, dass sich einzelne Fließprozesse aus der Abflussganglinie isolieren ließen. Dominante *Abflussbildungsmechanismen*, die zum Entstehen einer Abflusskomponente beitragen, stellen aber fast immer ein Wirkungsgeflecht aus verschiedenen Fließprozessen dar. Die Gleichsetzung von Abflussbildungsprozessen und Abflusskomponenten ist auch ein Ausdruck davon, dass in der Vergangenheit schnelle Abflussreaktionen ausschließlich auf oberirdische Fließprozesse zurückgeführt wurden, weswegen beispielsweise die Begriffe Direktabfluss und Oberflächenabfluss vielfach als Synonyme verwendet wurden. Hierauf weisen BECKER et al. (1999) hin.

Oberflächenabfluss (overland flow)

Im Gegensatz zur schnellen Abflusskomponente ›Oberflächenabfluss‹ in Gerinnen ist mit Oberflächenabfluss als Abflussbildungsprozess eine mo-

mentane Fließbewegung auf der Bodenoberfläche gemeint. Der Prozess schließt auch Wasser mit ein, welches bereits infiltriert war bzw. anschließend wieder infiltriert.

(1) HORTONScher Oberflächenabfluss (infiltration-excess overland flow)

entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die *aktuelle Infiltrationsrate* eines Bodens übersteigt, der Boden also aufgrund der Infiltrationseigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt das anfallende Niederschlagswasser nicht oder nicht vollständig aufnehmen kann (HORTON, 1933). Voraussetzungen hierfür sind im humiden Klimabereich – wo die Bedeutung des HORTONSchen Oberflächenabflusses lange überschätzt wurde – sehr hohe Niederschlagsintensitäten oder Böden mit schlechten Infiltrationseigenschaften. Schlechte Infiltrationseigenschaften sind z.B. gebunden an insgesamt geringe Durchlässigkeit des Bodens, Verschlämmung der Bodenoberfläche, anthropogene Verdichtungen des Oberbodens oder die Abwesenheit gut angebundener Makroporen. Eine nahezu dichte Oberfläche kann aus flächenhafter Bodengefrorenis, Versiegelung der Bodenoberfläche oder an der Oberfläche anstehendem Festgestein resultieren.

(2) Sättigungsflächenabfluss (saturation-excess overland flow)

ist die Folge der Ausbildung einer gesättigten

Zone bis an die Bodenoberfläche (DUNNE, 1978). Eine Abgrenzung zum HORTONSchen Oberflächenabfluss ist sinnvoll, da bei gesättigten Verhältnissen das Abflussverhalten des Bodens unabhängig von den Infiltrationseigenschaften ist (ZUIDEMA, 1985). Randbedingungen für das Auftreten von Sättigungsflächenabfluss sind im Gegensatz zum HORTONSchen Oberflächenabfluss eher gute Infiltrationseigenschaften sowie eine geringe Speicherkapazität und ein geringes laterales Transportvermögen des Bodens. Ursachen für geringes laterales Transportvermögen sind konvergierender Fluss im Untergrund, Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit oder Abnahme der Hangneigung in Verbindung mit einem stauenden Horizont an der Basis. Deswegen tritt Sättigungsflächenabfluss auch bevorzugt in Mulden und am Hangfuß auf (KÖLLA, 1986). Gespeist wird der DUNNESche Oberflächenabfluss von Niederschlag, der direkt auf die gesättigte Fläche fällt (KIRKBY & CHORLEY, 1967) und von Wasser, welches als *return flow* (siehe dort) wieder an die Oberfläche tritt (DUNNE & BLACK, 1970). Sättigungsflächen können sich entweder während des Niederschlagsereignisses entwickeln und ausdehnen, oder bereits vor dem Ereignis bestehen. Dieses Phänomen wurde erstmals von HEWLETT & HIBBERT (1967) durch das sogenannte *variable source-area concept* beschrieben und mit dem als *translatory flow* bezeichneten unterirdischen Versatz von Wasser infolge Druckübertragung in Verbindung gebracht.

(3) *Return flow*

bezeichnet das Wiederaustreten bereits infiltrierten Wassers an der Bodenoberfläche. Diskrete Austrittsstellen für *return flow* sind bis an die Oberfläche reichende Makroporen. Diffuses/flächenhaftes Austreten von Bodenwasser ist bedingt durch die Erschöpfung der Transportkapazität des Oberbodens infolge abnehmender Hangneigung, abnehmender hydraulischer Leitfähigkeit oder abnehmender Mächtigkeit eines wasserführenden Horizonts. Die Bedeutung des *return flow* liegt – wie die des Infiltrationsvorgangs – in der Herstellung eines Übergangs von oberirdischen zu unterirdischen Fließmechanismen, deren Wechselspiel die Hinfälligkeit der

starren Abflusskomponentenbetrachtung unterstreicht (DUNNE & BLACK, 1970).

Schnell reagierender unterirdischer Abfluss (subsurface stormflow)

Eine schnelle unterirdische Abflussreaktion auf ein Niederschlagsereignis ist nicht ausschließlich an schnelle unterirdische *Fließprozesse* gebunden. Sie kann ihre Ursache auch in der schnellen *hydraulischen Reaktion* eines zusammenhängend gesättigten Wasserkörpers auf infiltrierendes Niederschlagswasser haben. Der relative Zeitbegriff *schnell* wird dabei als Synonym für *ereigniswirksam* gebraucht. Hieran sind verschiedene Fließprozesse beteiligt (PEARCE et al., 1986; ANDERSON & BURT, 1990; BONNELL, 1998; BECKER et al., 1999):

(1) *Fluss in bevorzugten Fließwegen (flow in preferential pathways)*

Bevorzugte Fließwege im Untergrund können sowohl diskrete Fließwege (Makroporen) als auch diffuse Bereiche hoher Durchlässigkeit sein.

(a) *Makroporenfluss (macropore flow)*

Bei guter lateraler Vernetzung stellen Makroporen auch in hangabwärtiger Richtung sehr effektive Leitbahnen für den Wassertransport dar (BEVEN & GERMANN, 1982). Wie in Kap. 2.1.4.1 erwähnt, werden in lateraler Richtung besonders wirksame makroporöse Fließwege verschiedentlich auch als *pipes* bezeichnet (ANDERSON & BURT, 1990).

(b) *Fluss in hochdurchlässigen Bereichen (flow in highly permeable layers/pipes)*

Hochdurchlässige Bereiche zeichnen sich durch grobes Substrat mit hohem Grobporanteil aus, wie es für Hangschutt, periglazialen Solifluktionsschutt oder lockeres Moränenmaterial typisch ist. Turbulente Auswaschung von Feinmaterial sorgt in Bodenhorizonten, die ohnehin bereits aus vorwiegend grobem Substrat bestehen, für eine weitere Erhöhung der Wasserleitfähigkeit. Die Auswaschung von Feinmaterial wird begünstigt durch eine (relativ) undurchlässige Schicht im Liegenden. Sind Bereiche hoher Durchlässigkeit als röhrenartige Hohlformen ausgebildet, so werden sie – ebenso wie erweiterte Makroporen – häufig auch als

pipes angesprochen (ZUIDEMA, 1985; JONES, 1971).

(2) *Versatz ›alten‹ Wassers durch Druckübertragung (translatory flow)*

Der ereigniswirksame unterirdische Versatz von Wasser, welches bereits vor dem Niederschlagsereignis im Boden gespeichert war, ist an die Existenz bzw. Entstehung zusammenhängender gesättigter Bereiche gebunden, die innerhalb kurzer Zeit auf eine rasche Erhöhung des hydraulischen Gradienten reagieren. Gute Bedingungen hierfür sind eine in hangabwärtiger Richtung hohe hydraulische Leitfähigkeit des Bodens über einer geringdurchlässigen Basis sowie gute Infiltrationseigenschaften. An der Erhöhung des hydraulischen Gradienten sind sowohl Matrixfluss als auch schneller Makroporenfluss beteiligt. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist ein rasches Auspressen großer Mengen ›alten‹ Wassers (pre-event water) am Hangfuß bei im Vergleich zum freien Makroporenfluss geringen Fließgeschwindigkeiten (SKLASH et al., 1986). Dieser Vorgang ist mit den Begriffen *translatory flow* bzw. *piston flow effect* (BURT, 1989) sowie *kinematic pressure wave effect* (BEVEN, 1989) belegt worden.

(3) *Groundwater ridging*

Mit groundwater ridging wird ein rasches Ansteigen des Kapillarsaums der Grundwasseroberfläche in einer ausgedehnten Talsohle bezeichnet. Folge hiervon ist ein stark erhöhter hydraulischer Gradient in Richtung Gerinnebett, der (s.o.) zum raschen Auspressen alten Wassers ins Gewässernetz führt (SKLASH & FARVOLDEN, 1979). Dies wird durch gute Infiltrationseigenschaften und eine geringdurchlässige Basis begünstigt. Wie BONELL (1998) anmerkt, ist die Existenz dieses Phänomens jedoch nicht unumstritten.

Den zeitlichen und räumlichen Skalenbezug für die im Hangmaßstab auftretenden lateralen Abflussbildungsprozesse stellt Abb. 2.2, S. 9 her. HORTONScher Oberflächenabfluss auf undurchlässigen Flächen kann unmittelbar nach deren Benetzung einsetzen. Demgegenüber ordnen BLÖSCHL & SIVAPALAN (1995) dem Sättigungsflächenabfluss eine tendenziell um die Phase der Aufsättigung des Oberbodens verzögerte Reaktion zu, insofern die gesättig-

ten Verhältnisse nicht bereits vor Beginn des Niederschlagsereignisses bestanden haben. Während allerdings HORTONScher Oberflächenabfluss prinzipiell auch lokal auf einem Bodenmonolith beobachtet werden kann, ist DUNNEScher Oberflächenabfluss an konvergierende Fließverhältnisse im Untergrund und damit an einen unterirdischen *Einzugsbereich* in der Hangskala gebunden. Verglichen mit den Abflussbildungsprozessen auf der Landoberfläche erstrecken sich die Reaktionszeiten von *ereigniswirksam* reagierendem unterirdischem Abfluss über ein wesentlich größeres Intervall der logarithmischen (!) Zeitskala in Abb. 2.2, S. 9. Die Größe dieses Zeitintervalls ist zum einen von den unterirdischen Fließprozessen selbst, zum anderen aber auch von der Größe des betrachteten Gebietes abhängig, da die Gebietsgröße bei gegebener Niederschlagsdauer darüber entscheidet, welcher Anteil des aus vorwiegend unterirdischen Abflussbildungsprozessen freigesetzten Wasservolumens noch dem Hochwasserereignis und welcher bereits dem Basisabfluss zuzurechnen ist. Als Folge davon sind auch die Begriffe *subsurface stormflow* und *Ereignismaßstab (event scale)* zeitlich nicht voneinander zu trennen.

2.1.4.3 Abflussprozesse auf Einzugsgebietsebene

Als wesentliche neue Einflussgröße tritt im Einzugsgebietsmaßstab das Gewässernetz hinzu. Eine gute Beschreibung dafür, wie sich der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften gegenüber dem des Gewässernetzes beim *Übergang* vom *mikro-* zum *makroskaligen* Einzugsgebiet verschiebt, gibt BEVEN (1991b):

Die Darstellung geht aus von einem aus vorwiegend konvergierenden Hangstücken zusammengesetzten (mikroskaligen) Gebiet, welches zur Tiefenlinie hin in den Anfang eines Gerinnes entwässert, also von den *Fließprozessen am Hang* dominiert wird. Im humiden Klimabereich sind dies (siehe Kap. 2.1.4.2) vorwiegend unterirdische Fließprozesse sowie deren Auswirkung auf das Entstehen von Oberflächenabfluss. Während im mikroskaligen Bereich der Niederschlag als annähernd räumlich konstant angesehen werden kann, wird die Dynamik der Fließprozesse von der kleinräumigen Heterogenität von Boden und Vegetation beeinflusst.

Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße gewinnt die *zeitliche und räumliche Variabilität* des Niederschlages an Bedeutung. Gleichzeitig nimmt die Heterogenität der Vegetation, der Bodencharakteristika und der Hangformen bzw. der Topographie allgemein zu. Außerdem wächst, wie bereits erwähnt, der Einfluss des Gewässernetzes auf den Verlauf der Hochwasserganglinie, wohingegen der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften bzw. der Abflussbildungsprozesse am Hang immer mehr in den Hintergrund tritt. KIRKBY (zitiert in BEVEN, 1991b) macht hierfür vor allem das Verhältnis der *Zeitskalen* von Fließprozessen am Hang zu Fließprozessen im Gerinne verantwortlich, da mit zunehmender Einzugsgebietsgröße die *Aufenthaltszeiten im Gewässernetz* deutlich steigen, die Fließzeiten am Hang sich jedoch häufig nur unwesentlich erhöhen.

Gründe für die steigenden Aufenthaltszeiten im Gewässernetz wiederum sind einerseits das Anwachsen des Gewässernetzes insgesamt. Andererseits wächst mit zunehmender Einzugsgebietsgröße aber auch der Anteil an Bereichen mit geringerem Gefälle, was nicht nur geringere Fließgeschwindigkeiten im Gerinne mit sich bringt, sondern auch Verzögerungen des Gerinneabflusses durch Uferspeicherung und Vorlandüberflutungen ermöglicht. Verstärkend kommt hinzu, dass die vorwiegend geraden Hänge tieferer Einzugsgebietslagen meist auch weniger zur Bildung schneller Abflusskomponenten neigen als die im Englischen als *headwater areas* angesprochenen konvergierenden Hänge höherer Bereiche. BEVEN (1991b) erklärt dies mit der Tendenz konvergierender Hänge zur Ausbildung von Zonen hoher Bodenfeuchte am Hangfuß, welche sowohl schnelles unterirdisches Fließen als auch die Entstehung von Sättigungsflächenabfluss begünstigen. Dieser Zusammenhang äußert sich auch in einer tendenziellen Abnahme der Hochwasserabflussspende flussabwärts (BURT, 1989).

Auf eine weitere wichtige Konsequenz der Verschiebung der *relativen Zeitskalen* von Abflussbildungsprozessen und Abflussprozessen im Gerinne macht HEWLETT (1982) aufmerksam:

»However, it is not the peak discharge in the headwaters that produces the downstream flood, but rather the volume of stormflow released by the headwater areas. [...] As many first-order basins contribute stormflow, their respective peak discharges are staggered in time so that

tributary peak rates are not additive downstream, whereas tributary volumes are additive downstream.«

Für die Einschätzung des Einflusses der Abflussbildung an den Hängen höherer Einzugsgebietslagen auf das Hochwassergeschehen auf Einzugsgebietsebene bedeutet dies – übersetzt in die Skalenterminologie:

- (1) Die oben beschriebene *zeitliche* Differenzierung der verschiedenen Abflussbildungsprozesse an den Hängen höherer Einzugsgebietsbereiche wird mit zunehmender Einzugsgebietsgröße immer unwichtiger.
- (2) Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße tritt die Bedeutung der Verzögerung des an den Hängen oberer Einzugsgebietslagen innerhalb des Ereignismaßstabes zum Abfluss kommenden Niederschlages gegenüber der volumenwirksamen Speicherung von Wasser über das Ereignis hinaus in den Hintergrund.

2.1.5 Speichermechanismen der Landschaft

Zur Bewertung des Einflusses der physiographischen Faktoren auf das Hochwassergeschehen wird die in Kap. 2.1.1 erläuterte und in Abb. 2.1, S. 6 verwendete *Speicheranalogie* wieder aufgegriffen. Hierbei sollen, wie auch im weiteren, die *flächenhaften* physiographischen Faktoren und deren Einfluss auf die *Abflussbildung* bei Hochwasser im Vordergrund stehen. Retentionseffekte des *Gewässernetzes* werden nur randlich angesprochen.

Wird die *Kapazität* der Speicher eines Gebietes insgesamt überschritten, so haben dessen Speichereigenschaften keinen Einfluss mehr auf den Hochwasserverlauf. Dies belegt eine Arbeit von WOOD et al. (1990), die für bestimmte Einzugsgebiete zeigen konnten, dass die Bildung von Oberflächenabfluss bei Hochwasserereignissen mit Jährlichkeiten unterhalb von etwa $T_n = 15$ a von den *Gebietseigenschaften* geprägt ist, die Abflussbildung größerer Ereignisse jedoch zunehmend von den *Niederschlagscharakteristika* bestimmt wird.

Im folgenden wird zwischen den Speichermedien der Landschaft *Vegetation, Boden, Geologie* und *Topographie* unterschieden. Einen Eindruck von der

Wirkungsweise dieser Speichermechanismen der Landschaft, der Bedeutung der Feuchtebedingungen im Einzugsgebiet sowie dem Einfluss der Fließprozesse im Gewässernetz vermittelt *Abb. 2.4*, S. 18. Urbane Gebietsteile sind dabei aufgrund ihrer

von unversiegelten Bereichen grundsätzlich verschiedenen Abflussdynamik gesondert dargestellt. Das Fließschema zeigt außerdem die Wirkungsweise gezielt geschaffener dezentraler Rückhaltemaßnahmen.

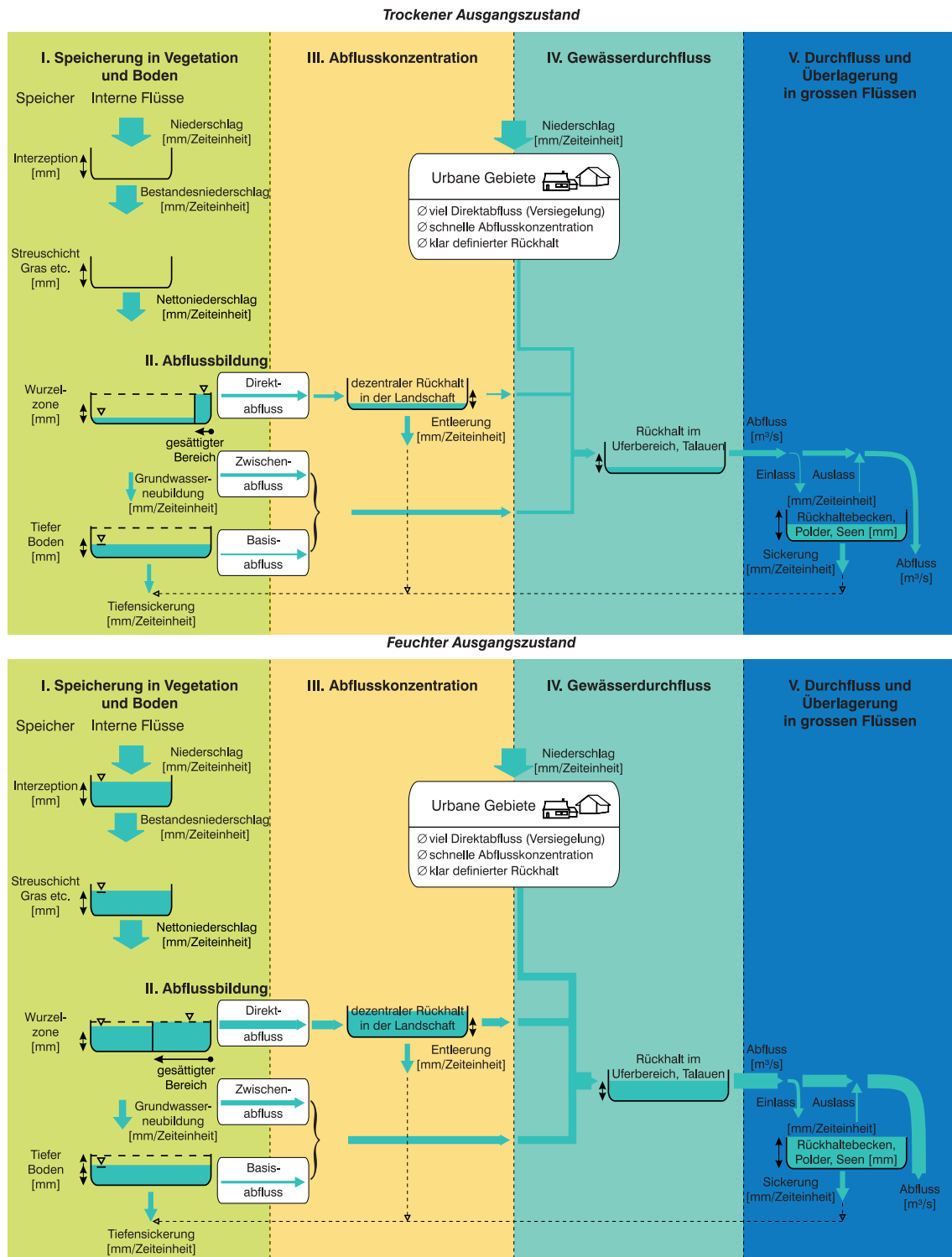


Abb. 2.4 Wirkungsgeflecht von Speicherung, Abflussbildung und Gewässerdurchfluss

Kriterien für die Bewertung der Speichermedien in Bezug auf den Ereignismaßstab sind deren Beitrag zur Verminderung und Verzögerung der Hochwasserabflussbildung.

Unter *Verminderung* ist in diesem Zusammenhang sowohl der langfristige Entzug von Wasser durch Evapotranspiration als auch die mittel- und langfristige Speicherung von Wasser über das Ereignis hinaus zu verstehen. *Verzögerung* meint demgegenüber die kurzfristige Speicherung von Wasser innerhalb des Ereignismaßstabes und die damit verbundene Änderung der zeitlichen Verteilung des abfließenden Wasservolumens.

Vom Standpunkt des Hochwasserschutzes aus sind Verminderung und Reduktion der Hochwasserfülle immer von Vorteil. Ob dahingegen die Veränderungen von Hochwasserscheitel und -dauer aufgrund von Verzögerungen der Abflussbildung bzw. des Wellenablaufs als wünschenswert angesehen werden können, ist vom Betrachtungsort und -maßstab ebenso abhängig wie von der Interessenslage des Betrachters. Dies soll im folgenden näher erläutert werden:

- (1) *Ortsabhängigkeit*: Die Bewertung der verzögernden Wirkung einer Teilfläche bzw. eines Gewässerabschnitts auf den Ablauf eines Hochwasserereignisses muss sich immer auf die Durchflussganglinie an einer zuvor festgelegten Stelle im Gewässernetz beziehen.
- (2) *Maßstabsabhängigkeit*: Als Konsequenz aus den in Kap. 2.1.2 dargestellten Maßstabsabhängigkeiten der an der Hochwasserentstehung beteiligten Prozesse muss aus einer Bewertung der hochwasserverzögernden Wirkung beispielsweise eines Hangstücks klar hervorgehen, ob sich die Bewertung auf den Hangfuß, auf ein aus mehreren Hangstücken zusammengesetztes kleines Einzugsgebiet oder ein größeres Einzugsgebiet bezieht. Aus dieser Festlegung leitet sich dann auch die zugehörige Zeitskala ab.
- (3) *Interessenabhängigkeit*: An der Art des zeitlichen Verlaufs eines Hochwassers kann sehr unterschiedliches Interesse bestehen. Dieses Interesse kann sich auf einen bestimmten Ort am Gewässernetz oder die Nutzung des Gewässernetzes an sich beziehen. Für die wasserwirtschaftliche Praxis ist bei der Bemessung von Flussausbauten oder Hochwasserentlastungen vor allem der Hochwasserscheitel von Interesse. Die Hochwasserdauer ist demgegenüber z.B. für die Standsicherheit von Dämmen wichtig (DYCK & PESCHKE, 1995).

Bewertungsmaßstäbe sind in diesem Fall die Höhe der damit verbundenen finanziellen Aufwendungen, entstehende Nutzungskonflikte und immer häufiger auch ökologische Aspekte.

Die nachfolgende Beschreibung und Bewertung der physiographischen Faktoren kann lediglich für die von Ort, Maßstab und Interessenlage unabhängigen Einflüsse zu allgemeingültigen Aussagen kommen. Darüber hinaus soll jedoch versucht werden, die für die einzelnen Speichermedien spezifischen Abhängigkeiten von der räumlichen Lage und dem betrachteten Größenmaßstab herauszuarbeiten.

Obwohl sich die Randbedingungen für wirksame Hochwasserverminderung und -verzögerung in den flächenhaften Speichern Vegetation, Boden und Gelände zum Teil entweder gegenseitig bedingen oder einander ausschließen, wird bewusst versucht, die flächenhaften Speichermechanismen unabhängig voneinander zu beschreiben. Dabei soll deutlich werden, dass aus dem Blickwinkel des Hochwasserschutzes positiv konnotierte Gebietseigenschaften wie z.B. eine *lokal* hohe Infiltrationsrate noch keine Aussage über deren positiven oder negativen Einfluss auf das Hochwassergeschehen im *Einzugsgebietsmaßstab* zulassen.

2.1.5.1 Vegetation

Die Vegetation trägt in mehrfacher Hinsicht zur Verminderung und Verzögerung von Hochwasserabfluss bei:

- (1) Vorübergehende Speicherung und Verdunstung von Niederschlagswasser an Pflanzenoberflächen und damit Verminderung des Hochwasservolumens.
- (2) Verzögerung von Oberflächenabfluss durch Erhöhung der Rauigkeit der Bodenoberfläche.
- (3) Tendenzielle Verbesserung der Infiltrationsbedingungen durch Wurzelgänge.
- (4) Dämpfung des an der Bodenoberfläche auftretenden Niederschlages und damit Schutz vor Verschlammung und Verdichtung der Bodenoberfläche sowie deren negativen Folgen für die Infiltration von Niederschlagswasser.
- (5) Verhinderung von Krustenbildung an der Bodenoberfläche durch Schutz vor Austrocknung des Oberbodens.

Die als *Interzeption* bezeichnete vorübergehende Speicherung von Niederschlag an Pflanzenoberflächen trägt vor allem zu Beginn eines Niederschlagsereignisses zur Verminderung des hochwasserwirksam zum Abfluss kommenden Wasservolumens bei (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1990). Anhaltswerte für die Interzeptionsspeicherung von flüssigem Niederschlag sind nach LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1995) bis zu 2 mm für Grasland und bis zu 5 mm für Wald.

Die INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1999) weist außerdem auf die *kumulative Wirkung* der Interzeption hin, die im Jahresmittel ungefähr 25% des Freilandniederschlags ausmacht (Nadelwald, 30–50%; Laubwald, 15–20%; Landwirtschaft, 10%). Unter Beständen mit hoher Interzeptionsspeicherkapazität wird die Auffüllung des sommerlichen Bodenwasserdefizits gegenüber niederwüchsigen Beständen um bis zu 2 Monate hinausgezögert. Die Aufnahmefähigkeit des Bodens für Wasser bleibt somit länger erhalten.

Prinzipiell lässt sich die Verringerung des die Bodenoberfläche erreichenden Niederschlagsvolumens durch den Interzeptionsspeicher unabhängig vom Flächenmaßstab als Wirkung pro Flächeneinheit ausdrücken. Für die tatsächliche Verminderung des Hochwasserabflusses ist jedoch, wie für alle flächenhaften Einflussfaktoren, der Anschluss an das Gewässernetz von Bedeutung. Leistet eine Fläche bei fehlender Vegetation keinen Beitrag zur Hochwasserentstehung, so bleibt sie auch vegetationsbestanden wirkungslos für die Verminderung von Hochwasser.

2.1.5.2 Boden

Die wesentlichen Einflüsse der Bodenzone auf die Abflussbildung bei Hochwasser wurden bereits in Kap. 2.1.4.1 und Kap. 2.1.4.2 benannt. Aus dem Wirkungsgeflecht dieser Einflüsse lassen sich verschiedene *Eigenschaften* ableiten, die im Boden zur Verminderung und Verzögerung von Hochwasserabfluss führen. Da die *Wirkung* dieser Eigenschaften aber, genauso wie die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren, maßstabsabhängig sind, wird auch hier zwischen den Maßstabsbereichen Bodenmonolith, Hang und Einzugsgebiet unterschieden.

Aus den Parametern *Wasserleitfähigkeit* und *Wasserhaltevermögen/Speicherkapazität* sowie den

Infiltrationseigenschaften eines Bodenmonoliths (RAWLS et al., 1992) ergeben sich in der *lokalen Skala* folgende Eigenschaften, die zur Verminderung und Verzögerung der Abflussbildung beitragen:

- (1) Hoher Anteil an Mittelporen zur Speicherung von Niederschlagswasser.
- (2) Gute Infiltrationseigenschaften gekoppelt mit rascher Tiefenperkolation.

Das *aktuelle* Speichervermögen eines Bodens ist stark von den Feuchtebedingungen zu Beginn des Niederschlagsereignisses abhängig. Da der Bereich der Feinporen im humiden Klimabereich nur sehr selten entleert wird, kann jedoch bereits das Volumen der Mittelporen als *maximal speicherbare Niederschlagsmenge* angesehen werden. Wie Tab. 2.8, S. 34 zeigt, liegt dies für Böden mit geringen Anteilen an organischer Substanz bei einer angenommenen Mächtigkeit von 1 m in etwa zwischen 50 und 250 mm. Die INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1999) gibt als Größenordnung einen Bereich von 100 bis 300 mm an.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass in Böden mit hohem Mittel- und Feinporenanteil das infiltrierte Wasser unter sonst gleichen Bedingungen auch länger im Boden verbleibt als in grobporenreichen Böden, was sich bei rasch aufeinanderfolgenden Niederschlägen negativ auf das aktuelle Speichervermögen des Bodens auswirken kann. Des weiteren führt das Auftreten von *bypass flow* insbesondere bei kurzen konvektiven Niederschlägen im Sommer dazu, dass Teile des Mittel- und Feinporenraums nicht speicherwirksam werden. Eine im Raum Oxford auf tonig-lehmigem Substrat durchgeführte Studie ergab, dass auf diese Art bis zu 20% der Sommerniederschläge den Oberboden umgehen können (in ANDERSON & BURT, 1990).

Bodeneigenschaften, welche in der *Hangskala* zur Verminderung und Verzögerung ereigniswirksamer Abflussbildung beitragen, ergeben sich im Umkehrschluss zu Kap. 2.1.4.2 aus der Abwesenheit der dort dargestellten Voraussetzungen für das Abfließen schneller Abflussbildungsprozesse:

- (1) Abwesenheit bevorzugter unterirdischer Fließwege in hangabwärtiger Richtung.

- (2) Abwesenheit einer oberflächennahen stauenden Schicht (Die Anwesenheit einer stauenden Schicht begünstigt demgegenüber die Bildung hochdurchlässiger Bereiche und die Ausbildung zusammenhängender gesättigter Bereiche. Gesättigte Bereiche ermöglichen das Auftreten von Sättigungsflächenabfluss und translatory flow).

Beim Übergang zum *mikroskaligen Einzugsgebiet* gewinnen zusätzlich solche Faktoren an Einfluss, die nicht in erster Linie von den Bodeneigenschaften bestimmt sind. Hochwasserabflussvermindernd und -verzögernd wirken hier:

- (1) Vorfluterferne Lage von Bereichen mit schneller Reaktion auf Niederschlagsereignisse.
- (2) Vorherrschen von geraden und divergenten Hängen in Vorfluternähe.
- (3) Kleine abflusswirksame Hanglängen.

KÖLLA (1986) geht davon aus, dass in kleinen Einzugsgebieten bei Vorherrschen unterirdischer Fließprozesse *Hanglängen* bis maximal 100 m Erstreckung vom Gerinne weg zu einem Hochwasser beitragen können. Darüber hinaus ist gerade in kleinen Einzugsgebieten die Lage von Hängen unterschiedlicher Eigenschaften zueinander und zum Gewässernetz von Bedeutung. Ebenso macht sich der Einfluss der *Topographie* auf die Verteilung der Feuchteverhältnisse im Boden und auf damit assoziierte Abflussbildungsprozesse vor allem in mikroskaligen Einzugsgebieten bemerkbar (BURT, 1989). Aufgrund ihres Einflusses auf die Bodenbildung sind Topographie und Vorfluternähe jedoch nicht unabhängig von den Bodeneigenschaften zu sehen.

2.1.5.3 Geologie

Auch der Einfluss der geologischen Ausstattung eines Einzugsgebietes auf die Hochwasserentstehung ist in hohem Maße von der *Gebietsgröße* abhängig.

Wie in *Kap. 2.1.5.2* beschrieben, begünstigen geringmächtige, gut durchlässige Böden über einer geringdurchlässigen Gesteinsbasis die Entstehung von *subsurface stormflow*. Hochwasservermindernd wirken sich in *kleinen Einzugsgebieten* deshalb folgende Eigenschaften des Gesteinsuntergrundes aus:

- (1) Guter *Anschluss* des Bodens an einen Grundwasserleiter.
- (2) Hohe *hydraulische Leitfähigkeit* des Grundwasserleiters zur raschen Aufnahme von perkolierendem Niederschlagswasser.

In *großen Gebieten*, wo vor allem langanhaltende Niederschläge geringer Intensität zu Hochwassern führen, kann ein schnell reagierender oberflächennaher Grundwasserleiter auch selbst zum Hochwasser beitragen. Hier gewinnen folgende hochwasservermindernde Eigenschaften an Bedeutung:

- (1) Große *Speicherkapazität* des Grundwasserleiters mit entsprechend gedämpftem Reaktionsverhalten.
- (2) Geringe *Fließgeschwindigkeiten* im Grundwasserleiter.

Eine grobe Übersicht über die Charakteristika der verschiedenen Typen von Grundwasserleitern vermittelt *Tab. 2.1*, S. 21.

Tab. 2.1 Charakteristika von Grundwasserleitern in Bezug auf deren möglichen Beitrag zur Hochwasserentstehung (verändert nach FELDWISCH, 1999)

	Fließgeschwindigkeit	Speichervermögen	Reaktionszeit	Disposition für subsurface stormflow
Porengrundwasserleiter	niedrig	hoch	lang	gering
Kluftgrundwasserleiter	abhängig von Klüftigkeit und Kluftweite	gering	mittel	abhängig von Deckschichtmächtigkeit und Hangneigung
Karstgrundwasserleiter	hoch	gering bis hoch	kurz	gering

2.1.5.4 Topographie

Die hochwasservermindernde und -verzögernde Wirkung des Geländes setzt sich im wesentlichen aus der Benetzung der Oberfläche, dem Rückhalt von Wasser in abflusslosen Hohlformen und der den Oberflächenabfluss behindernden Wirkung einer rauen Oberfläche zusammen. Der daraus resultierende Flächenrückhalt wird von der LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1995) mit bis zu 10 mm veranschlagt. Offen bleibt dabei, unter welchen Umständen dieser Maximalwert erreicht wird. Experimentelle Untersuchungen von HELMING (1992) ergaben auf den vermessenen Hängen Werte für den *Muldenrückhalt* von weniger als 1 mm.

Eine Schneedecke kann darüber hinaus sowohl über lange Zeit hinweg festen Niederschlag akkumulieren, als auch bis zu 50% des Wasseräquivalents der Schneedecke zusätzlich an Regenniederschlag aufnehmen (DYCK & PESCHKE, 1995). Eigenschaften der Geländeoberfläche, die Muldenrückhalt, hohe Benetzungsverluste und die Verringerung von Oberflächenabfluss begünstigen, sind:

- (1) Geringe Hangneigung als Voraussetzung für die Bildung abflussloser Hohlformen größeren Fassungsvermögens. Der Einfluss der Hangneigung auf das Entstehen von Oberflächenabfluss ist nach FELDWISCH (1999) bei einem Gefälle von mehr als 3 bis 5° gering.
- (2) Kuppiges Relief (Makrotopographie, Größenordnung Meter bis Dekameter) bzw. wellige Bo-

denoberfläche (Mikrotopographie, Größenordnung Millimeter bis Dezimeter).

- (3) Geringdurchlässige Bodenoberfläche in Mulden, um das gespeicherte Wasser so lange wie möglich schnellen unterirdischen Fließprozessen zu entziehen und das Speichervolumen der Hohlform auszuschöpfen.
- (4) Hohe Oberflächenrauigkeit mit der Folge erhöhter Benetzungsverluste und verringertem Oberflächenabfluss.

Reichen in einem ansonsten geringdurchlässigen feinkörnigen Oberboden Makroporen (z.B. in Form von Schrumpfungsrissen) bis an die Oberfläche, so erleichtert ein geringfügiger Überstau den Eintritt von Wasser in die Makroporen. Wie aus dem in Kap. 2.1.5.2 angeführten Beispiel aus dem Raum Oxford hervorgeht, wird damit das Auftreten von *bypass flow* unterstützt. Dies kann im Einzelfall zwar eine rasche unterirdische Abflussreaktion begünstigen. In den meisten Fällen wirkt *bypass flow* jedoch durch die verstärkte Tiefenperkolatation eher hochwasservermindernd und -verzögernd.

Voraussetzung für die Ausschöpfung des Speichervolumens im Gelände ist eine geringdurchlässige Oberfläche. Dies schließt eine schnelle Infiltration, die vor allem in Verbindung mit rascher Tiefenperkolatation hochwasservermindernd wirkt, aus. Die wünschenswerte Durchlässigkeit der Oberfläche hängt im übrigen davon ab, ob bereits kleine Niederschlagsintensitäten oder erst größere einen Überstau und damit eine Füllung der Hohlform bewirken sollen.

2.2 EINFLUSS DER LANDNUTZUNG AUF DIE HOCHWASSERENTSTEHUNG

2.2.1 Landnutzung als Teil des ökologischen Systems Landschaft

Landnutzung, Standortbedingungen und Lebensgemeinschaften bestimmen durch gegenseitige Beeinflussung das ökologische System einer Landschaft (DUNN et al., 1990). Während die Faktoren Standortbedingung und Lebensgemeinschaften ursprünglich von der Natur vorgegeben werden, ist die Landnutzung ein eindeutig *anthropogen geprägtes Ge-*

bietscharakteristikum. Sie kann als die menschliche Aktivität definiert werden, die direkt Einfluss auf das Land ausübt, seine Ressourcen nutzt oder durch Eingreifen in ökologische Prozesse das Funktionieren der Landbedeckung beeinflusst (VELDKAMP & FRESCO, 1996). Sie setzt sich aus der räumlichen Ausbreitung als *aktuelle Bodenbedeckung und der Bewirtschaftungsweise* zusammen. Ihre zeitliche Dynamik unterliegt den Jahreszeiten als *Jahresgang der Phänologie* und damit als aktueller Zustand von Vegetation und Boden.

Die Landnutzung repräsentiert weitläufige *Trends in Gesellschaft und Wirtschaft* und wird von sehr vielen verschiedenen Variablen auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen bedingt (RIEBESAME et al., 1994). Die *konkurrierenden Raumansprüche* werden bis auf wenige Flächenausweisung zum Wohle der Allgemeinheit und des Naturschutzes, meist von der größten Rentabilität bestimmt, die von der vorherrschenden Marktwirtschaft und der Politik abhängen (O'CALLAGHAN, 1996). Die Beachtung von Nachhaltigkeit der Nutzung und die daraus entstehenden Auswirkungen auf das ökologische Gleichgewicht der Landschaft treten dabei in den Hintergrund.

Landnutzung in Europa wird in der Regel in drei nutzungsbestimmte Landnutzungskategorien unterteilt (VENEKLAAS et al., 1994; BMELF, 1996):

- (1) Siedlungs-, Verkehrs- und Industrielandschaften
- (2) Agrarische Landschaften
- (3) Waldflächen und naturnahe/quasinatürliche Landschaften

Das Gleichgewicht dieser Kategorien ist *hoch dynamisch* und pendelt sich fast niemals auf einen Stillstand ein. Übergänge von einer zu anderen Landnutzungskategorie sind nur bedingt möglich, weil sich häufig durch die Inanspruchnahme Struktur und Ökologie der Landschaft komplett verändert haben. Die Rückführung in die Ausgangssituation ist deshalb oft nicht realisierbar (O'CALLAGHAN, 1996).

Jede Bewirtschaftung der Fläche stellt einen Eingriff in das ökologische Gleichgewicht dar. Seit dem Beginn der agrarischen Landnutzung in der Jungsteinzeit hat der Mensch die Landoberfläche verändert und zu einer *Kulturlandschaft* verwandelt (KLINK, 1995). Industrialisierung und Intensivierung von Forst- und Landwirtschaft in den vergangenen 200 Jahre hat die *Nutzungsintensität* nochmals verstärkt. Dadurch wurden nicht nur die ungenutzten und damit noch natürlichen Gebiete verringert, sondern auch biotische und abiotische Ressourcen beeinträchtigt (vgl. RIEBESAME, 1994).

Bisher liegen nur wenige verallgemeinerbare Erkenntnisse zum Einfluss anthropogener Veränderungen der Landschaft auf die Abflussbildung bei Hochwasser vor. Die Arbeiten zur Auswirkung einzelner Veränderungen beschränken sich zudem oft

auf die Mikroskala (ØVERLAND, 1990). Arbeiten, die in der Mesoskala durchgeführt wurden, beschreiben im Gegensatz dazu in den meisten Fällen die gesamthaften Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen an verschiedenen Stellen im Einzugsgebiet, so dass sich einzelne Effekte nur schwer isolieren und quantifizieren lassen.

Analog zu den in Kap. 2.1 getroffenen Aussagen vermuten BRONSTERT et al. (1993), dass der Einfluss flächenhafter anthropogener Eingriffe in mesoskaligen Einzugsgebieten für Ereignisse mit Jährlichkeiten von $0,5 \text{ a} < T_n < 5 \text{ a}$ am größten, für extreme Ereignisse mit $T_n > 20 \text{ a}$ jedoch von untergeordneter Bedeutung für den Hochwasserverlauf ist. Ebenso wird allerdings darauf hingewiesen, dass systematische Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem mittleren Wiederkehrintervall eines Niederschlagsereignisses und der Wirkung flächenhafter Eingriffe auf das daraus resultierende Abflussgeschehen bisher nicht durchgeführt wurden.

Ein Nebeneffekt dieser Abhängigkeit der Auswirkungen anthropogener Veränderungen von der Ereignisgröße ist deren Einfluss auf die Hochwasserstatistik. Wird an ein Kollektiv von Hochwasserwerten, die sich im Bereich kleiner Jährlichkeiten durch anthropogene Eingriffe erhöht haben, eine Verteilungsfunktion angepasst, so kann sich dadurch der Verlauf der Wahrscheinlichkeitsfunktion auch im Bereich der hohen Jährlichkeiten (Extrapolationsbereich) ändern, was den Tatsachen nicht entsprechen muss (DYCK & PESCHKE, 1995).

Auf Einzugsgebietsebene ist, wie BURT (1989) feststellt, für den Hochwasserscheitel neben der Art und Ausdehnung des anthropogenen Eingriffs auch dessen *Lage* im Gebiet entscheidend, da die Abflussganglinie am Gebietsauslass ja die *Überlagerung* der einzelnen Hochwasserwellen aus den Teileinzugsgebieten darstellt (siehe Kap. 2.1.4.3). Demzufolge kann eine durch Landnutzungsänderung hervorgerufene Abflussverschärfung in einem *Teil des Gebietes* je nach Überlagerung der Teilwellen am Auslass des *Gesamteinzugsgebietes* sowohl zu einer Aufhöhung als auch zu einer Reduktion des Scheitels beitragen. Aus diesem Grund ist auch bei der Bewertung anthropogener Eingriffe zu beachten, dass isolierte Betrachtungen einzelner Veränderungen im Hangmaßstab noch keine Angaben zu de-

ren Auswirkungen auf das Hochwasserverhalten im Einzugsgebietsmaßstab zulassen.

2.2.2 Versiegelung der Bodenoberfläche

2.2.2.1 Wirkungsmechanismen

In der Siedlungswasserwirtschaft gilt nach DIN 4045 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1985) lediglich der befestigte und undurchlässige Teil des an die Kanalisation angeschlossenen Entwässerungsgebietes als versiegelte Fläche. Im folgenden wird *Versiegelung* allgemeiner als Überbegriff für eine Abdichtung der Bodenoberfläche aufgrund von Baumaßnahmen wie Straßen, Gehwegen, Parkplätzen und Häusern verwendet. Ein gut ausgebautes Entwässerungssystem verstärkt den Einfluss dieser Abdichtung. HARMS (1986) fasst die Auswirkungen der Versiegelung der Bodenoberfläche und des Ausbaus der Entwässerungssysteme als *Urbanisierungseffekte* zusammen. Versiegelung wird unstrittig als tendenziell hochwasserverschärfend angesehen. Potentielle Auswirkungen von Versiegelung auf das Hochwassergeschehen sind nach HARMS (1986):

- (1) *Erhöhung der Scheitelabflüsse* insbesondere von Hochwassern kleiner bis mittlerer Jährlichkeiten infolge der geringen Verzögerung und Speicherung auf versiegelten Oberflächen.
- (2) *Vergrößerung der Hochwasserfülle* aufgrund der geringen Speicherkapazität versiegelter Oberflächen.
- (3) *Zeitliche Vorverlagerung der Wellenscheitel* aufgrund (a) schneller oberirdischer Fließprozesse auf Flächen mit oft geringer Oberflächenrauigkeit und (b) rascher Ableitung des anfallenden Niederschlagswassers bei gutem Anschluss an die Kanalisation oder einen Vorfluter.

Das Ausmaß dieser möglichen Auswirkungen ist nach VERWORN & HARMS (1984) auf Einzugsgebietsebene abhängig von (1) dem Anteil versiegelter Flächen im Gebiet, (2) der Lage der versiegelten Flächen im Gebiet, (3) der Abflussbereitschaft der versiegelten Böden vor deren Versiegelung, (4) den Feuchtebedingungen zu Beginn des Ereignisses, (5) der Größe und Art des Niederschlagsereignisses sowie (6) der Einzugsgebietsgröße.

Da das Problem der Versiegelung bereits frühzeitig erkannt wurde, sind insbesondere seit Anfang der 70er Jahre zahlreiche Modellrechnungen zum Einfluss von Siedlungsflächen auf das Hochwassergeschehen durchgeführt worden. Die weitaus meisten dieser Studien beschränken sich aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen physiographischen und hydroklimatischen Einflussfaktoren auf *mikro- und mesoskalige Gebiete*. Nach wie vor kommen dabei vorwiegend Verfahren zur Anwendung, die auf Regressionsbeziehungen beruhen. Aufgrund des fehlenden physikalischen Bezuges der daraus abgeleiteten Parameter besitzen diese Verfahren nur für den durch Analysedaten abgedeckten Bereich von Ereignissen Gültigkeit. Dennoch sind sie ein übliches Mittel zur Quantifizierung der Versiegelungsauswirkungen gerade auch für extreme Niederschlagsereignisse. HARMS (1986) vermerkt zu diesen Verfahren: »Der Extrapolation in Bereiche mit einer Wiederkehrzeit von $T_n > 20$ a muss bei allen Verfahren mit Skepsis begegnet werden.«

Untersuchungen von MEIJERING (1995) und KOEHLER (1996) bestätigen die These, dass mit zunehmender Ereignisjährlichkeit der Einfluss der Versiegelung zurück geht, weil dann auch das Speichervermögen unversiegelter Bereiche erschöpft wird (vgl. BAYRISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1998).

Bislang gibt es nahezu keine quantitativen Untersuchungen zum Einfluss von Siedlungs- und Verkehrsflächen auf das Hochwassergeschehen in großen Einzugsgebieten ($> 10000 \text{ km}^2$). KOEHLER startet in seiner Untersuchung von 1992 den Versuch einer Abschätzung für ein *makroskaliges* Einzugsgebiet mit einem von ihm selbst (KOEHLER, 1996) als »grob« eingestuften Flussgebietsmodell (FGMOD). Der Einfluss der Siedlungsfläche ging auch in diesem Maßstab mit steigender Jährlichkeit zurück.

Auf die *Bedeutung der Lage* anthropogen beeinflusster Teilflächen im Einzugsgebiet wurde bereits hingewiesen. Ein Beispiel dafür, dass Versiegelung auf einer Teilfläche eines Einzugsgebiets nicht zwingend zu einer Erhöhung der Scheitelabflüsse am Gebietsauslass führen muss, gibt VISCHER (1993). Er geht in seiner Studie davon aus, dass sich Einflüsse von Versiegelung im unteren Teil und Waldzunahme im oberen Teil seines Einzugsgebiets

ungefähr kompensiert haben müssen, da keine signifikante Änderung der Hochwasserabflüsse festgestellt werden konnte.

2.2.2.2 Parameterisierung

Die Stadt als Ökosystem wurde lange nur in sektoralen Analysen, die zur Minderung urbaner Belastung angestrengt wurden, Beachtung geschenkt. Erst durch die Berliner Schule der Stadtökologie wurden urbane Flächen in die deutsche Ökosystemforschung aufgenommen. Nach MEURER (1997) ist dieser Ansatz erst in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten verfolgt worden. Im Vordergrund standen dabei der Einfluss der Stadt auf das Klima und die Artenszusammensetzung. Der Schadstoffinput wurde für einige Flächen quantifiziert, aber nicht die Wirkung auf das Gesamtsystem und insbesondere auf die Hochwasserentstehung. Deshalb sind Parameter zur Beschreibung des Verhaltens urbaner Flächen nur sehr lückenhaft verfügbar.

Versiegelungsgrad

In ländlichen Siedlungen und städtischen Vororten kann der Anteil abgedichteter/undurchlässiger Flächen an der Siedlungsfläche mit bis zu 30 %, in den Kernstädten mit bis zu 90 % veranschlagt werden (KOEHLER, 1993). Industriegebiete weisen in der Regel hohe Versiegelungsgrade zwischen 75 und 90 % auf (SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG, UMWELTSCHUTZ UND TECHNOLOGIE, 1997).

Im Zeitraum von 1945 bis 1989 hat sich in der BRD der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der Gesamtfläche von 6 % auf 12,5 % mehr als verdoppelt (BACHMANN-ERDT et al., 1994). Durch die Wiedervereinigung mit den neuen Bundesländern ist der Bundesdurchschnitt der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 11,5 % gesunken (Stand 1993), weil das Gebiet der ehemaligen DDR mit durchschnittlich 7,9 % deutlich weniger stark überbaut ist (BISMUTH et al., 1998). SIEKER (1995) geht für die alten Bundesländer davon aus, dass die 12,5 % Siedlungs- und Verkehrsflächen 20 % bis 25 % zum Abflussvolumen großer Hochwasser beitragen. Diese sehr pauschale Aussage wird jedoch nicht belegt.

Vegetationsbedeckungsgrad

Der Vegetationsbedeckungsgrad urbaner Flächen bemisst für die Quantifizierung des Einflusses auf die Hochwasserentstehung die Fläche, auf der Interzeptionsspeicherung und Verdunstung stattfinden kann.

SUKKOP (1979) untersucht den Anteil an Vegetation nach unterschiedlicher Bebauungsdichte am Beispiel Berlin. Auffällig ist besonders der hohe Vegetationsbedeckung in der äußeren Randzone, der durch den großen Gartenanteil entsteht. Alleebäume, Dachgärten und Grünanlagen erzielen selbst in geschlossener Bebauung eine Vegetationsbedeckung von fast einem Drittel der Fläche (siehe Tab. 2.2, S. 25).

Tab. 2.2 Vegetationsbedeckung städtischer Ökosysteme nach SUKKOP (1979)

Landnutzungstyp	Vegetationsbedeckung [%]
Geschlossene Bebauung	32
Aufgelockerte Bebauung	55
Innere Randzone	75
Äußere Randzone	95

Die Böden urbaner Ökosysteme sind starken chemischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Je nach Bebauungsdichte können noch natürliche Böden vorhanden sein. Je höher die Bevölkerungsdichte ist, um stärker sind sie durch Düngung, Bewässerung und Schadstoffen verändert.

Die Entfernung des Falllaubs führt zur Minimierung der natürlichen Nährstoffversorgung, so dass häufig Armut an Humus und organischer Substanz herrscht. Die Untermischung technogener Substrate nimmt Einfluss auf die Bodenstruktur. Der durch fehlende Vegetationsrückstände entstehende Mangel an den Mineralien Kalzium, Kalium und Magne-

sium wird durch Bauschutt zum Teil so sehr überkompensiert, dass der Boden zum Teil pH-Werte über 7,5 erreicht. Dies schädigt die Bodenfauna und hemmt die Lösung von Spurenelementen.

Eine mechanische Belastung des Bodens entsteht durch die Störung der Horizontierung. Mischen, Planieren, Verdichtung, Auf- und Abtrag führt zu einer Zerstörung des Gefüges, so dass nur ein geringes Porenvolumen und eine verringerte Wasserspeicherkapazität vorhanden sind. Der hohe pH-Wert, Kontaminationen aus Industrie und Verkehr sowie der geringe Gehalt an organischer Substanz beeinträchtigt die Population der Bodenfauna. Dadurch sind die Sekundärporenentwicklung und Bioturbation sehr niedrig. In tonreichen Böden absorbieren Tonminerale Natriumsalze, die starke Quellungserscheinungen bewirken und die Sickerfähigkeit vermindern.

2.2.3 Ackerland

In der BRD werden nach BMELF (1996) mehr als die Hälfte (53,5%, Stand 1993) der Fläche landwirtschaftlich genutzt. Dennoch ist der Einfluss der Landwirtschaft auf die Hochwasserentstehung bisher aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflussfaktoren nur unzureichend untersucht (BRONSTERT et al., 1995). Noch mehr als für die Forschungsarbeiten zu den Einflüssen von Versiegelung gilt hier die Beschränkung der Arbeiten auf *kleine Einzugsgebiete* bis hin zu Hangparzellen. Gerade die im Rahmen der Erosionsforschung gewonnenen Erkenntnisse über den Oberflächenabfluss auf landwirtschaftlichen Flächen bei Starkregen stützen sich häufig auf *Beregnungsversuche*, die zwangsläufig auf kleinen Parzellen von selten mehr als 100 m² Grundfläche durchgeführt werden. Rückschlüsse auf unterirdische Fließprozesse lassen diese Untersuchungen meist nicht zu. Das Hauptaugenmerk bodenphysikalischer Untersuchungen im landwirtschaftlichen Bereich liegt dahingegen eher auf dem für das Pflanzenwachstum wichtigen längerfristigen Wasserhaushalt der Böden. Aussagen über laterale Fließprozesse im Boden sind deshalb auch anhand dieser Untersuchungen kaum möglich.

2.2.3.1 Wirkungsmechanismen und Parameterisierung in der lokalen Skala

Das Abflussverhalten landwirtschaftlich genutzter Flächen bei Hochwasser ergibt sich in der lokalen Skala aus den Eigenschaften der *Vegetationsbedeckung* und den *Bodeneigenschaften*.

Die Speichereigenschaften von Ackerfrüchten können mit den Parametern *Blattflächenindex*, *Bodenbedeckungsgrad* und *Durchwurzelung* des Bodens quantifiziert werden. Die Parameterisierung des *Bodens* für landwirtschaftliche Flächen ist stark an das Ausgangssubstrat und die Bewirtschaftungsweise gebunden. Die Parameter *organische Substanz* und *Bodenleben*, *Gefügestabilität* und *Porenvolumen/Porosität* haben Einfluss auf Infiltration, Wasserleitfähigkeit und Wasserhaltevermögen eines Bodenkörpers.

Blattflächenindex

Der *Blattflächenindex* (*Leaf Area Index*) *LAI* (DYCK & PESCHKE, 1995) wird als Maß für das Speichervermögen eines Vegetationsbestandes herangezogen. Er ergibt sich aus Quadratmetern Blattfläche bezogen auf 1 m² Bodenoberfläche. Bestimmend für den Interzeptionsspeicher sind die Art der Vegetationsdecke, deren Aufbau und Mischungsform, die Bestandsdichte und die Wachstumsbonität. Das Speichervermögen eines Vegetationsbestandes an einem Standort ist – je nach Art des Bewuchses – kurz-, mittel- und langfristigen Schwankungen unterworfen. Kurzfristige Schwankungen ergeben sich aus den Feuchtebedingungen vor einem Niederschlagsereignis. Diese wiederum hängen vor allem von dem hydroklimatischen Faktor Verdunstung und der seit dem letzten Niederschlagsereignis verstrichenen Zeit ab. Mittelfristige saisonale Schwankungen der Interzeption sind meist mit dem jahreszeitlich bedingten Entwicklungszustand der Vegetation verknüpft. Aufgrund der dynamischen Phänologie spielt dies bei landwirtschaftlichen Flächen eine besonders große Rolle.

Die Bestimmung des Blattflächenindexes ist sehr aufwendig. Deshalb wird häufig auf Literaturwerte zurückgegriffen, die von verschiedenen Autoren geliefert werden. Oftmals sind die Angaben auf kurze Messreihen begrenzt und umfassen nur einzelne Ackerfrüchte. Häufig fehlen Angaben zu den

Standortbedingungen, der Bewirtschaftungsweise und dem daraus resultierenden Wachstum des Bestandes. Da der Entwicklungszustand zusätzlich von der jeweiligen Witterung abhängt, können die Literaturangaben nur als Richtwerte gesehen und nicht immer bedenkenlos übertragen werden.

Zur Interzeption in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen hat HOYNINGEN-HUENE (1983) detaillierte Untersuchungen durchgeführt. Er beziffert neben der maximalen Speicherkapazität auch die maximale Niederschlagshöhe, die noch zur Auffüllung

des Interzeptionsspeichers führt (siehe Tab. 2.3, S. 27). Überschreitet die Niederschlagsmenge $N_{gr} \approx 15$ mm, so wird die Wirkung der Interzeption bezogen auf die Gesamtniederschlagsmenge immer unerheblicher. Ein geringfügiger weiterer Anstieg der speicherbaren Niederschlagsmenge ist jedoch möglich, wenn in Regenspauzen langanhaltender zyklonaler Niederschläge Interzeptionsverdunstung von den Blattoberflächen weg stattfindet. Die Ergebnisse werden häufig zitiert und finden Eingang in zahlreiche Modelle.

Tab. 2.3 Interzeptionsspeicherkapazität verschiedener land- und forstwirtschaftlicher Bestände (N_{gr} : Grenzwert des Freilandniederschlags, welcher noch zu Interzeption führt; $h_{i,max}$: maximal speicherbare Niederschlagsmenge) (landwirtschaftl. Nutzung nach HOYNINGEN-HUENE, 1983)

Bestandesart	Blattflächenindex LAI [m ² /m ²]	N_{gr} [mm]	$h_{i,max}$ [mm]
Zuckerrüben	3,5–3,8	14	2,5
Hafer	3,5	15	3,0
Weizen (grün)	2,5	14	2,1
Kartoffeln	5,2	17	3,4
Mais (4–12 Pfl./m ²)	1,2–3,8	10–15	1,4–6,0

MÜNCH (1993) erweiterte die von HOYNINGEN-HUENE (1983) für einzelne Pflanzenbestände bestimmten Blattflächenindizes durch die Berücksichtigung phänologischer Entwicklungsstufen während einer

Vegetationsperiode. Er stellte eine ausführliche Übersicht über die Blattflächenentwicklung der wichtigsten Ackerfrüchte zusammen, die in Abb. 2.5, S. 28 dargestellt ist.

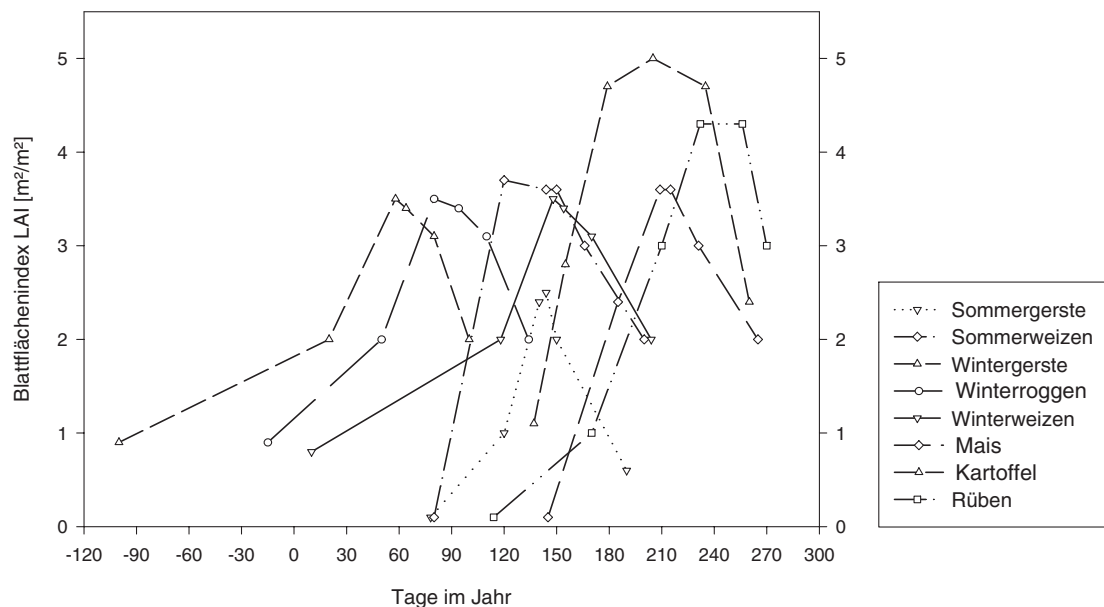


Abb. 2.5 Übersicht über die saisonale Entwicklung des Blattflächenindexes verschiedener Ackerfrüchte im Wasserhaushaltsmodell AKWA-M (nach MÜNCH, 1993)

Diese Werte können nur zur Orientierung dienen, denn Standortbedingungen, Klimaverhältnisse und Bewirtschaftungsweise nehmen starken Einfluss auf das Pflanzenwachstum.

Weitere Quellen für den Blattflächenindex stammen aus der Pflanzenbauforschung, wo der LAI als Maß für die Struktur und den Entwicklungszustand einer Art dient. SCHILLING (1982) und SCHRÖDTER (1985) geben für einige Anbaupflanzen die Optimalwerte für diesen Parameter an. Diese Angaben be-

ziehen sich immer auf einzelne Pflanzen und können nicht bedenkenlos auf die regionale Skala übertragen werden. Eine großskalige Zusammenstellung findet sich bei HOUGH (1990), der die Entwicklung der wichtigsten Ackerfrüchte der Europäischen Union zusammenstellt, um sie als Datenbasis für Satelliten Fernerkundung zu verwenden. Tab. 2.4, S. 28 zeigt die Zusammenstellung der Literaturwerte.

Tab. 2.4 Übersicht verschiedener Blattflächenindizes für die wichtigsten Ackerfrüchte

Bestandesart	Blattflächenindex LAI [m²/m²]	Quelle
Erbse	5–8	Hough (1990)
Geste	3–8	Hough (1990)
Hafer	3–8	Hough (1990)
Kartoffeln	3–5	Hough (1990)
Luzerne	4–7	Schilling (1982)
Mais	3–4	Schilling (1982)
Mais dicht	3,1–6,4	Schrödter (1985)
Mais normal	2,1–3,3	Schrödter (1985)
Rotklee	4,5–7,0	Schilling (1982)

Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung

Bestandesart	Blattflächenindex LAI [m ² /m ²]	Quelle
Sommerraps	3	Hough (1990)
Sommergerste	1,8–2,4	Schrödter (1985)
Sommerweizen	2,9–3,6	Schrödter (1985)
Weizen	3–8	Hough (1990)
Winterraps	≈ 4	Hough (1990)
Winterweizen	2,3–3,1	Schrödter (1985)
Zuckerrübe	3,2–3,7	Schilling (1982)
Zuckerrübe	2,4–3,6	Schrödter (1985)
Zuckerrübe	3,5–4,0	Hough (1990)

Den Einfluss von unterschiedlicher Düngapplikation zeigen MEUSER et al. (1990) in ihrem zweijährigen Feldversuch für Sommerweizen und Hafer. Dabei konnten sie für den kühl-feuchten Sommer 1991

eine Einschränkung des Wachstums für die organisch gedüngten Flächen während der vegetativen Entwicklungsphase feststellen

Tab. 2.5 Untersuchung des unterschiedlichen Düngeeinflusses auf die Pflanzenentwicklung nach MEUSER et al. (1990)

Anbaufrucht	Datum	Blattflächenindex [m ² /m ²] (mineralische Düngung)	Blattflächenindex [m ² /m ²] (organische Düngung)
Hafer	15.5.	3,2	0,7
	22.6.	7,4	3,0
	21.7.	1,1	2,3
	8.8.	0	1,6
Sommerweizen	8.5.	1,1	0,9
	12.6.	3,5	3,4
	17.7.	1,6	1,2
	4.8.	0	0

MENZEL (1997) deutet in seinem Modell TRAIN, das für die Modellierung der Verdunstung in der Schweiz konzipiert wurde, einen Jahresgang der Vegetation durch die Angabe des Blattflächenindex an vier charakteristischen Tagen im Jahr an. Die Blattflächenindizes zwischen diesen charakteristi-

schen Tagen werden linear interpoliert. Start und Dauer der Vegetationsperiode werden dabei an die jeweilige Höhenlage angepasst. Land- und Alpwirtschaft werden zusammengefasst, weil diese in der Schweiz überwiegend aus Grünlandnutzung bestehen.

Tab. 2.6 Mit dem Verdunstungsmodell TRAIN für eine Höhe von 400 m ü. NN berechnete Blattflächenindizes für Landwirtschaft und Alm von MENZEL (1997)

Datum	Blattflächenindex [m ² /m ²]
Mitte April	0,7
Ende Mai	6,3
Anfang September	3,8
Anfang Oktober	2,3

Vegetationsbedeckungsgrad

Der Vegetationsbedeckungsgrad kann in verschiedener Weise Einfluss auf die Hochwasserentstehung nehmen. Er bemisst die Fläche, auf der Interzeption stattfinden kann und gibt Aufschluss darüber, inwieweit der Boden vor Austrocknung oder Verschlammung geschützt ist. Der Einfluss des Bedeckungsgrades auf die Versickerung und Abflussbildung einer Fläche ist besonders für stark anthropogen geprägte und jahreszeitlich dynamische Landnutzung interessant, weil es hier zu starken jahreszeitlichen oder nutzungsbedingten Unterschieden kommen kann.

Der Vegetationsbedeckungsgrad charakterisiert ähnlich wie der Blattflächenindex die Vegetation in

ihrer Entwicklung. Er liefert Informationen über den Anteil der Vegetation ohne Angaben über deren räumliche Verteilung. PFAFF (1984) untersuchte durch künstliche Beregnung den Einfluss auf den Oberflächenabfluss verschiedener Landnutzungen auf einem Sand-Lehm- und einem Sand-Versuchsfeld. Seine Untersuchungen zeigen, dass Sommer- und Wintergetreide im reifen Zustand keine deutliche phänologische Unterscheidung zulassen. Merkliche Unterschiede zeigen sich nur im zeitlichen Entwicklungsablauf. Aufgrund des Einflusses der Bodeneigenschaften auf den Oberflächenabfluss lassen sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf einen anderen Standort übertragen.

Tab. 2.7 Vegetationsbedeckungsgrad verschiedener Anbaufrüchte aus PFAFF (1984)

Landnutzungstyp	Datum	Vegetationsbedeckung [%]
Luzerne	Ende Mai	40
	Ende Juli	55
	Mitte September	50
Wintergetreide	Mitte Mai	35–50
	Anfang Juni	55–65
	Ende August	10
Sand-Knäuelgras	Anfang Juni	30
	Ende Juli	30–40
	Anfang September	40
Sand- Kartoffeln	Mitte Juni	30–35
	Mitte Juli.	65–70
	Anfang August	0,15–0,2
	Anfang September	0

Durchwurzelung

Die Durchwurzelung übernimmt vielfältige Aufgaben für die Verminderung der Hochwasserentstehung. Über den Wasserentzug durch Transpiration hat sie Einfluss auf die Vorfeuchtebedingungen im Boden. Ihre maximale Entnahmetiefe steuert die Anbindung an das Grundwasser und ist für die Entwicklung der oberirdischen Pflanze von maßgebender Bedeutung. Ungünstige Bodeneigenschaften, wie Sauerstoff-, Feuchte- oder Nährstoffmangel, Verdichtung und zu grob- oder feinkörnige Substrate können die Durchwurzelung beeinträchtigen. Ihrerseits nimmt sie eine positive Wirkung auf die In-

filtrations- und Versickerungseigenschaften von Niederschlag, weil das Gefüge stabilisiert wird und die Wurzelgänge als Leitungsbahnen für das Wasser dienen können.

Für die hydrologische Modellierung wird sie meist als maximale Durchwurzelungstiefe parametrisiert, weil sie den maximalen Einfluss der Pflanze in die Tiefe charakterisiert. Besonders gut dokumentiert sind die Wurzeltiefen der am häufigsten angebauten Ackerfrüchte. *Abb. 2.6, S. 32.* zeigt die Spannweite der Angaben unterschiedlicher Autoren.

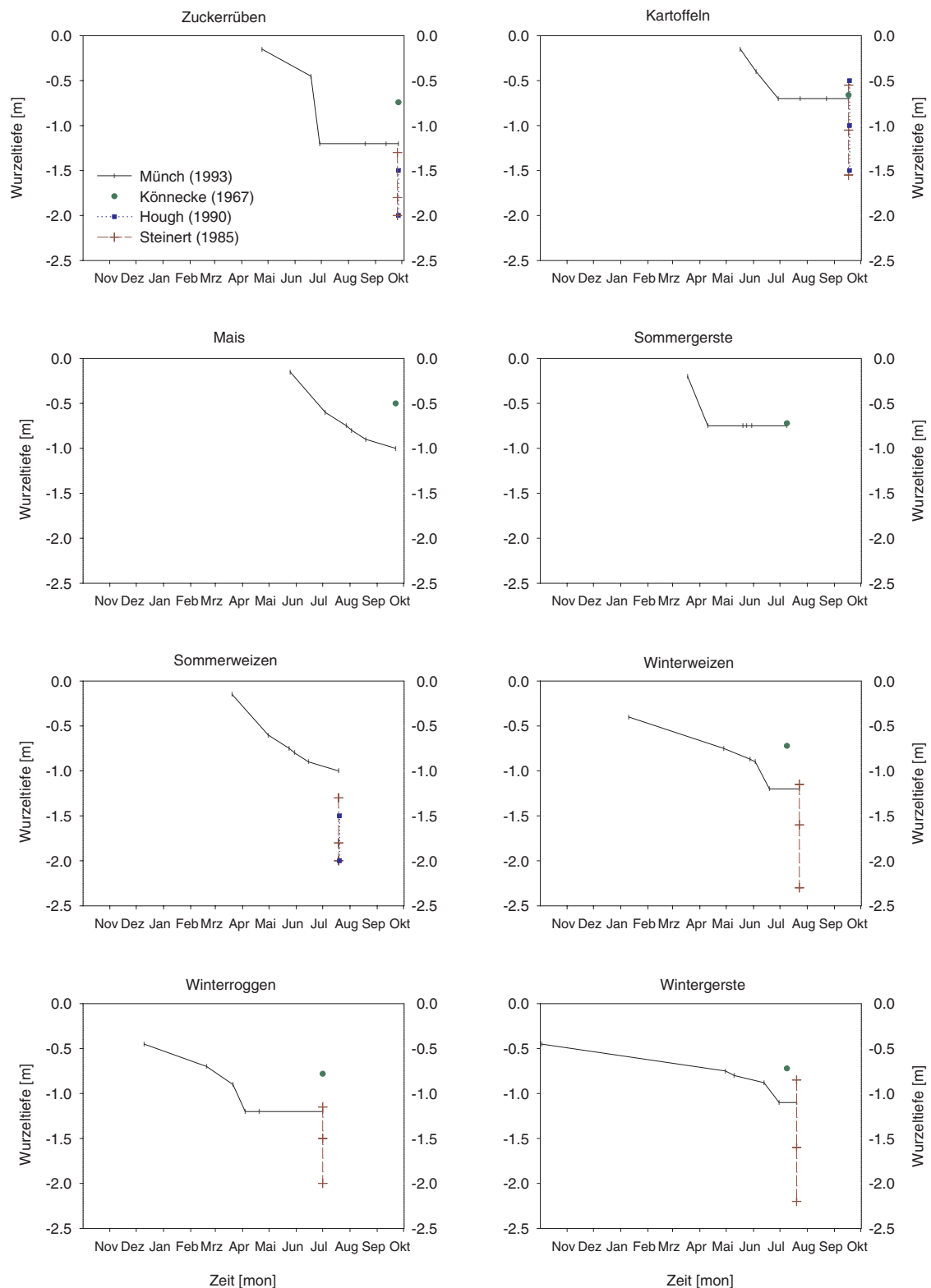


Abb. 2.6 Überblick der Literaturangaben der Wurzeltiefen für verschiedene Ackerfrüchte

Organische Substanz und Bodenleben

Zur organischen Substanz der Böden gehören alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe sowie deren organische Umwandlungsprodukte (SCHACHTSCHABEL et al., 1992). Untersuchungen ihres Einflusses auf die Hochwasserentstehung gehen größtenteils auf Erosionsstudien zurück, die an kleinen Testflächen durchgeführt wurden.

Zum einen stellt abgestorbene Pflanzenmasse an der Bodenoberfläche zusätzlich zur lebenden Vegetation einen wirksamen Interzeptionsspeicher und Schutz gegen Oberflächenverschlammung dar (HELMING et al., 1995). Auf Lössstandorten sinkt ihrer Untersuchung nach mit zunehmender Bodenbedeckung die Oberflächenabflussbildung überproportional. Sie konnten ab 95% Bedeckung auf beregneten Parabraunerdeparzellen keinen Oberflächenabfluss mehr messen. Die Belassung von Ernterückständen auf dem Feld und dessen Bedeckung mit Stroh oder Fremdmaterialien wird in der landwirtschaftlichen Praxis als Mulchung bezeichnet (LEICHTFUSS & KIVUMBI, 1995). Schätzungen des Bodenbedeckungsgrades auf Mulchsaatflächen erbrachten Ergebnisse zwischen 20 und 70% der Fläche, die als Schutz vor Oberflächenabflussbildung dienen. MORIN & BENYAMINI (1977) konnten in ihrer Untersuchung auf beregneten Testparzellen den Einfluss von Mulch auf die Infiltrationsrate für tonigen Boden (Tongehalt ca. 85%) nachweisen. Die Infiltrationseigenschaften unbedeckter Böden werden nicht nur durch die Vorfeuchte im Boden, sondern hauptsächlich durch die Verschlammung beeinflusst. Diese gehen nach ihren Untersuchungen auf Werte zwischen 5 und 8 mm/h zurück während auf den gemulchten Oberflächen 130 mm/h gemessen wurden (MORIN & BENYAMINI, 1977). SIKULA (1982) unterstreicht zusätzlich den

Schutz vor Gefrorenis in tieferen Bodenhorizonten. Dadurch könnte im Frühjahr das Auftauen beschleunigt und das Wiedereindringen von Schmelzwasser ermöglicht werden.

Zum anderen nehmen Vegetationsrückstände und organische Düngung indirekt Einfluss, indem sie den mikrobiellen Abbau fördern und Nahrungsgrundlage für Bodenorganismen darstellen, die durch ihre wühlende Tätigkeit den Boden lockern und Speichervolumen schaffen. Besondere Bedeutung kommt dabei den Regenwürmern zu, weil diese durch Schleimstoffe eine Stabilisierung von Aggregaten erzielen. Sie hinterlassen sehr dauerhafte Gänge und begünstigen die Tonmineralneubildung. Auf Mulchsaatflächen fanden JOSCHKO & BRUNOTTE (1992) eine rund dreifach höhere Individuenzahl. SIEGRIST et al. (1998) stellten ähnliche Unterschiede in der Populationsdichte für biodynamische und organische Düngung im Vergleich zu mineralischer Düngung fest. Die Anzahl der Regenwurmgänge pro m² hat sich bei der Bewirtschaftung als Direktsaat nach FREDE et al. (1992) von 30 Gänge/m² bei konventioneller Pflugbearbeitung auf 150 Gänge/m² erhöht. ROTH & JOSCHKO (1989) beobachteten, dass Gänge von mindestens 5 mm Länge unverschlämmt bleiben und zur Oberflächenabflussverminderung beitragen können. Für die Tiefenperkolation eignen sich die durch Regenwürmer geschaffenen Bioporen wegen ihrer hohen Kontinuität.

Porosität und Porenkontinuität

Die Porengrößenverteilung, ihr Volumen und ihre Kontinuität sind für die Hochwasserretention entscheidend. Die Porengrößenverteilung der Primärporen steht in einem engen Zusammenhang zur Körnung und Kornform. Diese Abhängigkeit wird in Tab. 2.8, S. 34 deutlich.

Tab. 2.8 Porenvolumen und Volumen der Porengrößenbereiche in mm bezogen auf 1 m³ Gesamtbodenvolumen (1 m² Grundfläche mit einer Bodenmächtigkeit von 1 m) (nach SCHACHTSCHABEL et al., 1992)

	Porenvolumen [mm]	Grobporen (> 10 µm) [mm]	Mittelporen (10 - 0,2 µm) [mm]	Feinporen (< 0,2 µm) [mm]
Sandböden	460 ± 100	300 ± 100	70 ± 50	50 ± 30
Schluffböden	470 ± 90	150 ± 100	150 ± 70	150 ± 50
Tonböden	500 ± 150	80 ± 50	100 ± 50	350 ± 100
Anmoor	700 ± 100	50 ± 30	400 ± 100	250 ± 100

Während die Primärporen vorwiegend von der Substratzusammensetzung vorgegeben sind, hängt die Entstehung der Sekundärporen stärker von der Bewirtschaftungsweise ab. Unter Sekundärporen versteht man Schrumpfrisse, Wurzel-, Tierröhren und unregelmäßige Hohlräume, die durch wühlende Tiere oder Bearbeitungsmaßnahmen entstehen. Sie zeichnen sich in der Regel durch eine stark ausgeprägte Kontinuität und Größe aus, so dass sie einen bedeutenden Einfluss auf die Leitfähigkeit nehmen (siehe auch Kap. 2.1.4.1).

Der Eingriff des Menschen in das natürliche Bodengefüge durch den Ackerbau ist geprägt von einem regelmäßigen Wechsel von verdichtenden und lockernenden Vorgängen. Die konventionelle Bewirtschaftungsweise mit Pflug fördert nach Teiwes (1988) die Effektivität der Wasserleitung in Mittel- und teilweise auch in Feinporen. Durch Auffüllung der Grobporen mit akkumulierten Stoffen kann die Zugabe von organischer Substanz den Anteil der

Mittel- und Feinporen besonders in Sandböden erhöhen. Dies führt zusätzlich zu einer verstärkten Bioturbation. Bei Pflugbewirtschaftung kommt es in der Regel durch die Lockerung des Oberbodens zunächst zu einer verbesserten Infiltrationsrate. Diese bleibt jedoch auf Dauer nicht erhalten, weil die Hohlräume durch Sackungsvorgänge wieder geschlossen werden. Die mechanische Bearbeitung durchtrennt außerdem vertikale Makroporen und kappt dabei effektive Leitungsbahnen in den Unterboden. Nach Teiwes (1988) ist die Kontinuität der Poren für die Wasserleitung oft wichtiger als das Gesamtvolumen, weil nur untereinander verbundene Poren zur Perkolation beitragen können. Deshalb erreicht der Gesamtbodenkörper oft eine verminderte Durchlässigkeit.

Einen Anhaltspunkt für den Wertebereich des Anteils von Makroporen am Bodenvolumen gibt Tab. 2.9, S. 34.

Tab. 2.9 Durchmesser und Anzahl von Makroporen sowie daraus abgeschätzte Makroporosität (nach BEVEN (1982 in: SCHIFFLER, 1992); ergänzt um Werte von BRONSTERT (1994); die Schichtmächtigkeit h beträgt bei Vol.-% als Einheit 0,1 m

Autor	Anzahl k [1/m ²]	Durchmesser d [mm]	Porosität n [Vol.-%] $n = \pi \cdot (d/2)^2 \cdot h \cdot k$
Omoti & Wild (1979)	100	2 – 10	0,03 – 0,8
Ehlers (1976)	27 – 363	2 – 11	0,008 – 3,4
Williams & Allman (1969)	100 – 50	5 – 10	0,2 – 0,4
Bronstert (1994)	—	—	0,05 – 0,6

Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung
Bodenschonende Maßnahmen wurden bereits wäh-

rend der 1930iger Jahre sehr enthusiastisch unterstützt. Nach dem Motto »Stop the raindrop where it

falls« (HEWLETT, 1982) erhoffte man sich nicht nur eine Lösung der Probleme der Bodenerosion, sondern auch die der Hochwasserentstehung gefunden zu haben. Verbesserte Infiltration und Leitfähigkeit können zwar nicht vollständig ein Hochwasser verhindern. Dennoch spielen sie für die Minderung eine Rolle und werden aufgrund ihrer allgemein positiven Wirkung bis heute propagiert.

Untersuchungen über den Einfluss von konventioneller Bewirtschaftung auf das Porenvolumen werden häufig im Vergleich zu konservierender Bodenbearbeitung oder dem Direktsaatverfahren ange stellt.

Konservierende Bodenbearbeitung verzichtet auf den Pflugeinsatz. Die Bodenbearbeitung erfolgt

in der Regel nur mit einem Grubber, der den Boden zwischen 5 und 8 cm anhebt und dabei nicht wendet. SEMMEL & HORN (1995) vergleichen konventionelle und konservierende Bewirtschaftungsweise und fanden je nach Bearbeitungsvariante unterschiedliche Verdichtungs Zustände wieder. Zwar brachte die konservierende Bodenbearbeitung im Oberboden höhere, in der Pflugsohle jedoch geringere Lagerungsdichten als bei konventioneller Bearbeitung. Das höhere Gesamtporenvolumen der konventionell gepflügten Flächen führt aber kaum zu höheren gesättigten Leitfähigkeiten. Dies ist besonders entlang der Pflugsohle sichtbar (siehe Abb. 2.7, S. 35).

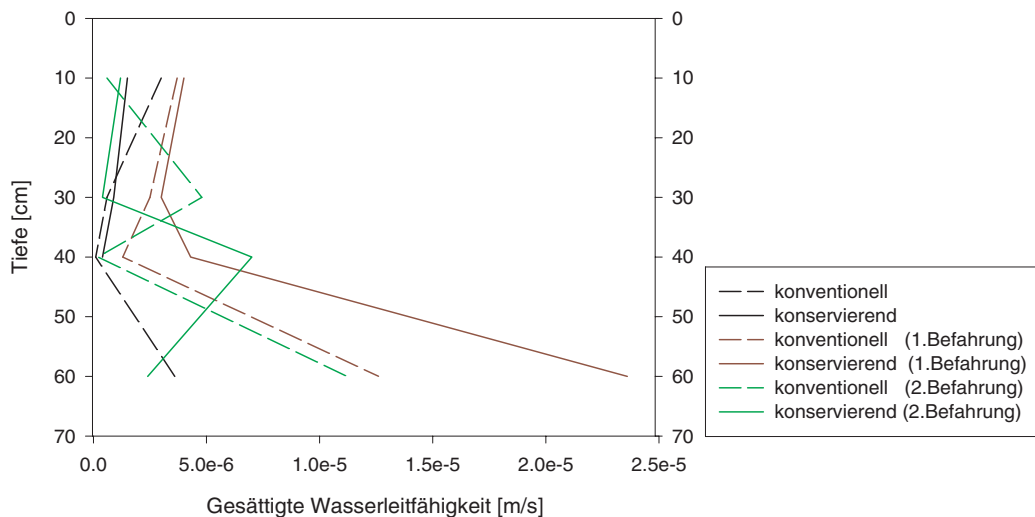


Abb. 2.7 Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit von Parabraunerde (Löss) nach SEMMEL & HORN (1995)

Negative Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung können bei strukturschwachen Sand-, Feinsand- und Schluffböden entstehen, die zu Verdichtung neigen. Ebenso ungünstig haben sich nach FELDWISCH (1999) nicht quellfähige Ton- und staunasse Böden erwiesen.

Ein Vergleich von Pflug-, Mulchsaat- und Direktsaatvarianten der Firma BIOPLAN aus Sinsheim zeigte für einen Beregnungsversuch deutlich bessere Infiltrationseigenschaften für die bodenkonservierende Bearbeitung. Ein Strakregenversuch auf einem Maisfeld mit Zwischenfruchtanbau von Ölrettich und Senf bewirkte nach PFEIL (1998) fast keinen Oberflächenabfluss bei Mulchsaat und Di-

rektsaat. Da diese Untersuchung sehr unstrukturiert und unvollständig belegt ist, wird auf genaue Angaben verzichtet.

Beim Direktsaatverfahren wird bis auf die Anlage von Sähschlitzen keine Bodenbearbeitung durchgeführt. Diese Bewirtschaftungsvariante führt nach FREDE et al. (1994) zu einer deutlich höheren Lagerungsdichte bzw. zu einer Abnahme des Gesamtporenvolumens. In 25 cm Tiefe hat diese um etwa die Hälfte auf 10 Vol.-% abgenommen. Besonders an der Oberfläche ist der Anteil der Poren geringer als in regelmäßig gepflügten Böden. Bodenkonservierende Maßnahmen begünstigen besonders die Ausbildung von Grobporen größer 10 μm , einen deut-

lich höheren Regenwurmbesatz und Poren ab 40 cm Tiefe. Zwar entstehen nur wenige, aber dafür sehr große Poren. Zusätzlich fehlt die sperrende Pflug-

sohle, so dass Unter- und Oberboden verbunden sind und das Wasser schnell in die Tiefe geleitet werden kann.

Tab. 2.10 Sichtbare Bioporen (Durchmesser > 1mm) in einer Tschernosem-Parabraunerde aus Löss bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (nach BEISECKER, 1994)

Tiefe [cm]	Anzahl Bioporen [m ⁻²]		Mittlerer Durchmesser [mm]		Bioporosität [Vol.-%]	
	Pflug	Direktsaat	Pflug	Direktsaat	Pflug	Direktsaat
10	520	656	4,0	3,4	0,65	0,60
40	896	2128	3,6	3,6	0,91	2,17

Eine Untersuchung von BEISECKER (1994) bestätigt dies, wie Tab. 2.10, S. 36 und Abb. 2.8, S. 36 zeigen. Die Direktsaatvariante zeichnet sich durch eine deutlich niedrigere gesättigte Wasserleitfähigkeit im Oberboden ab. Der Unterschied zur Pflugvariante geht an der Pflugsohle stark zurück. Das Verhältnis kehrt sich bei einer untersuchten Braunerde aus

Flugsand sogar soweit um, dass die Pflugsohle als sperrende Schicht wirkt. Insgesamt hat sich die langjährige unterschiedliche Bodenbearbeitung stärker auf die Parabraunerde ausgewirkt, weil diese durch einen höheren Schluffanteil eine stärkere Aggregation erfährt.

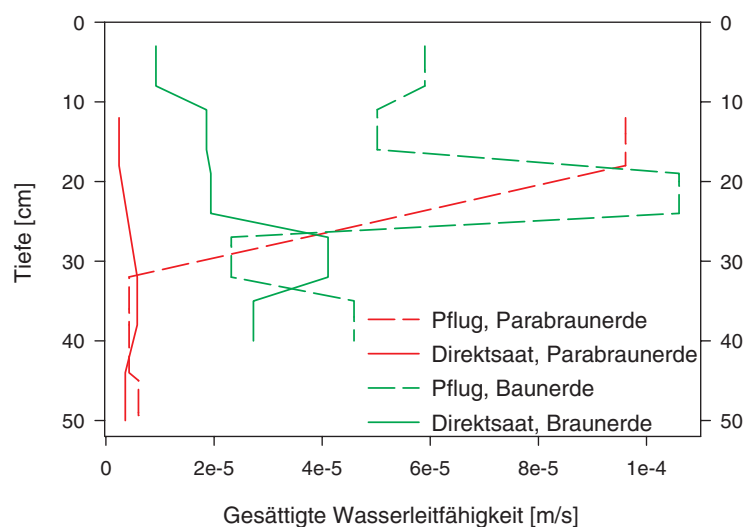


Abb. 2.8 Gesättigte Wasserleitfähigkeit k_s [m/s] von Tschernosem-Parabraunerde aus Löss und Braunerde aus Flugsand bei unterschiedlicher Bewirtschaftungstechnik nach BEISECKER (1994)

Gefügestabilität

Ein Bodengefüge wird dann als *stabil* bezeichnet, wenn sich die Lage der Primärteilchen gegeneinander bei einer Spannungsveränderung nicht verschiebt (SCHACHTSCHABEL et al., 1992). Die Gefügestabilität und vor allem die Stabilität der Sekundär-

poren hängt von der Verklebung verschiedener Stoffe im Boden ab, die den Scherwiderstand erhöhen. Nach BECHER (1995) bewirkt die Zunahme von organischer Substanz eine Stabilisierung durch die verkittende Wirkung der mikrobiellen Stoffwechsel-

produkte. Die Verklebung ändert nicht die Lagerungsdichte.

Eine Befahrung mit hohen Achslasten und zu ungünstigen Zeitpunkten kann bei geringer Gefügestabilität zu Verdichtung des Bodens und damit Abnahme des Porenvolumens führen. Das Ausmaß langjähriger Verdichtung beschreibt FENNER (1997) für einen Ackerstandort auf Löss. Als Folge von 20jähriger Befahrung und Bodenbearbeitung ging das Grobporenvolumen an diesem Standort in 40 cm Tiefe von ursprünglich über 20 Vol.-% um zwischen 45 % und 60 % zurück. Die Verdichtungserscheinungen ließen sich dort in bis zu 70 cm Bodentiefe nachweisen.

Die Aggregatstabilität ist an die Korngröße gebunden und sinkt mit steigendem Schluff- und sinkendem Tongehalt (HELMING et al., 1994). Insbesondere Böden mit hohem Schluffgehalt, wie sie an Löss-beeinflussten Standorten vorherrschen, zeigen nach AUERSWALD (1993) eine hohe *Verschlämmungsneigung*. Aufgrund der guten Speichereigenschaften befinden sich diese Böden dennoch häufig in landwirtschaftlicher Nutzung. Fehlt eine schützende Vegetationsschicht, trocknen die Aggregate an der Oberfläche aus. Ihre Stabilität geht dadurch erheblich zurück. Die Quantifizierung dieses Effekts ist schwierig, da der Zustand der Bodenoberfläche bei landwirtschaftlicher Nutzung zeitlich stark variabel und von vielen Faktoren wie zum Beispiel der Bewirtschaftungsweise, dem Wasserhaushalt sowie der Intensität von verschlämmungswirksamen Starkniederschlägen abhängig ist (BURT & SLATTERY, 1996). Es existieren deshalb nur vereinzelte Beispielanalysen, die meist als Beregnungsversuche durchgeführt worden sind. ROTH (1992) konnte für diesen Zusammenhang in einer Laborregensimulation mit einer Intensität von 30 mm/h für eine Parabraunerde über zwei Stunden hinweg einen Anstieg des Oberflächenabflusses auf das Doppelte messen.

2.2.3.2 Einflüsse in der Hangskala

Im Hangmaßstab treten weitere Einflussgrößen hinzu, die in landwirtschaftlich genutzten Gebieten zu einer anthropogen veränderten Abflussbildungssituation führen. Im wesentlichen sind dies *linienhafte Elemente* wie Straßen, Wege, Feldraine, Hecken, Fahrspuren oder Gräben. Auch *Drainagen* zählen zu

diesen linienhaften Elementen. Die tiefgreifendsten Veränderungen in der Hangskala sind das Ergebnis der in Deutschland seit 1953 systematisch durchgeführten Maßnahmen der *Flurbereinigung*.

Eine systematische Quantifizierung der Einflüsse agrarischer Nutzung auf die Abflussbildung in der *Hangskala* ist bisher nicht gelungen. Dementsprechend können auch keine *Parameter* für die einzelnen Einflussgrößen formuliert werden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die Beschreibung der Wirkungsmechanismen und exemplarischer quantitativer Studien.

Linienhafte Landschaftsstrukturelemente

Je nach ihrer Ausdehnung, Kontinuität und Ausrichtung zur Falllinie können linienhafte Landschaftsstrukturelemente entweder *Leitbahnen* oder *Barrieren* für Wasser darstellen.

Insbesondere wirksam für die Entstehung und Konzentration von Oberflächenabfluss sind geringdurchlässige Oberflächenbereiche in Gefällerrichtung. Hierauf weisen BURT & SLATTERY (1996) hin, in deren Untersuchungsregion (Oxfordshire, U.K.) die Durchlässigkeit der Böden normalerweise die dort üblichen Niederschlagsintensitäten übersteigt. Oberflächenabfluss nach HORTON (*infiltration-excess overland flow*) ist in dieser Region auf linienhafte Landschaftselemente beschränkt, die durch Versiegelung, Verschlämmung oder Verdichtung an der Oberfläche eine verringerte Wasseraufnahmefähigkeit besitzen. Hierzu zählen:

- (1) *Wege und Straßen*.
- (2) Erodierte und verschlammte *Talweg-Rillen* auf Ackerflächen.
- (3) *Fahrspuren* von landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

Mit dem Zusammenhang von Talwegerosion und Oberflächenabfluss beschäftigt sich beispielsweise BAADE (1994), der davon ausgeht, dass Oberflächenabfluss entlang des Talweges bis zu 50 % zum Austrag von Bodenmaterial aus dem von ihm untersuchten Lössgebiet beiträgt. SOUCHERE et al. (1998) untersuchten den Effekt der Pflugrichtung auf die Abflussrichtung. Dafür wurden in einem lehmigen Gebiet die Hangneigungsintensität und die Abweichung der Pflugrichtung vom steilsten Gefälle betrachtet. Den Beobachtungen nach folgte der Ober-

flächenabfluss auf über 50% der Beispielflächen der Bearbeitungsrichtung.

Die genannten linienhaften Landschaftsstrukturelemente stellen außerdem effektive Leitbahnen von Oberflächenabfluss zum Gerinne dar (LUFT & MORGENSEHWEIS, 1984). Wirksame Hindernisse für die Konzentration von Oberflächenabfluss sind hingegen hangparallel angelegte Grünstreifen, Raine und Hecken (HACH & HÖTL, 1989).

Drainagen

Den Einfluss von *Drainagemassnahmen* auf die Abflussbildung bei Hochwasser beschreibt ROBINSON (1990). Haupteinflussfaktoren sind danach im Hangmaßstab:

- (1) Die Bodenart.
- (2) Die Art der Drainage (Entwässerungsgräben oder unterirdische Drainagen).
- (3) Die Art der Vernässung (Staunässe oder Grundwasserbeeinflussung).

Während der Einfluss von Drainagen auf das Abflussvolumen von ROBINSON (1990) als gering eingestuft wird, führen Drainagemassnahmen bei gut durchlässigen Böden zu einer beschleunigten Abflussreaktion mit erhöhten Scheitelwerten. Diese Abflussverschärfung ist für offene Gräben höher als für unterirdische Drainagen. Bei Tonböden (ohne Trockenrisse) führen Drainagemassnahmen dahingegen eher zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse. Reicht das Grundwasser vor der Meliorationsmassnahme bis an die Bodenoberfläche, so geht mit der Drainage eine tendenzielle Vergrößerung des Bodenspeichers einher. Bei vorher bereits tieferen Grundwasserständen führt die Drainage eher zu einer Abflussverschärfung.

Flurbereinigung

Eine umfassende Literaturstudie zu den Auswirkungen von Flurbereinigungsmassnahmen auf das Abflussverhalten ländlicher Einzugsgebiete haben BRONSTERT et al. (1993) vorgelegt. Eine im Hinblick auf die hochwasserrelevanten Einflüsse der Flurbereinigung angefertigte Zusammenfassung dieser Studie enthält BRONSTERT et al. (1995).

Die für die Abflussbildung bei Hochwasser wichtigsten Massnahmen der Flurbereinigung außerhalb des Gewässernetzes lassen sich nach

BRONSTERT et al. (1995) für den *Hangmaßstab* wie folgt zusammenfassen:

- (1) Bodenneuordnung:
 - (a) Neugestaltung der Grundstücke (Vergrößerung der Schläge, Beseitigung von Kleinstrukturen, Auffüllung von Mulden, Änderung der Bewirtschaftungsrichtung).
 - (b) Umnutzung der Grundstücke (Rodung bzw. Aufforstung von Wald, Umwandlung von Grünland zu Äckern).
- (2) Landwirtschaftlicher Wegebau (Gestaltung der Wege und Wegseitengräben).
- (3) Meliorationen (Anlage von Entwässerungsgräben, Einbau von Drainagerohren, Tieflockung).

Beispielsweise von DIKAU (1983) im Kraichgau durchgeführte Parzellenversuche zeigen, dass die Zunahme der Hanglänge, die eine Vergrößerung der Schläge mit sich bringt, auf brachliegenden Flächen zu größeren Volumina an Oberflächenabfluss führt. Bewirtschaftung in der Falllinie führt, wie BAADE (1994) verdeutlicht, ebenfalls zu verstärktem Oberflächenabfluss. Zu den negativen Folgen, die sich aus der *Beseitigung hanggliedernder Elemente* wie Hecken, Feldrainen, begrünten Feldzwischenräumen, Terrassenmauern oder Wegen für die Abflussbildung bei Hochwasser ergeben haben, gibt es, wie BRONSTERT et al. (1993) vermerken, bisher keine gezielten Untersuchungen.

Nach BACHMANN-ERDT et al. (1994) kommen auf 100 ha Ackerfläche ungefähr 4,9 km oder 1,5 ha Wirtschaftswege. Bei bundesweit etwa 20 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche ergibt dies eine Fläche von 0,3 Mio. ha Wirtschaftswegen, was der Versiegelungswirkung von ca. 50% aller Straßen Deutschlands entspricht. Abflussverschärfend wirken sich landwirtschaftliche Wege vor allem dann aus, wenn sie in der Falllinie verlaufen und tiefer als das angrenzende Gelände angelegt sind.

Über die Auswirkungen einzelner Massnahmen der Flurbereinigung können im *Einzugsgebietsmaßstab* derzeit keine quantitativen Angaben gemacht werden. Die bisher auf Einzugsgebietsebene gewonnenen Erkenntnisse beschreiben meist die integralen Veränderungen, die sich aus der Durchführung verschiedener Flurbereinigungsmassnahmen ergeben

haben. KOEHLER (1996) zufolge fehlen bislang längere und zuverlässige Messreihen in einem Gebiet vor und nach der Durchführung verschiedener Maßnahmen, welche einen direkten Vergleich ermöglichen würden.

Die wahrscheinlich umfangreichsten Studien zum Vergleich benachbarter Gebiete mit und ohne Flurbereinigungsmaßnahmen wurden in zwei kleinen hydrologischen Testgebieten mit Weinbaunutzung durchgeführt. Dabei treten im rebflurbereinigten Gebiet als Folge sommerlicher Starkniederschläge Scheitelabflussspenden auf, welche z.T. um mehr als das 20fache über denen eines vergleichbaren unbereinigten Gebiets liegen. Von LUFT & MORGENSEHWEIS (1984) werden hierfür vor allem (1) die Bodenverdichtung bedingt durch Planierung der Terrassenflächen und Umlagerung des Lössmaterials, (2) die flächenhafte Drainage und (3) das asphaltierte Wegenetz verantwortlich gemacht.

2.2.4 Grünland

Grünland ist einerseits eine landwirtschaftliche Nutzungsform, die stark anthropogenen Einflüssen unterworfen ist. Andererseits kann es als heterogener Vegetationsbestand je nach Nutzungsintensität im

Gleichgewicht mit den natürlichen Einflüssen stehen. Hauptmerkmal stellt die von zahlreichen Pflanzenarten im Gemisch gebildete Grasnarbe dar. Im Gegensatz zu Ackerkulturen ist eine Wiese ein Gemisch aus verschiedenen Gräsern und Kräutern, die unterschiedliche Entwicklungsverläufe nehmen können. Die jahreszeitliche Entwicklung der Blattmasse ergibt sich aus der abwechselnden Dominanz von Wachstum und Mahd oder Beweidung, die einen Wiesenbestand nicht zerstören, sondern eher zu neuem Wachstum anregen. Entscheidend für die Produktivität sind der Grundwasserflurabstand und die Substratverhältnisse.

Blattflächenindex

Der Blattflächenindex für Grünland wird, wie Tab. 2.11, S. 39 zeigt, mit sehr großer Schwankungsbreite angegeben, weil der Reifungsprozess von Grünland ebenso wie im Ackerbau sehr von der Bewirtschaftungsweise und den Standortbedingungen wie Wasser- und Nährstoffversorgung abhängt. Die Dynamik der Bewirtschaftung wird in der Literatur nicht berücksichtigt. GEYGER (1977) gibt einen Überblick über Beispielswerte für unterschiedliche Höhenstufen (siehe Tab. 2.11, S. 39).

Tab. 2.11 Literaturwerte des Blattflächenindexes (LAI) für Grünland

Bestandesart	Blattflächenindex [m ² /m ²]	Quelle
Wiese und Weide	2–4	Schulla (1997), Münch (1993)
Grasland	3,8	Fennessy & Xue (1997)
Permanent short vegetation	2,9	Finch (1998)
Gras	max. 9,8	Ulaby et al. (1984)
Gras	3,5–12,9	Geyger (1977)
Gras/Wiese Schwarzwald	1,6–12,8	Geyger (1977)
Grasland Fulda-Ebene (Höhe 200 m)	max. 5,5	Geyger (1977)
Grasland Solling (Höhe 460 m)	max. 5,3	Geyger (1977)
Grasland Menzenschwand-Tal (Höhe 1000 m)	max. 10,2	Geyger (1977)
Grasland-Elbemarsch (Höhe 5 m)	max. 6,0	Geyger (1977)

Vegetationsbedeckung

Grünland fasst sehr heterogene Pflanzenbestände

zusammen. Nach RICHTER (1986) erreicht eine nicht näher spezifizierte Wiese ganzjährig einen Vegetati-

onsbedeckungsgrad von 100 %. PFAFF (1984) konnte für Knäuelgrasbewuchs auf einer Sand-Versuchsfläche nur Höchstwerte von 30 bis 40 % beobachten.

Durchwurzelung

ELLENBERG (1996) gibt Wurzelprofile für verschiedene Pflanzengesellschaften an. Wurzeltiefen wer-

den insbesondere für größtenteils vom Menschen mitgeschaffene und erhaltene Formationen angegeben (siehe für Wiesen *Tab. 2.12*, S. 40). Ihre Variationsbreite wird hier von den Bodeneigenschaften und der Wasserverfügbarkeit bestimmt. MÜNCH (1993) gibt eine ähnliche Spanne zwischen 0,6 und 1 m an.

Tab. 2.12 Maximale Wurzeltiefe von Wiesen von ELLENBERG (1996)

Wiesen-/Weidenart	Maximale Wurzeltiefe [m]
Ruderalarten	0,6–1,2
Goldhaferwiese auf Auelehm	0,6–1,2
Kohldistelwiese	0,6
Glatthaferwiese	0,75–1,0
Halbtrockenrasen	0,8
Magerrasen	0,5
Sandbinse	0,25

Die Bodenverhältnisse unter Grünland können sehr unterschiedlich sein. Meistens werden in der collinen Höhenstufe nur die Flächen für Grünland genutzt, die entweder zu feucht und schwer oder zu trocken und unfruchtbar für landwirtschaftliche Nutzung sind. Durch Beweidung kann es zu Verdichtung des Bodens und Trittschäden an der Grasnarbe kommen, die eine schnelle Infiltration verhindern. Quantitative Untersuchungen liegen dafür nicht vor.

2.2.5 Sonderkulturen, Kleingärten und Büsche

Unter Sonderkulturen versteht man landwirtschaftliche Spezialkulturen, die meist mehrjährig und unter großen Investitionskosten außerhalb der üblichen Fruchtfolge angebaut werden. Dazu gehören Obstanlagen, Baumschulen, Rebland, Hopfen, Tabak oder Heil- und Gewürzpflanzen. Diese stark anthropogen geprägten Landnutzungen treten in der

Regel nur kleinflächig auf. Da Sonderkulturen von ihrer Struktur her Ähnlichkeit mit Büschen und Sträuchern haben, werden sie im folgenden zusammen betrachtet. Kleingärten werden ebenfalls zu dieser Gruppe dazugenommen, weil sie bei intensiver Bewirtschaftung häufig ebenfalls einen hohen Strauchanteil haben.

Großflächige Buschlandschaften sind in Mitteleuropa als potentielle natürliche Vegetation nicht vorhanden. Ihre Verbreitung beschränkt sich auf temporäre Sukzessionsstadien im Übergang zu Wald, dessen Unterwuchs und Lichtungen (ELLENBERG, 1996). Dementsprechend gering ist die Literaturlauswertung dafür.

Blattflächenindex

Die Laubentwicklung während des Jahres wird aufgrund der Heterogenität der Klasse meistens durch die Schwankungsbreite ausgedrückt. *Tab. 2.13*, S. 41 gibt einen Überblick der Literaturwerte.

Tab. 2.13 Literaturwerte des Blattflächenindexes (LAI) für Büsche, Obst und Gartenbau

Bestandesart	Blattflächenindex [m ² /m ²]	Quelle
Buschbrache	2–4	Münch (1993)
Buschland	0,1–4,7	Clausen et al. (1994)
Obst und Gartenbau	0,5–5,1	Menzel (1997) Schulla (1997)

Über Vegetationsbedeckungsgrad und Wurzeltiefe gibt es auf Grund der großen Bandbreite innerhalb dieser Landnutzung kaum Angaben.

Böden von Sonderkulturen sind in der Regel stark mit organischer Substanz, Dünger und Pestiziden angereichert. Oftmals werden diese Flächen bewässert und häufig umgebrochen. Besonders in Kleingärten kommt es zur Anreicherung von humosem Oberboden.

2.2.6 Wald

2.2.6.1 Wirkungsmechanismen

Bewaldeten Flächen wird in der Regel eine abflussdämpfende Wirkung zugesprochen. Die wichtigsten Eigenschaften von Wald, die diese positive Konnotation forstlicher Nutzung stützen, sind nach HEWLETT (1982) folgende:

- (1) Durch die gegenüber anderen Nutzungen erhöhte Interzeption und die starke Transpiration von Waldbeständen ist die Bodenfeuchte unter Waldbeständen im Sommer und Herbst in der Regel geringer als im Umland, was in diesem Zeitraum ein erhöhtes Aufnahmevermögen des Bodens für Wasser zur Folge hat (siehe auch Kap. 2.1.5.1).
- (2) Die Infiltrationskapazität von Waldböden ist meist höher als die von Ackerland. Begründet ist dies in einer verringerten Bearbeitungsintensität, stärkerer Durchwurzelung, oft höherer Bioaktivität, aber auch in einem gegenüber Ackerstandorten häufig größerem Ausgangssubstrat.
- (3) Zusammenhängende Bodengefrorenis ist unter Waldbeständen selten, so dass auch im Winter die Aufnahmefähigkeit des Bodens für Wasser weitestgehend erhalten bleibt.

Zur abflussdämpfenden Wirkung trägt außerdem die Oberflächenabfluss hemmende Streu bei (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997). Die Wirkung des gegenüber Grünland oder ackerbaulicher Nutzung größeren Interzeptionsspeichers wird beispielsweise durch einen von ROBINSON et al. (zitiert in CALDER, 1992) unternommenen Vergleich zweier Einzugsgebiete in Bayern belegt. Als Folge von Aufforstung eines der beiden Gebiete verringerten sich dort die Abflussscheitel kleiner Niederschlagsereignisse mit fortschreitendem Wachstum der Bäume vor allem während der ersten zehn Jahre nach der Aufforstung deutlich.

CALDER (1992) weist darauf hin, dass die Art der Bewirtschaftung des Waldes einen potentiell größeren Einfluss auf das Abflussverhalten von Waldflächen hat als die An- oder Abwesenheit des Waldes an sich. Zu den Einflussfaktoren der forstwirtschaftlichen Nutzung auf den Hochwasserabfluss zählen vor allem:

- (1) Weitgehende Bodenversiegelung durch Wegebau zur Abfuhr des Holzes.
- (2) Anlage von Entwässerungsgräben.
- (3) Verdichtung des Bodens durch Befahrung mit hohen Achslasten.
- (4) Erhöhte Anfälligkeit für Waldschäden in ökologisch labilen forstlichen Monokulturen.

Die möglichen Folgen dieser Eingriffe wurden bereits im Zusammenhang mit den Maßnahmen der Flurbereinigung (siehe Kap. 2.2.3.2) besprochen.

In der Vergangenheit wurde die hochwasserdämpfende Wirkung von Wald häufig sehr undifferenziert gepriesen. Dass diese Wirkung nicht zwangsläufig zum Tragen kommt, betont wiederum HEWLETT (1982), der den immensen Einfluss von *Bodenmächtigkeit*, *-textur* und *-lagerung* auf die Hochwasserentstehung hervorhebt. Stockt der Wald auf ge-

ringmächtigen Böden mit grobem Substrat, so können *unterirdische Fließprozesse* auch auf Waldflächen eine rasche Abflussreaktion hervorrufen.

Wie sehr der Einfluss des Waldes gegenüber den *geomorphologischen* Rahmenbedingungen eines Gebietes in den Hintergrund treten kann, wird auch durch aktuelle empirische Untersuchungen belegt:

Bei BESCHTA et al. (2000) beispielsweise findet sich eine statistische Analyse von Hochwassermaxima verschiedener bewaldeter Einzugsgebiete in Oregon. Die langjährigen Abflussmessreihen, die hierfür verwendet wurden, decken jeweils Zeiträume vor und nach Kahlschlägen ab. Für kleine Einzugsgebiete zwischen 60 und 100 ha konnte auf diese Weise ein hochwasserverschärfender Einfluss des Kahlschlages auf die Hochwassersituation nachgewiesen werden. Dieser Einfluss lag für Ereignisse mit einer Jährlichkeit zwischen 1 und 5 Jahren bei 6 bis 9% Anstieg des Abflussmaximums, war jedoch bereits für Ereignisse mit einer Jährlichkeit von mehr als 5 Jahren statistisch nicht mehr signifikant. In mesoskaligen Einzugsgebieten mit einer Größe von 60 bis 640 km² war ein Einfluss von Kahlschlägen auf die Hochwasserentstehung selbst

für kleine Hochwasserereignisse statistisch nicht mehr zweifelsfrei nachweisbar.

2.2.6.2 Parameterisierung

Blattflächenindex

Der *Blattflächenindex* für Laubwald wird von deutschsprachigen Autoren mit sehr ähnlichen Werten belegt. Obwohl diese Landnutzung sich durch eine relativ hohe Dynamik im Jahresgang auszeichnet, wird diese kaum berücksichtigt. MENZEL (1997) berücksichtigt den Jahresgang des LAI durch eine Interpolation zwischen den Extremwerten und erhält so für jeden Tag des Jahres einen Zwischenwert. Nach ELLENBERG (1996) besteht eine Abhängigkeit zwischen Bodenfruchtbarkeit und Blattflächenindex, der für sommergrüne Laubwälder eine Wertespanne von 3 bis 12 ergibt. Die Strauchschicht ist darin enthalten. MÜNCH (1993) leitet seine Werte aus einem Waldlehrbuch von MITSCHERLICH (1981) ab. GEYGER (1977) und CANNEL (1983) geben Maximalwerte für einzelne Baumarten an, die auf die Mischung übertragen werden können. Einen Überblick liefert Tab. 2.14, S. 42.

Tab. 2.14 Literaturwerte des Blattflächenindexes (LAI) für Laubwald

Bestandesart	Blattflächenindex [m ² /m ²]	$h_{l,max}$ [mm]	Quelle
Laubwald	min. 1–2 bis max. 4–8	2–4	Münch (1993)
Laubwald	1–8	2–4	Dyck & Peschke (1995)
Laubwald	0,5–8	—	Schulla (1997)
Laubwald	min. 2–5 bis max. 6–8	2,4–4,5	Menzel (1997)
Laubwald	max. 7,0	—	Hollinger et al. (1994)
Eiche	min. 1–2 bis max. 5–8	2–4	Münch (1993)
Buche	min. 1–2 bis max. 4–8	2–4	Münch (1993)
Eiche	2,3–9,2	—	Geyger (1977)
Buche	2,8–10,0	—	Geyger (1977)
Buche	15,8–12,3	—	Mitscherlich (1981)
Buche Deutschland	max. 6,7	—	Cannel (1982)
Gemischter Eichenwald	max. 6,8	—	Cannel (1982)

Mischwald ist eine schwer kategorisierbare Landnutzung, weil die Artenzusammensetzung eine große Rolle spielt. Deshalb sind die Literaturwerte mit

sehr großer Schwankungsbreite angegeben. Durch die Durchmischung mit Nadelbäumen liegen die Werte höher als die des Laubwaldes.

Tab. 2.15 Literaturwerte des Blattflächenindexes (LAI) für Mischwald

Typ	LAI [m ² /m ²]	$h_{l\ max}$ [mm]	Quelle
Mischwald	min. 2–5 bis max. 6–12	2,5–4,5	Münch (1993)
Mischwald	6,4	—	Fennessy & Xue (1997)
Mischwald	3,8–7,0	3,4–4,5	Menzel (1997)

Der Nadelwald erreicht die höchsten Blattflächenindexe. Durch die ganzjährige Begrünung und einer dichten Benadelung erreicht der Nadelwald ein relativ hohes maximales Rückhaltevermögen. Die An-

gaben für den Blattflächenindex von MENZEL (1997) fallen im Vergleich mit den anderen Autoren sehr niedrig aus, weil die unterschiedlichen Altersklassen berücksichtigt werden sollten.

Tab. 2.16 Literaturwerte des Blattflächenindexes (LAI) für Nadelwald

Typ	LAI [m ² /m ²]	$h_{l\ max}$ [mm]	Quelle
Nadelwald	5–8 bis 8–14	3–5	Münch (1993)
Nadelwald	7,8	—	Fennessy & Xue (1997)
Nadelwald	5,5–7,0	4–4,5	Menzel (1997)
Fichte	3,8–14,0	—	Geyger (1977)
Fichte	16,5–19,2	—	Mitscherlich (1981)
Fichte Deutschland	max. 9,4	—	Cannel (1982)
Kiefer	5–7 bis 7–12	3–4	Münch (1993)

Langfristige Veränderungen ergeben sich aus den Entwicklungstendenzen von empfindlichen Ökosystemen oder Beständen mit überwiegend mehrjährigen Pflanzen, insbesondere bei Waldbeständen.

Durchwurzelung

Angaben über Wurzeltiefen für Wald und Forstwirtschaft finden sich nur vereinzelt. MÜNCH (1993) hat für sein Modell AKWA-M Durchschnittswerte von MITSCHERLICH (1981), SCHMIDT-VOGT (1986) und BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1990) zusammengestellt (siehe Tab. 2.17, S. 43).

Tab. 2.17 Überblick über die maximalen Wurzeltiefen aus einer Zusammenstellung von MÜNCH (1993)

Typ	Wurzeltiefe [m]
Nadelwald	0,7–1,0
Fichte	0,4–0,8
Kiefer	0,8–1,5
Mischwald	0,7–1,5
Laubwald	0,8–1,5
Buche	0,8–1,5
Eiche	0,8–1,5
Birke	0,8–1,5

Nach Untersuchungen von GLATZEL (1983) in Nordrhein-Westfalen besteht eine große Heterogenität in der maximalen Wurzellänge. Ausgrabungen in seinem Untersuchungsgebiet für Kiefern auf Sand zeigen Wurzeltiefen zwischen 1,2 und 4 m. Stieleichen auf Pseudogley erreichen der Studie zufolge Wurzeltiefen zwischen 1,1 und 1,7 m.

Bei der Parameterisierung der Waldböden ist das Ausgangssubstrat sehr wichtig, weil es Einfluss auf die Zusammensetzung des Waldtyps hat. In der Regel sind Waldböden ausreichend mit organischer Substanz versorgt. Besonders in Nadelwäldern zeigen sich starke Versauerungserscheinungen.

Durch die starke Durchwurzelung kommt es zu starker Sekundärporenentwicklung. Nach RICHTER (1986) können Makroporen bis zu 35 % des Porenvolumens eines Waldbodens einnehmen.

2.2.6.3 Neuartige Waldschäden

Vor dem Hintergrund der Diskussion um das ›Waldsterben‹ wurden in den 80er Jahren verschiedentlich drastische Szenarien berechnet, die den Einfluss dieses Phänomens bis hin zum vollständigen Absterben des Waldes mit anschließender Brache auf Einzugsgebietsebene berechneten. MÜLLER (1987) kam für diesen Fall anhand eines einfachen Niederschlag-Abfluss-Modells für sein mesoskaliges Untersuchungsgebiet zu dem Ergebnis, dass sich die Scheiteleintrittszeiten um 13 % verringern und der Scheitelabfluss sich in etwa verdoppeln würde. Ähnliche Berechnungen führten bei CASPARY

(1990) zu einer Zunahme des Hochwasserabflussvolumens um 150 %. Mit der Realität haben die zitierten Szenarien glücklicherweise wenig gemeinsam. Dementsprechend gering ist allerdings auch der Nutzen dieser Modellrechnungen für die Quantifizierung der durch neuartige Waldschäden zweifellos veränderten Abflusssituation bei Hochwasser.

1993 wiesen in Deutschland etwa 22 % der Fichten, 20 % der Kiefern, 32 % der Buchen und 45 % der Eichen erkennbare Schädigungen auf (BACHMANN-ERDT et al., 1994). Hydrologisch bedeutsame Begleiterscheinungen der neuartigen Waldschäden sind (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997; CASPARY, 1990):

- (1) Verringerte Interzeption infolge von Nadelverlusten bzw. einer Abnahme des Belaubungsgrades.
- (2) Reduzierte Infiltrationskapazität bedingt durch eine geringere Durchwurzelung und damit Rückgang des Makroporenvolumens.
- (3) Verringerte Wasserspeicherkapazität des Bodens als Folge einer durch reduziertes Feinwurzelnwerk verminderten Gefügestabilität.

Eine Abschätzung der Auswirkungen dieser tatsächlich beobachteten Waldschäden auf das Abflussgeschehen bei Hochwasser ist aber aufgrund des komplexen Wirkungsgefüges derzeit kaum möglich, zumal die Art der Schadenserhebung nur bedingt Rückschlüsse auf die hydrologischen Konsequenzen der Schäden zulässt.

2.3 EINFLUSS VON KIMAÄNDERUNGEN AUF DIE HOCHWASSERENTSTEHUNG

2.3.1 Grundlagen

2.3.1.1 Der Treibhauseffekt

Die natürlichen Treibhausgase der Atmosphäre, Wasserdampf (H_2O) mit einem Anteil von 70 %, Kohlendioxid (CO_2) mit 15 % sowie die Spurengase Ozon (O_3), Stickstoffdioxid (N_2O) und Methan (CH_4), verhindern durch ihre Molekülstruktur, dass die gesamte von der Erde absorbierte Sonnenstrahlung als langwellige Wärmestrahlung wieder in den

Weltraum zurückgestrahlt wird. Sie sind somit verantwortlich für die Temperatur an der Erdoberfläche. Ohne sie betrüge die mittlere Oberflächentemperatur der Erde nur ca. $-15^\circ C$ (WBGU, 1993).

Durch anthropogene Eingriffe werden zum einen die Konzentrationen dieser natürlichen Treibhausgase erhöht, zum anderen werden synthetisch erzeugte, wie z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), hinzugefügt. Die Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Stickstoffdioxiden in der

Atmosphäre haben in den letzten 250 Jahren um 30 %, 145 % und 15 % zugenommen (IPCC, 1995).

Als Ursache für diesen Anstieg wird an erster Stelle die Nutzung fossiler Brennstoffe genannt, wodurch sich insbesondere die Konzentrationen von CO₂ und CH₄ und begrenzt die des NO₂ erhöht haben. Als Quelle der FCKWs sind industrielle Emissionen zu nennen (WBGU, 1993). Die Folge ist eine Störung der Strahlungsbilanz der Erde, womit Änderungen der Temperaturen von Atmosphäre und Ozeanen und damit der Zirkulationsmuster und Wetterlagen verbunden sind, begleitet von Änderungen des globalen Wasserkreislaufes (IPCC, 1995 in: BRONSTERT, 1997).

2.3.1.2 Klimaänderungen

Die Quantifizierung anthropogen verursachter Klimaänderungen ist schwierig, da sie nur vor dem Hintergrund *natürlicher* Klimaschwankungen erfolgen kann. Durch diese Klimavariabilität scheinen langfristige Trends, wie z.B. die globale Erwärmung, überlagert zu werden (BRONSTERT, 1997).

Nach dem 2. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) von 1995 können aber folgende Änderungen mit Sicherheit menschlichem Handeln zugeschrieben werden:

- (1) Die schon in *Kap. 2.3.1.1* erwähnte Konzentrationszunahme einiger Treibhausgase.
- (2) Der Anstieg der mittleren globalen Lufttemperatur um 0,3 bis 0,6 K seit dem Ende des 19. Jahrhunderts.
- (3) Der globale Anstieg des Meeresspiegels um 10 bis 25 cm innerhalb der letzten 100 Jahre.

Bei einem weiteren Temperaturanstieg von 0,3 bis 0,5 K pro Dekade würde die durchschnittliche globale Temperatur im Jahr 2050 um 1,8 K höher liegen als heute (IPCC, 1990, 1992 in: ARNELL, 1994). Durch Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre – was in ca. 100 Jahren zu erwarten ist, sofern keine Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emission getroffen werden – kann sich die durchschnittliche globale Temperatur um 1,4 bis 5,8 K bis zum Jahr 2100 erhöhen (IPCC, 2001).

2.3.1.3 Klimamodelle

Der Einfluss des anthropogenen Treibhauseffektes auf zukünftige Klimaverhältnisse kann mit Hilfe numerischer Klimamodelle (General Circulation Models, GCMs) beurteilt werden (LIEBSCHER et al., 1996).

Durch ein typisches globales Klimamodell werden die Atmosphäre und Ozean in eine Vielzahl von diskreten Schichten (vom Meeresboden bis an die Obergrenze der Atmosphäre) unterteilt. Jede dieser Schichten besteht aus einem zweidimensionalen Gitter, dessen horizontale Auflösung bei 250 km × 250 km bis 500 km × 500 km liegt. Auf diesem dreidimensionalen Gittersystem werden vom Modell die Gleichungen für Transport von Wärme, Impuls, Feuchtigkeit und Salzgehalt berechnet (CUBASCH et al., 1995). Die GCMs folgender Klimaforschungseinrichtungen sind derzeit im allgemeinen Gebrauch:

- (1) Canadian Climate Center (CCC)
- (2) Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL)
- (3) Goddard Institute for Space Studies (GISS)
- (4) Modell des National Center for Atmospheric Research (NCAR)
- (5) Oregon State University (OSU)
- (6) United Kingdom Meteorological Office (UKMO)
- (7) Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg (Modell ECHAM).

Obwohl in einigen Studien (siehe *Kap. 2.3.3*) unterschiedliche Simulationsergebnisse bei Verwendung verschiedener Klimamodelle erreicht wurden, stimmen die Aussagen zur durchschnittlichen globalen Temperaturerhöhung überein, wonach mit einem Anstieg von 1 bis 5 K bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu rechnen ist (LOAICIGA, 1996).

2.3.1.4 Emissionsszenarien des IPCC

Zur Einschätzung der möglichen zukünftigen Situation der Treibhausgasemission werden Emissionsszenarien aufgestellt. Unterschieden wird zwischen den Szenarien des *Business as Usual* (BaU), in denen davon ausgegangen wird, dass keine politischen Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase er-

griffen werden und Szenarien einer *Accelerated Policy* (AP), bei denen angenommen wird, dass politische Maßnahmen die Treibhausgasemission reduzieren.

1992 wurden vom IPCC sechs Szenarien vorgestellt (IS92a-f), welche unter Beachtung jeweils unterschiedlicher Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Bevölkerung, des wirtschaftlichen Wachstums, der Landnutzung, der technischen Entwicklung sowie der Verfügbarkeit von Energie die Treibhausgasemission für den Zeitraum von 1990 bis 2100 simulieren (IPCC, 1995).

2.3.1.5 Mögliche Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten

Die Abhängigkeit hydrologischer Systeme vom Klima bewirkt, dass Klimaänderungen einen Einfluss auf das hydrologische Verhalten haben. Generell führt der Treibhauseffekt zu einer Intensivierung des globalen Wasserkreislaufes (LOAICIGA, 1996).

Im folgenden werden die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts kurz dargestellt. Wo nicht anders angegeben, handelt es sich dabei um Angaben der IPCC Working Group II (IPCC, 1996 in: FREDERICK & MAJOR, 1997):

Niederschlag

Da der Niederschlag die treibende Kraft des hydrologischen Systems ist, werden Änderungen in Menge, Intensität, Dauer und jahreszeitlicher Verteilung einen direkten Einfluss auf den Abfluss und die Grundwasserneubildung haben (ARNELL, 1994).

Auf globaler Ebene bringen ansteigende Temperaturen höhere Evapotranspirationsraten hervor. Die durchschnittliche globale Niederschlagsmenge würde dadurch schätzungsweise um 3 bis 15% ansteigen. Das zeitliche und regionale Muster von Niederschlägen wird sich ändern, und es kann von mehr Starkregenereignissen ausgegangen werden (LOAICIGA, 1996).

In den gemäßigten Breiten wird durch die Änderung der großräumigen Zirkulation mit einer jahreszeitlichen Umverteilung der Niederschläge gerechnet. Im Winter kann von einem Anstieg der Niederschläge, im Sommer hingegen von einer Abnahme ausgegangen werden (LIEBSCHER, 1991).

Evapotranspiration

Eine Zunahme der Temperatur bewirkt, dass die Luft mehr Feuchtigkeit halten kann. Nach BUDYKO (1980 in: ARNELL, 1994) steigt die potentielle Evapotranspiration um ca. 4% pro 1 K Temperaturanstieg.

Die Zunahme der Instabilität der Grenzschicht Wasser-Atmosphäre über den warmen Ozeanen der Subtropen hat zu einem Anwachsen der Verdunstung um 10 bis 15% geführt (LIEBSCHER, 1991).

Grundwasser

Durch Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge ist in Regionen mit gut durchlässigen Böden im Winter mit einer Erhöhung der Grundwasserneubildung zu rechnen, während sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung bedingt durch höhere Verdunstung und geringere Niederschläge verringert (LIEBSCHER, 1991).

Nach ARNELL (1995) wird der Anteil der Winterniederschläge, die in Form intensiver Starkregen fallen, größer. Da bei derartigen Ereignissen nur wenig Wasser in den Boden infiltrieren kann und demzufolge das Einzugsgebiet direkt als Abfluss verlässt, ist die Grundwasserneubildungsrate gering.

Abfluss

Global betrachtet führen die aus einer Verdopplung der CO₂-Konzentration resultierenden Klimaänderungen zu einer Erhöhung der Abflussmenge von derzeit 40000 km³/a auf 50000 km³/a (MILLER & RUSSELL, 1992).

Generell spiegeln sich Änderungen des Niederschlags verstärkt in Änderungen des Abflusses wieder, wobei die stärksten Änderungen in Gebieten mit geringen Abflusskoeffizienten auftreten (ARNELL, 1992; ARNELL, 1994; CHIEW et al., 1995; ARNELL & REYNARD, 1996). Studien in Großbritannien haben gezeigt, dass allein eine Erhöhung des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags um 10% zu einem Anstieg der Abflussmenge zwischen 12 und 30% führen kann, mit dem größten Anstieg in den trockensten Regionen (ARNELL, 1994). In den nördlichen Breiten wird infolge ansteigender Niederschläge generell mit einem Anstieg des Abflusses gerechnet. Dennoch kann auch in Gegenden mit ansteigenden Niederschlägen durch erhöhte Evapotranspiration der Abfluss sinken.

Die Speicherung von Niederschlagswasser in Form von Schnee und Eis sorgt, verbunden mit den Schmelzvorgängen in den Sommermonaten, für eine jahreszeitlich ausgeglichene Wasserführung im Abflussregime bedeutender Flussläufe in Mitteleuropa, wie z.B. des Rheins. Die Zunahme der Niederschläge im Winter sowie die durch die Temperaturerhöhung bedingte geringere Speicherung dieser Niederschläge in Form von Schnee und Eis führt zu einem erhöhten Abfluss in den Wintermonaten (LIEBSCHER, 1991; KWADIJK, 1991). GCM-Rechnungen zeigen außerdem bei globaler Erwärmung ein Ansteigen der Häufigkeit von Hochwasserereignissen.

2.3.2 Abschätzung der hydrologischen Folgen von Klimaänderungen

Nach GLEICK (1989) und ARNELL (1995) können zur Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt die im folgenden beschriebenen Methoden angewandt werden.

2.3.2.1 Paläoklimatische Untersuchungen

Diese Methode geht davon aus, dass die klimatischen und hydrologischen Bedingungen warmer Perioden erdgeschichtlicher Zeit ähnlich denen der heutigen, anthropogen bedingten globalen Erwärmung sind.

Derartige Untersuchungen basieren auf der Rekonstruktion vergangener Umweltsituationen unter Nutzung geologischer (z.B. Sedimentablagerungen, Eisbohrkerndaten) und botanischer (z.B. Pollenanalyse, Dendrochronologie) Beweise (ARNELL, 1994; ARNELL, 1995; GLEICK, 1989; BÁRDOSSY, 1994).

So wurden z.B. in den Studien von KNOX (1993) und ELY (1993) Sedimentablagerungen an Uferbänken untersucht, um Rückschlüsse auf prähistorische Hochwasserereignisse zu erhalten. KNOX (1993) konnte mit dieser Methode nachweisen, dass Änderungen in der Häufigkeit und Größenordnung von Überflutungen des Mississippi über einen Zeitraum von 7000 Jahren mit Änderungen der durchschnittlichen, jährlichen Temperatur um 1 bis 2 K zusammenhängen.

2.3.2.2 Historische Untersuchungen

Durch Untersuchung langer Zeitreihen von Messdaten verschiedener Klimavariablen ist es möglich, Änderungstendenzen des Klimas festzustellen. Direkte Prognosen lassen sich aber nur schwer ableiten (BÁRDOSSY, 1994).

Durch Untersuchung der Wetterlagenhäufigkeit in Europa seit 1891 anhand einer Zeitreihe täglicher Wetterkarten konnten BÁRDOSSY & CASPARY (1990) nachweisen, dass seit den 70er Jahren die Vorkommenshäufigkeit der Wetterlage West zyklonal in den Wintermonaten angestiegen und in den Sommermonaten abgefallen ist. Da mit dieser Wetterlage in Mitteleuropa typischerweise langanhaltende, großflächige Niederschläge einhergehen, können Korrelationen zwischen der Zunahme dieser Wetterlage und gehäuften Winterhochwasserereignissen in bestimmten Gebieten aufgestellt werden (BÁRDOSSY & CASPARY, 1990; BRONSTERT, 1997).

Für ein Untersuchungsgebiet in Südwestdeutschland wurde festgestellt, dass die 7 größten Hochwasserabflüsse des Beobachtungszeitraumes, 1930 bis 1994, insbesondere die Extremhochwasser der Abflussjahre, 1990, 1993 und 1995 durch die Großwetterlage West zyklonal verursacht wurden (CASPARY, 1996; CASPARY & BÁRDOSSY, 1995).

Langzeituntersuchungen in Irland zeigen, dass seit der Mitte der 70er Jahre ein Anstieg der Niederschläge und des Abflusses festzustellen sind. Für die Westküste Irlands beträgt der Niederschlagsanstieg 10%. Außerdem konnten seit dem »change point« im Jahr 1975 ein verstärktes Auftreten von Extremniederschlagsereignissen gezeigt werden (KIELY, 1999).

2.3.2.3 Klimaänderungsszenarien

Hypothetische Szenarien

Für die verschiedenen Klimaparameter werden willkürliche Änderungen angenommen (z.B. Temperaturanstieg von +2 K oder +4 K und Niederschlagszunahmen um 10% oder 20%) und die Folgen auf den Wasserhaushalt eines Gebietes mit Hilfe von hydrologischen Modellen bestimmt.

In vielen Studien, in denen die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt untersucht werden sollen, wird zuerst mit Hilfe hypothetischer Szenarien getestet, wie empfindlich die

einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts, z.B. der Abfluss, auf diese Änderungen reagieren (vgl. ARNELL, 1995; BOORMAN & SEFTON, 1997; CHIEW et al., 1995; PANAGOULIA & DIMOU, 1997). Diese Untersuchungen können deshalb als einfache Sensitivitätsanalysen bezeichnet werden (BÁRDOSSY, 1994).

Realistischere Klimaänderungsszenarien basieren auf Aussagen von globalen Zirkulationsmodellen, die entweder transiente (zeitabhängige) Klimaänderungen simulieren oder als stationäre Szenarien den Zustand eines Zeitpunkts in der Zukunft prognostizieren.

Transiente Szenarien

In transienten Klimaänderungsszenarien werden die Modellrechnungen ausgehend vom heutigen Gehalt der Treibhausgase in der Atmosphäre unter Annahme verschiedener *Entwicklungen* zukünftiger Treibhausgasemissionen durchgeführt (LIEBSCHER et al., 1996). Zugrundegelegt werden hier in den meisten Studien die vom IPCC (1992) veröffentlichten Emissionsszenarien IS92a-f für den Business-as-usual-Fall.

Stationäre Szenarien

In stationären Szenarien wird für die Modellierung ein möglicher zukünftiger *Zustand*, z.B. die Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre relativ zu einem Basisjahr, zugrundegelegt (LOAICIGA, 1996). Darauf aufbauend können dann für bestimmte Zeitpunkte in der Zukunft (häufig die Jahre 2030, 2050, 2070 und 2100; vgl. CHIEW et al., 1995; GRABS et al., 1997; SCHREIDER et al., 1996) die Klimaänderungen simuliert werden.

In den meisten Studien werden die Auswirkungen mehrerer verschiedener Szenarien untersucht.

2.3.2.4 Nutzung der Aussagen Globaler Zirkulationsmodelle

Bei der Nutzung der Simulationsergebnisse aus Experimenten mit Klimamodellen tauchen mehrere Probleme auf:

- (1) Datenunsicherheiten beeinflussen die Modellierung:
Beispielsweise gibt es kaum Niederschlagsdaten von den Ozeanflächen (BÁRDOSSY, 1994). Wei-

tere Klimavariablen, die im Wasserkreislauf eine wichtige Rolle spielen, wie z.B. Abfluss und Evapotranspiration, werden durch die GCMs ebenfalls nur unbefriedigend dargestellt (LOAICIGA, 1996). Nach IPCC (1992 in: LIEBSCHER, 1996) besteht außerdem Unsicherheit bei der Modellierung von:

- (a) Wolkenentstehung und Strahlungseigenschaften der Wolken
 - (b) Wirkung der Ozeane auf den Energieaustausch mit der Atmosphäre
 - (c) Wirkung der tieferen Ozeanbereiche und der Meeresströmungen
 - (d) Zukünftige Emissionsverhältnisse
 - (e) Chemisches Verhalten der Treibhausgase
 - (f) Einfluss des Polareises
 - (g) Landflächenhydrologie
 - (h) Vegetationsveränderungen
 - (i) Verminderung des Ozongehaltes in der Atmosphäre
 - (j) Strahlungsabschirmende Wirkung von Schwefelaerosolen
- (2) Die verschiedenen Modelle liefern unterschiedliche Ergebnisse (vgl. GELLENS & ROULIN, 1998).
 - (3) Grobe räumliche Auflösung der Modelle:
Aufgrund der groben räumlichen Auflösung der GCMs (vgl. Kap. 2.3.1.3) sind die Ergebnisse aus Experimenten mit Klimamodellen nicht direkt für hydrologische Wirkungsstudien brauchbar, es sei denn, solche Untersuchungen werden ebenfalls für ein großes Untersuchungsgebiet (Makroskala) angesetzt. MILLER & RUSSELL (1992) nutzten z.B. Simulationsergebnisse des GCMs GISS, um Abflussänderungen der 33 größten Flüsse der Welt bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu untersuchen.

2.3.2.5 Downscaling der Aussagen Globaler Zirkulationsmodelle

Um die regionalen Auswirkungen von Klimaänderungen abzuschätzen, wurde eine Methode entwickelt, mit der die großräumige Information der GCMs auf die lokale (regionale) Ebene übertragen werden kann (BÁRDOSSY, 1994; ARNELL, 1995). Diese Übertragung von der großen auf die kleine Skala wird als *Downscaling* bezeichnet.

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Daten für regionale Untersuchungen aus den GCMs abzuleiten (BÁRDOSSY, 1994):

- (1) Statistische Methoden (*semi-empirical downscaling*)
- (2) Einbindung hochauflösender, regionaler Klimamodelle (RCMs) in die GCMs, wobei die Randbedingungen dieser lokalen Modelle vom GCM vorgegeben werden (*nested model downscaling*)

Semi-empirical downscaling

Bei diesem Verfahren wird angenommen, dass zwischen lokalem Wetter und globalen Zirkulationsmustern Zusammenhänge bestehen, die mathematisch, meist durch lineare Regression, definiert werden können (BÁRDOSSY, 1994). In der Regel beinhalten derartige Untersuchungen daher u.a. auch die Klassifizierung atmosphärischer Zirkulationsvorgänge (WILBY et al., 1999).

Nach BAUR et al. (1944 in: BÁRDOSSY, 1994) wird eine Großwetterlage definiert als die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes mindestens von der Größe Europas während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleichbleiben.

Zur Klassifizierung dieser Großwetterlagen kann auf verschiedene Methoden zurückgegriffen werden, wobei unterschieden wird zwischen subjektiver Klassifikation durch Meteorologen und objektiver, automatischer Klassifikation (BÁRDOSSY, 1994):

(1) Subjektive Klassifikation

Als Beispiel für eine subjektive Klassifikation kann die Klassifikation der Großwetterlagen nach BAUR (1944 in: BÁRDOSSY, 1994) genannt werden, bei der die Lage der Höhenhoch- bzw.

Höhentiefdruckgebiete und Tröge sowie die Erstreckung der Frontalzonen die Grundlage bilden. Basierend auf diesem Klassifikationsschema wurden von HESS & BREZOWSKY (1969 in: BÁRDOSSY, 1994) 29 Großwetterlagen für Europa zusammengestellt (siehe Tab. 2.18, S. 50).

(2) Objektive Klassifikation

Zur detaillierten Beschreibung der jeweiligen Methodik muss auf die entsprechende Literatur verwiesen werden, da im folgenden die verschiedenen Klassifizierungsansätze nur der Vollständigkeit halber genannt werden.

- (a) Entfernungsbasierte Klassifikation (k-means-clustering)
- (b) Klassifikation mit neuronalen Netzen
- (c) Klassifikation mit Fuzzy-Regeln

Da zur Bewertung des Einflusses von Klimaänderungen auf den regionalen Wasserhaushalt insbesondere der Niederschlag als maßgebliche Größe betrachtet wird, wird im folgenden dargestellt, wie die regionale Abschätzung der Niederschlagsänderungen aus GCM-Ergebnissen ermöglicht wird.

Tatsache ist, dass der Niederschlag eng mit Richtung und Intensität der atmosphärischen Strömung verbunden ist und somit Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Großwetterlagen zu erkennen sind. Beispielsweise bringt die Großwetterlage Wz mit hoher Wahrscheinlichkeit Niederschlag (79,6% im Winter und 76,4% im Sommer) (BÁRDOSSY, 1994).

Mittels eines Kopplungsmodells »Großwetterlagen – Niederschlag« kann daher aus den nach obigem Schema definierten Großwetterlagen der regionale Niederschlag hergeleitet werden (vgl. hierzu ARNELL, 1995; BÁRDOSSY, 1994; LEAVESLEY, 1994; BÁRDOSSY & PLATE, 1992; HAY, 1991).

Tab. 2.18 Klassifikation der Großwetterlagen nach HESS & BREZOWSKY (1969 in: BÁRDOSSY, 1994)

Zirkulationsform			
Großwettertyp	Kürzel	Großwetterlage	Kürzel
Zonale Zirkulation			
West	W	1. Westlage antizyklonal	Wa
		2. Westlage zyklonal	Wz
		3. Südliche Westlage	Ws
		4. Winkelförmige Westlage	Ww
Gemischte Zirkulationsform			
Südwest	SW	5. Südwestlage antizyklonal	Swa
		6. Südwestlage zyklonal	Swz
Nordwest	NW	7. Nordwestlage antizyklonal	Nwa
		8. Nordwestlage zyklonal	Nwz
Hoch Mitteleuropa	HM	9. Hoch über Mitteleuropa	HM
		10. Hochdruckbrücke über Mitteleuropa	BM
Tief Mitteleuropa	TM	11. Tief über Mitteleuropa	TM
Meridionale Zirkulationsform			
Nord	N	12. Nordlage antizyklonal	Na
		13. Nordlage zyklonal	Nz
		14. Hoch Nordmeer-Inland antizyklonal	HNa
		15. Hoch Nordmeer-Inland zyklonal	HNz
		16. Hoch Britische Inseln	HB
		17. Trog Mitteleuropa	TrM
Nordost	NE	18. Nordostlage antizyklonal	NEa
		19. Nordostlage zyklonal	NEz
Ost	E	20. Hoch Fennoskandien antizyklonal	HFa
		21. Hoch Fennoskandien zyklonal	HFz
		22. Hoch Nordmeer-Fennoskandien antizyklonal	HNFa
		23. Hoch Nordmeer-Fennoskandien zyklonal	HNFz
Südost	SE	24. Südostlage antizyklonal	SEa
		25. Südostlage zyklonal	SEz
Süd	S	26. Südlage antizyklonal	Sa
		27. Südlage zyklonal	Sz
		28. Tief Britische Inseln	TB
		29. Trog Westeuropa	TrW

Hauptvorteil des semi-empirical downscaling ist dessen geringer technischer und rechnerischer Aufwand (HEWITSON & CRANE, 1996, STORCH et al., 1993, WILBY et al., 1999).

Nachteile des semi-empirical downscaling sind:

- (1) Die Methode kann nur angewandt werden, wenn ein enger Zusammenhang zwischen den großskaligen und den kleinskaligen Parametern besteht, was jedoch oftmals nicht der Fall ist (STORCH et al., 1993).
- (2) Durch die Annahme einer linearen Beziehung zwischen den globalen und den lokalen klimatischen Merkmalen wird die Gültigkeit der Ergebnisse eingeschränkt (STORCH et al., 1993).
- (3) Kurzzeitvariabilitäten lassen sich durch lineares downscaling nicht realistisch modellieren, da sie

von den Berechnungen der GCMs, die sich auf Mittelwerte beziehen, nicht erfasst werden (BÜRGER, 1996).

Expanded downscaling

Eine Verbesserung der Ergebnisse des *linear downscaling* wird durch die Methode des *expanded downscaling* nach BÜRGER (1996) erzielt, da in diesem Ansatz von *bilinearen* Beziehungen zwischen der lokalen Klimavariabilität und der globalen Zirkulationsvariabilität ausgegangen wird (BÜRGER, 1996).

Nested model downscaling

Die Anwendung dieser Methode sieht vor, regionale dynamische Klimamodelle mit einer Auflösung von 20 bis 50 km (WILBY et al., 1999), unter Beachtung der Aussagen aus globalen Zirkulationsmodellen

(GCMs) laufen zu lassen. Zum Beispiel können GCM-Simulationsergebnisse eines bestimmten Zeitintervalls für Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre, Temperatur der Troposphäre und Windgeschwindigkeit genutzt werden, um mittels des regionalen Modells die Niederschlagsverteilung einer Region abzuschätzen (LOAICIGA, 1996). Nach ARNELL (1995) wäre es möglich, die Berechnungsergebnisse direkt als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung eines Einzugsgebietes zu nutzen.

Bei der Einbindung des hochauflösenden Modells in das grobauflösende wird unterschieden zwischen der *One-way-Technik*, bei der nur das regionale Modell mit Information des globalen Modells beliefert wird und der *Two-way-Technik*, die auch Rückkopplungen (*feedback*) zwischen der regionalen und der globalen Ebene berücksichtigt (GIORGI & MEARNs, 1991).

Vorteile des nested model downscaling sind:

- (1) Regionale Klimamodelle haben die Fähigkeit, auf von außen einwirkende Kräfte wie z.B. Änderungen in der Chemie der Atmosphäre auf physikalischem Weg zu reagieren (WILBY et al., 1999).
- (2) Diese Modelle ermöglichen außerdem eine gute Simulation des regionalen und lokalen Klimas, da Topographie und Landschaft berücksichtigt werden (ARNELL, 1995).

Dem stehen folgende *Nachteile* gegenüber:

- (1) Durch die hohe räumliche Auflösung der regionalen Modelle ist der Rechenaufwand dieses Downscaling-Verfahrens sehr hoch (GIORGI & MEARNs, 1991, HEWITSON & CRANE, 1996).
- (2) Die Leistungsfähigkeit der regionalen Klimamodelle wird durch Fehler im GCM begrenzt (BRONSTERT, 1997).
- (3) Zur Erfassung kleinräumiger Prozesse wie z.B. konvektive Niederschlagsbildung bei Gewitter reicht auch die Auflösung der regionalen Klimamodelle nicht aus (BRONSTERT, 1997).

2.3.3 Mögliche Folgen von Klimaänderungen für die Abflussentstehung

2.3.3.1 Einfluss auf die Hochwasserentstehung

Zur Klärung der Frage des Einflusses von Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung meteorologischer Bedingungen. Entscheidend sind hier Dauer, Intensität und räumliche Ausdehnung von Niederschlägen sowie Zeitpunkt und Größenordnung der Schneeschmelze (BRONSTERT, 1997).

Wie schon in den *Kap. 2.3.1.5*, *Kap. 2.3.2.2* erwähnt, führen durch den CO₂-Konzentrationsanstieg induzierte Temperaturerhöhungen zu Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation und damit zu einer Änderung der Wetterlagenhäufigkeit in Mitteleuropa. Die Zunahme der Vorkommenshäufigkeit und Persistenz der niederschlagsreichen Wetterlage West zyklonal (Wz) in den Wintermonaten hat eine Erhöhung der Winterniederschläge zur Folge. Es ist daher insbesondere in den Wintermonaten mit einem Anstieg der Abflussmenge zu rechnen. Das Hochwasserrisiko wird zusätzlich dadurch erhöht, dass aufgrund der Temperaturerhöhung der meiste Niederschlag in Form von Regen fällt und nicht als Schnee »zwischen gespeichert« wird.

CASPARY (1996) verdeutlicht, dass der Anstieg der Häufigkeit und Dauer der Großwetterlage Wz in den Wintermonaten Dezember bis Februar seit der Mitte der 70er Jahre in Südwestdeutschland zu einer Zunahme der Extremhochwasser geführt hat. Für die Zukunft prognostiziert er für zahlreiche Einzugsgebiete der Mittelgebirgsregionen ein im Vergleich zum Zeitraum vor den 80er Jahren 10fach höheres Hochwasserrisiko, falls die Häufigkeit und Dauer der Wetterlage West zyklonal in den Wintermonaten auf dem derzeitigen hohen Niveau verbleibt oder sich gar erhöht. Die Winterhochwasser in Baden-Württemberg im Februar 1990, Dezember 1993 und Januar 1995 können bereits als Antwort der Einzugsgebiete auf die Änderungen des Winterklimas gedeutet werden (CASPARY & BÁRDOSSY, 1995; CASPARY, 1996).

Lokale, plötzliche Hochwasser (*flash floods*) sind das Ergebnis extremer Niederschlagsereignisse wie z.B. intensiver Gewitterregen. Da quantitative Vorhersagen von lokalen, hochintensiven Starkregen bislang nur begrenzt möglich sind, besteht hinsichtlich der Frage, inwieweit Klimaänderungen einen Einfluss auf Auftretenshäufigkeit und -ort lokaler Starkregen haben, noch Forschungsbedarf (BRONSTERT, 1996).

Nach IPCC (1995) ist es derzeit trotz der Ergebnisse zahlreicher Studien schwierig, den Einfluss von anthropogen verursachten Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung nachzuweisen. Verantwortlich für die Unsicherheiten sind:

- (1) Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Szenarien zur Simulation fluterzeugender Niederschlagsänderungen auf Einzugsgebietsebene.
- (2) Unzureichende Informationen zu Überflutungsereignissen innerhalb der meisten klimatischen und hydrologischen Untersuchungen.
- (3) Schwierigkeiten bei der Trennung von durch Klimaänderungen hervorgerufener Effekte von natürlichen Schwankungen oder anderen anthropogen bedingten Änderungen, wie z.B. Landnutzungsänderungen.

2.3.3.2 Studien zum Einfluss auf die Abflussentstehung

Studien, in denen die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Abflussentstehung eines oder mehrerer Einzugsgebiete untersucht werden, beinhalten in der Regel folgende Schritte:

- (1) Auswahl eines für die angestrebte Untersuchung und das Untersuchungsgebiet geeigneten hydrologischen Modells sowie Kalibrierung und Validierung dieses Modells anhand von Beobachtungsdaten (Messwerten).
- (2) Entwicklung eines Klimaänderungsszenarios.
- (3) Ablauf des hydrologischen Modells unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen (Basislinie), dann unter den vom Szenario prognostizierten zukünftigen und Vergleich der Ergebnisse.

Im folgenden werden Methodik und Ergebnisse einiger Studien vorgestellt, in denen untersucht wur-

de, wie der Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes auf klimatische Änderungen reagiert. Da in erster Linie der Einfluss von Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung verdeutlicht werden soll, werden hier vor allem die den Abfluss betreffenden Aussagen dieser Arbeiten wiedergegeben.

In den meisten Studien wird nach der oben beschriebenen Methode vorgegangen. Unterschiede bestehen aber hinsichtlich der Anzahl und Größe der untersuchten Einzugsgebiete, der verwendeten hydrologischen Modelle sowie der aufgestellten Klimaszenarien, wobei hier die Spannweite von einfachen hypothetischen Szenarien bis hin zu Szenarien reicht, die aus GCM-Ergebnissen heraus entwickelt wurden. In vielen Studien wird die Wirkung mehrerer, verschiedener Szenarien geprüft.

Auswirkungen auf der Basis hypothetischer Szenarien

Um zu untersuchen, wie empfindlich der Abfluss des Rheins auf eine, infolge der globalen Erwärmung reduzierte Speicherung von Niederschlag in den Alpen in Form von Schnee reagiert, setzte KWADJIK (1991) für die Wasserhaushaltsberechnung eine durchschnittliche, jährliche Temperaturerhöhung von 2 K voraus. Diese +2 K ergeben sich als Mittelwert aus einem für die Wintermonate angenommenen Temperaturanstieg um 4 K, einen Temperaturanstieg um 2 K im Frühjahr und Herbst und gleichbleibender Sommertemperatur. Durch die Temperaturerhöhung im Winter würde die 0°C-Isotherme von derzeit 700 m ü. NN auf 1400 m ü. NN ansteigen. Unter diesen Bedingungen verringert sich die Speicherung von Niederschlag als Schnee von derzeit 132 mm auf 49 mm, was einen Anstieg des Abflusses in den Wintermonaten und eine Reduzierung der Abflussmenge in den Sommermonaten zur Folge hat.

CHIEW et al. (1995) entwickelten durch Kombination willkürlicher Temperatur- und Niederschlagsänderungen hypothetische Szenarien für 28 Einzugsgebiete in Australien und wiesen nach, dass sich Änderungen des Niederschlags verstärkt in Änderungen des Abflusses widerspiegeln. Während in den feucht-temperierten Gebieten die prozentuale Änderung des Abflusses doppelt so groß ist wie die prozentuale Änderung des Niederschlags, kann in trockenen Gegenden von einer Verfünffachung der prozentualen Abflussänderung in Bezug zu prozen-

tualen Niederschlagsänderungen ausgegangen werden. Eine Temperaturerhöhung allein hat dagegen nur geringe Auswirkungen auf den Abfluss (CHIEW et al., 1995).

Dass Änderungen im Abfluss in erster Linie von Änderungen des Niederschlages und nur sekundär von Temperaturänderungen abhängen, wurde auch von PANAGOULIA & DIMOU (1997) mittels hypothetischer Szenarien für ein Einzugsgebiet in Griechenland bestätigt. Ansteigende Niederschläge resultieren hier in einer Erhöhung der Hochwasserhäufigkeit, des Hochwasservolumens und der Hochwasserspitzen.

Mittels hypothetischer Szenarien verglichen BOORMAN & SEFTON (1997) die Simulationsergebnisse von zwei hydrologischen Modellen, IHACRES und PDSM. Für drei Einzugsgebiete in Belgien wurden die Auswirkungen von Temperaturänderungen um 0 K, +2 K und +4 K kombiniert mit Niederschlagsänderungen um 0%, +10% und -10% auf MQ, Q95 und MHQ untersucht. Die Ergebnisse zeigen wie wichtig es ist, (1) den Einfluss von Klimaänderungen auf den Abfluss anhand verschiedener Indizes zu ermitteln und (2) verschiedene hydrologische Modelle unter gleichen Bedingungen laufen zu lassen, da die Ergebnisse stark vom eingesetzten Modell abhängen können. So wurde z.B. für ein Einzugsgebiet mit dem Modell PDSM bei einem Temperaturanstieg von +4 K kombiniert mit einem Anstieg der Niederschläge um 10% ein Anstieg des mittleren jährlichen Abflusses um 9%, eine Abnahme des Q95 von 7% und ein Anstieg des MHQ um 16% ermittelt.

Für ein weiteres Einzugsgebiet wurden ebenfalls im (+4 K, +10%)-Test mit IHACRES eine Verringerung des Abflusses um 33%, dagegen bei gleichen Bedingungen mit PDSM ein Anstieg um 9% simuliert.

Auswirkungen auf der Basis transienter Szenarien

GELLENS & ROULIN (1998) untersuchen mittels des hydrologischen Modells IRMB die Auswirkungen der von 7 verschiedenen Klimaänderungsszenarien prognostizierten zukünftigen klimatischen Bedingungen auf den Wasserhaushalt von 8 Einzugsgebieten in Belgien untersucht. Alle Szenarien basieren auf GCM-Experimenten bei Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, wobei die

simulierten Klimaänderungen in zwei Szenarien als stationärer Zustand und in fünf Szenarien als transiente Änderungen wiedergegeben werden. Von Szenario zu Szenario variieren die Angaben zu zukünftigen Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Bei den durchschnittlichen jährlichen Temperaturänderungen reicht die Spannbreite von +1,4 bis +4,8 K, den Niederschlag betreffend werden durchschnittliche jährliche Änderungen von -9 mm bis +103 mm ermittelt. Als einziges unter allen Szenarien ähnliches Ergebnis wurde ermittelt, dass in Einzugsgebieten, in denen Oberflächenabfluss vorherrscht, mit einer Zunahme der Hochwasserhäufigkeit im Winter zu rechnen ist.

Auswirkungen auf der Basis stationärer Szenarien

MILLER & RUSSELL (1992) untersuchten den Abfluss der 33 bedeutendsten Flüsse der Welt unter der Annahme einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und den daraus resultierenden Klimaänderungen, die mittels des GCMs GISS simuliert wurden. Als Ergebnis konnten sie festhalten, dass sich unter den klimatischen Bedingungen bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration der Abfluss von 25 dieser 33 Flüsse erhöhen wird, wobei dieser Anstieg in erster Linie mit höheren Niederschlägen in den entsprechenden Einzugsgebieten verbunden ist.

BULTOT et al. (1988) nutzten ebenfalls das Szenario 2 × CO₂, um den Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von drei Einzugsgebieten in Belgien zu untersuchen. Dazu ließen sie ein vom Royal Meteorological Institut of Belgium entwickeltes hydrologisches Modell (IRMB) unter derzeitigen Klimabedingungen (Szenario 0) und unter den klimatischen Bedingungen, die sich bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in Belgien einstellen würden (Szenario 1), laufen. Die Angaben zu den Änderungen der Klimavariablen unter Szenario 1 wurden aus Simulationsversuchen mit GCMs entnommen. Den Abfluss betreffend prognostizieren sie für Einzugsgebiete mit geringer Infiltrationsrate unter den Bedingungen des Szenario 1 eine Zunahme der Hochwasserhäufigkeit in den Wintermonaten.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen BULTOT et al. (1992) für ein Untersuchungsgebiet in der Schweiz, das Einzugsgebiet der Murg. Auch in dieser Studie

wurde das hydrologische Modell IRMB unter den Bedingungen der Szenarien 0 und 1 angewandt und nachgewiesen, dass sich das jahreszeitliche Verhalten des Abflusses ändern wird, während es bei der durchschnittlichen jährlichen Abflussmenge kaum Veränderungen gibt. Dies ist darauf zurückzuführen,

dass den ermittelten höheren Abflussmengen im Winter niedrigere Abflussmengen in den Sommermonaten gegenüberstehen, wobei die höheren Abflussmengen im Winter auf den für die Wintermonate prognostizierten Anstieg des Niederschlags zurückzuführen sind.

Tab. 2.19 Änderungen der Klimavariablen Temperatur (T) und Niederschlag (P) sowie des Abflusses (R) unter den Bedingungen des Szenario 1 (bei Verdopplung der CO₂-Konzentration); verändert nach BULTOT et al. (1992)

Variable	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
T [°C]	3,1	3,4	3,4	3,1	2,8	2,7	2,5	2,3	2,3	2,7	2,8	3,2	2,8
P [mm]	9,3	10,5	9,9	10,2	-1,2	-2,7	-1,6	-2,2	0,0	5,3	8,1	8,7	54,3
R [mm]	11,7	4,3	-2,9	2,2	-1,9	-5,9	-4,7	-5,7	-4,2	-0,6	1,8	7,5	1,6

ARNELL & REYNARD (1996) untersuchten u.a. die Abflussänderungen von 21 Einzugsgebieten in Großbritannien unter von einem stationären Szenario prognostizierten klimatischen Bedingungen des Jahres 2050. Entwickelt wurde das Szenario von der Climate Change Impacts Review Group (CCIRG, 1991) in Großbritannien unter Berücksichtigung der Ergebnisse verschiedener GCM-2-x-CO₂-Experimente (ARNELL & REYNARD, 1996). Demnach wird für das Jahr 2050 für England, Wales und Schottland ein übers Jahr verteilter Temperaturanstieg von 2,1 bis 2,9 K, ein Anstieg der potentiellen Evaporation von 7 bis 9% im Sommer und 13 bis 18% im Winter sowie ein Anstieg der Niederschläge im »Best-estimate«-Fall von 0% in den Sommermonaten, 4% im Frühjahr und Herbst und 8% im Winter vorausgesagt.

Bei Anwendung eines konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modells wurde deutlich, dass derartige Klimaveränderungen zu einem Anstieg des Abflusses in den Wintermonaten führen. Die größ-

ten prozentualen Änderungen im monatlichen Abfluss sind dabei, wie schon in anderen Studien festgestellt wurde (vgl. CHIEW et al., 1995), in Einzugsgebieten zu erwarten, in denen die Niederschlagsmenge, die direkt zu Abfluss wird, am geringsten ist.

Ein für das Jahr 2050 von der Climate Research Unit der University of East Anglia entwickeltes stationäres Szenario ist auch Grundlage einer Studie von GRABS et al. (1997). Die Konstruktion dieses Szenarios basiert auf Klimänderungsexperimenten mit den GCMs UKHI und XCCC (gleich: CCC; vgl. auch BORMAN & SEFTON, 1997) und gilt zum einen für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins und jeweils angepasst für die Einzugsgebiete von Murg, Ergholz, Broje, Thur, Saar und Vecht. In der Tabelle werden die von den beiden GCMs für das Jahr 2050 ermittelten durchschnittlichen Temperatur- und Niederschlagsänderungen für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins dargestellt.

Tab. 2.20 Von den GCMs (a) UKHI und (b) XCCC ermittelte Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Einzugsgebiet des Rheins für das Jahr 2050 (verändert nach GRABS et al., 1997)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperaturanstieg [K]													
a	2,8	3,0	2,5	2,0	1,8	1,7	1,6	2,5	2,5	2,1	1,4	2,1	2,2
b	1,2	1,4	1,1	0,8	1,0	1,1	1,4	1,2	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Niederschlagsanstieg [mm]												
a	15,6	11,5	8,1	5,6	0,1	-4,7	-7,5	-10,4	-13,4	4,2	2,9	11,8	1,0
b	14,8	9,1	12,2	7,5	0,8	-3,5	-10,7	-5,4	-6,6	0,2	9,7	12,7	2,5

Obwohl in dieser Studie je nach untersuchtem Einzugsgebiet verschiedene hydrologische Modelle angewandt wurden und die den jeweiligen Einzugsgebieten angepassten Szenarien leicht voneinander abweichen, sind die Ergebnisse miteinander vergleichbar. Es ist deshalb möglich, Aussagen zu den von diesem Szenario verursachten Änderungen des Wasserhaushalts zu treffen. Zusammenfassend lassen sich für die Teilregionen des Rhein-Einzugsgebietes folgende Trends nachweisen:

- (1) In den Alpen wird sich durch den Temperaturanstieg die Akkumulation von Schnee verringern, was im Winter zu höheren und im Sommer niedrigeren Abflüssen führt. Dies wird verstärkt durch einen starken Anstieg der Niederschläge im Winter.
- (2) In den Mittelgebirgsregionen wird der Abfluss durch ansteigende Niederschläge auf der einen Seite und durch, infolge der Temperaturerhöhung verursachte, ansteigende Evapotranspiration auf der anderen Seite im Gleichgewicht gehalten. Hier sind die jahreszeitlichen Unterschiede im Abfluss nicht so stark ausgeprägt wie in den alpinen Gebieten.
- (3) Im Flachland werden ansteigende Winterniederschläge zu einem Anstieg des Winterabflusses führen. Während der Sommermonate verringert sich der Abfluss infolge der höheren Evapotranspiration (GRABS et al., 1997).

2.3.3.3 Zusammenfassung der Hauptaussagen der vorgestellten Studien

- (1) Durch Verdopplung der CO₂-Konzentration wird global betrachtet die Abflussmenge erhöht (MILLER & RUSSELL, 1992).
- (2) Klimaänderungen infolge der CO₂-Verdopplung führen in Europa zu ansteigenden Niederschlägen im Winter (BULTOT et al., 1988; BULTOT et

al., 1992; ARNELL & REYNARD, 1996; GELLENS & ROULIN, 1998).

- (3) Änderungen des Niederschlags spiegeln sich verstärkt in Änderungen des Abflusses wieder (CHIEW et al., 1995, PANAGOULIA & DIMOU, 1997).
- (4) Ein 10%-iger Anstieg der durchschnittlichen jährlichen Niederschläge kann zu einer Erhöhung der durchschnittlichen jährlichen Abflussmenge zwischen 12 und 30% führen (ARNELL, 1994).
- (5) Die prozentualen monatlichen Abflussänderungen sind größer als die prozentualen jährlichen Abflussänderungen (ARNELL & REYNARD, 1996).
- (6) Der Einfluss von Klimaänderungen auf den Abfluss hängt vom Abflusskoeffizienten ab. Die größten Änderungen sind in Gebieten mit geringem Abflusskoeffizienten, in trockenen Regionen zu erwarten (ARNELL, 1992; CHIEW et al., 1995; ARNELL & REYNARD, 1996)
- (7) Durch Temperaturerhöhung verringert sich die Speicherkapazität von Niederschlag in Form von Schnee und es kommt zu einer Erhöhung der Winterabflüsse (KWADIJK, 1991; GRABS et al., 1997)
- (8) Der Anstieg der Niederschläge im Winter erhöht die Hochwasserhäufigkeit (BULTOT et al., 1988; BULTOT et al., 1992; ARNELL & REYNARD, 1996; GELLENS & ROULIN, 1998).

2.3.4 Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landnutzung

2.3.4.1 Auswirkungen des Anstiegs der CO₂-Konzentration auf Pflanzen

Unabhängig davon, zu welchen klimatischen Veränderungen ein Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre führt, wird er auf jeden Fall einen direkten Einfluss auf die Entwicklung der Vegetation

haben, z.B. durch Änderung der Photosyntheserate und Änderungen im Wasserhaushalt der Pflanze (DRAKE, 1992; KIMBALL, 1993; BÁRDOSY, 1994; ARNELL, 1994).

Änderungen der Photosyntheserate

Inwieweit die Produktivität einer Pflanze durch eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration beeinflusst wird, hängt davon ab, ob sie je nach Art der CO_2 -Fixierung bei der Photosynthese dem C_3 - oder dem C_4 -Typus zuzuordnen ist.

Bei den C_3 -Pflanzen erfolgt die CO_2 -Assimilation durch Vereinigung von CO_2 mit einem aus fünf

C-Atomen bestehenden Akzeptormolekül (Ribulose-1,5-Bisphosphat). Als Produkt dieses sogenannten Carboxylierungsvorganges entstehen über eine instabile C_6 -Verbindung zwei C_3 -Moleküle (3-Phosphoglycerinsäure). Zu den Kulturpflanzen mit C_3 -Photosynthese gehören u.a. Weizen, Reis, Kartoffeln, Hafer und Gerste. Während der C_4 -Photosynthese wird dagegen als Produkt der Carboxylierung eine aus vier C-Atomen bestehende Oxalessigsäure gebildet. Mais ist z.B. eine C_4 -Pflanze. Für beide Wege gilt, dass die Abhängigkeit der Photosyntheserate von der CO_2 -Konzentration einer Sättigungskurve folgt.

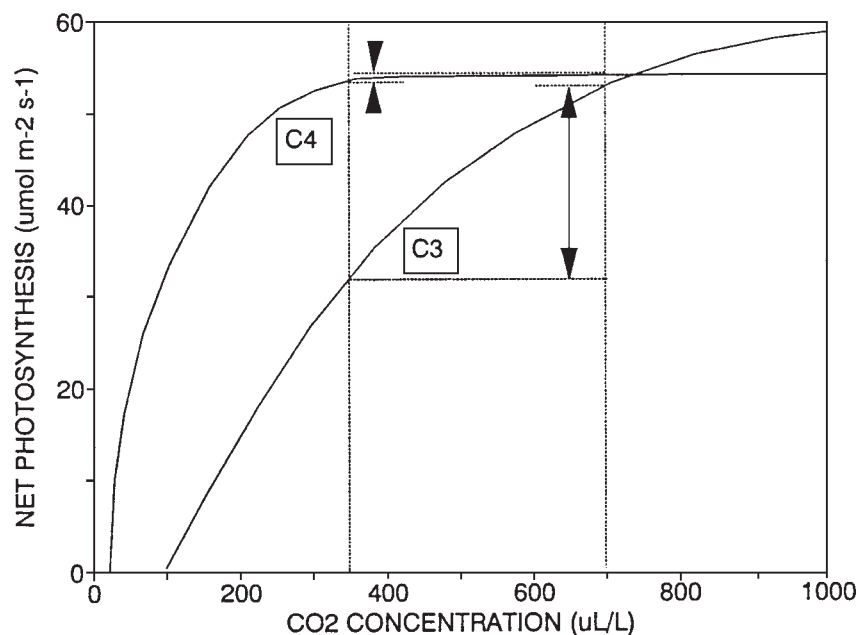


Abb. 2.9 Nettophotosynthese von gewöhnlichen C_3 - und C_4 -Pflanzen bei unterschiedlicher CO_2 -Konzentration (KIMBALL, 1993)

Anhand von Abb. 2.9, S. 56 wird deutlich, dass die Photosyntheserate der C_4 -Pflanzen schon bei geringer CO_2 -Konzentration größer ist als die der C_3 -Pflanzen. Die natürliche CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre wird von Pflanzen mit C_4 -Photosynthese demnach effektiver genutzt. Bei relativ geringer CO_2 -Konzentration ist dementsprechend dann auch der Sättigungspunkt erreicht, ab dem keine Erhöhung der Photosyntheserate mehr erfolgen kann. Im Gegensatz dazu können Pflanzen mit C_3 -Photosynthese aufgrund ihres höheren CO_2 -Sättigungswertes

auf eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration mit einer Steigerung der Produktivität reagieren.

Nach KIMBALL (1993) wirkt sich eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration wie folgt auf die Vegetation aus:

- (1) Wachstum und Ertrag der Pflanzen erhöhen sich um durchschnittlich 30%.
- (2) Durch die unterschiedliche Reaktion von C_3 - und C_4 -Pflanzen auf eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration wird es beim Anbau von Kultur-

pflanzen Umverteilungen zugunsten der C_3 -Pflanzen geben.

Änderungen des Wasserhaushalts der Pflanzen

Durch Experimente konnte aufgezeigt werden, dass die Pflanzen auf eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration mit einer Verringerung der Stomataöffnung reagieren, wodurch die Transpirationsrate stark vermindert wird (DRAKE, 1992; KIMBALL, 1993). Zwischen den C_3 - und den C_4 -Pflanzen besteht in dieser Hinsicht kein signifikanter Unterschied (KIMBALL, 1993).

Nach ROGERS et al. (1983) und WONG (1980 in: BÁRDOSY, 1994) kann von einem Anstieg der *water use efficiency* (WUE) ausgegangen werden. Die WUE ist der Quotient aus mmol fixiertem CO_2 pro mmol transpiriertem Wasser. Für Mais, Baumwolle, Sojabohne und für verschiedene Baumarten konnten bei einer Zunahme der CO_2 -Konzentration von 330 ppm auf 660 ppm eine Verdopplung der WUE nachgewiesen werden.

2.3.4.2 Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landschaft

Die unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Pflanzentypen gegenüber erhöhten CO_2 -Ge-

halten führt dazu, dass sich die natürliche Artenzusammensetzung in einem Ökosystem ändert (ARNELL, 1994). Auf Kulturpflanzen bezogen halten WOLF & DIEPEN (1991 in: LIEBSCHER, 1996) für Mitteleuropa folgende Landnutzungsänderungen bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre für möglich:

- (1) Zunahme von Flächen mit Feldfrüchten und Sonderkulturen, wie z.B. Wein.
- (2) Abnahme von Flächen mit Dauergrünland.
- (3) Abnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Wurzelfrüchten, Hafer, Roggen und Raps.

Infolge der erhöhten Temperaturen ist zum einen mit einer Verlängerung der Vegetationszeit und zum anderen mit einer schnellen Verschiebung der Klimazonen zu rechnen, an die sich die Vegetation nicht anpassen kann (BÁRDOSY, 1994). Dies kann zum Verschwinden ganzer Pflanzenformationen wie z.B. der Hochwälder Mitteleuropas führen (ENQUETE-KOMMISSION, 1988; HEKSTRA, 1988 in: BÁRDOSY, 1994).

2.4 LANDNUTZUNGSSZENARIEN

2.4.1 Trends in der Landnutzung

In Deutschland unterliegt die Entwicklung der Landnutzung zum einen *administrativen/politischen* und zum anderen *wirtschaftlichen* Entscheidungen (BMELF, 1996). Nach dem 2. Weltkrieg wurde in der Bundesrepublik mit der *Raumordnungspolitik* ein geordnetes Planungsinstrument institutionalisiert, mit dem Ziel, in allen Teilräumen der Bundesrepublik gleichwertige Lebensverhältnisse zu schaffen und die Lebensqualität zu verbessern (KENNEWEG & WECKWERTH, 1994). Für die Koordination der unterschiedlichen Nutzungsansprüche an den Raum werden auf verschiedenen Planungsebenen (Bund, Länder, Regionen, Gemeinden etc.) Programme und Pläne für eine Gesamtplanung aufgestellt. Das Sub-

sidiaritätsprinzip gewährt den Gemeinden autonome Entscheidungsfreiheit und kommunale Selbstbestimmung, so dass über ein Gegenstromprinzip die Interessen der einzelnen Gemeinden mit der Raumplanung des Staates und der Länder in Einklang gebracht werden müssen. 1976 wurde die Landschaftsplanung als Umweltfachplanungen auf den selben Maßstabsebenen eingeführt, welche die ökologischen Belange in die Landes-, Regional- und Bauleitplanung berücksichtigen und eine gezielte Flächennutzung garantieren sollten (BMELF, 1996). Die Erwartungen an die Landschaftsplanung sind allerdings nicht vollständig erfüllt worden, weil für sie in den meisten Bundesländern keine Rechtsverbindlichkeit besteht (KENNEWEG & WECKWERTH, 1994). Die Planungsunterlagen aus der Landschafts-

planung können vielmehr als Fachgutachten und Richtlinien angesehen werden, wie sich Deutschland mit einer *umweltverträglichen Flächennutzung* entwickeln könnte. In der Regel überwiegt aber die Entscheidung für die Nutzung mit der größten Rentabilität.

2.4.1.1 Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsfläche

Zu dieser Kategorie zählen die Nutzungsarten Gebäude- und Freifläche, Betriebsfläche ohne Abbau-land, Erholungsfläche (Sportanlagen), Verkehrsfläche und Friedhof zusammengefasst und als *Siedlungsraum* definiert, weil sie überwiegend siedlungswirtschaftliche Funktionen übernehmen. Die Zuweisung in diese Klasse ist an der Definition von Siedlungs- und Verkehrsfläche des BMELF (1996) orientiert. Der gemeinsame Flächenbedarf durch Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsfläche ist in den letzten 30 Jahren enorm gestiegen und nimmt nach der Flächennutzungserhebung von 1997 4,2 Mio. ha oder 11,8% des gesamten Bundesgebiets ein (DOSCH & BECKMANN, 1999). In der jüngeren Vergangenheit nahm die Siedlungs- und Verkehrsfläche fast ausschließlich auf Kosten der Landwirtschaftsfläche zu.

Der Flächenverbrauch hängt nicht nur von *demographischen Größen* ab, sondern wird zusätzlich von *Wohlstand, Wirtschaftswachstum, Form der Industrialisierung und Wanderungsbewegungen* beeinflusst. Generell ist auf Grund der stetigen Individualisierung mit einem anhaltenden Trend der Siedlungsentwicklung zu rechnen, auch wenn die Entwicklung seit dem 2. Weltkrieg nicht in die Zukunft extrapoliert werden kann (VENEKLAAS et al., 1994). Die politische und rechtliche Steuerung des Siedlungswachstums wird in Deutschland durch das Raumordnungsrecht und die Bauleitplanung geregelt (KLEYER, 1996). Dabei wird durch behördliche Vorgaben versucht, Flächenverschwendung zu beschränken, indem zunächst eine Verdichtung der existierenden Städte durch Bestandssicherung und -erneuerung durch das so genannte »Konzentrationsprinzip« angestrebt wird (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1988). Eine weitere Zerschneidung von natürlichen Flächen als Lebensraum soll somit vermieden und Freiräume gesichert werden. Der Flächenanspruch für Siedlungszwecke gliedert sich

in die übergeordnete Planung ein. Entwicklungsachsen sollen das Grundgerüst für die angestrebte räumliche Schwerpunktbildung bilden (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1994). Die Entwicklungsachsen basieren besonders auf Versorgungs- und Verkehrssträngen und bilden eine schematische Netzstruktur. Die darin integrierten Siedlungsbereiche dienen als Schwerpunkte für Industrie- und Dienstleistungseinrichtungen.

Da eine Bindung der Bevölkerung an ihre Umgebung gewünscht ist, sollen durch die Sicherung und Bereitstellung von Infrastruktur stabile Arbeitsplätze gewährleistet werden. Der Einsatz moderner Produktionstechniken und Dienstleistungsangebote führen zu einem ständig steigenden Flächenbedarf für Industriegebiete, die in der Regel einen höheren Versiegelungsgrad als Wohnsiedlungen aufweisen. Ihre Neuausweisung ist indirekt mit der Bereitstellung von Arbeitsplätzen verknüpft und die Kommunen profitieren von der Gewerbe- und Einkommenssteuer. Daher ist die Planung nicht das umfassende Instrument, mit dem Urbanisierung wirklich lenkbar wäre, weil in den Gemeinden bereitwillig große Neubau- und Industriegebiete ausgewiesen werden, um gleichzeitig eine potenzielle finanzielle Stärkung zu ermöglichen. Dadurch kommt es zu häufig einer polyzentrischen Aufblähung des Siedlungseinerleis, die für die Verkehrsbewältigung und den Landschaftsschutz zu großen Problemen führt (KLEYER, 1996).

Die Umsetzung der Flächenausweisungen führt zu einer anhaltenden zusätzlichen Versiegelung der Landschaft durch ein ständiges Wachstum der Städte und Gemeinden. Status-quo-Trendrechnungen prognostizieren bis 2010 bundesweit einen Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 13,4% (DOSCH & BECKMANN, 1999). Der Anteil von Wohnbauflächen beträgt dabei nur etwa 40% des Zuwachses, während die Nicht-Wohnbauflächen erheblich stärker wachsen.

2.4.1.2 Landwirtschaftlich genutzte Fläche

Zur landwirtschaftlich genutzten Fläche werden außer Ackerflächen auch Flächen, die zu Viehwirtschaft, Gartenbau, Gemüseanbau, Obstanbau und Weinbau, sowie sämtliche Baum- und Strauchkulturen, die zur Gewinnung pflanzlicher Rohstoffe angelegt werden, gezählt (LESER et al., 1991). Bis zur

Mitte dieses Jahrhunderts wurde der größte Teil des Landes für die Produktion von Lebensmitteln gebraucht, weil diese Produktionsweise mit einer niedrigen In- und Outputrate arbeitete. Seit 1950 brachte die technische Revolution, basierend auf den Errungenschaften der *Petrochemie* (Dünger und Pflanzenschutzmittel) und der *zunehmenden Mechanisierung* eine erhöhte Produktion (O'CALLAGHAN, 1996). Diese Intensivierung ziehen durch Übernutzung und Chemikalieneintrag Umweltproblemen nach sich. Andererseits führte diese Entwicklung zu einer *Überproduktion*, so dass die Bewirtschaftung der gesamten Fläche nicht mehr rentabel war (SUCCOW, 1995). Rentable außerlandwirtschaftliche Flächennutzungen treten allerdings nicht erst dann in Wettbewerb zur bisherigen landwirtschaftlichen Nutzung, wenn diese absolut nicht mehr lohnt, sondern konkurrieren bereits vorher mit ihr (BMELF, 1996). Besonders bei der Umwidmung von Flächen für Siedlungs- und Infrastruktureinrichtungen spielt die Rentabilität der landwirtschaftlichen Nutzflächen oft keine Rolle mehr. Dieser Trend ist ungebrochen, so dass die Landschaft, statt von einer überwiegend landwirtschaftlichen, von neuen Nutzungen wie Siedlung, Industrie, Verkehr, Erholung oder Naturschutz beansprucht wird. Diese Umbruchphase könnte eine Chance für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung und die Sicherung einer besseren Umweltqualität und nachhaltiger Nutzungssysteme bieten (SUCCOW, 1995). Allerdings birgt sie auch die Gefahr der *Flächenverschwendung* und Fehlnutzung.

Ackerfläche

In der Bundesrepublik hat die *Landwirtschaftsfläche* seit 30 Jahren um mehr als 3 % abgenommen und wird möglicherweise auch weiter zurückgehen. Trotzdem stellt diese Nutzungskategorie in Deutschland mit 54 % der Fläche immer noch den größten Flächenanteil (BMELF, 2000). Sie übernimmt nicht nur die Produktion von Nahrung und nachwachsenden Rohstoffen, sondern ist auch für die *Pflege und Offenhaltung der Kulturlandschaft* bedeutend. Durch den Einsatz moderner Produktionstechniken und den gesellschaftlichen Wandel hat in den letzten Jahren eine Verschiebung von vielen kleineren Höfen hin zu wenigen Großbetrieben stattgefunden, weil diese eine bessere Rendite erwirtschaften können (REGIONALVERBAND MITTEL-

RER NECKAR, 1986). Die Landwirtschaft unterliegt den Marktmechanismen, die stark durch agrar- und umweltpolitische Instrumente beeinflusst werden. Die Auswahl der Anbauprodukte wird bis auf wenige Feldfrüchte wie z.B. Zuckerrüben im wesentlichen von den Richtlinien der EU-Agrarpolitik gelenkt. Flächenstilllegungsprogramme steuern die Größe der Produktionsflächen. Die Quote für die temporäre Stilllegung wurde bisher jedes Jahr neu von der EU-Regierung festgelegt. Eine Förderung der Produktion von nachwachsenden Rohstoffen hat eine Verschiebung bei den Anbauprodukten weg von der ausschließlichen Nahrungsmittelproduktion bewirkt. Grenzertragsflächen werden vermehrt dauerhaft aus der intensiven Nutzung herausgenommen und können für landespflegerische Maßnahmen wie z.B. für historische Nutzungsformen wie Streuwiesen, Heiden und Hutungen genutzt werden (SUCCOW, 1995). Als Grenzertragsfläche werden die Flächen bezeichnet, »deren gegenwärtige landwirtschaftliche Nutzung ein Faktoreinkommen – Wertschöpfung – hervorbringt, das die Kosten der dabei eingesetzten Faktormengen nicht abzudecken vermag, beziehungsweise bei gleichbleibender Entwicklung von Produktivität und Preisen in den nächsten Jahren nicht mehr abgedeckt wird« (NEANDER, 1973). In Baden-Württemberg können Landwirte für die Extensivierung dieser Flächen Ausgleichszahlungen erhalten (z.B. Marktentlastungs- und Kulturlandschaftsausgleichszahlungen: MEKA). Generell hat der rückläufige Trend in der Bewirtschaftung der Ackerfläche zwar schon nachgelassen, ist aber noch nicht zum Stillstand gekommen.

Agenda 2000

Die von der EU-Kommission gefassten agrarpolitischen Beschlüsse der *Agenda 2000* zielen darauf ab, einen Reformprozess für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Landwirtschaft mit dem Ziel einer schrittweisen Anpassung an die Weltmarktpreise einzuleiten (EUROPÄISCHE UNION, 1998).

Zu den inhaltlichen Eckpunkten für die Ackerkulturen gehören (BMELF, 1999):

- (1) die Interventionspreissenkung von Getreide um 15%

- (2) eine dauerhaft festgesetzte Flächenprämie für Getreide
- (3) eine obligatorische Flächenstilllegung von 10%. Die Stilllegungsprämie ist mit der Flächenprämie für Getreide identisch.
- (4) eine Absenkung der Flächenprämie für Ölsaaten auf das Niveau von Getreide
- (5) eine Absenkung des Mindestpreises für Stärkekartoffeln um 15 %

Durch die Reform wird auf den verbleibenden landwirtschaftlich genutzten Flächen mit einer Verschiebung der Anbauverhältnisse gerechnet, über deren Details unterschiedliche Voraussagen existieren. Nach Prognosen des BMELF (1999) wird der Anbau von Ölfrüchten zurückgehen und der Getreideanteil in der Fruchtfolge erhöht werden. Der Anbauumfang von Winterweizen wird sich nach DABBERT et al. (1998) noch mehr als die übrige Getreideerzeugung erhöhen. Nach Ergebnissen des Agrarmodells RAUMIS verringert sich nach CYPRIS et al. (1997) die Silomaisfläche um 10% und die der Food-Ölsaatenfläche um bis zu 65 %. Der Zuwachs an Getreidefläche wird durch das Modell bei 6 bis 18 % angenommen. Diese Ergebnisse weichen von denen anderer Modelle ab (KLEINHANSS, 1998), was die Unsicherheit dieser Prognosen verdeutlicht. Umfassende Veränderungen werden ferner nicht nur auf der betrieblichen und regionalen Anpassung, sondern auch für die Umsetzung von Umwelt- und Naturschutzziele erwartet. Bei der Interpretation dieses Reformprozesses werden unterschiedliche Szenarien für die Landnutzungsentwicklung abgeleitet. KLEINHANSS (1998) prognostiziert eine weite Spanne denkbarer Stilllegungsquoten, die seiner Meinung nach bei günstiger Weltmarktpreisentwicklung eine Fläche von 5% und bei ungünstiger Preisentwicklung Stilllegungsanteile von bis zu 23 % der Fläche umfassen können. Um die Entwicklung des ländlichen Raumes dadurch nicht zu beeinträchtigen, wird versucht mit *flankierenden Maßnahmen*, wie z.B. Umweltschutz in der Landwirtschaft, Aufforstungsmaßnahmen und Vorruhestandsregelungen für Bauern die benachteiligten Gebiete, finanziell zu entlasten. Diese Agrarumweltprogramme werden von DABBERT et al. (1998) als notwendig erachtet, um eine Intensivierung der Produktion auf den übrigen Flächen zu vermeiden.

Grünland

Unter Dauergrünland versteht man die nicht in die Fruchtfolge integrierten Flächen, auf denen dauerhaft (für einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren) Gras geerntet wird (BMELF, 2000). Grünland wird hauptsächlich zur Futtergewinnung bewirtschaftet und ist deshalb eng an die Viehwirtschaft gebunden. Da der Viehbestand ebenfalls durch eine Quotierung von der EU geregelt wird, unterliegen diese Flächen administrativen Bestimmungen. Die Grünlandwirtschaft unterliegt bis auf Areale in den Lagen der Mittelgebirge überwiegend einem abnehmenden Trend, der im Zeitraum von 1979 bis 1991 auf dem Gebiet der alten Bundesrepublik in den verschiedenen Landkreisen zwischen 20 und 50 % lag (KREINS, 1997). Diese Flächen wurden zu großen Teilen in Ackernutzung überführt und dort mit Futterpflanzen wie Silo- oder Körnermais bebaut. Dieser Entwicklung des Grünlandumbruchs wurde durch flankierende Maßnahmen im Rahmen der Agrarreform und der Tierbestandsobergrenzen entgegengewirkt. Da eine Erhöhung der Milchquote von KREINS (1997) als unwahrscheinlich angesehen wird und die Milchleistung der Kühe steigt, ist mit einer Reduzierung des Viehbestandes zu rechnen. Inwieweit sich das auf den Grünlandflächenanteil auswirkt, ist schwierig zu bestimmen, weil außer der Flächenreduzierung auch eine Extensivierung der Bewirtschaftung denkbar ist. Die erhofften positiven Entwicklungen wie Extensivierung dieser Flächen im Rahmen der Umsetzung der *Agenda 2000* hängen nach DABBERT et al. (1998) stark von der Konkretisierung der Agrarumweltprogramme ab. Die Umwandlung von Grünland in siedlungsräumliche Funktionen folgt vorwiegend wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Stilllegungsflächen

Stilllegung wird grundsätzlich in die obligatorische und die freiwillige Form unterschieden. Die Einhaltung der obligatorischen Flächenstilllegungsregeln ist Voraussetzung für die Gewährung der Flächenausgleichszahlungen durch die Europäische Union. Die Beschlüsse der *Agenda 2000* setzen diesen Flächenanteil bis zu Jahre 2006 auf 10% fest. Darüber hinaus können freiwillig bis zu 33 % der Fläche mit Ausgleichsanspruch stillgelegt werden. Die geförderten stillgelegten Flächen unterliegen bestimmten Auflagen wie der Pflicht zur Selbstbegrünung oder

einer gezielten Begrünung bis zum 15. Mai. Die Flächen müssen zusätzlich für eine nachhaltige agronomische Nutzungsfähigkeit gepflegt werden. Jegliche Düngung oder die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln ist untersagt (BMELF, 2000). Als Landbedeckung findet sich auf den stillgelegten Flächen entweder Wiese oder Anbau von nachwachsenden Rohstoffen.

Wird die Bewirtschaftung einer bis dato landwirtschaftlich genutzten Fläche dauerhaft eingestellt, ohne dass eine neue Nutzung an deren Stelle tritt, so fällt sie permanent *brach* (BMELF, 1996). Da dieser Prozess mit der Aufgabe der landwirtschaftlichen Produktion einher geht, spricht man auch vom Phänomen *Sozialbrache*. Diese Flächen werden oftmals für Natur- und Biotopschutz reserviert und für die Landschaftspflege bewirtschaftet. Werden diese Flächen sich selbst überlassen, setzt die Sukzession ein, deren Endstadium (Klimax) je nach Vornutzung und Standortvoraussetzung von unterschiedlicher Gestalt sein kann. Es ist daher ungewiss, ob sich Wald als die Klimaxvegetation aller brachfallenden Flächen entwickelt, obwohl er für die meisten Flächen die potentiell natürliche Vegetation darstellt (KLINK, 1995). Die Etablierung von Holzarten hängt von der Endbewirtschaftung ab. Auf ehemaliger Schwarzbrache ist eine Ansiedlung von Holzarten wahrscheinlicher als auf unbewirtschafteten Grünflächen. Eine rasche Verwaldung ist nur unter bestimmten Umständen möglich. Häufig stellt sich nach 5 bis 10 Jahren eine stabile Gesellschaft ein, die noch vor der Verbuschung oder Verwaldung zurückbleibt. Diese Entwicklung wird unter »Rückgabe von Kulturflächen an die Natur« zusammengefasst.

Da Flächen in der Kulturlandschaft Mitteleuropas eine endliche und knappe Ressource darstellen, werden die aus der Nutzung fallenden Areale häufig für Siedlungszwecke eingesetzt.

Sonderkulturen

Durch die Beschlüsse der *Agenda 2000*, die den Erhalt der Kulturlandschaft mit Gartenbauförderprogrammen unterstützt, werden Obst-, Gemüse- und sonstige Pflanzenproduktion eine wichtige Bedeutung beigemessen (BMELF, 1999). Dafür können Erzeugerorganisationen Beihilfen bei der EU beantragen.

2.4.1.3 Wald und naturnahe Landschaften

Naturnahe unbewaldete Flächen übernehmen im Landschaftsmosaik ähnliche Funktionen wie Wald und werden deshalb in der gleichen Kategorie behandelt.

Wald

Als Wald wird im Sinne des Bundeswaldgesetzes jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche betrachtet, sofern sie sich nicht innerhalb von bebauten Gebieten befindet oder nur einzelne Baumgruppen betrifft. Durch die naturnahe Nutzung übernimmt der Wald neben der Holzproduktion Aufgaben als Kohlendioxidsenke und als Schutz der ökologischen Vielfalt. Ziel ist es deshalb, ihn wegen seines wirtschaftlichen Nutzens und seiner Bedeutung für die Umwelt, insbesondere für die dauernde Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, das Klima, den Wasserhaushalt, die Reinhaltung der Luft, die Bodenfruchtbarkeit, das Landschaftsbild, die Agrar- und Infrastruktur und die Erholung der Bevölkerung zu erhalten, erforderlichenfalls zu mehren und seine ordnungsgemäße Bewirtschaftung nachhaltig zu sichern (BUNDESWALDGESETZ §1). Wenn auch der Wald alle genannten Funktionen gleichzeitig übernehmen kann, erfüllen diese nicht grundsätzlich alle bewaldeten Gebiete. Die Forstwirtschaft hat dabei die Aufgaben sowohl eine nachhaltige Bewirtschaftung als auch eine marktgerechte Produktion anzustreben und dabei natürlich vorkommende Baumarten zu fördern.

Der Waldanteil nimmt in Deutschland 30% der Gesamtfläche ein (BMELF, 2000). Regional schwankt dieser Anteil sehr stark. Obwohl der Wald die potentielle natürliche Vegetation Mitteleuropas auf nahezu sämtlichen Standorten darstellt (BMELF, 1996) und er die genannten wichtigen Funktionen übernimmt, ist eine großflächige Aufforstung unerwünscht. Mit Hilfe von landschaftspflegerischen Maßnahmen wird eine Offenhaltung von Landschaftsteilen bevorzugt, um die ökologische Vielfalt zu sichern und ein kulturell gewachsenes Landschaftsbild zu erhalten. Der bestehende Waldanteil allerdings unterliegt dem *Waldbestandschutz*, der eine Rodung von Bestandsflächen untersagt. Nur für infrastrukturelle Erweiterung kann Wald entfernt werden, wenn gemäß der Eingriffsregelung an anderer Stelle eine Ausgleichsmaßnahme durchgeführt

wird. Der Flächenanteil des Waldes ist in der Vergangenheit leicht gewachsen (BMELF, 1996). Es gibt in manchen Bundesländern Bestrebungen, den Waldanteil aus unterschiedlichen Zielsetzungen zu vermehren. Es sind mehrere Formen der Waldbe-gründung mit unterschiedlicher Zielsetzung denkbar, so etwa Wald als Endstadium einer natürlichen Sukzession, die Aufforstung zur natürlichen Waldgesellschaft, die Aufforstung unter landespflegerischer Eingriffen mit dem Ziel, einen Erholungswald zu schaffen, oder eine Aufforstung zum Wirtschaftswald (BMELF, 1996). Für die Aufforstung wäre es sicher am sinnvollsten, wenn hierfür die produktivsten Flächen ausgewählt würden. Tatsächlich aber werden in erster Linie solche aus der Produktion genommen, die aufgrund geringer Nährstoffausstattung oder Flachgründigkeit, zu großer Trockenheit oder Nässe, Lage in klimatisch ungünstigen Gebieten, schlechter Erreichbarkeit, schwieriger Geländeausprägung oder geringer Flächengröße den Landwirten am ehesten entbehrlich erscheinen (HUSS, 2000). Waldnutzung wird nach EISENKRÄMER (1988) als die gesamtwirtschaftlich und ökologisch sinnvollste Nutzung von landwirtschaftlichen Grenzstandorten bezeichnet.

Der Wald ist neben den direkten Landnutzungsänderungen aber auch indirekt durch den Menschen beeinflusst. Vom Menschen verursachte Stoffeinträge, extreme Witterungsereignisse (Schnee, Frost, Sturm, Trockenheit), biotische Schaderreger und waldbauliche Maßnahmen haben die Vitalität des Waldes beeinflusst.

Das Phänomen des Waldsterbens wurde seit Ende der 70er Jahre bekannt und gefährdet den aktuellen Bestand durch großflächigen Vitalitätsverlust. Durch Luftreinhaltemaßnahmen wird seit 1991 eine ganz allmähliche Verbesserung des Kronenzustands festgestellt (BMELF, 2000). Nach WESSELS (1997) sind Fichte und Eiche besonders gefährdet. Obwohl in Deutschland die deutlichen Schäden von 30% im Jahre 1991 auf 21% im Jahre 1998 zurückgegangen sind, kann noch keine generelle Entwarnung gegeben werden. Nur 38% des Bestandes sind ohne erkennbare Schadmerkmale (BMELF, 2000). Großflächiges Absterben findet in Deutschland allerdings nicht statt, weil kleinere geschädigte Flächen durch Anpflanzung sukzessive wieder bewaldet werden. Die Reaktion des Waldes auf extreme Witterungsereignisse hängt immer von der Stärke der Störung

ab. Baumwurf durch Sturm hat in den Jahren 1990 und 1999 zu großflächigen Kahlschlägen geführt, die einer langwierigen Wiederaufforstung bedürfen. Als Grund für diese Schäden sind neben den klimatischen Veränderungen auch Fehler in der Forstwirtschaft zu nennen.

Naturnahe unbewaldete und bewaldete Flächen

Die quasinatürlichen, waldfreien Bereiche sind in Mitteleuropa auf Extremstandorte und Reservate beschränkt, weil sonst durch die hohe Bevölkerungsdichte fast überall Einfluss genommen wird. Besonders in den letzten 100 Jahren haben diese Landschaften starke Flächenverluste hinnehmen müssen (BMELF, 1996). Deshalb wurden viele der noch erhaltenen Flächen unter administrativen Schutz gestellt. In der BRD sind derzeit nur 2,4% der Fläche als Naturschutzschutzgebiete mit strengstem Schutzstatus ausgewiesen. Ausweisungen mit weniger starken Protektionen integrieren teilweise die Kulturlandschaft. Die europäische Fauna-Flora-Habitat (FFH) Richtlinie ist ein wesentliches Element der gemeinsamen europäischen Naturschutzpolitik und fordert von allen Mitgliedsstaaten die Meldung von 5% der Hoheitsfläche als für Europa bedeutende Lebensräume von Tieren und Pflanzen. Die Bundesrepublik hat diese Quote bis jetzt nicht erfüllt, so dass von Neuausweisungen ausgegangen werden muss.

2.4.2 Landnutzungsänderungen

Die Natur als *multidimensionales System* unterliegt einem komplizierten Beziehungsgeflecht, so dass Veränderungen von Einzelgrößen das Gesamtsystem in vielfältiger Weise beeinflussen. Diese Veränderungen werden in jüngster Zeit unter dem Stichwort Globaler Wandel (»Global Change«) vermehrt diskutiert. Besonders diese Untersuchungen dürfen den enormen Einfluss des Menschen auf die Natur nicht vernachlässigen (RIEBESAME et al., 1994). LEEMANS & ZUIDEMA (1995) unterscheiden zwei verschiedene Veränderungstypen:

- (1) den *systematischen Wandel*, der sich aus der Änderung der globalen Bedingungen ergibt. Darunter fallen z.B. die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre oder das Klima.

- (2) den *akkumulativen Wandel*, der durch seine Häufigkeit im Auftreten und deren Wiederholung einen Effekt auf die Umwelt bewirkt. Beispiele für diesen Typ sind Veränderungen in der Waldzusammensetzung, in der landwirtschaftlichen Praxis oder die zunehmende Urbanisierung.

Eine systematische Veränderung der Gegebenheiten kann sowohl natürlich als auch durch den Menschen verursacht werden. Sie wirkt sich in der Regel nur langsam oder nach Überschreitung eines kritischen Grenzwerts unwiderruflich aus. Der akkumulative Wandel Typ (b) kann langfristig in Typ (a) übergehen, wenn die Akkumulation einen globalen Effekt bewirkt und andere Größen sich daraufhin systematisch verändern (RIEBESAME et al., 1994).

In vielen Untersuchungen werden die Auswirkungen des globalen Wandels wie zum Beispiel Klimaänderung oder Kohlendioxidanstieg auf die Landnutzung untersucht (DAAMEN et al., 1997; REYNOLDS et al., 1996; PARRY, 1992). Als die derzeit wichtigste Ursache für eine Änderung der Landschaft werden aber die vom Menschen verursachten Landnutzungsänderungen angesehen (TURNER et al. 1994; LEEMANS & ZUIDEMA, 1995). Für Landnutzungsszenarien spielt daher der *anthropogene, akkumulative* Einfluss eine weitaus größere Rolle als der systematische. Obwohl die Nutzungseinheiten oft sehr klein sind, haben ihre Veränderungen in der Summe eine große Wirkung. Landnutzungsänderungen nehmen Einfluss auf Biodiversität, Wasser- und Strahlungsbilanz, Emissionen und andere Prozesse.

In der Geschichte hat sich die Landschaft Mitteleuropas bis zur industriellen Revolution überwiegend schrittweise mit ihrer an die naturräumlichen Gegebenheiten angepassten Nutzung zu einer »traditionellen« Landschaft entwickelt (ANTROP, 1999). Die Vielfalt und Verteilung der unterschiedlichen Landnutzungen haben sich dadurch zu regional charakteristischen Landnutzungsmustern ausgebildet, die sich hauptsächlich nach den natürlichen Rahmenbedingungen und der kulturellen Entwicklung einer Landschaft richten. Rasche Veränderungen traten lange Zeit nur in begrenzten Zeiträumen, d.h. als singuläre Ereignisse und in limitierten Zeitspannen auf. Beispiele dafür sind Landreformen, Naturkatastrophen, Kriege und ihre Folgeerscheinung. In den

ruhigeren Phasen dazwischen, passten sich Natur und Landnutzung schrittweise an die Veränderung an (ANTROP, 1999). Diese Entwicklung ist seit der industriellen Revolution und dem ökonomischen Boom nach dem zweiten Weltkrieg durch einen neuen Prozess ersetzt worden, welcher der Landschaft eine neue Funktion zugewiesen hat. Heute wird die Landnutzung nach MEYER & TURNER (1992) außer von Bevölkerungsstrukturen, Politik/Administration und ethischen Einstellungen auch von Technologieentwicklung, Wirtschaftsorientierung und Wohlstandsgrad bestimmt. Durch die Interaktion steht die Landnutzung im selben Maße unter Einfluss, wie sie selbst auf die Umweltbedingungen wirkt.

Änderungen der Landnutzung finden immer dann statt, wenn die aktuelle Nutzung entweder den biophysischen oder den anthropogenen Ansprüchen nicht mehr genügt (O'CALLAGHAN, 1995). Das kann durch verschiedene Faktoren ausgelöst werden:

- (1) *Änderungen der natürlichen Verhältnisse*: durch systematischen Wandel können beispielsweise Klimaänderungen, Waldsterben, Bodendegradierung oder Veränderungen anderer Umweltrestruktoren auftreten.
- (2) *Anstieg des Flächenbedarfs durch die Bevölkerung*: inneres Bevölkerungswachstum, steigender Flächenbedarf pro Kopf und Zuwanderung stellen Ansprüche an die Flächennutzung, weil die Versorgung mit Wohnraum, Nahrungsmittel und Infrastruktur gewährleistet werden muss.
- (3) *Änderungen der ökonomischen Rahmenbedingungen*: Wirtschaftsform, Wirtschaftswachstum, Außenhandel und Agrarpolitik können die Landnutzung und besonders die Bewirtschaftungsweise gravierend und kurzfristig beeinflussen.
- (4) *Änderungen der politischen Rahmenbedingungen*: gravierende Änderungen wie z.B. der Fall der Mauer können einen entscheidenden Einfluss auf die Landnutzung nehmen.

Landnutzungsänderungen können auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Entweder stellen sie eine *Modifikation* der bestehenden Nutzung oder eine *Konversion* von einer Landnutzungskategorie in eine andere dar (RIEBESAME et al., 1994). Auswirkungen von Landnutzungskonversionen verändern die Gebietseigenschaften offensichtlich und häufig

auch dramatisch. Doch auch Modifikationen können durch Veränderung der Bewirtschaftungstechnik, Anbaufrucht oder durch sonstige Umwelteinflüsse bedingt ähnlich starke Varianzen der Landoberfläche bewirken. Da die Landwirtschaft besonders häufiger Eingriffe bedarf und sehr dynamisch ist, gilt das zwar vor allem für diese, prinzipiell aber auch für alle anderen Landnutzungen. Die Stärke der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen wird von drei Faktoren bestimmt:

- (1) *Intensitätsunterschiede zwischen bisheriger und neuer Landnutzung*: Die Nutzungsintensität steuert die Hemerobie (Wirkung des menschlichen Einflusses auf die Ökosysteme) und damit das ökologische Gleichgewicht der Landschaft. Intensive Nutzungen haben in der Regel als vorrangiges Ziel die Gewinnmaximierung, welche die Ressourcen im Sinne der Wertschöpfung optimal ausnutzen muss. Intensivierung, unabhängig davon ob sie innerhalb der bestehenden oder als Überführung in eine intensivere Landnutzung stattfindet, strapaziert das ökologische Gleichgewicht. Extensivierung der Nutzung wirken sich positiv auf den Landschaftshaushalt aus.
- (2) *Raum*: Die Lage im Raum und die Ausdehnung der Nutzungsänderung üben auf Grund der Wechselwirkungen Einfluss auf die Landschaft aus. Die Flächengröße bestimmt die Skala, in der durch die Nutzung Veränderungen auftreten können. Je größer die Fläche, desto stärker ist der Einfluss der vorherrschenden Nutzung.
- (3) *Zeit*: Dauer und Frequenz einer Nutzungsänderung sind eng mit der Intensität verknüpft. Sie bestimmen, ob sich ein ökologisches Gleichgewicht einstellen kann und welchen Störungen das System unterliegt.

Um der Gesellschaft ein Verständnis für die Wirkung ihrer Manipulation zu vermitteln, müssen geeignete Methoden gefunden werden, Veränderungen zuverlässiger als bisher abschätzen zu können (WENKEL, 1999). Die angewandte Landschaftsökologie hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, innovative Landnutzungssysteme zu entwerfen, die durch geeignete Kombinationen vielfältiger Funktionen sowohl einer Intensivnutzung als auch dem Natur- und Landschaftsschutz gerecht werden (MOSIMANN,

1999). Eine Voraussetzung dafür die Wirkung von Veränderungen abzuschätzen zu können, besteht darin, flächentreue Landnutzungsszenarien zu entwerfen.

2.4.3 Landnutzungsszenarien

Unter einem Szenario versteht man die »hypothetische Aufeinanderfolge von Ereignissen, die zur Betrachtung kausaler Zusammenhänge konstruiert wird« (Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion, 1990). Die Erstellung von Szenarien ist in der Unternehmensführung und Politikberatung ein häufig praktizierter Ansatz, weil er die Möglichkeit bietet die Folgen denkbarer *Entwicklungen abzuschätzen* und *unerwünschte Entwicklungstendenzen* durch korrigierendes Eingreifen zu unterbinden (BORK et al., 1995).

Ein Szenario darf nicht mit einer Prognose gleichgesetzt werden, weil es keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit gibt. Vielmehr stellt es eine bestimmte *alternative* Zukunft dar, die mit einer Beschreibung des Effekts auf die Einflussgrößen des Untersuchungsgegenstands ausgeschmückt ist (JENKINS, 1997). Dafür müssen die Gesetzmäßigkeiten und Einflussgrößen des Systems bekannt sein. Das Szenario wird als *Projektion* verstanden, weil es keine Rechenschaft über die Entwicklung bis zu dieser Situation ablegt, sondern »wenn ..., dann ...«-Aussagen liefert. Die bewusste Simulation von unwahrscheinlichen und *extremen Szenarien* ermöglicht die Abgrenzung einer Systembeschreibung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit. Ergebnisse zwischen den Extremen bieten die Möglichkeit unter Berücksichtigung externe Prognosen ein wahrscheinlichstes Ergebnis (»best guess«) abzuleiten. Der zukunftsorientierte und flexible Charakter von Szenarien macht diese Methode daher auch für die Umweltwissenschaften interessant. Szenarien können demnach verschiedenen Zielen folgen, die bei der Interpretation der Ergebnisse stets berücksichtigt werden müssen (RIEBESAME et al., 1994).

Modelltypen

Die Modellierung der Landschaftsentwicklung ist ein noch relativ junges Wissenschaftsfeld, das sich seit Beginn der neunziger Jahre schrittweise zu einem selbstständigen Zweig der Landschaftsökolo-

gie bzw. der Umweltforschung entwickelt hat (WENKEL, 1999).

Landnutzungsmodellierung unterscheidet sich von der reinen Vegetationsmodellierung darin, dass sie nicht nur die natürlichen, sondern auch die anthropogenen Einflussfaktoren berücksichtigt. Die Landbedeckung wird dabei nicht ausschließlich und überwiegend von ihrer potentiell-natürlichen Vegetation, sondern von ihrer sozialen oder ökonomischen Funktion für den Menschen determiniert. Daher werden neben bio-physischen Aspekten vermehrt soziale Theorien in den Modellen verwendet oder Modelle beider Typs gekoppelt (RIEBESAME et al., 1994).

Häufig werden bei Fragestellungen, inwieweit sich Landnutzungsänderungen auf die anderen Umweltparameter auswirken, deren Nachbarschaftsbeziehungen und Lage im Raum vernachlässigt. Statt dessen werden im einfachsten Fall nur prozentuale Flächenanteile der verschiedenen Landnutzungen gegen einander verschoben (vgl. BULTOT et al., 1990; LIEBSCHER et al., 1995; DAAMEN et al., 1997). Die Erstellung von Landnutzungsszenarien besteht, bedingt durch die räumliche Dimension, aus zwei Teilbereichen:

- (1) *Bestimmung der Landnutzungsänderung (Szenarioziel)*: Dabei wird festgelegt, welche Landnutzungen sich eher statisch und welche sich eher dynamisch verhalten und wie groß der Änderungsgrad ist.
- (2) *Umsetzung des Ziels auf die Fläche*: Dabei wird festgelegt, wo die in Punkt (1) bezifferten Landnutzungsänderungen stattfinden.

Die Bestimmung der Zielgrößen (1) hängt, wie in Kap. 2.4.2 erwähnt, in starkem Maße von anthropogenen Einflussnahmen ab. Viele Untersuchungen entnehmen diese Angaben aus externen Studien oder treffen selbst Annahmen, entweder stufenweise oder als Extremannahme ohne Zwischenstadien (LEICHTFUSS & KIVUMBI, 1995; EGUIGUREN, 1997; BECKER et al., 1998). Eigenständige Modellierungen von Landnutzungsänderungsraten (»Szenariozielen«) entspringen meistens rein ökonomischen Modellen, die mit statistischen Daten gekoppelt werden (BORK et al., 1995; MÖLLER, 1998; CYPRI, 2000). Viele ökonomische Modelle sind dabei auf eine Landnutzungskategorie spezialisiert, so dass

entweder Verstädterung, Änderung der landwirtschaftlichen Fläche und Forstflächen getrennt voneinander oder alleine berücksichtigt werden.

Eine *Allokation* der Landnutzungsänderungen (2) und die Beachtung der sich daraus ergebenden Landnutzungsmuster erfolgen meistens nur marginal, weil entweder die Daten räumlich nicht vorliegen oder nicht räumlich weiterverarbeitet werden können. Häufig geht die Landnutzung und ihre Szenarien hauptsächlich als Parameter ohne räumliche Verteilung in andere Modelle (z.B. in hydrologische Modelle) ein. Besonders für die Untersuchung von Energie- und Stoffflüssen ist die Verteilung aber essenziell. Daher müssen lagegetreue Landnutzungsszenarien entwickelt werden. Ansätze für diese Simulation kommen aus der Landschaftsmodellierung auf der Basis der natürlichen Gegebenheiten der Landschaft. Für die Landnutzungssimulation kann als Ansatz dienen, die Landschaft in ihrer Ausstattung unter dem Gesichtspunkt des Leistungspotentials zu erfassen. Es existieren dazu verschiedene Bewertungsansätze (MARKS et al., 1992; BASTIAN et al., 1994). Da Landnutzung als anthropogen gesteuertes System sich mehr nach ökonomischen Richtlinien als nach naturräumlichen Gegebenheiten richtet, bleibt für diesen Ansatz ein sozioökonomisches Defizit bestehen. Ansätze, dem gerecht zu werden, liefern verschiedene Autoren für die Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen. MÖLLER et al. (1998) orientieren sich an der Grundrendite jeder Fläche und bestimmen so die Allokation von Feldfrüchten für Ackerland. ZANDER & KÄCHELE (2000) bieten mit ihrem Modell MODAM ein »Decision Support System« an, bei dem die optimale Bewirtschaftung durch eine standortbezogene Kosten-Nutzen Berechnung aufgestellt wird. Das Modell von VELD-KAMP & FRESCO (1994) ist ebenfalls landwirtschaftlich orientiert und bezieht Daten über Bevölkerung, Technologie- und Wohlstand mit ein. Die Zuweisung von Landnutzungsänderungen folgt dem Prinzip der Nutzungskonzentration und orientiert sich an der vorhandenen Infrastruktur. BORK et al. (1995) berücksichtigen für die agrarwirtschaftliche Lagebestimmung der Landnutzungsänderungen regionspezifisch die historische Entwicklung, aktuelle Trends und beziehen abgeschlossene Studien ein. Diese Landnutzungsmodelle sind auf die Leistungsfähigkeit für die Agrarproduktion limitiert und bieten keine Modellierungen für die gesamte Land-

schaft an. Außerdem hängt die Fähigkeit realistische Landnutzungsmuster zu modellieren nicht nur von der Wahl und dem Aufbau eines Modells ab, sondern wird in starkem Maße dadurch limitiert, dass dabei die Komplexität der anthropogenen Welt reflektiert wird.

Zusammenfassend kann also davon ausgegangen werden, dass bisher noch kaum Modelle für die Generierung von befriedigenden Landnutzungsszenarien existieren und für die vorliegende Studie deshalb kein vorhandenes genutzt werden kann. Deshalb war es wichtig, ein solches Werkzeug zu entwickeln.

2.5 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG

2.5.1 Allgemeine Auswahlkriterien für hydrologische Modelle

Die Aussagekraft hydrologischer Modellierungsergebnisse hängt vor allem von der Güte der verwendeten *Daten* sowie von einer an die *Fragestellung* angepassten Repräsentation der beteiligten hydrologischen Prozesse ab (DE VRIES & HROMADKA, 1992; KLEMEŠ, 1986). Wichtige Kriterien, die sich hieraus für die Auswahl eines geeigneten Modells ergeben, sind:

- (1) *Zweck* der Modellanwendung (z.B. Hochwasservorhersage, Prognose der Auswirkung von Klimaveränderungen auf die Abflussbildung bei Hochwasser, Bestimmung der Grundwasserneubildung).
- (2) *Größe des betrachteten Gebiets* (z.B. Hangparzelle, meso- oder makroskaliges Einzugsgebiet).
- (3) *Zeitraum*, der für die Fragestellung relevant ist (z.B. Wasserhaushaltsjahr, Hochwasserereignis, Niedrigwasserperiode).
- (4) *Hydrologische Prozesse*, die für die zu lösende Problemstellung von Bedeutung sind (z.B. Verdunstung, Makroporenfluss, Schneeschmelze).
- (5) *Datenmaterial*, das für die Modellierung zur Verfügung steht.
- (6) *Arbeitsaufwand*, welcher der Fragestellung angemessen ist.

Aus der Vielzahl möglicher Kombinationen von Fragestellung, Eigenschaften des hydrologischen Systems und Datenlage ergibt sich – in Ermangelung eines universellen Modells – die Berechtigung für eine Vielzahl von Modellkonzeptionen. Dabei werden – von einfachen Black-Box-Modellen abgesehen – zwei grundsätzlich verschiedene Wege beschritten (BEVEN, 1991):

- (1) Die *konzeptionelle* Beschreibung der *Abflussdynamik* eines Einzugsgebietes mit Hilfe von unterschiedlich rasch auf ein Niederschlagsereignis reagierenden Speichern, deren Parameter eng an die Modellstruktur gebunden sind und nur zum Teil mit messbaren Werten verknüpft werden können.
- (2) Die *physikalisch begründete flächendetaillierte* Beschreibung der *Fließprozesse* im Einzugsgebiet mit Hilfe *mikroskaliger* Gleichungen, die im Labor für die Wasserbewegung in einer Bodensäule ermittelt wurden und eine Vielzahl von Messwerten erfordern, die ebenfalls mikroskalig ermittelt werden.

Viele Modelle stellen eine Mischung aus diesen beiden Konzepten dar. Eine Einschätzung der Eignung verschiedener Modelle für die Abschätzung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung gibt Kap. 2.5.4.

2.5.2 Bedeutung des Zeit- und Längenmaßstabes für die Modellierung

Die Erkenntnisse, die bisher über die Wechselwirkung der einzelnen *Abflussbildungsprozesse* bei Hochwasser gewonnen wurden, sind im wesentlichen eine Errungenschaft der Hydrologie im Hangmaßstab (hillslope hydrology) sowie von Studien in kleinen Einzugsgebieten (siehe Kap. 2.2). Aufgrund der *Skalenabhängigkeit* der beteiligten *Prozesse* und deren *Beobachtung* gelten diese Erkenntnisse aber streng genommen auch nur für den Maßstab in dem sie beobachtet werden, also für die *Mikroskala* nach BECKER (1992). Für die Ermittlung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf das Hochwassergeschehen eines Einzugsgebietes werden jedoch

Daten zum Einfluss der einzelnen Prozesse in der Meso- bzw. Makroskala benötigt.

Die wichtigsten Faktoren der *Skalenabhängigkeit* hydrologischer Prozesse für die Einzugsgebietsmodellierung sind nach BURT (1989), BEVEN (1991), BLÖSCHL (1996) und BLÖSCHL & SIVAPALAN (1995):

- (1) Die räumliche *Heterogenität* der Gebietseigenschaften (z.B. hydraulische Leitfähigkeit der ungesättigten Zone).
- (2) Die räumliche und zeitliche *Variabilität* der hydrologischen Prozesse (z.B. Sättigungsflächenabfluss) und Zustandsvariablen (z.B. Bodenfeuchtegehalt).
- (3) Der sich mit dem Skalenbereich verschiebende *relative Einfluss* der Abflussbildungsprozesse

am Hang sowie der *Fließprozesse im Gerinne* auf den Abfluss aus einem Einzugsgebiet.

Ebenso sind auch die *Modellvorstellungen*, die zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse entwickelt werden, skalenabhängig, da sich die mathematische Beschreibung der Prozesse zwangsläufig an dem Skalenbereich orientieren muss, in dem die Prozesse *beobachtet/gemessen* werden können (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995).

BLÖSCHL (1996) und O'CONNELL & TODINI (1996) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass prozessnahe Gleichungen zur Beschreibung von Infiltration und Wasserbewegung in der Bodenzone bislang weder im Hangmaßstab noch auf Einzugsgebietsebene zur Verfügung stehen (siehe Tab. 2.21, S. 67).

Tab. 2.21 Prozessnahe Gleichungen für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf verschiedenen Maßstabsebenen bzw. Fehlen entsprechender Gleichungen auf größerer Maßstabsebene (gekennzeichnet durch '?') (nach BLÖSCHL, 1996)

	Bodensäule	Hang	Einzugsgebiet
Evapotranspiration	Penman-Monteith	?	?
Infiltration und Bodenfeuchtebewegung	Richards, Green-Ampt	?	?
Oberflächenabfluss	—	St. Venant	?
Wasserbewegung in der gesättigten Zone	—	Darcy	Darcy
Gerinneströmung	—	—	St. Venant

Angesichts der gegenseitigen Abhängigkeit von *Modellierungsmaßstab* und *Beobachtungsmaßstab* gehen BEVEN (1996) und REFSGAARD et al. (1996) davon aus, dass die Entwicklung prozessnaher Gleichungen im Hang- bzw. Einzugsgebietsmaßstab an die Entwicklung neuer, größerskaliger *Messtechniken* gebunden ist. Diese Ansicht wird vor allem von der Hoffnung getragen, dass sich der mittlere Einfluss der kleinräumigen Heterogenität der Gebiets-eigenschaften und der Variabilität der beteiligten Prozesse auf die Abflussbildung mit größerskaligen Messungen besser erfassen ließe als durch die Aggregation vieler kleinskaliger Messungen, wie dies derzeit geschieht.

2.5.3 Anforderungen an die Simulation von Landnutzungsänderungen

Den Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung zu simulieren bedeutet, ein gegenüber dem Ist-Zustand *verändertes hydrologisches System* zu beschreiben, dessen Verhalten nicht bekannt ist und nicht anhand von Messergebnissen überprüft werden kann. Hydrologische Modelle, die dieser Anforderung genügen sollen, müssen insbesondere folgende Faktoren adäquat berücksichtigen:

- (1) *Bodenzone*: Aufgrund der Schlüsselstellung der Bodenzone bei der Aufteilung des Niederschlages in Oberflächenabfluss bzw. oberirdische

Speicherung, schnellen unterirdischen Abfluss und längerfristig gespeicherten Anteil ist die Güte der Simulation der Abflussbildung bei Hochwasser eng an eine geeignete Repräsentation der Bodenoberfläche sowie der ungesättigten Zone im Modell geknüpft (TODINI, 1995).

- (2) *Landnutzung*: Eigenschaften der Landnutzung, die einen Einfluss auf die Beschaffenheit der Bodenoberfläche sowie des Bodens selbst ausüben, müssen sich im Modell wiederfinden. Außerdem müssen die Speichereigenschaften der Vegetation wie Interzeption und Streuspeicherung im Modell repräsentiert sein.
- (3) *Ausgangsbedingungen*: Von großer Bedeutung für die Modellierung der Hochwassentstehung ist neben den Bedingungen während des Ereignisses der Feuchtezustand des Einzugsgebietes vor Einsetzen des Niederschlages, weswegen die Güte der Modellierung entscheidend von der korrekten Erfassung der Ausgangsbedingungen abhängt (siehe Abb. 2.1, S. 6).
- (4) *Räumliche Verteilung*: Aufgrund des Einflusses der Lage von Veränderungen der physiographischen Gebietseigenschaften im Einzugsgebiet auf die Abflusssituation bei Hochwasser muss die Verteilung dieser Veränderungen über das Gebiet bei der Modellierung berücksichtigt werden (BURT, 1989, siehe Kap. 2.2). Das Modell muss außerdem die raumzeitliche Dynamik von Niederschlagsereignissen wiedergeben.

2.5.4 Modelle zur Simulation des Einflusses von Landnutzungsänderungen

Im folgenden werden die Vor- und Nachteile konzeptioneller bzw. physikalisch begründeter Modelle getrennt erörtert. Etliche Modelle beinhalten jedoch Merkmale beider Modelltypen. Eine Dokumentation verschiedenster hydrologischer Modelle bietet SINGH (1995). Ein aktueller Vergleich verschiedener Modelle im Hinblick auf die Simulation des Einflusses der Landnutzung auf das Abflussgeschehen findet sich beispielsweise bei FELDWISCH (1999).

2.5.4.1 Konzeptionelle Modelle

Soll bei gleichbleibenden Bedingungen im Einzugsgebiet die Abflussreaktion des Gebietes auf eine

durch Messungen abgedeckte Bandbreite von Niederschlagsereignissen simuliert werden, so sind rein konzeptionelle Modelle in vielen Fällen ausreichend. Wesentliche Vorteile konzeptioneller Modelle gegenüber komplexeren Modellen sind deren überschaubare Anzahl zu ermittelnder bzw. zu kalibrierender Parameter, deren einfache mathematische Basis, geringe Rechenzeiten sowie eine vergleichsweise kurze Einarbeitungszeit.

Diese Modelle scheiden jedoch nach KIRNBAUER et al. (1996) für *Prognosen* der Wirkung von Landnutzungsänderungen auf die Abflussmechanismen in einem Gebiet aus folgenden Gründen aus:

- (1) Die *Modellparameter* sind eng an die *Modellstruktur* geknüpft und können nicht direkt mit *messbaren* physiographischen Eigenschaften und Zustandsvariablen des Einzugsgebietes in Verbindung gebracht werden (BEVEN, 1991a).
- (2) Die Abhängigkeit der Parameter von der Modellstruktur bringt es außerdem mit sich, dass veränderte Bedingungen im Einzugsgebiet, deren Wirkung in exemplarischen Untersuchungen *gemessen* wurde, nicht durch gezielte Veränderungen von Modellparametern mit physikalischer Bedeutung definiert werden können (TIETJE, 1993).
- (3) Konzeptionelle Modelle bilden lediglich die *Dynamik* der Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis nach. Dies geschieht meist mit Hilfe von Speichern unterschiedlichen Füllungs- bzw. Auslaufverhaltens, die – wenn kein Wellenablaufmodul verwendet wird – sowohl den Abflussbildungsprozess als auch den Wellenablauf im Gerinne bis zum Gebietsauslass in seinem *zeitlichen Verlauf* beschreiben. Eine eindeutige Zuordnung der Speicher zu den im Einzugsgebiet vorherrschenden *Abflussbildungsprozessen* bzw. den anschließenden *Fließprozessen* im Gerinne findet nicht statt (BEVEN, 1991a).

Dennoch werden einfache konzeptionelle Modelle zur Prognose der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes verwendet (z.B. BULTOT et al., 1990; CASPARY, 1990; KOEHLER, 1992).

Eine Berücksichtigung der *räumlichen Lage* von Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet erfolgt

in konzeptionellen Modellen meist durch die Ausweisung von *Teileinzugsgebieten*, die getrennt modelliert und durch ein flood-routing-Modul miteinander verknüpft werden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn für die Teileinzugsgebiete Abflussdaten zur Verfügung stehen, anhand derer die Teilmodelle (im Ist-Zustand) kalibriert werden können, da für jedes Teileinzugsgebiet ein kompletter *Parametersatz* bestimmt werden muss (NEMEC, 1993; PFÜTZNER et al., 1992).

Einen Versuch, die Vorteile der konzeptionellen Modellierung mit der Beschreibung von *Abflussbildungsprozessen* zu verbinden, stellt das Konzept des TOPMODEL dar. Ausführungen zum Aufbau des Modells finden sich unter anderem bei BEVEN & KIRKBY (1979), BEVEN et al. (1984) und BEVEN et al. (1995). In TOPMODEL dient ein *topographischer Index*, der aus Daten eines digitalen Geländemodells (DGM) ermittelt wird, zur Charakterisierung der Affinität einer Stelle im Gebiet zu *Sättigungsflächenabfluss*. Sättigungsflächen werden in TOPMODEL abhängig von der *Verteilungskurve* des topographischen Indexes und vom *Füllungszustand* eines Speichers modelliert, der sowohl die Dynamik der ungesättigten als auch die der gesättigten Zone abbilden soll. Grundgedanke hierfür ist das in Kap. 2.1.4.2 angesprochene Konzept der variabel zum Abfluss beitragenden Flächen (variable source-area concept). Die starke Variabilität der Sättigungsflächen, die das Modell berechnet, konnte jedoch bisher in vielen Fällen nicht durch Geländebeobachtungen bestätigt werden (KIRNBAUER et al., 1996; GÜNTNER et al., 1999). FRANCHINI et al. (1996) bemängeln an TOPMODEL außerdem die geringe Sensitivität des Modells für die Form der Verteilungskurve des topographischen Indexes sowie durchweg unrealistisch hohe Werte für den Parameter der hydraulischen Leitfähigkeit.

Konzeptionelle Modelle unterschiedlicher Komplexität sind z.B. ARC/EGMO (KLÖCKING, 1999), ARNO (TODINI, 1996), HBV (LINDSTRÖM et al., 1997), AKWA-M (MÜNCH, 1993), PRMS (LEAVESLEY & STANNARD, 1995) oder WASIM-ETH mit TOPMODEL-Ansatz (SCHULLA, 1997).

2.5.4.2 Physikalisch begründete Modelle

Angestoßen insbesondere durch die Entwicklung des Système Hydrologique Européen SHE (ABBOTT

et al., 1986a/b) in den 80er Jahren zieht sich durch das vergangene Jahrzehnt eine bis heute nicht abgeschlossene Diskussion um das Leistungsvermögen physikalisch begründeter flächendifferenzierter Modelle (z.B. BEVEN, 1989; BATHURST & O'CONNELL, 1992; GRAYSON et al., 1992; BEVEN, 1996; REFSGAARD et al., 1996; O'CONNELL & TODINI, 1996), deren Komplexität und Datenbedarf bislang eine umfassende operationelle Verwendung in der Hydrologie verhindert haben. Vertreter dieses Modelltyps sind beispielsweise SHE (ABBOTT et al., 1986a/b), IHDM (BEVEN et al., 1987), THALES (GRAYSON et al., 1995) oder WASIM-ETH mit Richards-Gleichung (SCHULLA & JASPER, 1999).

Das Attribut *physikalisch begründet* (physically based) wird hier, analog zu SMITH et al. (1994), ausschließlich auf Modelle angewandt, deren Gleichungen für die Wasserbewegung im Einzugsgebiet aus den Grundgesetzen der Hydromechanik abgeleitet sind, wie z.B. der *Diffusionswellenansatz*, das DARCY-Gesetz oder die RICHARDS-Gleichung.

Als *flächendetailliert* (distributed) werden im weiteren vor allem Modelle bezeichnet, welche die räumliche Verteilung der Gebietseigenschaften und Prozesse als Rasterflächen wiedergeben. Die getroffenen Aussagen schließen jedoch auch Modelle wie THALES ein, dessen Raumgliederung sich aus den Falllinien einzelner Hangsegmente zusammensetzt.

Von BEVEN (1989, 1992, 1996), BLÖSCHL (1996), GRAYSON et al. (1992), O'CONNELL & TODINI (1996) und anderen geäußerte Vorbehalte gegen diese Modelle sind:

- (1) Enormer Datenbedarf, der in der Regel nicht befriedigt werden kann.
- (2) Hoher Zeitaufwand bei der Erstellung der Modellstruktur für ein bestimmtes Gebiet.
- (3) Lange Rechenzeiten aufgrund der komplexen Prozessbeschreibung.
- (4) Die Verwendung sogenannter *effektiver* Parameter auf der Ebene der Rasterelemente vernachlässigt ungerechtfertigterweise die kleinräumige *Heterogenität* der Gebietskennwerte und die starke *Variabilität* der Prozesse und Zustandsvariablen innerhalb eines Rasterelementes (*subgrid variability*; BEVEN, 1989). Zur Berücksichtigung dieser subgrid-Variabilität werden verschiedene Ansätze diskutiert (BEVEN, 1993; BINLEY et al., 1989; BLÖSCHL, 1996; BLÖSCHL et

- al., 1995; JENSEN & MANTOGLOU, 1992; RAGAB & COOPER, 1993a/b; WOOD et al., 1988).
- (5) Die zur Beschreibung der Abflussreaktion der Bodenzone erforderlichen Werte der hydraulischen Leitfähigkeit sind nicht identisch mit der Matrixleitfähigkeit, die im Labor (Mikroskala) bestimmt werden kann. Für die Modellierung müssen daher *effektive Leitfähigkeiten* abgeschätzt oder Makroporen explizit getrennt behandelt werden, was nur in seltenen Fällen durch Daten abgedeckt ist (GRAYSON et al., 1995).
 - (6) Werden die »physikalischen« Parameter derartiger Modelle in die *Kalibrierung* einbezogen, so geht deren physikalische Bedeutung verloren (BEVEN, 1989).
 - (7) Physikalische Gleichungen, die im Labor an einer Bodensäule, also in der *lokalen Skala* nach DOOGE (1986), ermittelt wurden und streng genommen auch nur für diese Gültigkeit besitzen, werden ohne eine kontrollierte Übertragung direkt auf Rasterelemente von z.T. mehr als 1000 m Seitenlänge angewandt (BEVEN, 1989; BLÖSCHL, 1996; siehe auch Tab. 2.21, S. 67).
 - (8) Trotz ihrer Komplexität stellen die *physikalischen Grundgleichungen* keine ausreichende Beschreibung der Vielzahl an Prozessen dar, die in der Bodenzone ablaufen (siehe Kap. 2.1.4.1 und Kap. 2.1.4.2). So beschreibt z.B. die RICHARDS-Gleichung lediglich die laminare Fließbewegung in einer homogenen Bodensäule, wird aber dennoch implizit zur Beschreibung der Gesamtheit der Fließprozesse im Boden herangezogen (BEVEN, 1996; O'CONNELL & TODINI, 1996).
 - (9) Das Modellierungsergebnis hängt stark von der Art der *räumlichen Diskretisierung* (z.B. Quadratraster, Dreieckselemente, Hangsegmente) im Modell ab (BLÖSCHL, 1996).
 - (10) Aufgrund der *Detailliertheit* der Prozessbeschreibung werden falsche Erwartungen bezüglich der *Genauigkeit* der Modellergebnisse geweckt (BEVEN, 1989; GRAYSON et al., 1992).
 - (1) Die Parameter physikalisch begründeter Modelle besitzen eine *physikalische Bedeutung* und können durch Messungen bereitgestellt werden (BATHURST & O'CONNELL, 1992).
 - (2) Verschiedenartigste flächenhafte und punktförmige *Gebietsinformationen* (a priori knowledge) können in das Modell einfließen (O'CONNELL & TODINI, 1996).
 - (3) *Veränderte Gebietszustände* (als Folge von veränderter Landnutzung) können anhand von physikalisch begründeten (messbaren) Parametern definiert werden.
 - (4) Die *räumliche Gliederung* des Einzugsgebietes ermöglicht die Berücksichtigung (a) der Lage von Veränderungen der physiographischen Gebietseigenschaften sowie (b) der Niederschlagsverteilung über das Gebiet.
 - (5) In Rasterform vorliegende Eingangsdaten (z.B. Fernerkundungsdaten, Landnutzungskarten oder Bodenkarten) und Modellierungsergebnisse können unmittelbar in einem *Geographischen Informationssystem* (GIS) verarbeitet werden (falls die Berechnung nicht ohnehin in einem GIS durchgeführt wird).
 - (6) Zur *Validierung* dieser Modelle stehen neben der Abflussganglinie am Gebietsauslass noch andere Berechnungsergebnisse wie z.B. das räumliche Verteilungsmuster einer Schneedecke (BLÖSCHL, 1996) oder Bodenfeuchtwerte/Grundwasserstände (O'CONNELL & TODINI, 1996) zur Verfügung.
 - (7) Durch eine mathematische Beschreibung (a) der kleinräumigen Variabilität innerhalb einer Rasterfläche des Gitternetzes sowie (b) der Unsicherheit der Parameter/Messwerte können die *Genauigkeitsgrenzen* der Berechnung quantifiziert werden.

Die Vorteile der physikalisch begründeten Modelle sind nach BATHURST & O'CONNELL (1992), BLÖSCHL (1996), KUCHMENT (1989), O'CONNELL & TODINI (1996) und REFSGAARD et al. (1996):

Neben Modellen zur physikalisch begründeten flächendetaillierten Beschreibung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses auf Einzugsgebietsebene gibt es eine Reihe von Modellen zur Simulation der *Abflussbildung am Hang*. Stärker als dies im Einzugsgebietsmaßstab möglich ist, wird mit diesen Modellen eine physikalische Beschreibung einzelner Abflussbildungsprozesse wie Makroporenfluss (vorwiegend vertikal) oder pipe flow (vorwiegend lateral) versucht. Vertreter dieses Modelltyps sind beispielsweise QSOIL (FAEH, 1997), HILLFLOW

(BRONSTERT, 1994) oder SWMS-2D (SIMUNEK et al., 1992).

Das in dieser Hinsicht kompromissloseste Modell dürfte das an der ETH Zürich entwickelte zweidimensionale Finite-Elemente-Modell QSOIL sein. Gerade an einem Modell wie QSOIL zeigen sich aber auch deutlich die Grenzen einer mathematischen »Nachahmung« der einzelnen Prozesse. Insbesondere die physikalische Beschreibung des Makroporenflusses verlangt dem Modellanwender die Bestimmung einer Vielzahl von Parametern ab, die sich in dieser Weise nicht im Gelände messen lassen. Bei der Anwendung solch eines Modells offenbaren sich aber auch die Lücken, die beim Verständnis der Prozesse selbst nach wie vor bestehen.

2.5.5 Bewertung von Modellergebnissen

Hauptmerkmal der Berechnung von Prognosen zur Wirkung von Veränderungen im Einzugsgebiet auf das Abflussgeschehen bei Hochwasser ist das Fehlen von Messwerten des Abflusses zur Kalibrierung des Modells bzw. zur Bewertung der Modellergebnisse. Dennoch gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Verlässlichkeit der Prognoserechnungen abzuschätzen. Diese werden im folgenden vorgestellt.

2.5.5.1 Validierung an gemessenen Hochwasserganglinien

Für die Modellierung von Landnutzungsänderungen schlägt KLEMEŠ (1986) den *differential split-sample test* vor. Voraussetzung für diesen Test ist, dass in der Vergangenheit des Einzugsgebietes bereits aufgetretene Landnutzungsänderungen durch Niederschlags- und Abflussdaten dokumentiert sind. In diesem Fall können zwei Zeiträume ausgewählt werden, die sich bei sonst gleichen Bedingungen in ihrer Landnutzung unterscheiden. Zunächst wird dann das Modell an einem der beiden Zeiträume kalibriert. Anschließend wird versucht, die Landnutzung des anderen Zeitraumes in ihren Auswirkungen auf den Niederschlag-Abfluss-Prozess zu simulieren. Der Vergleich mit den Abflussdaten dieses Zeitraumes ermöglicht dann eine Bewertung der simulierten Abflussganglinie.

Eine andere Möglichkeit, die Eignung eines Modells zur Anwendung unter Bedingungen zu testen,

für die keine Daten zur Kalibrierung zur Verfügung stehen, verwenden BEVEN et al. (1984) zur Evaluierung von TOPMODEL. Dabei werden zunächst die Modellparameter aus Geländebeobachtungen und Messungen abgeschätzt und mit diesen geschätzten Parametern Simulationen durchgeführt, *ohne* das Modell an einer gemessenen Abflussganglinie zu kalibrieren. Anschließend wird die simulierte Abflussganglinie direkt mit der gemessenen verglichen und daran bewertet. Die Ergebnisse dieses Tests bewerten BEVEN et al. (1984) als »sufficiently encouraging«.

Einen präziseren Bewertungsmaßstab für solch einen Blindtest fordern EWEN & PARKIN (1996). Deren Vorschlag hierfür sieht vor, nicht nur die *Modellparameter* anhand von verfügbaren Daten abzuschätzen, sondern bereits *vor* der Simulation *Fehlergrenzen* für die Variablen vorzugeben, die anhand der Simulation ermittelt werden sollen. Beispiele für diese Variablen sind die Fülle eines Hochwasserereignisses, die Abflusssumme eines Jahres oder der Verlauf des Grundwasserstandes an einer bestimmten Stelle im Gebiet über den Zeitraum der Simulation hinweg. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, sich bereits vor der Modellanwendung darüber klar zu werden, welche Genauigkeit von den Modellierungsergebnissen erwartet werden kann. Im weiteren trägt dieser Test aber auch dazu bei, abschätzen zu können, ob die bei der Modellierung erzielbare Genauigkeit *überhaupt* für die Beantwortung einer bestimmten Fragestellung ausreicht. Eine erste Anwendung dieses Verfahrens, das Modell und Modellanwender gleichermaßen fordert, ist bei PARKIN et al. (1996) beschrieben.

2.5.5.2 Validierung an zusätzlichen Informationsquellen

Das Modellierungsergebnis physikalisch begründeter flächendetaillierter Modelle beinhaltet neben Hochwasserganglinien meist auch räumliche Informationen wie z.B. das Verteilungsmuster einer Schneedecke (BLÖSCHL, 1996), von Bodenfeuchtwerten, Grundwasserständen (O'CONNELL & TODINI, 1996; SEIBERT, 1998; KUCZERA & MROCKOWSKI, 1998) oder von Zonen erhöhter Abflussbildung wie Sättigungsflächen (FRANKS et al., 1998; AMBROISE et al., 1996; GÜNTNER, 1999) zu einem bestimmten *Zeitpunkt* sowie beispielsweise die

räumliche Verteilung der Interzeption oder der Verdunstung für einen bestimmten *Zeitraum*. Diese können für eine Bewertung der Simulationsergebnisse im Ist-Zustand herangezogen werden – vorausgesetzt, dass Daten hierüber zur Verfügung stehen. Werden neben dem Gebietsabfluss auch andere hydrologische Größen vom Modell richtig wiedergegeben, so erhöht dies die Wahrscheinlichkeit, dass auch die zugrundeliegenden hydrologischen Prozesse im Modell in geeigneter Weise repräsentiert sind.

Dieses Vorgehen wird auch als *multi-response validation* bezeichnet (MROCKOWSKI et al., 1997).

Gemessene *Isotopenkonzentrationen* bzw. *hydrochemische Parameter* wie z.B. Silikat- Nitrat-, oder Chloridkonzentrationen sowie daraus abgeleitete Informationen zu den Anteilen einzelner Abflusskomponenten am Abflussgeschehen können ebenfalls als Informationsquelle dienen (BECKER et al., 1999; UHLENBROOK, 1999; MROCKOWSKI et al., 1997).

Die Untersuchungsgebiete

3.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE DREI AUSGEWÄHLTEN EINZUGSGEBIETE

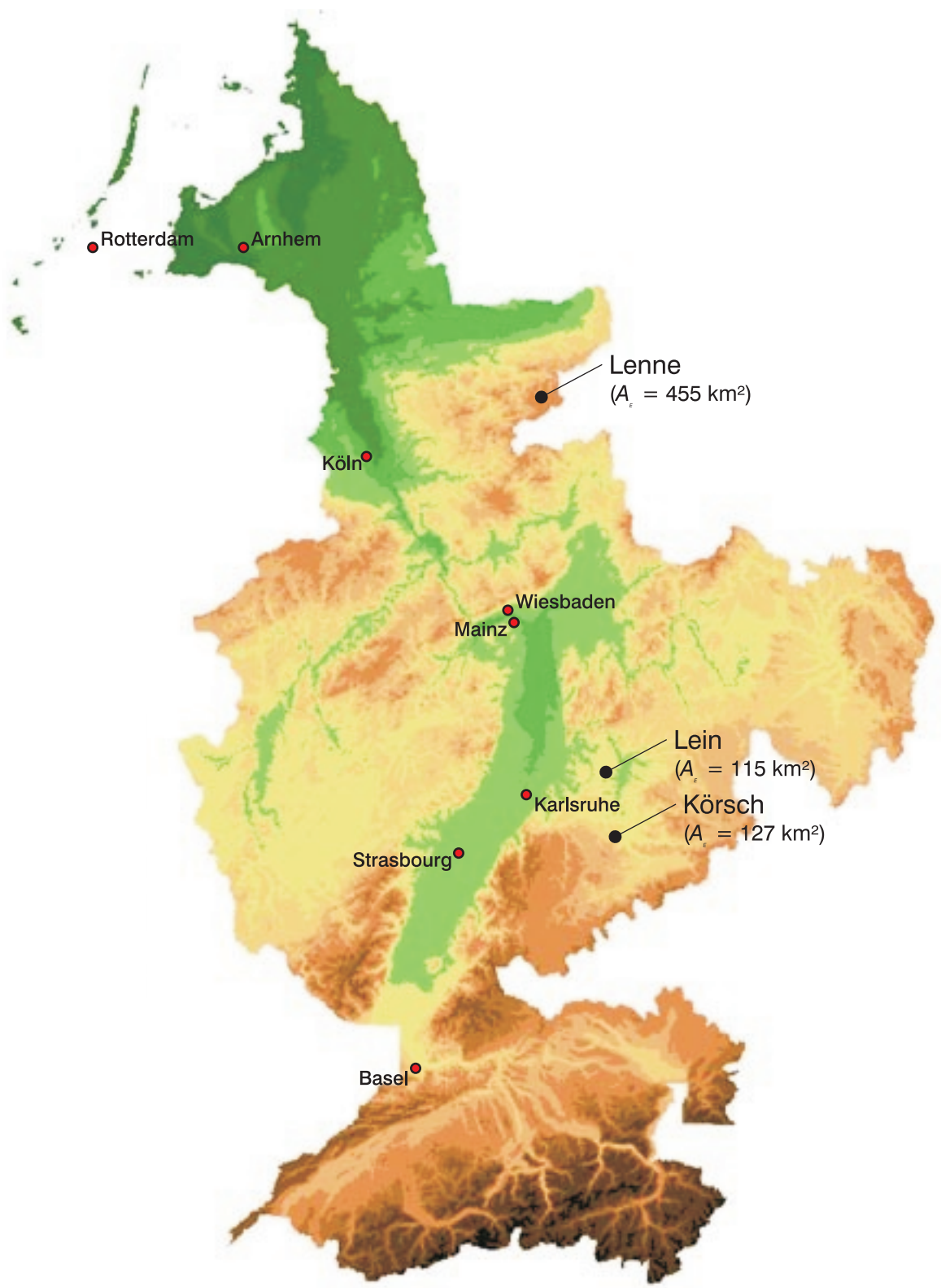
Hauptziel der vorliegenden Untersuchung ist es, anhand von verschiedenen Einzugsgebieten exemplarisch den Einfluss der Landnutzung auf die Abflussbildung bei Hochwasser darzustellen. Hierfür wurden drei mesoskalige Einzugsgebiete im deutschen Teil des Rhein-Einzugsgebietes ausgewählt, die sich markant in ihrer Landnutzung unterscheiden. Zu diesem Zweck wurde eine Kooperation mit dem Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart und dem Ruhrverband in Essen aufgebaut. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, dass eines der Gebiete dicht besiedelt, eines vorwiegend bewaldet ist und eines intensiv landwirtschaftlich genutzt wird.

Die *Mesoskala* – die nach BECKER (1992) Gebiete bis zu einer Größe von etwa 1000 km² umfasst – bietet sich für eine derartige Studie an, da in größeren Gebieten der Einfluss des Gewässernetzes den Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften auf den Verlauf eines Hochwassers zunehmend überprägt und damit Aussagen zu Abflussbildungsprozessen erschwert (BEVEN, 1991).

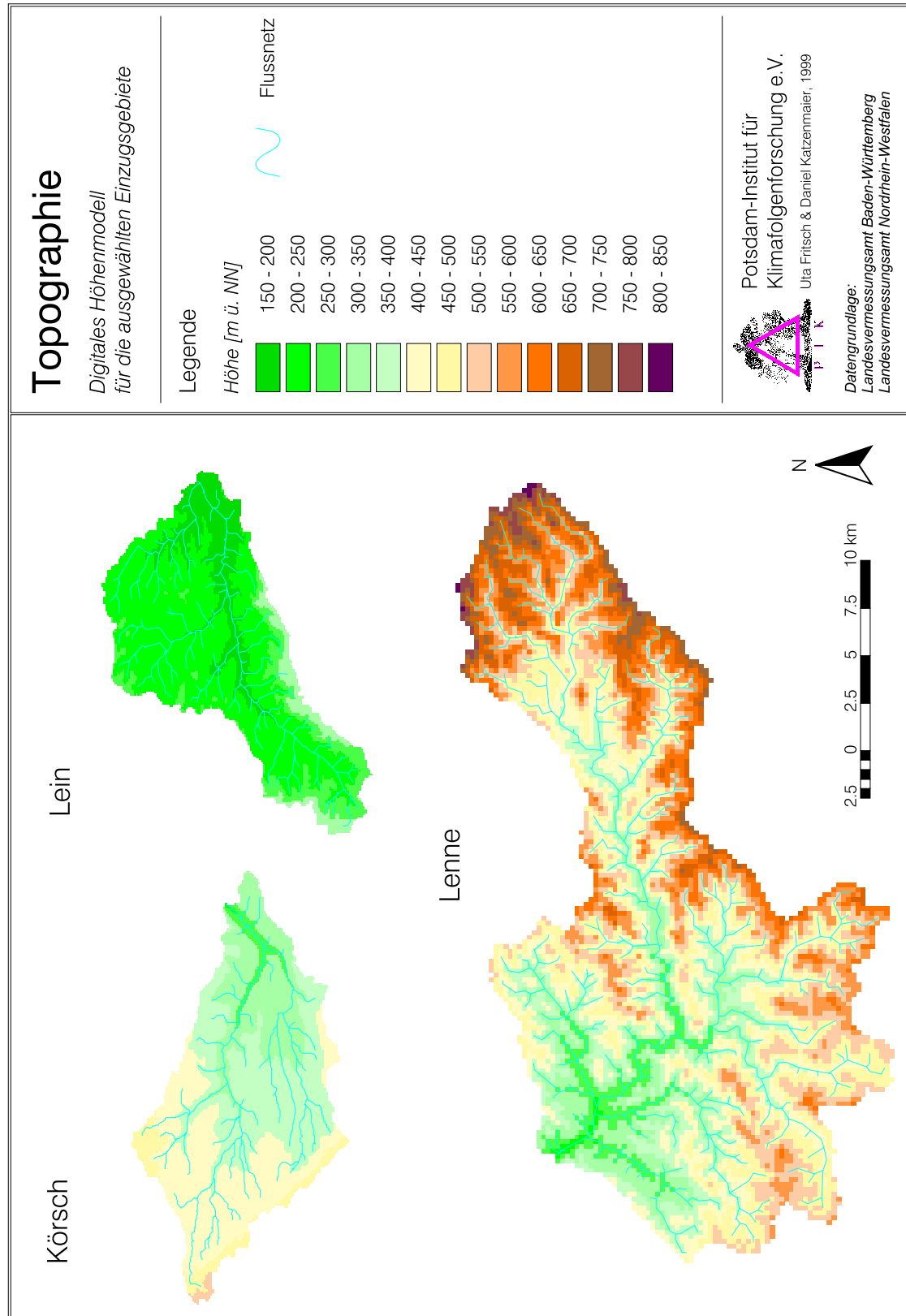
Karte 3.1, S. 74 bietet eine Einordnung der drei im folgenden genannten Untersuchungsgebiete innerhalb des Rhein-Einzugsgebietes:

- (1) Das überwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der *Lein* liegt südwestlich von Heilbronn und nimmt eine Fläche von 115 km² ein. Es ist sanft gewellt und fällt von Südwesten nach Nordosten flach ab (Kap. 3.2).
- (2) Das urban geprägte Einzugsgebiet der *Körsch* befindet sich im Süden von Stuttgart. Es hat eine Fläche von 127 km², die sanft von Westen nach Osten hin abfällt. Der Flusslauf der Körsch hat sich im Laufe der Zeit tief in die sonst flache Hochebene eingeschnitten (Kap. 3.3)
- (3) Die *Lenne* ist ein Zufluss der Ruhr und entspringt im Rothaargebirge. Das ausgewählte Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den Oberlauf bis zum Pegel Bamenohl. Dieses Gebiet ist 455 km² groß und stark reliefiert (Kap. 3.4).

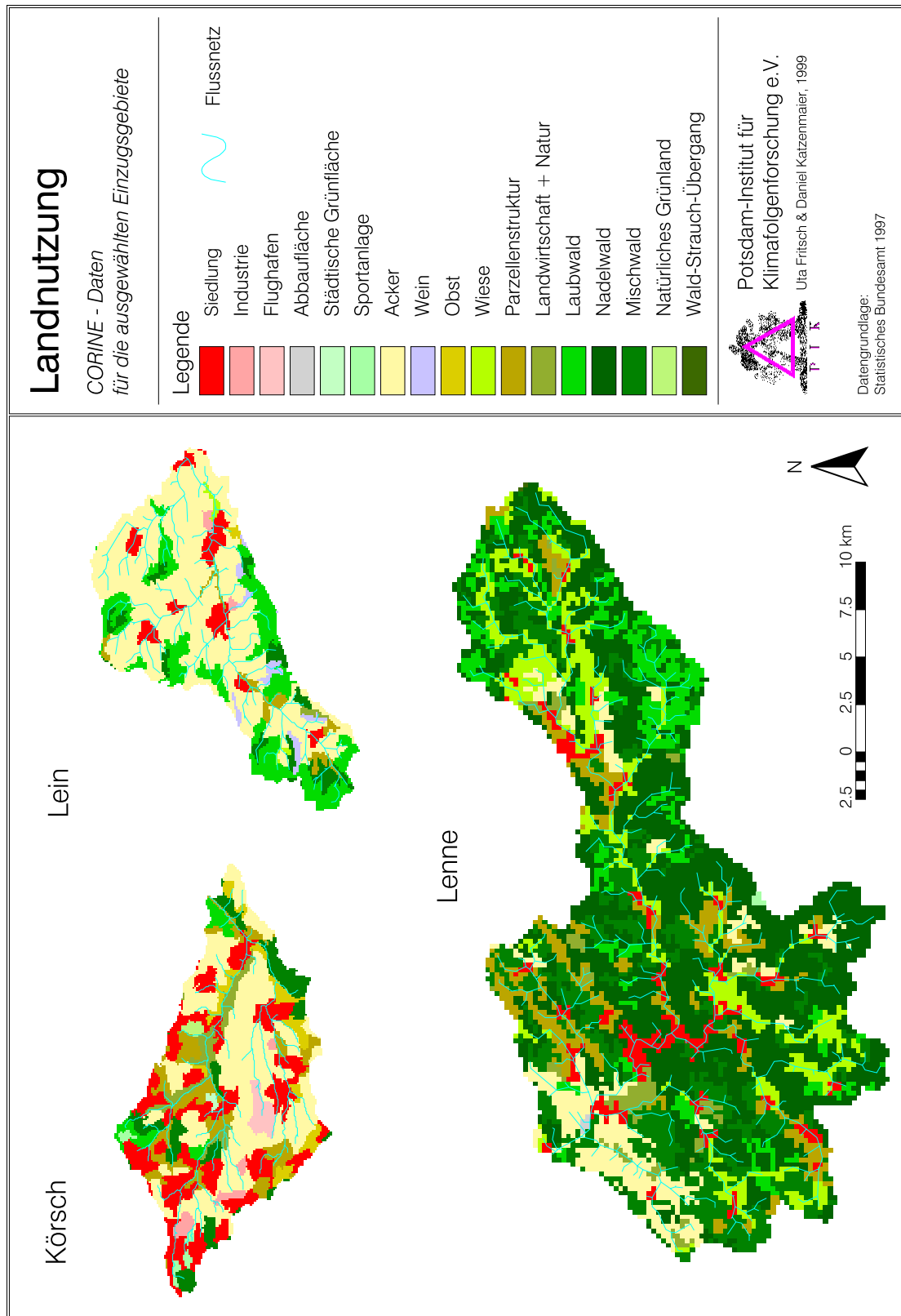
Die darauffolgenden Karten geben einen Überblick über Topographie, Landnutzung, dominante Bodentypen sowie die Lage der Messstationen in den drei Untersuchungsgebieten. Der Vergleichbarkeit wegen sind alle drei Gebiete im selben Maßstab und mit einheitlicher Höhenskalierung dargestellt.



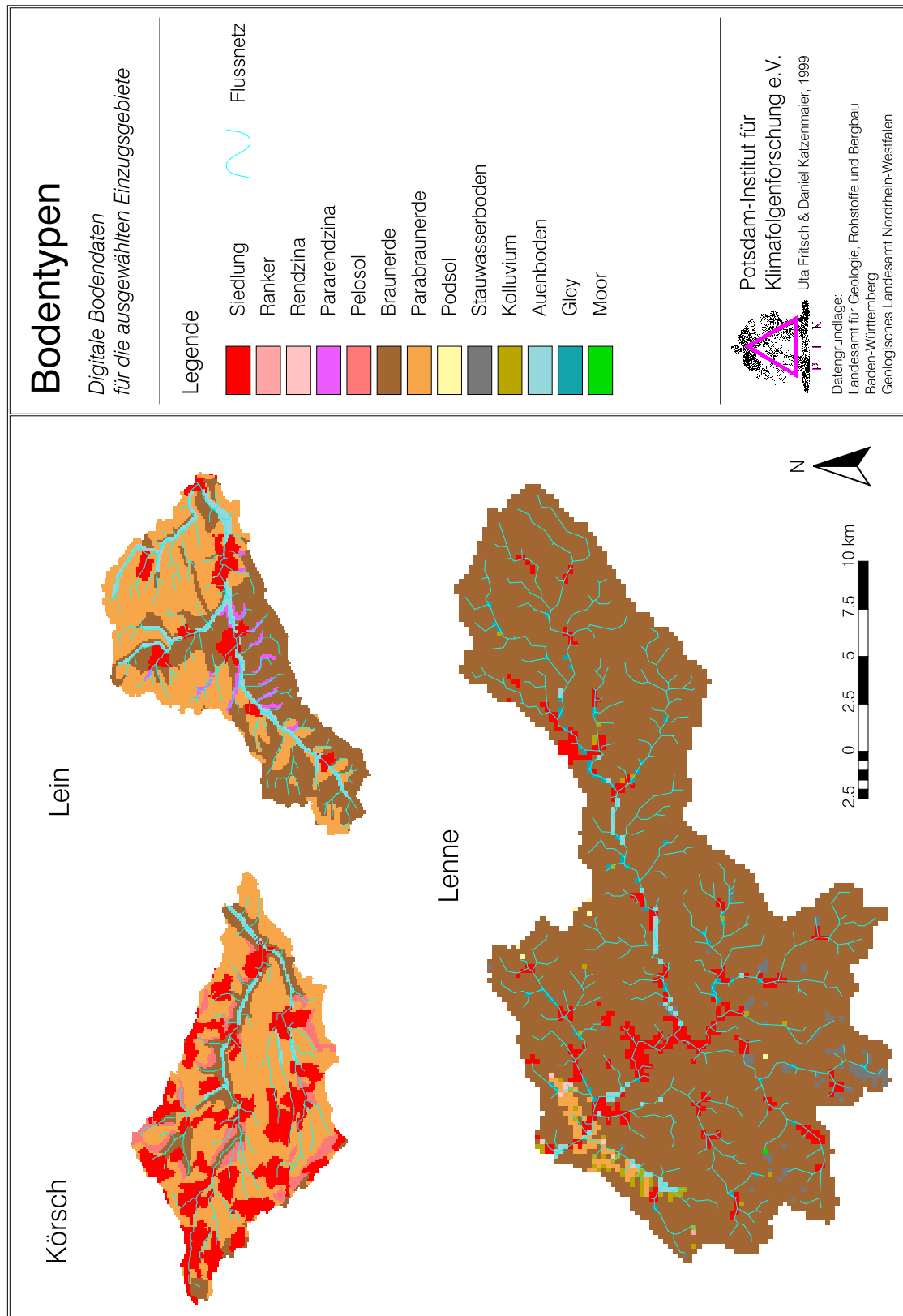
Karte 3.1 Lage der drei Untersuchungsgebiete im Einzugsgebiet des Rheins



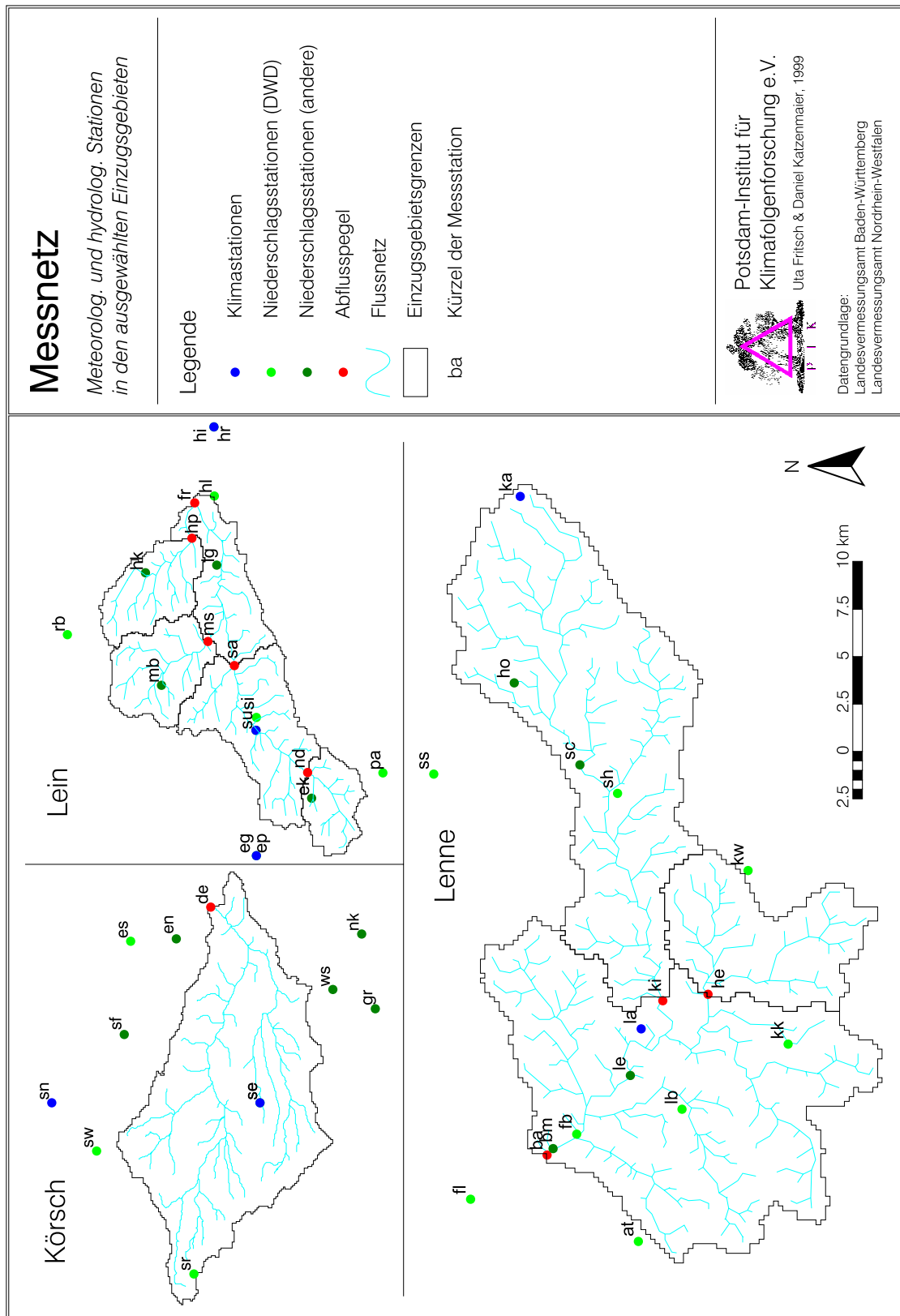
Karte 3.2 Topographie der drei Untersuchungsgebiete



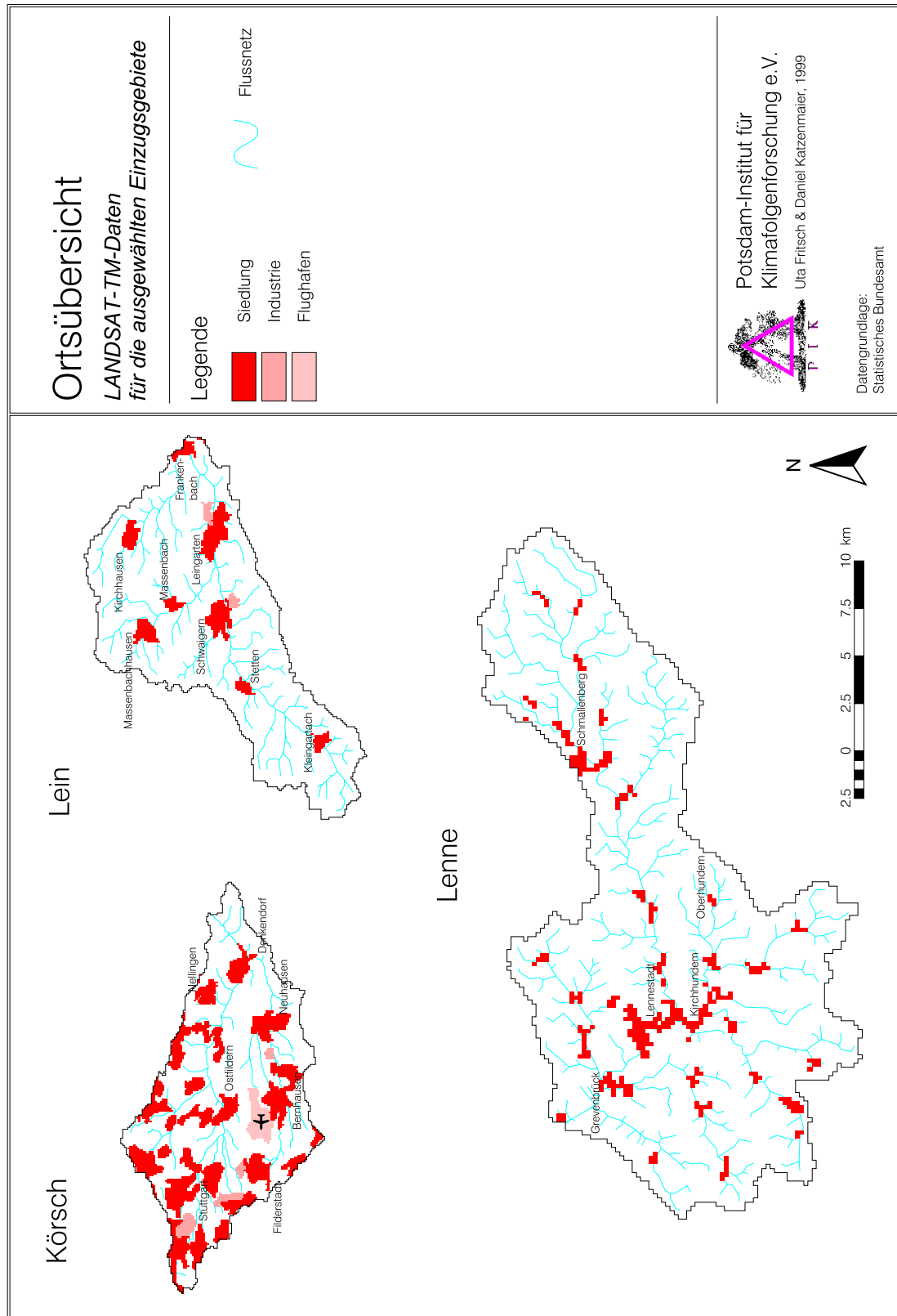
Karte 3.3 Landnutzung in den drei Untersuchungsgebieten



Karte 3.4 Vorherrschende Bodentypen in den drei Untersuchungsgebieten



Karte 3.5 Messnetz in den drei Untersuchungsgebieten (Stationskürzel siehe Kap. A.3)



Karte 3.6 Ortsübersicht der drei Untersuchungsgebiete

3.2 LEIN

3.2.1 Klimatische Verhältnisse

Das Klima des Einzugsgebiets der Lein unterliegt, wie ganz Mitteleuropa, den Schwankungen der *außertropischen Zirkulation*, die sich in unterschiedlichen Großwetterlagen von jeweils mehrtägiger Dauer auswirken (vgl. HENDL, 1995). Der normale mitteleuropäische Winter wird hier bei wechselhaften Zirkulationsverhältnissen auffallend *stark ozeanisch* geprägt. Der Großwettertyp West ist daran überdurchschnittlich beteiligt und bringt intensive Zyklonentätigkeit mit häufigen Frontalniederschlägen mit sich. Im Frühjahr überwiegt der Großwettertyp Nord, der kühles und schauerreiches Wetter nach Mitteleuropa führt. Der Sommer ist wiederum *stark ozeanischen orientiert* und bewirkt ein Sommermaximum der Niederschläge durch bewölkungsreiche und oft von Frontalniederschlägen begleitete Südwest bis Nordwest Großwetterlagen. Die warmen Sommer werden durch eine gesteigerte Häufigkeit des Großwettertyps Kontinental-Ost bedingt. Im Herbst dominiert das Auftreten vom Großwettertyp des Hochdrucks mit niederschlagsfreien Strahlungswetterperioden. Im November verschieben sich die vorherrschenden Großwettertypen zu West mit niederschlagsbegleitenden Zyklonen. Die jahreszeitliche Veränderung der Großwetterlagen tritt mit bestimmten Häufigkeitsverteilungen auf und übt auf den durchschnittlichen Witterungsverlauf Einfluss aus.

Die Kraichgausenke stellt ein *thermisch sehr begünstigtes Gebiet* dar und gehört zu den wärmsten Gebieten in Baden-Württemberg (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1988). Die räumliche Variation der Lufttemperatur ist durch die ebenen, wenig geneigten Flächen des Schichtstufenlands relativ gering. Eine starke atlantische Beeinflussung bewirkt vor allem erhöhte Wintertemperaturen und einen im Vergleich zu den anderen Stufenlandbereichen *geringen Lufttemperaturjahresgang* von nur 17,9 K (HENDL, 1995). Die mittlere Anzahl von durchschnittlich 80 Frosttagen und nur 30 Schneedeckentagen verdeutlicht die thermische Gunstlage des Gebiets. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt rund 770 mm. Der überwiegende Teil dieser Summe entstammt zyklonalen Niederschlägen. Die Hauptwindrichtung ist West-Südwest. Sie erfährt

eine Beeinflussung durch das Relief. Die Windgeschwindigkeiten liegen im Durchschnitt um 3–4 m/s (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1988).

3.2.2 Geologie und Böden

Der Naturraum *Kraichgau*, dem das Einzugsgebiet der Lein zuzurechnen ist, wird im Süden vom Schwarzwald bzw. von Strom- und Heuchelberg, im Norden vom Kleinen Odenwald, im Westen vom Oberrheingraben und im Osten vom Neckartal begrenzt. Ebenso wie in der Umgebung von Stuttgart sind die mesozoischen Schichten im Kraichgau zu großen Teilen von *Löss* überdeckt, der in der Kaltzeit des Pleistozäns durch den Westwind aus den trockenliegenden Schotterflächen des Oberrheingrabens (Periglazialbereich) ausgeblasen wurde. Entsprechend der Transportrichtung des Gesteinstaubes nimmt die Mächtigkeit der Lössdecke von Westen nach Osten hin ab, erreicht aber im Lein-Einzugsgebiet immer noch Beträge von bis zu 20 m. An den Talflanken des Leintals, west(wind)exponierten Hängen sowie an den Hängen des Heuchelberges im Südosten des Leingebietes treten an mehreren Stellen mergelige Schichten des Unteren Keupers (*Lettenkeuper*) sowie Gipshorizonte des Mittleren Keupers (*Gipskeuper*) zutage. Bei Massenbach wird auch der darunterliegende Obere *Hauptmuschelkalk* angeschnitten. Der Rücken des Heuchelberges, der die südöstliche Einzugsgebietsgrenze der Lein bildet, wird vom *Schilfsandstein* (ebenfalls Mittlerer Keuper) im Hangenden des Gipskeupers eingenommen. Dieser kann als Sandstein oder Mergel ausgeprägt sein. Die Talsohle des Leintals bilden quartäre Auelehme und Kiese mit hohem Schluff- und Tongehalt. Im Unterlauf der Lein und des Rotbachs treten auch pleistozäne *Hochterrassenschotter* an die Oberfläche, die sich aus z.T. nagelfluhartig verfestigten Kiesen zusammensetzen (GEYER & GWINNER, 1991; RAUSCH et al., 1995).

Ebenso wie im Einzugsgebiet der Körsch herrschen im Leingebiet *Parabraunerden* auf Löss vor. Auf den verschiedenen anstehenden Schichten des Keupers haben sich vornehmlich *Braunerden* gebildet. Braunerden finden sich aber auch in lössbedeckten Bereichen als Folgeprodukte von Para-

braunerden an Stellen, wo die Entkalkung des Löss und die daraus resultierende Verlehmung und Verbraunung des Bodens bereits weiter fortgeschritten sind. In den Talauen einiger kleinerer Zuflüsse zur Lein sind vereinzelt geringer entwickelte Vorstufen zu Parabraunerden, sogenannte *Pararendzinen*, entstanden. *Auenböden* sind auf das Leintal selbst sowie auf die beiden größten Zuflüsse zur Lein, Massenbach und Rotbach, beschränkt.

3.2.3 Gewässer und Grundwasser

Die Lein entspringt oberhalb von der Ortschaft Kleingartach in *mehreren kleinen Quellen*. Sie wird beidseitig von mehreren kleineren Zuflüssen auf ihrer 18 km langen Fließstrecke gespeist. Die bedeutenderen wie Dachbach, Lohgraben, Massenbach und Rotbach treffen sie linksseitig (RAUSCH et al., 1995). Die Lein hat sich im Laufe der Jahre in die sanftwellige, fruchtbare Landschaft der *Gäuflächen* eingetieft und einen Auenbereich geschaffen.

Das Leintal gehört zur *Grundwasserlandschaft des Unterkeupergebiets*, dessen Schichten den bedeutendsten Aquifer darstellen. Die Lein gilt als Vorflut ihres abfließenden Grundwassers. Sein lithologischer Aufbau von ca. 22–30 m mächtigem Tonstein, der mit bis zu 1 m mächtigen Dolomiten, bis zu 8 m mächtigen Sandsteinen durchsetzt ist und dessen Schichtenlagerung mit weitgespannten Mulden strukturiert ist, begründen sein *ergiebiges Dargebot* (RAUSCH et al., 1995). Zu diesem Dargebot trägt außerdem die Ausbildung großer Einzugsge-

biete bei, deren größtes im Leintal liegt. Bei Frankenbach ist dadurch eine Trinkwasserförderung von 150 l/s möglich. Diese Ergiebigkeit wird einerseits durch *Einsickerung* auf den Unterkeuperflächen und andererseits durch *Speisung durch andere Grundwasserleiter* erklärt. Entlang des Leinbachtals liegt die Grundwasserdruckfläche des Oberen Muschelkalks höher als die des Unteren Keupers, so dass aus dem Muschelkalk Grundwasser in diesen Leiter aufsteigen kann. Vorfluterferne Bachläufe, die nur periodisch Wasser führen und meist als *trockene Muldentäler* erscheinen, bezeugen die Speisung des Grundwassers von der Oberfläche durch Versickerung (RAUSCH et al., 1995).

3.2.4 Vegetation und Landnutzung

Als potenziell natürliche Vegetation wird diejenige Vegetation bezeichnet, die sich bei einem plötzlichen Aufhören des menschlichen Einflusses auf die Pflanzendecke auf Grund der derzeitigen Standortbedingungen einstellen würde. Im Einzugsgebiet der Lein herrschen potentiell *subkontinentale Eichen-Hainbuchenwälder* auf mittelmäßigen bis nährstoffreichen Bodenverhältnissen vor (KLINK, 1995).

Durch die hohe Bodenfruchtbarkeit des Leintals wurde der Wald schon früh von den lössbedeckten Flächen verdrängt und führt heute zu einer überwiegend *agrarisch intensiven Nutzung*, wie in Abb. 3.1, S. 81 deutlich zu sehen ist. Die Klassifizierung der verschiedenen Landnutzungen wird von der Datenbasis CORINE übernommen.

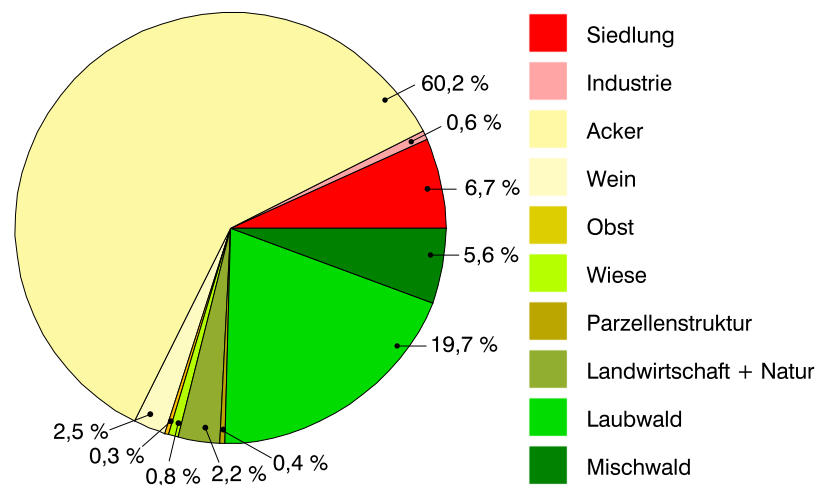


Abb. 3.1 Flächenanteile der Landnutzung des Leineinzugsgebiets (STATISTISCHES BUNDESAMT, 1997)

Der allgemeine Trend seit den 60er Jahren zum Rückgang der landwirtschaftlichen Produktion, hat sich deshalb im Einzugsgebiet der Lein kaum bemerkbar gemacht. Als Feldfrüchte dominieren Getreidearten. Die Nähe zu einer Weiterverarbeitungsfirma im nahe gelegenen Eppingen bedingt einen relativ hohen Anbauanteil von *Kartoffeln und Zwiebeln*. Diese Früchte erreichen einen höheren Marktwert als Getreide. Dort, wo es die Bodengüte zulässt, werden die anspruchsvollen Ackerfrüchte *Zuckerrüben und Zichorie* angebaut, weil diese den höchsten Gewinn bringen. An steileren Lagen im Süden des Untersuchungsgebiets wird die Fläche für *Wein- und Obstanbau* genutzt. Nach mündlicher Auskunft von LEMPE (Landwirtschaftsamt Heilbronn) wurde in den letzten Jahren viel Grünland umgebrochen, um am Stichtag für die EU-Bewertung als Ackerland aufgenommen zu werden. Deshalb ist der Anteil an Wiesen kleiner 1 % Flächenanteil. Wald ist wegen der hohen Bodenfruchtbarkeit auf etwa 25 % der Fläche beschränkt und nur auf Braunerden zu finden. Der überwiegende Teil davon ist Laubwald, lediglich 25 % der Waldfläche ist mit Nadelholz durchmischt. Die Besiedlung hat in den letzten Jahren zugenommen und liegt bei einem Flächenanteil von etwa 7 %. Der *Siedlungszuwachs* ging mehrheitlich zu Lasten von Ackerflächen. Besonders in den Gemeinden Massenbachhausen und Schwaigern gibt es große Neubausiedlungen. Innerhalb der Ortslagen beträgt der Versiegelungsgrad des Bodens bis zu 80 %, in Randlagen durch Hausgärten ungefähr 40 % (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1988).

3.2.5 Bevölkerung und Wirtschaft

Seit 1995 ist für die Bevölkerungsstruktur im Landkreis Heilbronn mit einem *Geburtenrückgang* zu rechnen, der einem anhaltenden Trend bis ins nächste Jahrtausend hat (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1995). Dennoch hält das Bevölkerungswachstum in dieser Region stetig an, das durch *Zuwanderungen* aus dem In- und Ausland begründet wird.

Aus einem inneren Bedarf und den Zuwanderungen ergibt sich ein steigender Siedlungsflächenbedarf. Zwar ist ein Ziel der behördlichen Planung, für neue Siedlungsflächen grundsätzlich möglichst wenig Boden zu beanspruchen und eine möglichst hohe Wohnbaudichte zu erreichen, aber die Einwoh-

nerdichte pro Wohnbaufläche wird in der Realität auch in Zukunft zurückgehen (REGIONALVERBAND FRANKEN, 1995). Deshalb muss mit einem *steigenden Siedlungsbedarf* gerechnet werden. Leingarten und Schwaigern gehören im Leintal laut REGIONALVERBAND FRANKEN (1995) zu den Siedlungsbereichen, die sich schwerpunktmäßig zur Aufnahme der Siedlungstätigkeit besonders eignen. Sie passen in die Planung von Entwicklungsachsen und die Lage von Industrie und Dienstleistungseinrichtungen. Massenbachhausen gilt hingegen als nur bedingt geeignet, weil es nicht direkt an der Entwicklungsachse liegt.

Die Wirtschaftsstruktur ist bis heute noch *stark landwirtschaftlich geprägt* und wurde auch durch die Flächenstilllegungsprogramme der EU kaum verändert. Der überwiegende Teil der landwirtschaftlichen Betriebe wird hauptberuflich genutzt, mit einer durchschnittlichen Bewirtschaftungsgröße zwischen 40 und 60 ha Ackerland (LEMPE, Landwirtschaftsamt Heilbronn, mündliche Auskunft). Überwiegend Nebenerwerbsbetriebe bewirtschaften die Rebflächen von durchschnittlich 3 bis 6 ha Größe.

Für die Entwicklung der Betriebe müssen in Zukunft Flächen bereit gestellt werden, um die Arbeitskräfte aus der Zuwanderung, den Ausscheidenden aus der Landwirtschaft und die zunehmende Automatisierung aufzufangen.

Ein großer Teil der Bevölkerung arbeitet inzwischen in der Industrie oder in Dienstleistungsbetrieben und pendelt zur Arbeitsstätte in das Oberzentrum Heilbronn, das einen überregional bedeutsamen Schwerpunkt darstellt. Regional bedeutsame Standpunkte innerhalb des Leineinzugsgebiets stellen Leingarten und Schwaigern dar.

3.2.6 Hochwasserereignisse

Hochwasser sind im Zeitraum von 1980 bis 1997 in der Lein sowohl als Folge von langanhaltenden *advektiven/zyklonalen* Niederschlägen geringer Intensität als auch infolge von sommerlichen *konvektiven* Starkregenereignissen aufgetreten. Die größten Hochwasserereignisse im Gebiet mit einer Jährlichkeit von mehr als 5 Jahren sind jedoch ausnahmslos auf ergiebige zyklonale Niederschläge zurückzuführen (siehe Tab. 3.1, S. 83).

Tab. 3.1 Am Pegel Frankenbach/Lein im Zeitraum von 1980 bis 1997 gemessene Hochwasserscheitel, ermittelt aus stündlichen Durchflussmittelwerten

Wiederkehrintervall [a]	Zeitpunkt des Auftretens	Scheitel [m³/s]	Abflussbeiwert
5 - 10 a	21.12.1993, 12 Uhr	15,6	0,17
	26.02.1997, 13 Uhr	14,9	0,17
2 - 5 a	26.05.1983, 12 Uhr	11,6	0,18
	28.06.1994, 3 Uhr	10,3	0,08
	16.02.1990, 2 Uhr	10,0	0,12
< 2 a	23.07.1995, 6 Uhr	9,2	0,06
	09.06.1996, 15 Uhr	7,4	0,08
	04.06.1992, 6 Uhr	5,9	0,04
	13.04.1994, 21 Uhr	5,3	0,09
	vor 1990	14.03.1988, 12 Uhr	10,2
		31.01.1982, 3 Uhr	10,2
		05.09.1987, 2 Uhr	8,7
		17.12.1982, 22 Uhr	7,7
		01.12.1981, 17 Uhr	7,6
		01.04.1988, 10 Uhr	7,2
		08.07.1989, 11 Uhr	5,9

Anhaltswerte für die Größenordnung von Hochwassern in der Lein gibt Tab. 3.2, S. 83 für den Pegel Frankenbach.

Insbesondere die Angaben im Bereich der großen Hochwasser sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Tab. 3.2 Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Frankenbach/Lein für den Zeitraum von 1968 bis 1998 (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1999)

Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_{\bar{p}}$ [-] (entsprechendes Wiederkehrintervall T_n [a])	0,5 (2)	0,2 (5)	0,1 (10)	0,05 (20)	0,02 (50)	0,01 (100)
Hochwasserscheiteldurchfluss [m³/s]	9,33	13,92	17,07	20,13	24,18	27,33

3.2.7 Datenlage

3.2.7.1 Räumliche Daten

Zur Charakterisierung der *Topographie* sowie daraus abgeleiteter Größen wie Hangneigung, Exposition, Einzugsgebietsgröße oder Neigung zur Bildung von Sättigungsflächen wurde das Digitale Höhenmodell des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg verwendet, welches in Form von Ras-

terdaten mit einer Gitterweite von 50×50 m bereitgestellt wird (Karte 3.2, S. 75).

Für die *Landnutzung* standen die »Daten zur Bodenbedeckung« CORINE des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (1997) zur Verfügung, welche als Vektordaten mit einer Informationsdichte bereitgestellt werden, die in etwa dem Maßstab 1:100000 entspricht. Erfasst wurden Landnutzungseinheiten mit mehr als 25 ha Fläche und einer Breite von mehr als 100 m. Diese aus LANDSAT-TM-Satellitenaufnahmen, Luftbildern und topographischen Karten visu-

ell interpretierten Daten aus dem Jahre 1992 enthalten keine linienhaften Strukturen. Da sie flächendeckend und einheitlich für das ganze Bundesgebiet zur Verfügung stehen, wurden sie als Datengrundlage für alle drei Einzugsgebiete verwendet (*Karte 3.3*, S. 76). Dennoch birgt diese Datengrundlage einige Schwachstellen: ihre Klasseneinteilung der verschiedenen Landnutzungen sind in vielen Bereichen uneindeutig. Besonders die landwirtschaftlichen Flächen gliedern sich in wenige Unterklassen, so dass keine Aussagen über ihre Nutzungsintensität getroffen werden können. Um Folgefehler zu vermeiden, wurde diese Datengrundlage unverändert übernommen, was die zum Teil recht allgemeine Klasseneinteilung erklärt. Eine Erläuterung der Legende befindet sich in A.2, S. 210.

Als Datengrundlage für die *Böden* im Einzugsgebiet diente die Digitale Bodenübersichtskarte 1:200000 des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Diese enthält Informationen zu vorherrschenden Bodentypen (siehe *Karte 3.4*, S. 77), Bodenarten und verschiedenen hydrologischen Parametern wie hydraulischer Leitfähigkeit, nutzbarer Feldkapazität, Grobporenvolumen oder Verschlammungsneigung.

Einen Überblick über die in den drei Untersuchungsgebieten jeweils verwendeten digitalen räumlichen Daten gibt *Tab. A.1*, S. 209. Szenario-bildung und Modellierung erfolgten für das Leingebiet mit einer einheitlichen Rasterweite aller Informationsschichten von 100×100 m.

3.2.7.2 Meteorologische und hydrologische Daten

Im Bereich des Lein-Einzugsgebietes befinden sich sechs Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes, an denen tägliche Werte abgelesen werden. Zusätzlich hierzu wurde 1978 speziell für das Leingebiet ein kommunaler Messverband mit fünf kontinuierlich aufzeichnenden Regenschreibern eingerichtet, der vom Tiefbauamt in Heilbronn verwaltet wird. Dies geschah als Reaktion auf große Hochwasserereignisse in den Jahren 1968, 1970 und 1978 mit der Absicht, auf diese Weise die Datenbasis für ein Hochwasserschutzkonzept für das gesamte Leintal zu schaffen (siehe *Kap. 3.2.6*). Die Standorte der Regenschreiber wurden nach Empfehlungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft in Karlsruhe ausgewählt. Auch die Abdeckung des Gebietes mit Klimastationen (drei DWD-Stationen) ist überdurchschnittlich gut.

Zur Validierung der hydrologischen Simulationen wurden zwei Pegel der Landesanstalt für Umweltschutz verwendet. Die Daten des Pegels Frankenbach sind nach LUFT (Landesanstalt für Umweltschutz, mündl. Auskunft) gerade im Hochwasserbereich ungenau, da das Bett der Lein am Pegel lediglich $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (RENSCHLER, Gewässerdirektion Besigheim, schriftl. Auskunft) fasst. Der Pegel Schwaigern ist mit einem bordvollen Abfluss von ca. $25 \text{ m}^3/\text{s}$ wesentlich großzügiger ausgelegt, so dass diese Daten als Kontrolle dienen können. Außerdem wurden im Rahmen des obengenannten kommunalen Messverbandes drei weitere Pegel eingerichtet, die ebenfalls zur Validierung der hydrologischen Modellierung herangezogen werden.

3.3 KÖRSCH

3.3.1 Klimatische Verhältnisse

Die Region Stuttgart unterliegt durch die räumliche Nähe zum Leintal klimatisch vergleichbaren Verhältnissen und erfährt einen ähnlichen Einfluss durch Großwetterlagen. Auch diese Region gehört mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10°C zu den *thermisch begünstigten Gebieten*, die sich für den Anbau von anspruchsvollen Sonderkulturen ei-

genen. Die mittlere Durchschnittstemperatur beträgt im Januar $-0,8^\circ\text{C}$, im Juli $17,6^\circ\text{C}$ (DIERCKE WELT-ATLAS, 1991). Die Amplitude beträgt $18,4^\circ\text{C}$ und die durchschnittlich jährliche Frosthäufigkeit von ungefähr 100 Ereignistagen bestätigen den gemäßigten Temperaturverlauf in dieser Gegend. Die durchschnittlichen Niederschlagssumme für die Region Stuttgart liegt bei 675 mm im Jahr, mit einem deutlichen *Sommermaximum* (HENDL, 1995).

3.3.2 Geologie und Böden

Das beherrschende tektonische Element im Raum Stuttgart ist der *Fildergraben*, der sich auf einer Breite von ca. 10 km von Nordwesten nach Südosten erstreckt und leicht nach Südosten hin abfällt. Entwässert wird der Fildergraben größtenteils von der Körsch, deren Einzugsgebiet im Südwesten markant durch das höhergelegene Gebiet des Schönbuchs begrenzt wird, welcher in diesem Bereich den südlichen Rand des Fildergrabens bildet. Der größte Teil des Einzugsgebietes ist von einer mächtigen *Lösslehmdecke* (im Mittel 4 bis 5 m) bedeckt, die im Quartär während der Riss- und Würmkaltzeit, als die Region Stuttgart im Periglazialbereich lag, als äolisches Sediment abgelagert wurde. Entlang des tief eingeschnittenen Flusslaufes der Körsch sowie an den Einzugsgebietsrändern sind verschiedene Schichten des Mesozoikums angeschnitten. Zuunterst sind dies Stubensandstein (mit Mergellagen), Knollenmergel und Rät aus dem *Keuper* (Trias). Diese werden vom *Lias α* (Schwarzer Jura) überdeckt, der als Tonmergel, Sandkalk oder als Sandsteinkörper an die Oberfläche tritt. Am Schönbuchrand sind stellenweise auch die Schichten des *Lias β* bis ϵ aufgeschlossen. Den unmittelbaren Bereich der Talaue nehmen fluviale quartäre Sedimente ein (GEYER & GWINNER, 1991).

Aus der Lösslehmdecke sind in weiten Teilen des Einzugsgebietes tiefgründige *Parabraunerden* hervorgegangen (siehe *Karte 3.4*, S. 77). In Bereichen, in denen tonreicher *Lias α* ansteht, finden sich stellenweise *Pelosole*. Im Mittel- und Unterlauf der Körsch ist die Talsohle von *Auenböden* geprägt. Die

entlang des Flusslaufes und an den Hängen des Schönbuchs freiliegenden Keuperschichten haben vorwiegend *Braunerden* hervorgebracht.

3.3.3 Gewässer und Grundwasser

Die Struktur des Gewässernetzes der Körsch ist stark von der Fallrichtung des Fildergrabens von Nordwesten nach Südosten geprägt. Das Abknicken von Körsch und Sulzbach nach Nordosten im unteren Einzugsgebietsteil zeugt davon, dass die Körsch, die ehemals ins danubische System entwässerte, durch rückschreitende Erosion vom Neckar angezapft wurde.

Da der im Körschgebiet vorherrschende *Lias α* aufgrund seines äußerst geringen nutzbaren Porenvolumens, seiner geringen Matrixleitfähigkeit und seiner geringen Klüftigkeit keinen relevanter Grundwasserleiter darstellt, ist die Bedeutung der Filderfläche für die Neubildung und Gewinnung von Grundwasser gering.

3.3.4 Vegetation und Landnutzung

Das Körschtal wäre wie das Leingebiet bei potenziell natürlichen Verhältnissen von subkontinentalen Eichen-Hainbuchenwäldern bewachsen (KLINK, 1995). Wegen der vorherrschenden Bodenfruchtbarkeit wurde dieses Gebiet jedoch schon früh landwirtschaftlich genutzt und *anthropogen* überprägt.

Die ehemals intensive Ackernutzung wird heute noch durch einen relativ hohen Anteil dieser Flächen widergespiegelt (siehe *Abb. 3.2*, S. 86).

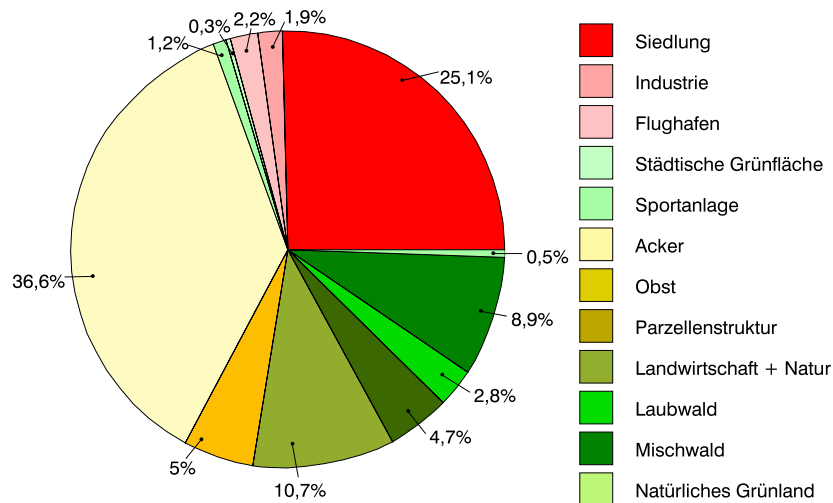


Abb. 3.2 Flächenanteile der Landnutzung im Körseinzugsgebiet (Statistisches Bundesamt, 1997)

Wie auf Landesebene hat auch in dieser Region der *Getreideanbau* das größte Gewicht, gefolgt von Futtermais und Feldfrüchten. Trotz günstiger Anbaubedingungen hat der Strukturwandel der letzten 30 Jahre die Landwirtschaft zurückgedrängt. Der Rückgang der Hauptidealbetriebe deutet auf die Verschlechterung der wirtschaftlichen Situation der Landwirtschaft hin. Lediglich Betriebe mit einer Fläche größer 20 ha haben zugenommen (REGIONALVERBAND MITTLERER NECKAR, 1986). Die Spezialisierung auf *Sonderkulturen* ermöglicht auch Betrieben unter 10 ha die Bewirtschaftung als Nebenerwerb, der in dieser Gegend einen anhaltenden Trend hat. Der Obstanbau stellt wegen der günstigen klimatischen Bedingungen mit 5 % Flächenanteil einen festen Bestandteil an der landwirtschaftlichen Produktion dar. Dieser erstreckt sich auf die stärker geneigten Flächen des Schönbuchrands und der Talhänge der Körsch. Dort befinden sich auch Parzellenstrukturen, die hauptsächlich aus Kleingärten bestehen. Der Anteil von über 10 % ist durch die Stadtnähe bedingt und liegt über dem Landesdurchschnitt (REGIONALVERBAND MITTLERER NECKAR, 1986). Der Waldanteil ist heute auf rund 12 % Flächenanteil geschrumpft und besteht überwiegend aus Mischwald. Diese Bestände sind heute auf die von Nordwesten nach Südosten ziehenden Keuperhöhen beschränkt.

Das Einzugsgebiet der Körsch steht unter dem *Siedlungsdruck* und Einfluss der Stadt Stuttgart. Die räumliche Nähe bindet es als Bestandteil an die

Großstadt, obwohl die Siedlungsstruktur, bestehend aus vielen kleinen Ortslagen, einen dörflichen Charakter vermittelt. Alte Dorfkernstellen stellen bis heute die Zentren der Siedlungseinheiten dar, deren Flächenanteil gemessen an der gesamten überbauten Fläche gering ist. Die Siedlungen haben in den letzten Jahrzehnten ein *gewaltiges Flächenwachstum* zu Lasten der landwirtschaftlichen Nutzfläche erfahren und nehmen heute etwa ein Viertel der Gebietsfläche ein. Die als reine Industriegebiete ausgewiesenen Flächen und der Flughafen haben bis jetzt nur einen geringen Anteil von rund 2 %, der durch die Verflechtungen innerhalb des wirtschaftlich starken Großraums Stuttgart einen zunehmenden Trend erfahren werden.

3.3.5 Bevölkerung und Wirtschaft

Die gefestigte wirtschaftliche Stellung Stuttgarts bedingt eine positive Bevölkerungsbilanz durch *Zuwanderung*. Immer mehr Wohnbevölkerung zieht aus der Innenstadt in die umgebenden Dörfer, wie das Einzugsgebiet der Körsch. Für die Region Stuttgart wird bis zum Jahr 2010 mit einem Bevölkerungswachstum von 8,7 % gerechnet (VERBAND REGION STUTTGART, 1998). Dafür sollen hauptsächlich die bestehenden Stadtbereiche verdichtet werden. Doch aufgrund positiver Wanderungsbilanz, innerem Wachstum und bestehendem Wohnungsdefizit wird der *Siedlungsdruck* auch in Zukunft nicht nachlassen.

Die Landeshauptstadt Stuttgart stellt ein bedeutendes wirtschaftliches und kulturelles Zentrum dar. Die Filder bietet als *ausbau- und entwicklungsfähige Fläche* eine optimale Ergänzung dieses Oberzentrums (VERBAND REGION STUTTGART, 1998). Der Strukturwandel seit Ende des Krieges führte in dieser Region zu einer starken wirtschaftlichen Einbindung in Industrie und in neuerer Zeit in das Dienstleistungsgewerbe, so dass die Bedeutung der Landwirtschaft zurückgedrängt wurde. Das verdeutlicht auch die Positionierung des Flughafens auf fruchtbaren Parabraunerden in Mitten der Filder (*Karte 3.3*, S. 76 und *Karte 3.4*, S. 77). Die wirtschaftliche Entwicklung wird besonders durch die gute Verkehrsanbindung auch in Zukunft wachsen. Die behördlichen Planungen in der Filder unterstützen diese These. Dem Bereich südlich des Flughafens wird im Regionalplan ein hohes Gewerbeflächenpotential zugesprochen (VERBAND REGION STUTTGART, 1998). Als regional bedeutsamer Schwerpunkt für Industrie, Gewerbe und Dienstleistungseinrichtungen wird außerdem die Kernzone Filderstadt, Bern-

hausen, Leinfelden und Echterdingen im Nordwestend des Untersuchungsgebiet ausgewiesen.

3.3.6 Hochwasserereignisse

Die Abflussverhältnisse im Einzugsgebiet der Körsch sind sehr stark anthropogen geprägt. Im Basisabfluss sind am Pegel Denkendorf Tagesgänge der Abgabe von Wasser aus der Kläranlage bei Pliezingen erkennbar. Der Basisabfluss aus dem Einzugsgebiet der Körsch wird außerdem durch die Fremdwasserzufuhr aus der Bodenseewasserversorgung Sipplingen beeinflusst. Hochwasser mit einem erwarteten Wiederkehrintervall von mehr als fünf Jahren sind seit 1980 im Gebiet nicht aufgetreten (siehe *Tab. 3.3*, S. 87). Aus diesem Grund wurden für die hydrologische Modellierung auch zahlreiche Hochwasser mit einer Jährlichkeit von weniger als zwei Jahren hinzugezogen. Insbesondere wurden auch kleinere zyklonale Ereignisse berücksichtigt, die durch ihre große räumliche Ausdehnung auch in den anderen beiden Untersuchungsgebieten zu Hochwassern führten.

Tab. 3.3 Am Pegel Denkendorf/Körsch gemessene Hochwasserscheitel im Zeitraum von 1983 bis 1997, ermittelt aus stündlichen Durchflussmittelwerten

Wiederkehrintervall [a]	Zeitpunkt des Auftretens	Scheitel [m³/s]	Abflussbeiwert
10 - 20 a	–	–	
5 - 10 a	–	–	
2 - 5 a	14.06.1995, 20 Uhr	33,1	0,39
vor 1990	25.05.1983, 5 Uhr	40,1	0,44
	29.04.1986, 23 Uhr	36,0	0,31
	15.06.1987, 13 Uhr	30,8	0,27
	08.07.1987, 16 Uhr	39,0	0,24
< 2 a	17.12.1982, 7 Uhr	21,7	0,47
	20.08.1983, 5 Uhr	25,4	0,11
	06.07.1985, 19 Uhr	26,6	0,13
	12.03.1988, 20 Uhr	27,4	0,58
	15.02.1990, 9 Uhr	22,0	0,26
	22.07.1992, 0 Uhr	25,0	0,14
	21.12.1993, 4 Uhr	19,2	0,33
	13.04.1994, 10 Uhr	26,2	0,39
	22.07.1995, 18 Uhr	26,2	0,15
	08.07.1996, 10 Uhr	26,6	0,21

Die Untersuchungsgebiete

Auffällig ist die im Vergleich zur Lein große Variationsbreite der Abflussbeiwerte. Diese Variationsbreite ist in der Verschiedenartigkeit der an der Körsch aufgetretenen Hochwasser begründet, wo

im Gegensatz zur Lein im betrachteten Zeitraum auch sommerliche Frontenniederschläge zu Hochwassern führten.

Tab. 3.4 Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Denkendorf/Körsch für den Zeitraum von 1941 bis 1997 (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1999)

Überschreitungswahrscheinlichkeit p_a [-] (entsprechendes Wiederkehrintervall T_n [a])	0,5 (2)	0,2 (5)	0,1 (10)	0,05 (20)	0,02 (50)	0,01 (100)
Hochwasserscheiteldurchfluss [m³/s]	29,78	46,79	56,26	72,20	89,64	104,0

Tab. 3.4, S. 88 dient zur Einordnung der in Tab. 3.3, S. 87 angegebenen Scheitelwerte des Abflusses.

3.3.7 Datenlage

3.3.7.1 Räumliche Daten

Die für das Einzugsgebiet der Körsch zur Verfügung stehende digitale Gebietsinformation beruht auf denselben Datengrundlagen wie die der Lein (siehe Kap. 3.2.7.1, Übersichtskarten in Kap. 3.1 und Tab. A.1, S. 209 im Anhang).

Für die Szenarien und die hydrologische Modellierung wurde, ebenfalls wie für das Gebiet der Lein, eine einheitliche horizontale Auflösung der Gebietsinformation von 100×100 m gewählt.

3.3.7.2 Meteorologische und hydrologische Daten

Tägliche Niederschlagshöhen werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) im Bereich des Körsch-Einzugsgebietes zur Zeit an fünf Stationen gemes-

sen. Vier Stationen der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) mit zeitlich höher aufgelösten Daten wurden in der Zeit zwischen 1986 und 1992 aufgenommen, so dass zur Simulation von Hochwassereignissen der 90er Jahre hochaufgelöste Daten nur von der Versuchsstation der Universität Stuttgart-Vaihingen und ab Ende 1996 von der Station Wolfslungen des 1995 eingerichteten Verbundmessnetzes von LfU und DWD zur Verfügung stehen. DWD-Daten zu den Klimavariablen Temperatur, Relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit waren für zwei Klimastationen erhältlich. Zusätzlich wurden Daten der Globalstrahlung einer dritten Klimastation im Raum Stuttgart genutzt. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Niederschlags- und Klimastationen findet sich im Anhang in Tab. A.2, S. 213. Deren räumliche Verteilung ist in Karte 3.5, S. 78 dargestellt.

Der Pegel Denkendorf/Körsch, der den Gebietsauslass darstellt, wird, wie die meisten Pegelstationen in Baden-Württemberg, von der Landesanstalt für Umweltschutz in Karlsruhe betreut.

3.4 LENNE

3.4.1 Klimatische Verhältnisse

Das Einzugsgebiet der Lenne gehört dem *nordwest-deutschen Klimabereich* an. Es ist überwiegend maritim geprägt mit allgemein kühlen Sommern und milden, niederschlagsreichen Wintern. Trockenere sommerliches Wetter oder Kälteperioden im Winter werden durch kontinentalen Einfluss bedingt.

Die klimatischen Verhältnisse im Bereich der deutschen Mittelgebirgsschwelle werden stark durch das ausgeprägte Relief beeinflusst. Dadurch bilden sich nicht nur *höhenabhängige Unterschiede* in der Temperatur, sondern auch *Luv- und Leeeffekte* aus. Auf dem Kahlen Asten, der höchsten Erhebung des Lenne-Einzugsgebietes, werden in 841 m im Januar im Durchschnitt $-3,0^\circ\text{C}$ und im Juli nur $12,6^\circ\text{C}$ erreicht

(HENDL, 1995). Die jahreszeitlichen Unterschiede der vertikalen Lufttemperaturabnahme bewirken eine geringe mittlere Jahresschwankung von 15,6 K. Insgesamt sind in diesem Bereich nur niedrige Jahresdurchschnittstemperaturen von 5–7 °C zu erwarten.

Auf dem Kahlen Asten fallen im Durchschnitt 1471 mm Niederschlag pro Jahr (HENDL, 1995). Das räumlich nahe, aber nur auf 420 m gelegene Kirchhundem erhält jährlich dagegen nur 1175 mm. Hier kommt die *Höhenabhängigkeit der Niederschläge* zum Ausdruck. Insgesamt sind die Niederschlagssummen des Lennetals im Vergleich mit dem restlichen Nordrhein-Westfalen sehr hoch (vgl. REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). Durchschnittlich erhält das Hochsauerland an 34 bis 39 Tagen im Jahr mehr als 10 mm Niederschlag. Durch ein niedriges Kondensationsniveau kommt es in den höheren Lagen im Winter häufig zu einer *geschlossenen Schneedecke* und zu häufiger Nebelbildung. Der niederschlagsärmste Monat ist der März, da in diesem Monat statistisch die Ostwetterlagen vorherrschen, die im allgemeinen trocken sind. Am niederschlagsreichsten sind die Monate Juli und August, in denen mehr als 10 % des Jahresniederschlags fallen. Ein relativ hoher Anteil davon wird durch *konvektive Prozesse* verursacht (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989).

3.4.2 Geologie und Böden

Das *Rheinische Schiefergebirge*, in dem das Einzugsgebiet der Lenne liegt, erscheint als ein 600 bis 800 m herausgehobenes Rumpfgewölbe, das randlich tief zerschluchtet ist. Dessen höchste Erhebung, der Kahle Asten (841 m ü. NN), ist zugleich der höchste Punkt des Lennegebietes. Die heute vorherrschenden devonischen *Tonschiefer* wurden als feinkörnige Sedimente in größeren Meerestiefen, die weniger weit verbreiteten Quarzite als gröbere Substrate in Flachmeeren des *Unterdevons* abgelagert. Aus dem *Mitteldevon* stammen ebenfalls vorwiegend geschieferte Tonsteine sowie Grauwacken, Kalksteine, und vulkanische Gesteine wie Quarzkeratophyte und Tuffe, welche zum Teil mit Erzlagerstätten verbunden sind. Im unteren Teil des Einzugsgebietes zwischen Grevenbrück und Bamenohl finden sich außerdem z.T. verkarstete Massenkalk aus dem *Oberdevon* sowie Ton- und Sandsteine aus dem

Unterkarbon. *Pleistozäne* Terrassenschotter treten nur sehr vereinzelt an den Rändern des Lennetals in Erscheinung. Vielerorts sind jedoch die devonischen Schiefer von *Hangschutt* überdeckt, der v.a. während des *Pleistozäns* als periglaziales Verwitterungsprodukt entstand und umgelagert wurde. Nennenswerte *pleistozäne* Talfüllungen sind auf den Lauf der Lenne beschränkt. Sie bestehen vorwiegend aus grobem Sand und Kies, in die linsenförmig feiner Sand, Schluff und Ton eingelagert sind. Die Mächtigkeit dieser Lockergesteine beträgt zwischen 4 und 10 m. Die Täler der Nebenbäche sind meist von verlehmttem Hangschutt mit einer Mächtigkeit von 2–5 m ausgefüllt, welche von einer 0,5–4 m mächtigen Auenlehmschicht aus dem *Holozän* überdeckt ist (CLAUSEN et al., 1985).

Auf den Verwitterungsprodukten der devonischen Schiefer sind basenarme, sandige bis lehmige Gebirgsböden von geringer Mächtigkeit entstanden. In exponierten Lagen sind dies *Ranker*, ansonsten vorwiegend *Braunerden*, die aufgrund der Basenarmut des Ausgangsmaterials z.T. als *Podsol-Braunerden* bzw. vereinzelt als *Podsole* ausgeprägt sind. In den Talböden haben sich auf Auenlehm meist vergleyte *Braune Auenböden* oder *Auengleye* gebildet. An den Talanfängen und am Hangfuß der Haupttäler kommen Kolluvien vor, die aus umgelagerten Hanglehmen hervorgegangen sind. Die Talsohlen der Nebenbäche werden aufgrund des ganzjährig hohen Grundwasserspiegels (<0,8 m unter Flur) vorwiegend von *Gleyen* und Nassgleyen bis hin zu Anmoor- und Moorgleyen eingenommen. In abflussgehemmten Hohlformen des Geländes haben sich vereinzelt *Nieder- und Übergangsmoore* gebildet. *Parabraunerden* und *Rendzinen* sind im Bereich der teilweise mit Löss vermengten Massenkalken bzw. deren Verwitterungsprodukte im unteren Einzugsgebietsteil entstanden.

3.4.3 Gewässer und Grundwasser

Die Quelfassung der Lenne befindet sich direkt unterhalb des Gipfels des Kahlen Asten. Aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Tonschiefers hat sich im Lennegebiet ein dichtes Gewässernetz ausgebildet. Der wichtigste Nebenfluss der Lenne bis Bamenohl ist die Hundem, die bei Altenhundem von Süden her in die Lenne mündet. In

diesem Bereich liegt auch der Siedlungsschwerpunkt des Einzugsgebietes.

Grundwasserleiter von überörtlicher Bedeutung finden sich im Einzugsgebiet der Lenne bis Bamenohl nicht. Den ergiebigsten Grundwasserleiter bildet der im Oberdevon abgelagerte und verkarstete Massenkalk in der Attendorner Mulde, die nur im Bereich um Bamenohl in das Einzugsgebiet hineinreicht. Er wird im wesentlichen von in Karstspalten oder Erdfällen versinkenden Bächen gespeist. Grundwasserführend sind außerdem die pleistozänen Talfüllungen entlang der Lenne, deren Überdeckung mit Auenlehm eine gute Filterwirkung auf versickerndes Wasser ausübt. Die Porendurchlässigkeit der dort 4–10 m mächtigen Lockergesteine wird von CLAUSEN et al. (1985) als gut bis sehr gut eingestuft.

Die devonischen Tonschiefer, die im Gebiet dominieren, besitzen nahezu kein nutzbares Porenvolumen. Deren Trennfugendurchlässigkeit ist in der Regel ebenfalls mäßig bis sehr gering. Erhöhte

Trennfugendurchlässigkeiten sind an stärker geklüftete tektonischen Störungszonen gebunden, wie sie südlich von Kirchhundem in Verbindung mit Quarzkeratophyren und Tuffen als Zeugen der tektonischen Aktivität vorkommen.

3.4.4 Vegetation und Landnutzung

Das Untersuchungsgebiet ist eine typische Mittelgebirgsregion, die überwiegend bewaldet ist (vgl. Abb. 3.3, S. 90). Die ursprünglichen artenarmen Buchwaldgesellschaften wurden nach *Rodungen im 19. Jahrhundert* durch Fichten ersetzt (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). Darum überwiegt der Nadelwald heute mit einem Flächenanteil von über 40 % des Einzugsgebiets. Rund 25 % sind mit Mischwald und 8,3 % mit Laubwald bewachsen. Der Wald wird dabei zum Teil intensiv bewirtschaftet. Kleinere Schläge in der Nähe von Kirchhundem werden für die Aufzucht von Christbäumen genutzt (Exkursion Oktober 1998).

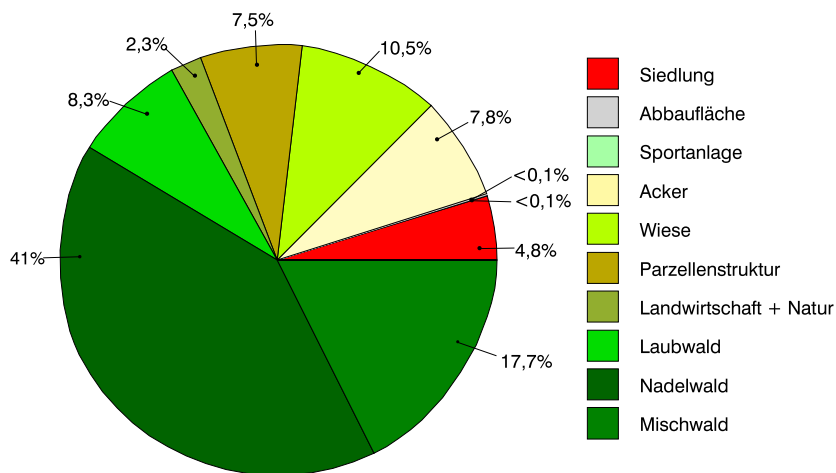


Abb. 3.3 Flächenanteile der Landnutzung des Lenneinzugsgebiets (STATISTISCHES BUNDESAMT, 1997)

Durch das raue Klima hat die Landwirtschaft in dieser Region eine geringe Bedeutung (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). Der Ackerbau ist auf die Feldfrüchte Kartoffeln und Hafer in den tieferen Tallagen und auf flacheren Hänge beschränkt. Ein hoher Grünlandanteil wird für die Milch- und Viehwirtschaft mit Wiesen und Weidennutzung genutzt. Diese befinden sich hauptsächlich in den Auen und bedecken rund 10 % des Untersuchungsgebiets. Sie

übernehmen gleichzeitig die landschaftspflegerische Aufgabe der Offenhaltung der Flächen. Die Topographie drängt die Siedlungen entlang der Täler als Weiler und Einzelhofstreusiedlung ohne erkennbaren Ortskern. Der Anteil an neu errichteten Ein- bis Zweifamilienhäusern lag im Zeitraum von 1980 bis 1986 in Finnentrop und Kirchhundem über 60 % (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). Eine

sinnvolle Inanspruchnahme der Fläche soll eine Erweiterung von Streusiedlungen vermeiden.

3.4.5 Bevölkerung und Wirtschaft

Das Gebiet der oberen Lenne hat nur eine geringe Bevölkerungsdichte. Durch Abwanderung leidet das Gebiet trotz hoher Geburtenraten unter einer permanent leicht *negativen Wanderungsbilanz*, besonders von der Bevölkerung im arbeitsfähigen Alter. Dadurch entsteht eine alterstrukturelle Verschiebung zu den über Sechzig jährigen. Trotz rückläufiger Bevölkerungsentwicklung ist weiterhin mit zusätzlichem Flächenbedarf zu rechnen, der sich aus niedrigeren Belegungsdichten und steigendem Flächenbedarf für die Wirtschaft ergibt (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989).

Die Wirtschaft im Untersuchungsgebiet ist durch die naturräumliche Gegebenheiten nicht besonders gut entwickelt. 4 % der Beschäftigten dieser Region arbeiten in der Land- und Forstwirtschaft, wobei über die Hälfte der existierenden Betriebe nur als Nebenerwerb bewirtschaftet werden (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). 87 % der Wald-

fläche ist in Privatbesitz, mit einer Durchschnittsflächengröße von unter 10 ha.

Auf dem Gemeindegebiet von Lennestadt wird Dolomit, Schwefelkies und Grauwackensandstein oberirdisch abgebaut und in mittelständischen Betrieben weiterverarbeitet. Die Zahl der dort Beschäftigten sinkt durch zunehmende Automatisierung stetig. Insgesamt verliert im Zuge des allgemeinen Strukturwandels das produzierende Gewerbe immer mehr an Bedeutung (REGIERUNGSPRÄSIDENT ARNSBERG, 1989). Stattdessen wächst der Anteil an Dienstleistungen, der mit Beschäftigungsanteilen von weniger als 50 % insgesamt nicht besonders stark entwickelt ist. Der Fremdenverkehr hat dabei eine besonders wichtige Rolle.

3.4.6 Hochwasserereignisse

Größere Hochwasser sind im Lennegebiet im Zeitraum von 1981 bis 1997 ausschließlich im Winterhalbjahr als Folge langanhaltender advektiver Niederschläge und hoher Vorfeuchte aufgetreten (siehe Tab. 3.5, S. 91).

Tab. 3.5 Am Pegel Bamenohl/Lenne gemessene Hochwasserscheitel im Zeitraum von 1988 bis 1997, ermittelt aus stündlichen Durchflussmittelwerten, sowie im Zeitraum von 1981 bis 1987, ermittelt als Momentanwert

Wiederkehrintervall [a]	Zeitpunkt des Auftretens	Scheitel [m³/s]	Abflussbeiwert
10 - 20 a	23.01.1995, 8 Uhr	193,000	0,64
	vor 1988	Januar 1986	193,000
		Dezember 1986	183,000
		März 1981	179,000
5 - 10 a	31.12.1993, 12 Uhr	159,000	0,55
	vor 1988	Februar 1984	160,000
2 - 5 a	22.12.1991, 24 Uhr	126,000	0,62
	12.01.1993, 13 Uhr	117,000	0,56
	30.12.1990, 13 Uhr	103,000	0,63
	20.12.1988, 6 Uhr	98,200	0,63
	01.03.1990, 9 Uhr	96,500	0,43
	19.03.1994, 22 Uhr	91,200	0,48
	27.03.1988, 21 Uhr	90,900	0,87
	vor 1988	Januar 1982	105,000

Diese Hochwasserereignisse wurden teilweise von Schneeschmelze begleitet, was auch den extrem hohen Abflussbeiwert von 0,87 des Hochwassers vom März 1988 erklärt. Die Abflussbeiwerte der Ereignisse im Lennegebiet sind jedoch mit meist mehr als 50 % des gefallenen Niederschlags insgesamt sehr hoch. Dies ist zum einen eine Folge der vorherrschenden Ereignischarakteristika mit großen Niederschlagsmengen und hoher Vorfeuchte innerhalb des Winterhalbjahres. Ein Hauptgrund hierfür ist je-

doch auch die geomorphologische Struktur des Gebietes. Das Lennegebiet wird dominiert von geringdurchlässigen Tongesteinen, die von meist deutlich durchlässigerem (peri-)glazialen Hangschutt überdeckt sind. Diese Kombination aus gut durchlässigem Hangschutt und geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert das Gebiet für *subsurface storm-flow* (rasche unterirdische Abflussreaktion in der Folge eines Starkregenereignisses).

Tab. 3.6 Durchflussmaxima für Hochwasser unterschiedlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit am Pegel Bamenohl/Lenne (Grundlage: Jährliche Serie von 1973–1996)

Überschreitungswahrscheinlichkeit p_o [-] (entsprechendes Wiederkehrintervall T_n [a])	0,5 (2)	0,2 (5)	0,1 (10)	0,05 (20)	0,02 (50)	0,01 (100)
Hochwasserscheiteldurchfluss [m^3/s]	105	147	175	203	238	265
Unsicherheit [m^3/s]	± 23	± 36	± 47	± 57	± 71	± 82
Unsicherheit [%]	± 22	± 24	± 27	± 28	± 30	± 31

3.4.7 Datenlage

3.4.7.2 Meteorologische und hydrologische Daten

3.4.7.1 Räumliche Daten

Die *Topographie* des Einzugsgebietes wurde dem Digitalen Höhenmodell (DHM) des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen entnommen, welches wie das DHM von Baden-Württemberg in einer Rasterweite von 50×50 m vorliegt (siehe *Karte 3.2*, S. 75 und *Tab. A.1*, S. 209 im Anhang).

Ebenso wie für Körsch und Lein konnten als Datengrundlage für die *Landnutzung* im Lennegebiet die Daten zur Bodenbedeckung des Statistischen Bundesamtes verwendet werden (siehe *Karte 3.3*, S. 76).

Als räumliche Datengrundlage für die *Böden* im Bereich des Lenne-Einzugsgebietes wurde auf die Digitale Bodenkarte des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50000 zurückgegriffen. Diese wird in Form von Polygondaten mit angeschlossener Datentabelle vorgehalten. Eine Darstellung der dominanten Bodentypen im Gebiet enthält *Karte 3.4*, S. 77.

Für Szenarienbildung und Modellierung wurden diese Daten in ein einheitliches Raster mit einer Maschenweite von 250×250 m überführt.

Der Deutsche Wetterdienst unterhält im Bereich des Lenne-Einzugsgebietes acht Niederschlagsstationen, deren tägliche Messwerte für die Hochwassersimulationen genutzt werden konnten. Im Gebiet werden zwei Klimastationen betrieben, eine davon am höchsten Punkt des Einzugsgebietes, dem Kahlen Asten (841 m ü. NN), welche ebenfalls Niederschlag aufzeichnen. Neben deren Klimadaten wurden zusätzlich Daten der Klimastation Lüdenscheid hinzugezogen, welche sich ca. 25 km westlich des Abflusspegels Bamenohl (Gebietsauslass) befindet. Tägliche Niederschlagsdaten wurden uns außerdem von vier Stationen des Ruhrverbandes in Essen zur Verfügung gestellt, teilweise auch als zeitlich hochaufgelöste Regenschreiberdaten. Aufgabe des Ruhrverbandes ist die Talsperrenbewirtschaftung für das gesamte Einzugsgebiet der Ruhr.

Der Abflusspegel, der das von Talsperren unbeeinflusste Teilgebiet der Lenne bis Bamenohl begrenzt, wurde ebenfalls vom Ruhrverband eingerichtet. Die Abflussdaten der zusätzlich für die Simulationen verwendeten Pegel Kickenbach/Lenne und Herrntrop/Hundem werden vom Staatlichen Umweltamt in Siegen verwaltet.

Landnutzungsmodell

4.1 MODELLKONZEPT

Zu Projektbeginn existierte kein zugängliches und zufriedenstellendes Modell für die Generierung von Landnutzungsszenarien (vgl. Kap. 2.4.3). Deshalb wird diese Aufgabe für die vorliegende Untersuchung durch die Erstellung eines eigenen Verfahrens bearbeitet. Ziel bei der Erstellung von Landnutzungsszenarien ist dabei nicht nur die Berücksichtigung eines Zielwerts in Form von veränderten prozentualen Flächennutzungsverhältnissen, sondern auch die Einbeziehung der Lage und die Topologie (Beziehung der Flächen) zueinander. Die prozentuale Bestimmung der Landnutzungsänderungen (Szenarioziel) ist in der entwickelten Methode nicht enthalten und wird aus externen Prognosen entnommen. Kernstück der Szenariotechnik stellt vielmehr die Disaggregation der Landnutzungsänderungen auf die Fläche dar. Eine lagegetreue Spezifizierung der Flächen in Bezug zum Gewässersystem und zu ihren benachbarten Nutzungsflächen ist zur Beurteilung von hydrologischen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen von besonderer Wichtigkeit.

Das für das Projekt entwickelte, rasterbasierte Verfahren zur Szenarioerstellung LUCK (Land Use Change scenario Kit) berücksichtigt sowohl Standortfaktoren als auch die Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Flächen als Kriterien für eine Nutzungskonversion. Dabei werden auch typische Nutzungsmuster und die Wirkung von Entwicklungsachsen in der Landschaft (z.B. Straßen, Bahnlinien) in Betracht gezogen. Daraus resultiert ein *Veränderungspotential* für jede Rasterzelle, von denen manche über einen dynamischen, andere über einen eher statischen Charakter verfügen. Das *Veränderungs-*

potential einer jeden Zelle ist die Basis für die darauf folgende iterativ angelegte Landnutzungsänderungsmethode.

Die Ergebnisse dienen als Inputdaten für die hydrologische Modellierung und werden deshalb mit der gleichen räumlichen Auflösung von 100×100 m erstellt.

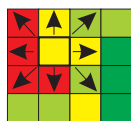
4.1.1 Bewertung nach Standortfaktoren

Ziel eines ökologischen Eignungsbewertungsverfahrens ist die Bestimmung des auf natürlichen Faktoren beruhenden Wertes, den ein Raum im Hinblick auf bestimmte Nutzungsansprüche inne hat (MARKS, 1979). Die Bewertung von Standortfaktoren ist ein gebräuchliches Mittel, um die Landschaft quantitativ zu erfassen (LESER 1988; MARKS et. al, 1992; BASTIAN, 1994). Ein Beispiel hierfür ist die Reichsbodenschätzung, die im Jahr 1934 schlagweise für Acker- und Grünlandflächen durchgeführt wurde. Grundlage solcher Standortnutzungsbewertungen stellen einerseits messbare Daten und andererseits beschreibende Verfahren dar. Die als semi-quantitativ bezeichneten Ergebnisse erlauben als Expertenwissen Aussagen über das Leistungsvermögen einer Landschaft. Aus der relativen Eignung der Landschaft für eine bestehende Landnutzung können Rückschlüsse über die Konversionswahrscheinlichkeit in eine andere gezogen werden.

Die Standortfaktoren für die Beurteilung werden aus den vorhandenen räumlichen Daten wie Boden, Topographie und der vorhandenen Landnut-

zung abgeleitet. Die Nutzungseignung unterliegt einerseits dem Einfluss des Naturraums. Andererseits ist entlang von Entwicklungsachsen und in der Nähe von Siedlungen der anthropogene Einfluss besonders stark. Dort ist eine gute infrastrukturelle Versorgung gewährleistet, die eine Einflussnahme begünstigt. Je nach Landnutzungskategorie werden für die ordinal-skalierte Eignungsbewertung unterschiedliche Standortfaktoren berücksichtigt.

4.1.2 Nachbarschaftsbeziehungen



■ Siedlung
■ Acker
■ Wiese
■ Wald

Nachbarschaftsbeziehungen spielen bei der Entwicklung eines Landnutzungsmusters eine entscheidende

Rolle. Viele Nutzungen stellen einen bestimmten Anspruch an ein Mindestareal. Ihre Erweiterung

soll nach Möglichkeit an bestehende Nutzungen angeschlossen werden, um eine Verinselung zu verhindern. Eine Erweiterung bestehender Strukturen für Landwirtschafts- und Siedlungsbereiche wird außerdem durch die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur rentabler. Auch naturnahe Flächen benötigen eine gewisse Flächengröße, um ein ökologisches Gleichgewicht aufbauen zu können. Die Nachbarschaftsanalyse wird für jede Zelle einzeln durchgeführt. Dabei werden die aus dem Raster resultierenden Nachbarn hinsichtlich ihrer Landnutzung überprüft und deren Bedeutung für die betrachtete Zelle bewertet. Die Anzahl der betrachteten Nachbarn kann vom Nutzer frei gewählt werden, so dass hier auch weitläufigere Nachbarschaften berücksichtigt werden können.

Abb. 4.1, S. 94 gibt einen Überblick über die Grundüberlegungen des Modells.

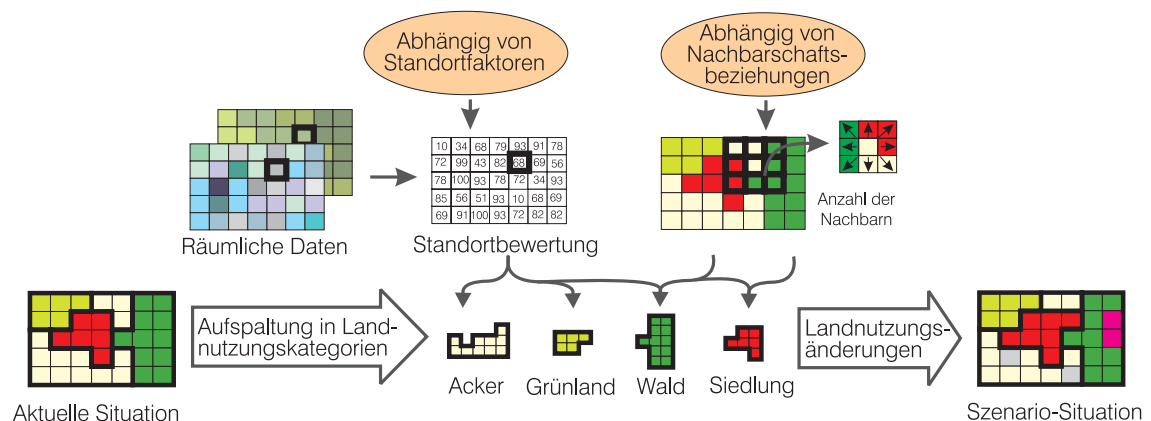


Abb. 4.1 Übersicht über die Modellkonzeption

4.2 DIE MODULE

4.2.1 Das Stadterweiterungsmodul

Wie schon in Kap. 2.4.1.1 beschrieben, hält der Trend der Ausweitung der bebauten Flächen, nicht nur bedingt durch den stetig wachsenden Wohnraumbedarf, sondern auch angetrieben von der Flächennachfrage der Wirtschaft, kontinuierlich an. Deshalb ist das Modul für eine Siedlungs- und Industrieausbreitung konzipiert, deren Ausbreitungsgröße frei gewählt werden kann.

Die Stadterweiterung orientiert sich an den Überlegungen der bisherigen Entwicklung. Die meisten Siedlungen haben in Deutschland eine mehr oder weniger konzentrische Struktur mit einem baulich verdichteten alten Kern und neueren Teilen, die sich um diesen Kern herum ansiedeln. Die Grundstruktur wird dabei von der historischen Anlage vorgegeben. Ursache dafür ist der Wiederaufbau nach dem Ende des 2. Weltkriegs, der zunächst den historisch vorgegebenen Siedlungsgrundrissen folgte. Im Laufe

der Entwicklung ist der Flächenbedarf gestiegen und die Städte haben sich mehr oder weniger ringförmig erweitert, um die Distanz zum Altstadtkern als Zentrum so gering wie möglich zu halten. Siedlungen wachsen allerdings nicht immer gleichmäßig in die umgebende Landschaft hinein. Viele Faktoren beeinflussen im Einzelfall die Entscheidung, ob eine Fläche bebaut wird oder nicht. Steile Hanglagen, tief eingekerbte Bachtäler und die traditionell besonders geschätzten Wälder sind Beispiele für Landschaftsstrukturen, die häufig von Bebauungen ausgenommen werden (KLEYER, 1996). Abweichungen ergeben sich entweder durch infrastrukturelle Entwicklungsachsen des Verkehrsnetzes, entlang derer sich die Siedlungen als Entwicklungsstimulanz ausdehnen. Andererseits werden bei Platzbedarf auch die steileren Lagen infrastrukturell erschlossen und bebaut. Die Ausbreitung der Bebauung bis an benachbarte Siedlungen führt zu einem Zusammenwachsen der Flächen, die sich von da an polyzentrisch ausbreiten.

Auf der Grundlage dieser Überlegungen basiert die Szenariotechnik auf den in Kap. 4.1 beschriebenen beiden Grundprinzipien:

Die *Eignungsbewertung* für die Siedlungsausbreitung erfolgt anhand einer Analyse der räumlichen Daten, die für Topographie, Böden und Landnutzung zur Verfügung stehen. Der Anspruch von Bebauung an den Naturraum ist nicht sehr hoch. Deshalb bietet es sich an, limitierende Faktoren zu beachten, welche die Erweiterung einer Stadt ungünstig erscheinen lassen. Die *Topographie* kann bei einer Hangneigung von mehr als 12% einen limitierenden Faktor darstellen. Solche Flächen sind infrastrukturell schwieriger zu erschließen und können von Abrutschungen bedroht sein. Dennoch werden diese Hänge bebaut, wenn es keine Ausweichmöglichkeit gibt. Die *aktuelle Landnutzung* hat entscheidenden Einfluss auf das Veränderungspotential einer Rasterzelle, denn manche haben einen statischen Charakter. Für die Umwandlung in Siedlung werden vorrangig Ackerflächen und Wiesen genutzt, weil deren Rentabilität als Bauland höher ist. Waldflächen werden nur dann umgewandelt, wenn keine andere Fläche zur Verfügung steht. Obst- und Weinanbau gelten häufig unter landschaftspflegerischen Aspekten als wertvoll und werden deshalb erhalten. Innerstädtische Grünflächen und Sportanla-

gen übernehmen wichtige soziale und ökologische Funktionen und dürfen deshalb nicht überbaut werden. Naturschutzareale entfallen ebenfalls. Außer der aktuellen Landnutzungssituation spielen in Deutschland *Entwicklungsachsen* eine große Rolle, weil ihnen in der Planung große Bedeutung beigemessen wird. Sie ergeben sich aus dem Verkehrsnetz, das in ländlichen Gebieten häufig dem Flusstal folgt. Da die CORINE-Daten keine linienhaften Elemente beinhalten, wurde für die Szenarioerstellung beispielsweise für ländliche Gebiete ersatzweise auf den Verlauf der Flusstäler zurückgegriffen, der sich aus dem digitalen Höhenmodell ableiten lässt. Andernfalls muss diese Information aus topographischen Karten ergänzt werden. Diese Annahme entspricht der Aussage von KLEYER (1996), dass breite Täler zunächst in den Auen bebaut werden, bevor die Hänge besiedelt werden. Für stärker besiedelte Gebiete müssen die Hauptverkehrswege ergänzt werden. Die einzelnen Eigenschaften werden anschließend in einer Bewertungskarte zusammengeführt.

Die *Nachbarschaftsanalyse* soll gewährleisten, dass nur dort die Siedlungsausbreitung fortschreitet, wo schon Flächen für Siedlungszwecke genutzt werden. Deshalb werden die umliegenden Nachbarn jeder Zelle hinsichtlich ihrer Landnutzung überprüft. Die Anzahl der benachbarten Zellen, die schon als Siedlung genutzt werden, ist das Kriterium für das Veränderungspotential der jeweiligen Zelle. Diese Analyse erfolgt Zelle für Zelle und arbeitet sich als bewegliches Fenster (*flying window approach*) durch das gesamte Untersuchungsgebiet. Die Größe dieses Fensters ist frei wählbar, wurde aber für diese Untersuchung auf die acht benachbarten Felder einer jeden Zelle festgelegt. Als Ergebnis entsteht eine Karte, welche die Anzahl der benachbarten Raster für jede Zelle beinhaltet.

Wenn beide Analysen abgeschlossen sind, folgt die Synthese der Teilergebnisse. Abb. 4.2, S. 96 stellt diese Prozedur in einer graphischen Übersicht dar. Zunächst werden nur solche Zellen von ihrer ursprünglichen Landnutzung in Siedlung umgewandelt, die über die höchste Eignung und die maximale Anzahl von benachbarten Siedlungszellen verfügen. Finden sich keine untersuchten Zellen im Untersuchungsgebiet, die diese Kriterien erfüllen, wird die Eignungsqualifikation schrittweise bis zu einem Schwellenwert herab gesetzt, der die Flächen für

eine Bebauung als ungeeignet bewertet. Wird dieser erreicht, ohne dass passende Zellen gefunden wurden, maximiert sich der Anspruch auf Eignungsqualifikation und das Kriterium der Anzahl der notwen-

digen Nachbarn wird verringert. In dieser Konstellation wird nun die schrittweise Suche nach möglichst hoher Eignung erneut durchgeführt.

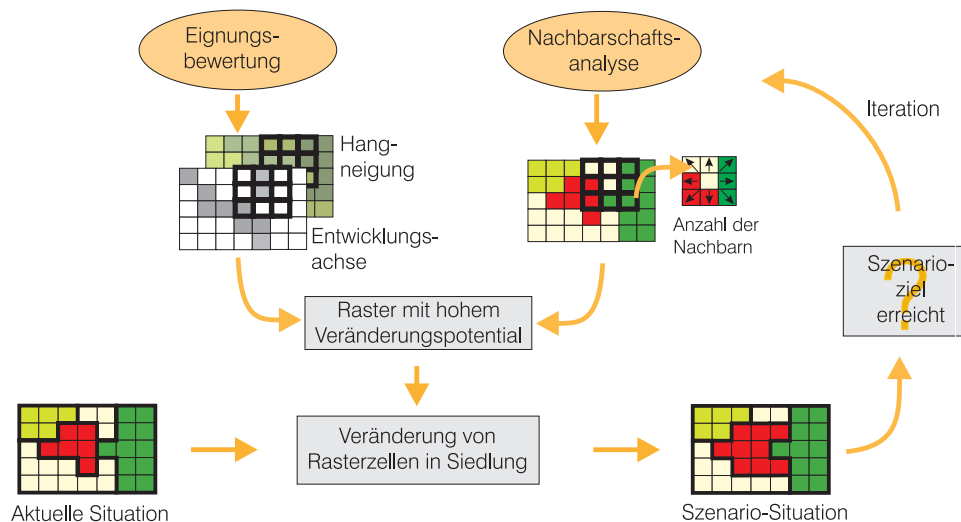


Abb. 4.2 Vorgehensweise für ein Verstärkungsszenario

Zellen, die das Umwandlungskriterium erfüllen, ändern ihre Landnutzung in Siedlung. Nach jeder Landnutzungsveränderung muss zunächst überprüft werden, ob das gewünschte Szenarioziel bereits erfüllt wurde. Liegt die Anzahl der veränderten Zellen darunter, schließt sich eine erneute Nachbarschaftsanalyse mit der veränderten Landnutzung an, um die neu geschaffenen Verhältnisse zu berücksichtigen. Anschließend werden beide Kriterien für Eignung und Nachbarschaft wieder auf maximale Ansprüche heraufgesetzt und das Verfahren beginnt von vorn. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis das Szenarioziel erreicht ist.

Diese Vorgehensweise wird für Siedlungen und Industrieflächen durch getrennte Szenarioziele angesteuert, weil diese sich nicht proportional zueinander verhalten. Die Synthese der Teilanalysen von relativer Eignung und Nachbarschaft legt ein stärkeres Gewicht auf die Nachbarschaft. Durch ihren iterativen Charakter wird ein dynamischer Wachstumsprozess simuliert.

4.2.2 Das Ackermodule

Stilllegung landwirtschaftlich genutzter Flächen

Die Landnutzungskategorie Acker unterscheidet sich in Entwicklung und Standortansprüchen grundsätzlich von der Siedlungsnutzung. Ackerflächen unterliegen einer sehr hohen Nutzungsdynamik, die von *Nachbarschaftsbeziehungen* weitestgehend unabhängig ist. Lediglich die Nähe zu anderen expandierenden Landnutzungen wie Siedlung oder Entwicklungsachsen üben Einfluss auf die Kontinuität der Bewirtschaftung aus. Um Redundanzen zum Verstärkungsmodul zu vermeiden, wird nur die Nähe zu Entwicklungsachsen berücksichtigt.

Kernstück dieses Szenariomoduls stellt die interne *Eignungsbewertung* dar, die unabhängig von den topologischen Beziehungen das agronomische Potential einer Landschaft beurteilt. Die Funktionsleistung der Landschaft wird dabei als das Vermögen verstanden, nutzbare organische Substanz zu erzeugen und die Bedingungen dafür zu regenerieren (STEINHARDT, 2000). Die Bewertungskriterien sind an die vorhandene Datengrundlage angepasst. Dabei werden aus räumlichen Informationen über Bö-

den und Topographie eines Gebiets ertragsrelevante Eigenschaften abgeleitet und hinsichtlich ihres Einflusses beurteilt. Die Bewertung erfolgt über eine Klassifizierung von Eigenschaften in fünf Güteniveaus. Ihre Hierarchie orientiert sich an Literaturangaben aus LESER & KLINK (1988), MARKS et al. (1992) und AG BODEN (1994). Abb. 4.3, S. 97 gibt eine Übersicht über den Ablauf.

Die Bewertung der Bodeneigenschaften setzt sich aus dem Wasserhaltevermögen, einem Fruchtbarkeitswert, ihrer Bearbeitbarkeit und der Bewertung der Topographie zusammen. Als Kriterien für den Wasserwert gehen die nutzbare Feldkapazität und der ökologische Feuchtegrad (angelehnt an AG BODEN, 1994) ein. Der Sorptionsfähigkeit von Nährstoffen ist abhängig von der Textur und bestimmt die relative Fruchtbarkeit des Bodens. Die Textur steuert außerdem zusammen mit der Gründigkeit

des Bodens die Bewirtschaftungseignung im Sinne ihrer mechanischen Bearbeitbarkeit. Aus dem Höhenmodell werden Hangneigung und bei reliefierter Topographie auch die Exposition abgeleitet. Diese beiden Größen ergeben als Produkt einen Topographiewert.

Diese vier Bewertungsmaße werden für jede einzelne Rasterzelle miteinander multipliziert. Das Ergebnis wird auf Werte zwischen null und hundert normiert, so dass die schlechtesten Zellen den Wert null und die besten den Wert hundert erhalten. Die Eignungsbewertung mündet in eine Karte, die für jede Zelle eine relative Eignung für die ackerbauliche Nutzung beinhaltet. Diese *Bewertungsgrundlage* stellt die Basis für die Suche nach potentiellen Stilllegungsflächen dar. Das Szenarioziel wird als Prozentangabe festgelegt und durch eine iterative Vorgehensweise sukzessiv erfüllt.

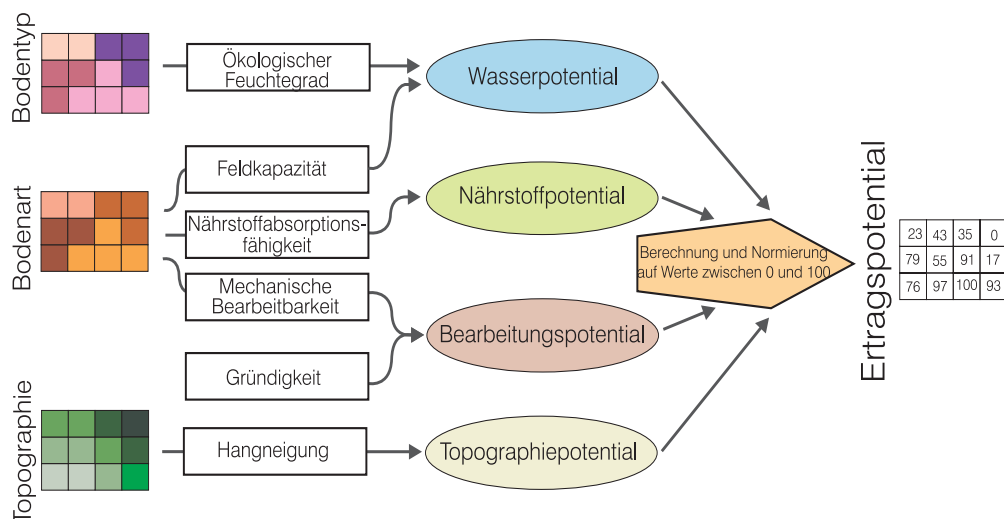


Abb. 4.3 Schema der Ertragspotentialberechnung

Zunächst werden solche Zellen von Ackerland in Brache überführt, die von der Eignungsbewertung als schlechteste ackerbauliche Standorte ausgewiesen wurden. Dabei wird fortwährend die Anzahl der bereits umgewandelten Zellen mit der Zielgröße verglichen. Ist die Differenz noch nicht ausgegli-

chen, wird der Anspruch an die Eignungsbewertung immer weiter gelockert. Bei gleicher Wertigkeit selektiert der Algorithmus die Zellen per Zufallsprinzip. Abb. 4.4, S. 98 zeigt die Vorgehensweise der Auswahl von potentiellen Stilllegungsflächen.

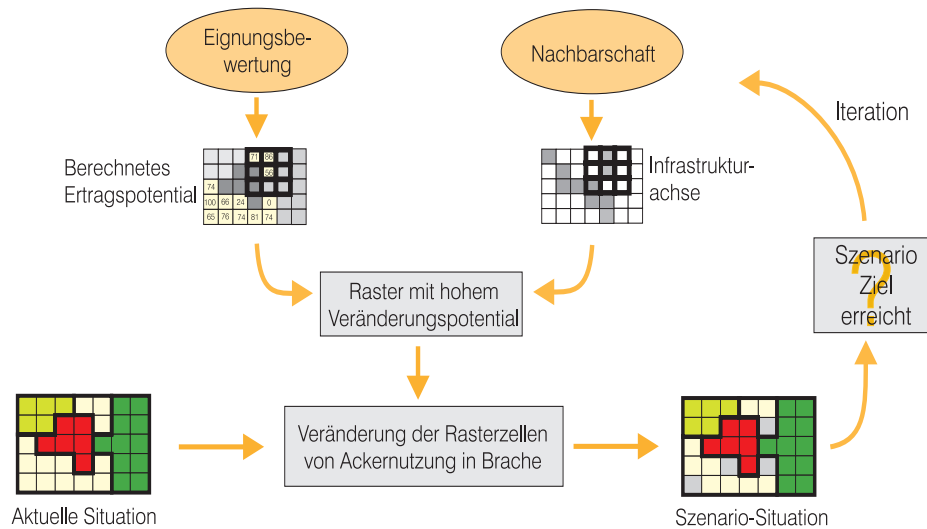


Abb. 4.4 Vorgehensweise für ein Szenario zur Bestimmung von Stilllegungsflächen

4.2.3 Das Waldmodul

Die Landnutzung Wald ist bedingt durch langsames Wachstum und Bestandesschutz (Bundeswaldgesetz §9) eine überwiegend statische Kategorie. Lediglich der Bau von Infrastruktur oder Mangel an Ausweichmöglichkeiten heben den gesetzlichen Schutz vor Rodung auf. Das reduziert das Spektrum der plausiblen Landnutzungsveränderungen auf einerseits die Aufforstung und andererseits auf natürliche Eingriffe in die Waldstruktur.

4.2.3.1 Aufforstung

Von allen Landnutzungsformen ist die Wald- bzw. Forstwirtschaft die am stärksten auf Langfristigkeit

angelegte Bewirtschaftungsform (UMWELTRAT, 2000). Zwar spricht sich der Naturschutz gegen die großflächige Aufforstung aus, um wertvolle Nischenbiotope zu bewahren. Trotzdem werden in waldarmen Gegenden, wie in Kap. 2.2.6 bereits erwähnt, Waldmehrungsprogramme durchgeführt. Es hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass zumeist dort Wald neu entstanden ist, wo der Waldanteil sowieso schon relativ hoch war (BMELF, 1996). Potenzielle Flächen dafür stellen entweder Grünland- oder Ackerflächen dar. Für die Aufforstung eignen sich einerseits Grenzertragsbereiche, denn geringe landwirtschaftliche Ertragsfähigkeit ist nicht mit forstwirtschaftlicher gleichzusetzen. Sinnvoll ist es andererseits, Grünzüge zu schließen, um so für den Artenschutz Habitate zu vergrößern.

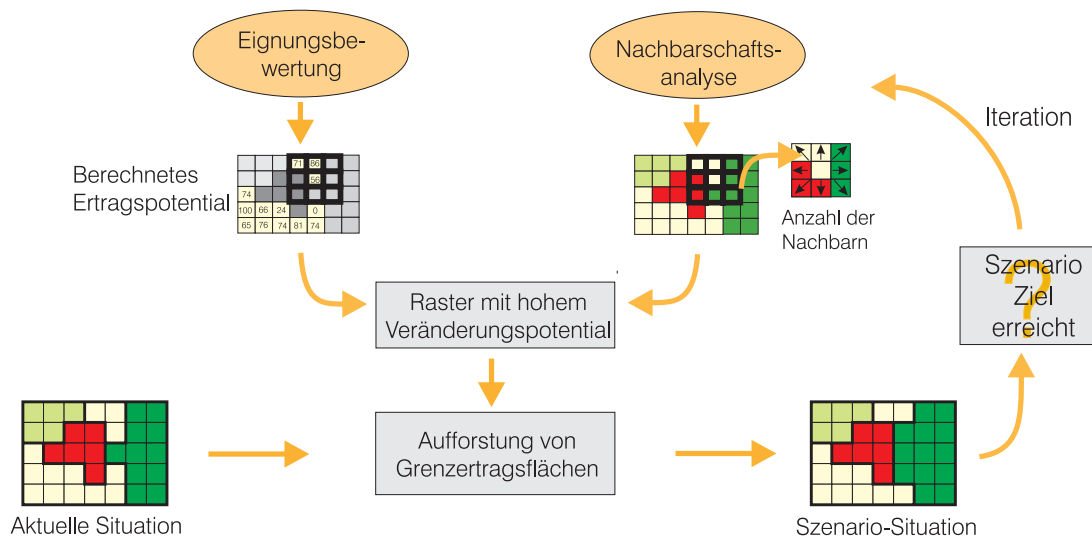


Abb. 4.5 Vorgehen für die Erstellung von Aufforstungsszenarien

Um diesen beiden Ansprüchen gleichermaßen gerecht zu werden, simuliert LUCK die Aufforstung (dargestellt in Abb. 4.5, S. 99) mit einer ähnlichen Technik wie die der Stadterweiterung. Dabei werden die Nachbarschaftsverhältnisse des jeweiligen Pixels betrachtet, um die Nähe vorhandener Waldflächen zu berücksichtigen. Als Eignungsbewertung dafür geht die Ertragspotenzialsbewertung des Ackermoduls ein, welche Grenzertragsbereiche für den Ackerbau identifiziert und somit deren Flächenkonversion in Betracht zieht. Das Ergebnis der Simulation ist die Landnutzungskonversion walddaher Grenzertragsflächen.

4.2.3.2 Windwurf

Naturrisiken sind durch Schadstoffe, ungünstige Standorte, falsche Forstwirtschaft und durch extreme Witterungsereignisse bedingt. Da Sturm in den letzten Jahren dem Wald den größten Schaden zugefügt hat, weist dieses Landnutzungsszenario die Flächen mit dem größten Risiko aus. Sturmschäden treten überwiegend entlang der Hauptwindrichtung auf Flächen exponierter Lage auf. Die Auswahl ist von den Nachbarschaftsverhältnissen unabhängig und wählt die Flächen aus, die nach den genannten Kriterien ungünstigste Bedingungen aufweisen. Abb. 4.6, S. 99 gibt einen Überblick über das Verfahren.

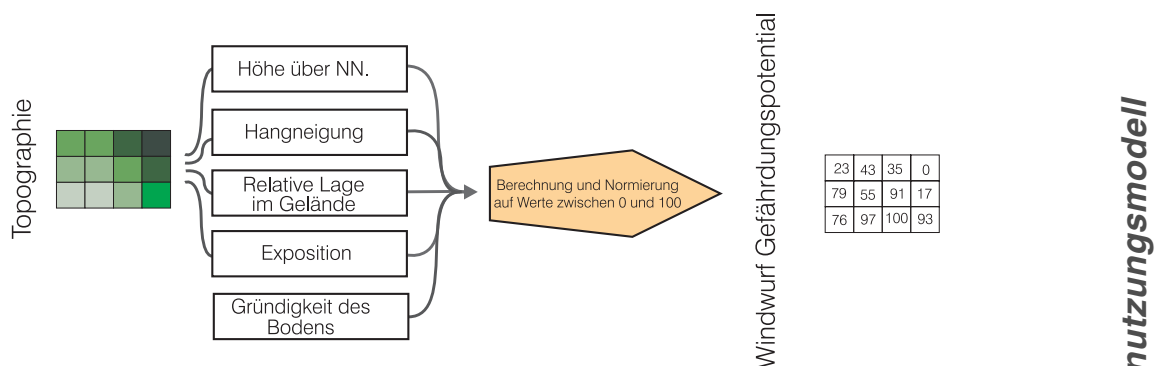


Abb. 4.6 Schema der Windwurfgefährdungsklassifizierung

Für eine Definition von *exponierter Lage* werden die Waldflächen hinsichtlich ihrer topographischen Eigenschaften Exposition, Höhe über NN und Hangneigung bewertet. Außerdem dient das lokale Einzugsgebiet einer jeden Gridzelle als Kriterium für exponierte Kuppenlage einerseits bzw. geschützte Tallage andererseits. Die Skalierung und Bewertung basiert genau wie die der Ackerstandorte auf einer fünfstufigen Skala, wobei Werte die für beide Verfahren verwendet werden, identisch sind. Der Endwert errechnet sich aus dem auf Werte von null bis hundert normierten Produkt der bewerteten Eigenschaften. Ähnlich wie beim Stilllegungsmodul werden die Bedingungen zur Erfüllung des gewählten Ausmaßes (Szenariozielgröße) schrittweise gelo-

ckert und bei gleicher Evaluierungsstufe per Zufall ausgewählt.

4.2.4 Konkurrierende Berücksichtigung

Die Zusammenführung der Einzelszenarien berücksichtigt die Hierarchie der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Landnutzungskategorien. Bei konkurrierenden Flächenansprüchen wird der profitabelsten Landnutzungskategorie Siedlung der Vorrang gegeben. Diese Hierarchie wird gefolgt von landwirtschaftlicher Nutzung, die profitabler ist als Wald.

4.3 LANDBEDECKUNGSVARIATIONEN

Landbedeckungsvariationen finden in Form von Modifikationen der Hauptlandnutzungskategorien statt. Im Rahmen der hydrologischen Modellierung können sie durch Veränderung der Modellparameter berücksichtigt werden. Vertreter der dynamischsten Landnutzungskategorie stellen auf Grund ihrer intensiven Bewirtschaftung und der jahreszeitlichen Dynamik die ackerbaulich genutzten Flächen dar. Modifikationen ergeben sich entweder durch unterschiedliche Wachstumsentwicklung der Anbaufrüchte oder aus einer veränderten Bewirtschaftungsweise. Eine Unterteilung der Landnutzungs-kategorie Acker in die verschiedenen Anbaufrüchte ermöglicht eine Berücksichtigung der Hauptanbauf-ruchtypen innerhalb des Modells.

4.3.1 Berücksichtigung jahreszeitlich bedingter Entwicklungsstadien

Die ackerbaulich genutzten Flächen weisen, bedingt durch die unterschiedlichen Entwicklungsverläufe der einzelnen Anbaufrüchte, innerhalb eines Jahres eine starke phänologische Dynamik auf. Da die Vegetationsentwicklung über die Parameter Vegetationsbedeckungsgrad und Blattflächenindex innerhalb des hydrologischen Modells Einfluss auf Interzeption, Infiltration und damit das gesamte Abflussverhalten nimmt, müssen die wichtigsten

Anbaufrüchte der für die Region typischen Fruchtfolgen parameterisiert werden.

Zur Erhaltung von Bodenfruchtbarkeit und Ertragsleistung werden Ackerflächen in einem abgestimmten Wechsel von Brache, Blatt- und Halmfrüchten bewirtschaftet. Das Fruchtfolgesystem ist dabei nicht nur an die lokalen Boden- und Klimaverhältnisse gekoppelt, sondern wird unter anderem auch von der aktuellen Agrarpolitik und der Lage zum Absatzmarkt bestimmt. Es ist daher nicht möglich, die einzugspezifische Bodennutzung nur aus ihren physiographischen Daten abzuleiten. Um die reale Nutzung zu berücksichtigen, empfiehlt es sich, auf prozentuale Angaben der Gemeindestatistik zurückzugreifen und diese in einem realistischen Muster auf die Fläche zu verteilen.

Für die Modellierung von Hochwasserereignissen spielt die zeitliche Aufeinanderfolge der verschiedenen Anbauprodukte auf einer Fläche eine untergeordnete Rolle. Mögliche langfristige Auswirkungen der Fruchtrotation auf den Wasserhaushalt eines Gebiets haben auf die kurzfristig entstehenden Hochwasserereignisse nur einen geringen Einfluss und werden bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Deshalb werden die Rotationsschemata bei der Szenarienentwicklung nicht nachgebildet, sondern die Fruchtverteilung geht als Momentaufnahme in die Modellierung ein. Die Frucht Auswahl wurde auf die phänomenologische Beschreibung der Hauptkategorien Wintergetreide,

Sommergetreide, Blattfrüchte und Brache beschränkt, weil eine arten- und sortenspezifische Parameterisierung zusätzlich von der Wachstumsentwicklung der Pflanzen abhängt und im hydrologischen Modell nicht differenziert genug abgebildet werden kann.

Ein räumliches Muster der Anbaufrüchte wurde für die Einzugsgebiete Lein und Körsch mit Hilfe einer von der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellten, klassifizierten Landsat-TM-Szene realisiert. Diese wurde auf die einheitlich verwendete Rasterweite von 100 m vergrößert und an die Gemeindestatistik angeglichen. Da im Einzugsgebiet der Lenne die ackerbauliche Nutzung eine untergeordnete Rolle spielt, wurde hier auf eine Anbauproduktaufspaltung verzichtet.

4.3.2 Modifikationen in der Bewirtschaftung

Die Berücksichtigung von veränderten Bewirtschaftungsmethoden erfolgt über eine Veränderung der Parameterisierung in der Steuerdatei des hydrologischen Modells WaSiM-ETH. Die Datengrundlage für eine Parameteränderungen stellt die Literaturstudie aus *Kap. 2.2.* dar. Die Auswertung der Literatur zeigt, dass die Übertragung der gefundenen Studien sich häufig als problematisch erweist, weil die untersuchten Flächen oft sehr klein und die Randbedingungen nicht übertragbar sind.

Exemplarisch wird ein Mulchszenario auf allen Blattfruchtflächen an der Lein gezeigt werden. Eine detaillierte Zuweisung auf einzelne Flächen wurde nicht vorgenommen.

Hydrologisches Modell

5.1 MODELLKONZEPT

Für die vorliegende Untersuchung wurde das deterministische flächendifferenzierte hydrologische Modell WASIM-ETH ausgewählt, welches eine ausgewogene Mischung aus physikalisch begründeten und konzeptionellen Ansätzen darstellt (siehe Kap. 2.5.4.1 und Kap. 2.5.4.2). Eine ausführliche Beschreibung des an der ETH Zürich entwickelten Modells ist in SCHULLA (1997) und SCHULLA & JASPER (1999) enthalten. Die wichtigsten Teilmodelle werden jedoch im folgenden kurz dargestellt. Besonderes Augenmerk liegt dabei aus den in Kap. 2.5.3 genannten Gründen auf der Parameterisierung und mathematischen Behandlung von *Landnutzung* und *Bodenzone* sowie deren *räumlicher Diskretisierung* im Modell.

WASIM-ETH wurde ursprünglich dafür konzipiert, den Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten zu simulieren, weswegen große Sorgfalt auf die Interpolation der meteorologischen Eingangsgrößen sowie die Modellierung der Verdunstung verwendet wurde. Um den Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung noch besser als bisher berücksichtigen zu können, wurde das Bodenmodell im Rahmen dieses Projektes um verschiedene Aspekte wie die explizite Berücksichtigung von Makroporenfluss, Verschlammung, Versiegelung mit Anschluss an eine Kanalisation und von dezentralen Rückhalten er-

gänzt. Diese Modellerweiterungen werden in Kap. 5.5 vorgestellt.

Die räumliche Verteilung der *physiographischen Gebietseigenschaften* wird in WASIM-ETH durch Einteilung des Einzugsgebietes in ein regelmäßiges Gitter berücksichtigt. Außerdem kann das Einzugsgebiet in beliebig viele *Teileinzugsgebiete* gegliedert werden, deren Grenzen sich ebenfalls an diesem Gitter orientieren. Die *meteorologischen Daten* verschiedener Messstationen, die für die Simulation benötigt werden, werden während des Modelllaufs für jede einzelne Zelle des Gitters interpoliert, was in Kap. 5.3.1 näher erläutert wird. Für jede einzelne Gitterzelle werden außerdem die hydrologischen Prozesse der Schneedeckenentwicklung, der Interzeption, der Verdunstung, der Infiltration sowie der *vertikalen* Wasserbewegung in der Bodenzone simuliert (siehe Kap. 5.3). Der auf den einzelnen Gitterzellen gebildete Oberflächenabfluss wird anschließend anhand eines *Fließzeitschemas* (siehe Kap. 5.2.1) dem Gerinne zugeführt. Die *Abflusskonzentration* bis zum Teilgebietsauslass erfolgt anhand von Einzellinearspeichern getrennt für die Abflusskomponenten Direktabfluss, Interflow und Basisabfluss (Kap. 5.3.6). Der weitere Weg des Abflusses im Gewässernetz vom Pegel des Teileinzugsgebietes bis zum Auslass des Gesamteinzugsgebietes wird durch ein *Abflussrouting* beschrieben (Kap. 5.3.7).

5.2 DATENGRUNDLAGE

5.2.1 Räumliche Daten

Alle räumlichen Daten werden für die Modellierung mit WASIM-ETH als Rasterdaten (Grids) in einheitlicher Größe und Auflösung benötigt. Als Datenformat dient das ASCII-Export-Format für Grids des Geographischen Informationssystems ARC/INFO. Die räumliche Auflösung des Rasters ist von der Größe des Einzugsgebietes abhängig. Eine Untersuchung von SCHULLA (1997: 96 f.) ergab, dass für das Einzugsgebiet der Thur (1700 km²) die Güte der hydrologischen Simulation oberhalb einer Gitterweite von 1000 × 1000 m stark abnahm. Umgekehrt ergab sich unterhalb einer Gitterweite von 500 × 500 m keine weitere Zunahme der Simulationsgüte. Für kleinere Gebiete mit räumlich höher aufgelöster Gebietsinformation sind jedoch kleinere Gitterweiten sinnvoll. Für das Einzugsgebiet des Wernersbachs (4,6 km²) verwendete SCHULLA (1997) beispielsweise ein Raster von 50 × 50 m.

Notwendige räumliche Daten für Simulationen mit WASIM-ETH sind, wie in Abb. 5.1, S. 104 dargestellt, ein digitales Höhenmodell, digitale Landnutzungsdaten sowie digitale Daten zu den Bodenarten im Einzugsgebiet. Aus dem Höhenmodell können entweder mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems oder der zu WASIM-ETH gehörenden Zusatzsoftware weitere für die Modellierung benötigte topographische Informationen abgeleitet werden. Die Daten zur Landnutzung und zu den Bodenarten werden zu Beginn des Modelllaufs mit Tabellenwerten zu jeder Landnutzungs- bzw. Bodenart verknüpft. Hierbei können entweder die vorgegebenen Werte und Nutzungs- bzw. Bodenartenklassen verwendet oder eigene Daten in die beliebig erweiterbaren Tabellen eingefügt werden. Liegen beispielsweise detaillierte digitale Daten zur räumlichen Verteilung der nutzbaren Feldkapazität vor, so können diese auch direkt als Grid eingelesen werden. Die Tabellenwerte werden dann ignoriert.

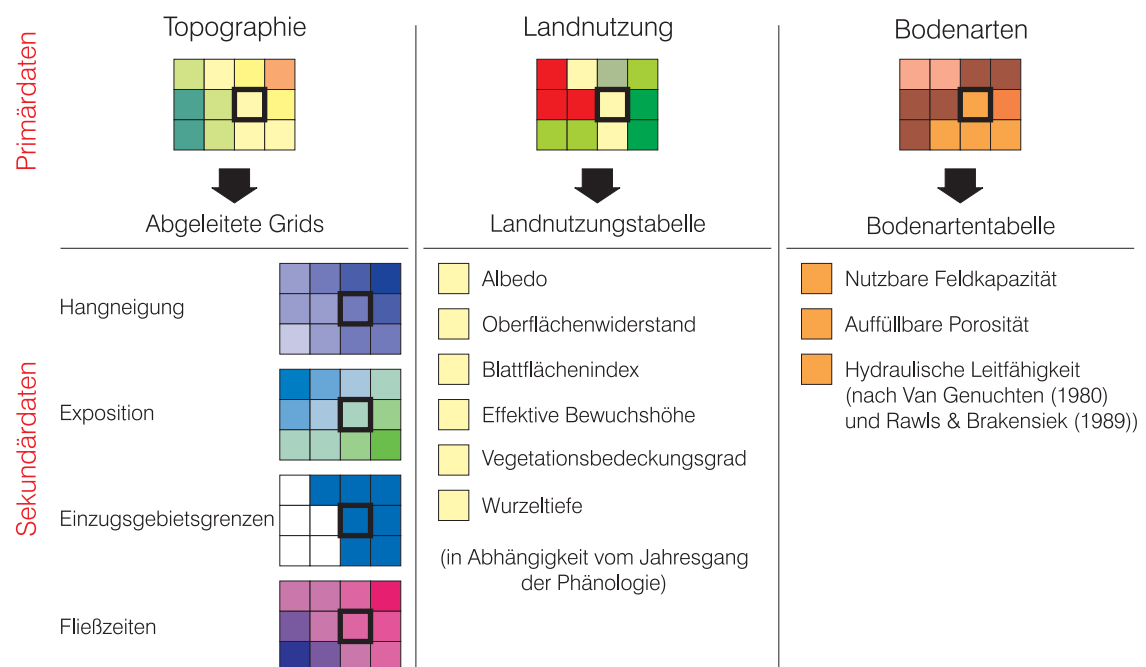


Abb. 5.1 Für die hydrologische Modellierung in WaSiM-ETH notwendige räumliche Daten

5.2.2 Meteorologische und hydrologische Daten

Für die hydrologische Modellierung mit den in Kap. 5.3 beschriebenen Berechnungsansätzen werden Zeitreihen folgender meteorologischer Größen benötigt. Teilweise können jedoch auch einfachere Ansätze mit geringerem Datenbedarf verwendet werden:

- (1) Niederschlag [mm]
- (2) Lufttemperatur [°C]
- (3) Relative Luftfeuchte [–]
oder Wasserdampfdruck [hPa]
- (4) Windgeschwindigkeit [m/s]
- (5) Globalstrahlung [Wh/m²]
oder Relative Sonnenscheindauer [–]

Die notwendige zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten hängt von der Fragestellung und der Gebietsgröße ab. In der vorliegenden Untersuchung

werden zur Berechnung der *Feuchtebedingungen* im Gebiet zu Beginn des Ereignisses – wie für Wasserhaushaltssimulationen in der Mesoskala üblich – *tägliche* Daten verwendet. Die *Hochwasserereignisse* werden mit *stündlichen* Werten simuliert. Wichtig für die Simulation von Hochwasserereignissen ist, wenn die Ereignisse nicht durch Schneeschmelze beeinflusst sind, v.a. eine ausreichende Anzahl kontinuierlich aufzeichnender Niederschlagsmessstationen, da die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlages von entscheidender Bedeutung für das Modellierungsergebnis ist. Die zur Berechnung der Verdunstung und/oder Schneeschmelze benötigten meteorologischen Größen sind während solcher Hochwasserereignisse von untergeordneter Bedeutung.

Zur *Kalibrierung* und *Validierung* des Modells sind außerdem Pegelraten des Abflusses aus den Teileinzugsgebieten sowie aus dem Gesamteinzugsgebiet in der zeitlichen Auflösung der durchgeführten Simulationen vonnöten.

5.3 TEILMODELLE

5.3.1 Interpolation und Korrektur der meteorologischen Daten

Während der Simulation werden die gemessenen meteorologischen (Punkt-)daten der einzelnen Messstationen auf die Gitterzellen des Einzugsgebietes interpoliert. Hierfür stehen zwei Methoden zur Verfügung: (1) Abstandsgewichtete (horizontale) Interpolation (IDW, Inverse Distance Weighting Interpolation) sowie (2) höhenabhängige (vertikale) Regression. Diese Verfahren können auch kombiniert werden.

Das Ergebnis dieser Interpolation ist ein für jeden Modellierungszeitschritt errechnetes Grid mit den interpolierten Werten für jede Gitterzelle. Diese Grids werden modellintern erzeugt und nach Gebrauch wieder gelöscht, können aber auch für einzelne Zeitschritte gespeichert und mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems visualisiert werden. Außerdem erzeugt das Modell auf Wunsch Grids mit Mittelwerten oder Summen meteorologischer Größen (z.B. Niederschlagssumme eines Starkregenereignisses oder Jahresmitteltemperatur).

Für die meteorologischen Daten stehen verschiedene Korrekturverfahren zur Verfügung, die bei SCHULLA (1997: 20 ff.) näher beschrieben sind. Da Niederschlagsmessungen grundsätzlich mit einem systematischen Fehler behaftet sind, empfiehlt sich eine Niederschlagskorrektur in fast allen Fällen. Das im Modell enthaltene Korrekturverfahren für Niederschlag unterscheidet zwischen festem und flüssigem Niederschlag und berücksichtigt den Einfluss des Windes auf die Niederschlagsmessung.

5.3.2 Interzeption

Die Speicherung von Niederschlagswasser auf Blättern und vegetationslosen Oberflächen wird in WASIM-ETH wie folgt berechnet (SCHULLA, 1997: 50 f.):

$$I_{max} = v \cdot LAI \cdot h_{SI} + 1 - v \cdot h_{SI} \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

SI_{max}	Maximale Interzeptionsspeicherkapazität	[mm]
v	Vegetationsbedeckungsgrad	[–]
LAI	Blattflächenindex	[m²/m²]
h_{SI}	Maximale Schichtdicke des Wassers auf der Oberfläche (nach SCHULLA (1997) 0,1–0,4 mm)	[mm]

Niederschlagswasser gelangt im Modell erst dann auf die Bodenoberfläche, wenn der Interzeptionspeicher gefüllt ist. Die Entleerung des Interzeptionspeichers erfolgt durch Verdunstung mit der potentiell möglichen Rate.

Detailliertere Ansätze zur Interzeptionsmodellierung finden sich beispielsweise bei RUTTER (1970) und MENZEL (1997). Diese Ansätze benötigen jedoch zusätzliche Angaben zur Vegetation, die in der Mesoskala in der Regel nicht zur Verfügung stehen.

Landnutzungsabhängige Parameter

In der Steuerdatei des Modells sind für jede Landnutzungsart Werte für *Blattflächenindex* und *Vegeta-*

tionsbedeckungsgrad tabelliert, die in Tab. 5.1, S. 106 aufgeführt sind, so wie sie für die vorliegende Untersuchung verwendet werden. Dabei wird auch den Siedlungsflächen, die ja nicht zu 100% versiegelt sind, ein effektiver Blattflächenindex bzw. Bedeckungsgrad zugeordnet.

Die vier Stützpunkte (in Tab. 5.1, S. 106: 20. April, 30. Mai, 7. September, 7. Oktober) stellen markante Tage im phänologischen Jahresgang dar, die für die Nordwestschweiz in einer Höhe von 400 m ü. NN ermittelt wurden und entsprechend der tatsächlichen Höhe einer jeweiligen Gitterzelle korrigiert werden. Für die übrigen Tage des Jahres werden die tabellierten Werte linear zwischen den Stützpunkten interpoliert.

Tab. 5.1 Landnutzungsabhängige Parameter zur Berechnung der Interzeption im hydrologischen Modell WaSiM-ETH am Beispiel der Parameterisierung für das Leingebiet

Landnutzung	Phänolog. Stützpunkte d_i [Julianische Tage]				Blattflächenindex LAI [m^2/m^2]				Bedeckungsgrad v [–]			
	d_1	d_2	d_3	d_4	1	2	3	4	1	2	3	4
Siedlung	110	150	250	280	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Industrie	110	150	250	280	1	1	1	1	0,4	0,4	0,4	0,4
Flughafen	110	150	250	280	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Abbaufäche	110	150	250	280	1	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
Grünfläche	110	150	250	280	3	5	5	3	0,9	0,95	0,95	0,9
Sportanlage	110	150	250	280	1,5	2	2	1,5	0,7	0,75	0,75	0,7
Wintergetreide	110	150	220	225	1	5	4	1	0,3	0,85	0,8	0,3
Brache	90	165	280	285	0,5	2	4	0,5	0,05	0,75	0,75	0,05
Blattfrüchte	90	165	280	285	0,5	2	4	0,5	0,05	0,9	0,9	0,05
Sommergetreide	90	165	265	270	0,5	4	3	0,5	0,1	0,8	0,75	0,1
Wein	110	150	250	280	0,5	5	5	0,5	0,7	0,75	0,75	0,7
Obst	110	150	250	280	0,5	5	5	0,5	0,75	0,8	0,8	0,75
Wiese/Weide	110	150	250	280	2	4	4	2	0,9	0,95	0,95	0,9
Parzellen	110	150	250	280	0,5	5	5	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7
Landw./Natur	110	150	250	260	1	4	4	1	0,6	0,9	0,8	0,6
Laubwald	110	150	250	280	0,5	8	8	0,5	0,7	0,95	0,95	0,7
Nadelwald	110	150	250	280	9	13	13	9	0,9	0,9	0,9	0,9
Mischwald	110	150	250	280	4	10	10	4	0,8	0,93	0,93	0,8
Natürl. Grünland	110	150	250	280	2	4	4	2	0,9	0,95	0,95	0,9
Wald/Sträucher	110	150	250	280	3	5	5	3	0,8	0,9	0,9	0,8
Wasser/Feuchthfl.	110	150	250	280	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1	0,1

5.3.3 Evapotranspiration

Für die Berechnung der potentiellen Verdunstung im Tageszeitschritt stehen im Modell die Verfahren von PENMAN-MONTEITH, WENDLING, HAMON und HAUDE zur Verfügung. In der vorliegenden Untersuchung wird der Ansatz von PENMAN-MONTEITH (MONTEITH, 1975; BRUTSAERT, 1982) angewandt, der auch für kleinere Zeitschritte eingesetzt werden kann und die pflanzliche Transpiration auf physikalisch begründete Weise simuliert:

$$\bar{z} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma_p} \cdot (R_N - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{\gamma \cdot r_a} \cdot (e_s - e)}{\frac{\Delta}{\gamma_p} + 1 + \frac{r_s}{r_a}} \quad (5.2)$$

λ	Temperaturabhängige Kondensations- bzw. Verdunstungswärme (z.B. $2,478 \cdot 10^6$ J/kg bei 10°C)	[J/kg]
E	Fluss latenter Wärme	[kg/m ²]
Δ	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	[hPa/K]
R_N	Nettostrahlung	[Wh/m ²]
G	Bodenwärmefluss	[Wh/m ²]
ρ	Dichte von feuchter Luft	[kg/m ³]
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck (ca. 1005 J/(kg·K))	[J/(kg·K)]
e_s	Sättigungswasserdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur	[hPa]
e	Aktueller Wasserdampfdruck	[hPa]
t_i	Länge des Berechnungsintervalls	[s]
γ_p	Psychrometerkonstante (ca. $0,66$ hPa/K)	[hPa/K]
r_s	Oberflächenwiderstand der Landoberfläche	[s/m]
r_a	Aerodynamischer Widerstand der Landoberfläche	[s/m]

Die Nettostrahlung wird, wenn Daten hierzu nicht zur Verfügung stehen (was der Regelfall ist) mit Hilfe der Albedo der Landoberfläche aus der Globalstrahlung oder der Sonnenscheindauer abgeleitet. Der aerodynamische Widerstand ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit und der aerodynamischen Rauigkeitslänge, die im folgenden als effektive Bewuchshöhe bezeichnet wird.

Die aktuelle Verdunstung wird gegenüber der potentiellen Verdunstung linear in Abhängigkeit vom Feuchtezustand des pflanzenverfügbaren Teils der Bodenzone reduziert.

Landnutzungsabhängige Parameter

Ebenso wie für die Interzeption in Kap. 5.3.2 beschrieben sind in der Steuerdatei Werte für die Albedo der Landoberfläche, die effektive Bewuchshöhe, den Oberflächenwiderstand (der sich aus dem Stomatawiderstand und dem Oberflächenwiderstand der unbelebten Landoberfläche zusammensetzt) sowie die Wurzeltiefe (welche die Mächtigkeit der pflanzenverfügbaren Bodenzone bestimmt) tabelliert. Die in Tab. 5.2, S. 108 angegebenen Werte für effektive Bewuchshöhe, Oberflächenwiderstand und Wurzeltiefe beziehen sich auf die in Tab. 5.1, S. 106 aufgeführten und in Kap. 5.3.2 erläuterten phänologischen Stützpunkte. Der für die Albedo ganzjährig verwendete Wert wird während einer Simulation nur durch das in Kap. 5.3.4 beschriebene Schneemodell verändert, um so das erhöhte Reflexionsvermögen einer schneebedeckten Bodenoberfläche zu berücksichtigen.

Tab. 5.2 Landnutzungsabhängige Parameter zur Berechnung der Verdunstung im hydrologischen Modell WaSiM-ETH am Beispiel der Parameterisierung für das Leingebiet

Landnutzung	Albedo [-]		Minimaler Oberflächenwiderstand [s/m]												Eff. Bewuchshöhe [m]				Wurzeltiefe [m]			
	Zeitpunkt	Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
Siedlung		0,1	100	100	100	90	80	80	80	80	80	90	100	100	7	7	7	7	0,3	0,3	0,3	0,3
Industrie		0,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	7	7	7	7	0,2	0,2	0,2	0,2
Flughafen		0,1	100	100	100	95	90	90	90	90	90	95	100	100	5	5	5	5	0,3	0,3	0,3	0,3
Abbaufläche		0,12	100	100	100	95	90	90	90	90	90	95	100	100	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1
Grünfläche		0,20	80	80	70	70	50	50	50	55	55	70	80	80	1,5	2,5	2,5	1,5	0,8	0,8	0,8	0,8
Sportanlage		0,15	90	90	85	85	75	75	75	80	80	85	90	90	3	4	4	3	0,5	0,5	0,5	0,5
Wintergetreide		0,25	100	100	75	70	65	65	65	70	100	100	100	100	0,05	0,5	0,3	0,05	0,3	1,0	1,0	0,1
Brache		0,15	100	100	75	75	65	65	65	65	65	80	100	100	0,05	0,2	0,15	0,05	0,1	0,5	0,5	0,1
Blattfrüchte		0,25	100	100	80	70	50	50	50	55	55	80	100	100	0,05	0,3	0,25	0,05	0,1	1,2	1,2	0,1
Sommergetreide		0,25	100	100	80	70	65	65	65	65	65	80	100	100	0,05	0,4	0,2	0,05	0,1	1,0	1,0	0,1
Wein		0,25	100	100	90	70	60	60	60	60	60	80	100	100	0,4	1	1	0,4	1,5	1,5	1,5	1,5
Obst		0,25	100	100	90	70	60	60	60	60	60	80	100	100	0,4	1,5	1,5	0,4	1,3	1,3	1,3	1,3
Wiese/Weide		0,25	90	90	75	65	50	55	55	55	60	70	90	90	0,15	0,4	0,3	0,15	1,2	1,2	1,2	1,2
Parzellen		0,25	100	100	90	70	60	60	60	60	60	80	100	100	0,4	1	1	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8
Landw./Natur		0,25	85	85	75	70	60	60	60	60	60	70	90	90	0,1	0,45	0,25	0,1	0,6	1,1	1,1	0,6
Laubwald		0,17	100	100	95	75	65	65	65	65	65	85	100	100	0,3	10	10	0,3	1,5	1,5	1,5	1,5
Nadelwald		0,12	80	80	75	65	55	55	55	55	55	75	80	80	10	10	10	10	1,3	1,3	1,3	1,3
Mischwald		0,15	90	90	85	70	60	60	60	60	60	80	90	90	5	10	10	5	1,4	1,4	1,4	1,4
Natürl. Grünland		0,25	90	90	75	65	50	55	55	55	60	70	90	90	0,15	0,4	0,3	0,15	1,2	1,2	1,2	1,2
Wald/Sträucher		0,20	80	80	70	70	50	50	50	55	55	70	80	80	1,5	2,5	2,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2
Wasser/Feuchtfläche		0,05	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

5.3.4 Schneemodell

Mit dem Schneemodell werden *Schneeakkumulation* und *Schneeschnmelze* simuliert. Eine Aufteilung in festen bzw. flüssigen Niederschlag erfolgt im Modell anhand der Lufttemperatur. Der ermittelte feste Niederschlag wird als Schneedecke akkumuliert. Für die Schneeschnmelze stehen drei verschiedene Verfahren mit unterschiedlichem Datenbedarf zur Verfügung:

- (1) Temperatur-Index-Verfahren
- (2) Temperatur-Wind-Index-Verfahren
- (3) Kombiniertes Verfahren nach ANDERSON (1973)

Den Verfahren (1) und (2) ist folgende Form gemeinsam:

$$M = c \cdot (T - T_m) \cdot \frac{\Delta t}{24} \quad [\text{mm/Zeitintervall}] \quad (5.3)$$

für $T > T_m$, sonst $M = 0$

M	Schmelzrate	[mm/Zeitintervall]
c	Schmelzfaktor	[-]
T	Lufttemperatur	[°C]
T_m	Grenztemperatur für das Einsetzen der Schneeschnmelze	[°C]
Δt	Zeitintervall, auf das sich die Schmelzrate bezieht	[h]

Die beiden Verfahren unterscheiden sich vor allem in der Ermittlung des *Schmelzfaktors* c , der beim Temperatur-Index-Verfahren nur von der Lufttemperatur, beim Temperatur-Wind-Index-Verfahren zusätzlich von der Windgeschwindigkeit abhängt.

Da das kombinierte Verfahren nach ANDERSON für Tageswerte entwickelt wurde und für kürzere Zeitschritte nur bedingt empfohlen wird, kommt in der vorliegenden Untersuchung das *Temperatur-Wind-Index-Verfahren* zum Einsatz. Auf eine Beschreibung des Verfahrens nach ANDERSON wird deshalb verzichtet.

5.3.5 Bodenmodell

In WASIM-ETH kann zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Modulen zur Berechnung der (vertikalen) Abflussbildung auf und unter der Landoberfläche gewählt werden (SCHULLA, 1997, SCHULLA & JASPER, 1999):

(1) Topmodel-Ansatz (WASIM-ETH I)

Infiltration nach einem auf GREEN & AMPT (1911) basierenden Verfahren von PESCHKE (DYCK & PESCHKE, 1995); Bildung von Sättigungsflächenabfluss nach einem auf TOPMODEL (BEVEN et al., 1995) beruhenden Verfahren; Aufteilung der ungesättigten Zone in einen pflanzenverfügbaren Mittelporenbereich (Wurzelzone), einen nicht pflanzenverfügbaren Mittelporenbereich (unterhalb der Wurzelzone), einen Grobporenbereich sowie einen Zwischenabflussspeicher; Beschreibung der gesättigten Zone durch einen Basisabflussspeicher.

(2) Richards-Gleichung (WASIM-ETH II)

Berechnung der eindimensional vertikalen Bewegung des Wassers in der ungesättigten Zone anhand der RICHARDS-Gleichung; Beschreibung der gesättigten Zone wahlweise durch einen Basisabflussspeicher oder ein zweidimensionales Grundwassermodell.

Da sowohl das Bodenmodell mit *Richards-Gleichung* als auch das mit *Topmodel-Ansatz* auf deren Eignung zur Bearbeitung der Fragestellung hin überprüft wurden, werden im folgenden auch beide Versionen in ihren Grundzügen erläutert und deren jeweilige Vor- und Nachteile diskutiert. Praktische Erwägungen führten im weiteren zur Anwendung von WASIM-ETH I.

5.3.5.1 Version mit Topmodel-Ansatz

Im Unterschied zur Version II wird im Bodenmodell von WASIM-ETH I keine *Bodenwasserbewegung* berechnet, sondern die Entwicklung der Bodenfeuchte durch ein System von *Speichern* nachgebildet, die sich – ihrer jeweiligen Funktion entsprechend – durch eine charakteristische Füllungs- und Entleerungsdynamik auszeichnen. Dem Bodenmodell ist ein Infiltrationsmodell vorgeschaltet.

Infiltration

Zur Beschreibung des Eindringens von Niederschlagswasser in den Boden wird ein auf dem weit verbreiteten Infiltrationsmodell von GREEN & AMPT (1911) aufbauendes sogenanntes »Zweistufenmodell für homogene Böden« von PESCHKE (DYCK & PESCHKE, 1995: 369 ff.) eingesetzt. Das Verfahren von PESCHKE unterscheidet sich vom ursprünglichen

Ansatz im wesentlichen durch die Möglichkeit, *diskontinuierliche* Niederschläge verarbeiten zu können.

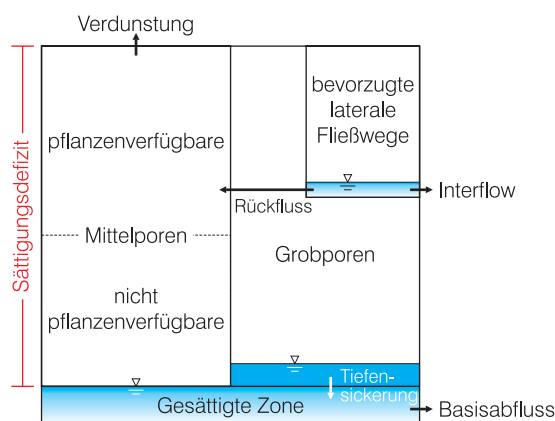
Der Begriff ›Zweistufenmodell‹ leitet sich aus der Unterteilung des Infiltrationsvorgangs in eine *Sättigungsphase* – bei ungesättigten Verhältnissen – und eine *Rückgangphase* – bei gesättigten Verhältnissen – ab. Das eindringende Niederschlagswasser wird in der Modellvorstellung als sprunghaft vorrückende *Feuchtefront* idealisiert. Deren Vorrücken wird vom Sättigungsdefizit sowie den bodenphysikalischen Kenngrößen hydraulische Leitfähigkeit des Bodens und Saugspannung an der Feuchtefront bestimmt, die in der Bodentabelle des Modells (siehe Tab. 5.3, S. 112) aufgelistet sind.

Das Ergebnis der Berechnungen des Infiltrationsmodells ist eine Aufteilung des Niederschlages in *Infiltrationsüberschuss*, der zu Direktabfluss wird und *infiltrierendes Wasser*, das an das Bodenmodell übergeben wird.

Unterirdische Fließvorgänge

Eine Übersicht über das Speicherkonzept des Bodenmodells gibt Abb. 5.2, S. 110. Infiltrierender Niederschlag wird zunächst an die pflanzenverfügbaren *Mittelporen* der Wurzelzone sowie an die nicht pflanzenverfügbaren Mittelporen unterhalb der Wurzelzone abgegeben. Sind die Mittelporen gesättigt, so füllen sich die *Grobporen*, die den Sickerwasserbereich der Bodenmatrix darstellen. Abhängig von der *Leitfähigkeit* des Grobporenbereichs kann vom Grobporenspeicher aus Wasser in die gesättigte Zone perkolieren und auf diese Weise den *Basisabflussspeicher* füllen. Abhängig vom *Sättigungsdefizit* des Grobporenbereichs kann ein Teil des dort gespeicherten Wassers über bevorzugte laterale Fließwege als *Interflow* rasch zum Abfluss kommen, ohne die gesättigte Zone zu speisen.

(a) großes Sättigungsdefizit



(b) geringes Sättigungsdefizit

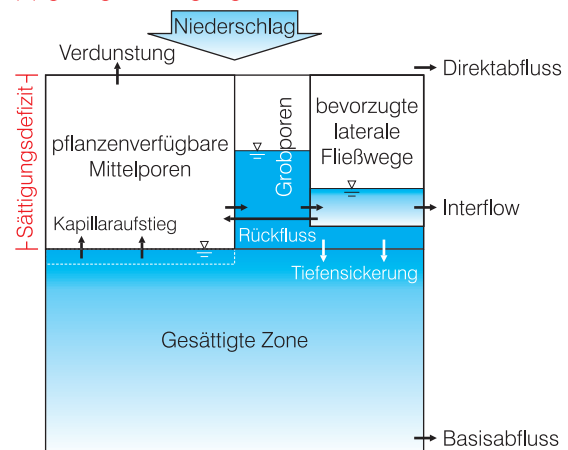


Abb. 5.2 Speicherkonzept des Bodenmodells

Verdunstung findet innerhalb des Bodenmodells nur aus dem pflanzenverfügbaren Mittelporenspeicher heraus statt. Ein Teil des Sättigungsdefizits der Mittelporen wird als *Kapillaraufstieg* aus der gesättigten Zone ausgeglichen.

Das Sättigungsdefizit des Bodenspeichers einer Gitterzelle insgesamt errechnet sich anhand eines Ansatzes, der auf dem Konzept des hydrologischen Modells TOPMODEL (BEVEN et al., 1995) beruht. In

TOPMODEL wird die Tendenz einer Gitterzelle zur Bildung von *Sättigungsflächenabfluss* durch einen sogenannten *topographischen Index* beschrieben (Gl. 5.4, S. 111), der sich mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells bestimmen lässt. Der topographische Index errechnet sich aus dem lokalen Einzugsgebiet einer betrachteten Gitterzelle und deren Hangneigung:

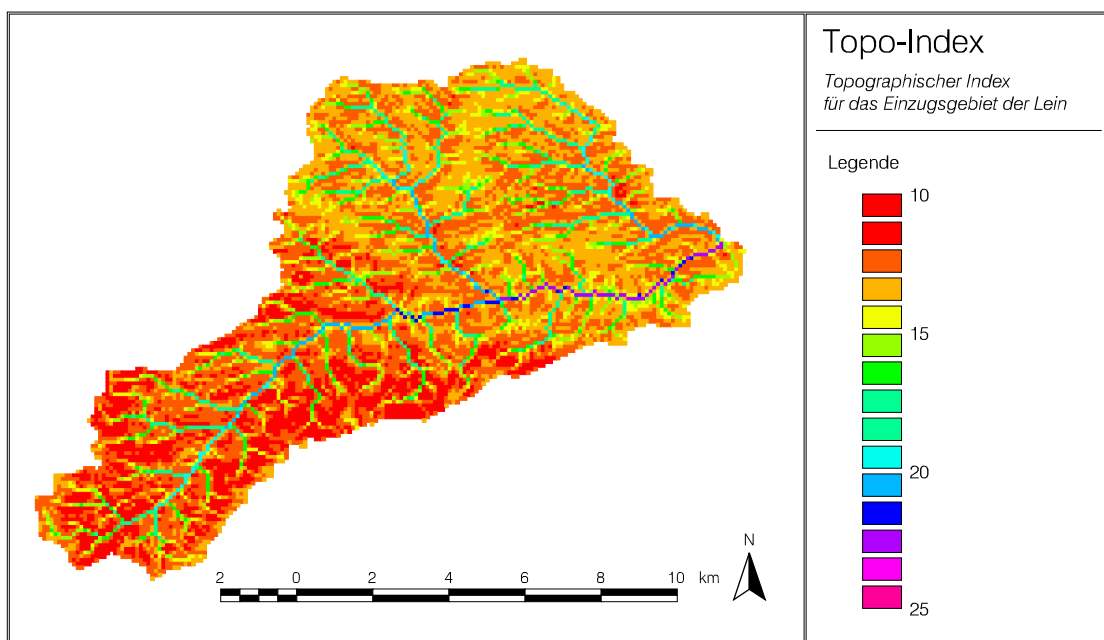
$$c_i = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right) \quad [-] \quad (5.4)$$

c_i	Topographischer Index einer Gitterzelle	$[-]$
a	Spezifische Einzugsgebietsfläche dieser Gitterzelle bezogen auf deren Kantenlänge	$[m^2/m]$
β	Hangneigung dieser Zelle	$[m/m]$

Je größer das lokale Einzugsgebiet einer Zelle und je kleiner deren Hangneigung, desto größer ist der topographische Index und damit die Tendenz zur

Sättigung. Am Beispiel der Lein (siehe Karte 5.1, S. 111) wird deutlich, dass der topographische Index im Talboden hohe, an steilen Hängen und auf Kuppen hingegen niedrige Werte annimmt.

Der topographische Index basiert auf der Annahme, dass der hydraulische Gradient der gesättigten Zone näherungsweise dem Gefälle der Geländeoberfläche entspricht, was in vielen Fällen nicht zutrifft. Hierauf weisen beispielsweise FREER et al. (1997) hin.



Karte 5.1 Verteilung des topographischen Index am Beispiel des Einzugsgebietes der Lein

In TOPMODEL selbst werden die Bodenfeuchteverhältnisse anhand eines mittleren Sättigungsdefizits für das gesamte Einzugsgebiet charakterisiert. Der topographische Index einer jeden Gitterzelle fließt dabei lediglich als *Häufigkeitsverteilung* in die hydrologische Modellierung ein. Anhand dieser Häufigkeitsverteilung wird bestimmt, welcher Anteil des Einzugsgebietes bei einem bestimmten mittleren Sättigungsdefizit gesättigt ist und damit Sättigungsflächenabfluss bildet.

Auch in WASIM-ETH wird am Ende eines jeden Zeitschritts das mittlere Sättigungsdefizit eines Teileinzugsgebietes berechnet. Im Gegensatz zu TOP-

MODEL wird jedoch das Sättigungsdefizit zu Beginn des nächsten Zeitschritts entsprechend des jeweiligen topographischen Index wieder auf die einzelnen Gitterzellen verteilt, um eine zellenweise Berechnung der Abflussbildung zu ermöglichen.

5.3.5.2 Version mit Richards-Gleichung

Die RICHARDS-Gleichung hat für die Beschreibung der eindimensional vertikalen Wasserbewegung in der ungesättigten Zone folgende Form:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(-k(\Theta) \cdot \frac{\psi_h(\Theta)}{\partial z} \right) \quad [1/s] \quad (5.5)$$

Θ	Volumetrischer Wassergehalt	[m ³ /m ³]
t	Zeit	[s]
q	Spezifischer Fluss	[m/s]
z	Vertikalachse	[m]
k	Hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes	[m/s]
ψ_h	Hydraulisches Potential als Funktion des Wassergehaltes (Hydraulisches Potential ψ_h [m] = Matrixpotential ψ_m [m] + Gravitationspotential ψ_z [m])	[m]

Ist der Boden gesättigt, so vereinfacht sich die RICHARDS-Gleichung und nimmt die Form des DARCY-Gesetzes an. Zur Bestimmung der Saugspannungs-Wassergehalts-Funktion sowie der Leitfähigkeits-Wassergehalts-Funktion wird in WASIM-ETH II der Ansatz von VAN GENUCHTEN (1980) eingesetzt. Die hierfür notwendigen BROOKS-COREY-Parameter werden anhand der Pedotransferfunktionen von RAWLS & BRAKENSIEK (1989) abgeschätzt.

5.3.5.3 Bodenparameter beider Versionen

Wie in Abb. 5.1, S. 104 illustriert wird das Grid, das die Verteilung der *Bodenarten* im Einzugsgebiet enthält, während der Simulation mit den in der Steuerdatei vorgegebenen *Bodenkennwerten* verknüpft. Einige dieser Kennwerte sind in Tab. 5.3, S. 112 aufgeführt.

Zur Beschreibung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone wird der Boden aus numerischen Gründen in zahlreiche Schichten unterteilt, die im Fall von WASIM-ETH alle mit den gleichen Bodeneigenschaften und der gleichen Mächtigkeit ausgestattet sind.

Tab. 5.3 Ausgewählte Bodenparameter des Bodenmoduls im hydrologischen Modell WaSiM-ETH

Bodenart	Gesättigte hydraul. Leitfähigkeit k_{sat} [m/s]	Wassergehalt [Vol.-%]		
		der nutzbaren Feldkapazität n_{FK}	bei gesättigtem Boden Θ_{sat}	am permanenten Welkepunkt Θ_{PWP}
Sand	$8 \cdot 10^{-5}$	6	43	4,5
Lehmiger Sand	$4 \cdot 10^{-5}$	11	43	5,7
Sandiger Lehm	$1 \cdot 10^{-5}$	12	41	6,5
Sandig toniger Lehm	$4 \cdot 10^{-6}$	13	39	1,0
Lehm	$3 \cdot 10^{-6}$	13	43	7,8
Schluffiger Lehm	$1 \cdot 10^{-6}$	23	45	6,7
Toniger Lehm	$5 \cdot 10^{-7}$	21	41	9,5
Schluff	$7 \cdot 10^{-7}$	28	46	3,4
Sandiger Ton	$3 \cdot 10^{-7}$	19	38	10,0
Schluffig toniger Lehm	$2 \cdot 10^{-7}$	28	43	8,9
Ton	$6 \cdot 10^{-8}$	29	38	6,8
Schluffiger Ton	$6 \cdot 10^{-7}$	28	36	7,0
Moor	$8 \cdot 10^{-5}$	47	80	20,0

Weitere Bodenparameter dienen in WASIM-ETH II zur Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit bei nicht gesättigten Verhältnissen, zur Beschreibung der Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe, zur konzeptionellen Berücksichtigung

von bevorzugten Fließwegen sowie zur Anpassung der Berechnungsergebnisse von Simulationen mit großen Zeitschritten an die Ergebnisse von mit kleinen Zeitschritten durchgeführten Modellrechnungen. Außerdem enthält die Bodentabelle die Anzahl der

zu durchlaufenden Bodenschichten sowie deren Mächtigkeit.

Der Einfluss der Landnutzung auf die Bodeneigenschaften bzw. die Abflussbildung bei Hochwasser kann – falls Daten hierzu vorliegen – durch Veränderung der Bodenkennwerte in der Steuerdatei berücksichtigt werden. Zusätzlich können in der Steuerdatei neue Bodenarten vereinbart werden.

5.3.5.4 Diskussion der beiden Versionen

Der Argumentation in *Kap. 2.5.4* folgend wurde zunächst der Modellversion II der Vorzug gegeben. Dabei erwies es sich jedoch als Manko, dass die Wasserbewegung in der ungesättigten Zone in WASIM-ETH II als laminare Fließbewegung in einer monoporösen homogenen Bodenmatrix aufgefasst wird, was die tatsächlichen Verhältnisse nicht angemessen widerspiegelt. Um den Einfluss *bevorzogter Fließwege* wie Makroporen oder hochdurchlässiger Bereiche auf die Abflussbildung mit dem Modell nachvollziehen zu können, war es nötig, die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix stark zu erhöhen. Folge davon ist eine insgesamt raschere Perkolations des Bodenwassers, die der Realität nicht entspricht. Dieser Missstand von Modellen, die die Fließbewegung in der ungesättigten Zone ausschließlich mit der Richards-Gleichung beschreiben, wurde bereits 1986 von den Urhebern von SHE erkannt (BATHURST, 1986: 90), aber auch in der Nachfolge nicht behoben. Stattdessen kommen nach wie vor sogenannte *effektive* hydraulische Leitfähigkeiten zum Einsatz, die nur geringen Bezug zur *messbaren* hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenmatrix besitzen. Durch diese Praxis wird auch der prinzipielle Vorteil derartiger Modelle, die Bodenwasserbewegung explizit zu simulieren, geschmälert. Eine Erweiterung des Bodenmodells mit RICHARDS-Gleichung um eine ebenfalls mikroskalige Simulation der Fließbewegung in bevorzugten Fließwegen, wie bereits in Hangmodellen geschehen, ist jedoch für mesoskalige Einzugsgebiete fragwürdig.

Die Modellversion I verzichtet mit ihrem Speicherkonzept auf eine explizite Modellierung der Bodenwasserbewegung, was ihre Aussagekraft bezüglich der Bodenfeuchteentwicklung einschränkt. Die Dynamik der Speicher wird außerdem von hochsensitiven Parametern ohne direkte physikalische Ent-

sprechung bestimmt, die sich lediglich aus gemessenen Abflussganglinien ableiten lassen. Dieser Mangel wird jedoch teilweise dadurch ausgeglichen, dass die einzelnen Speicher mit bodenphysikalischen Kenngrößen verknüpft sind. Ein Vorzug des Speicherkonzeptes ist es, dass wichtige Abflussbildungsmechanismen in einer den Unsicherheiten der Mesoskala angemessenen Weise repräsentiert werden. Dies erleichtert auch die Erweiterung des konzeptionellen Bodenmodells um weitere Abflussbildungsmechanismen, die als bedeutsam angesehen werden.

5.3.6 Abflusskonzentration

Der lokal im Bereich einer Gitterzelle gebildete Abfluss wird mit einer *zeitlichen Verzögerung* an den Teilgebietsauslass abgegeben, welche sowohl die Verzögerung durch laterale Fließvorgänge auf und unter der Landoberfläche repräsentiert als auch den Fließvorgang im Gerinne bis zum unteren Ende des Teileinzugsgebietes konzeptionalisiert (siehe *Kap. 2.1.1*).

Beim *Basisabfluss* geschieht das durch Einleiten des über das gesamte Teilgebiet gemittelten Basisabflusses in einen Einzellinearspeicher. Das Auslaufverhalten eines solchen Speichers hat folgende Form:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (5.6)$$

$Q(t)$	Abfluss als Funktion der Zeit	[m³/s]
t	Zeit	[s]
Q_0	Abfluss zu Beginn des betrachteten Zeitraums	[m³/s]
k	Speicherkonstante des auslaufenden Speichers	[s]

Der variabel (abhängig vom Sättigungsgrad einer Bodenschicht) gebildete *Zwischenabfluss* erfährt zunächst in der entsprechenden Gitterzelle eine Speicherung und wird anschließend ebenfalls einem Einzellinearspeicher zugeführt, der die Translation und Retention dieser Abflusskomponente im Gewässernetz nachbildet. Die zeitliche Verzögerung des *schnellen Direktabflusses* auf der Landoberfläche ist durch das aus dem Digitalen Höhenmodell abgeleitete Fließzeit-Grid (siehe *Kap. 5.2.1*) vorgegeben, anhand dessen jedes Teileinzugsgebiet abhängig vom Modellierungszeitschritt in Fließzeitzo-

nen unterteilt wird. Der in der untersten Fließzeitzone angelangte schnelle Direktabfluss mündet ebenfalls in einen Einzellinearspeicher zur Berücksichtigung von dessen Dämpfung im Gewässernetz. Die von den drei Einzellinearspeichern abgegebene Wassermenge addiert sich zum Gesamtabfluss eines Teileinzugsgebietes.

5.3.7 Abflussrouting

Der weitere Weg des Abflusses eines Teileinzugsgebietes im Gewässernetz unterhalb liegender Teilgebiete wird durch ein sogenanntes Abflussrouting beschrieben, welches die Translations- und Retentionsvorgänge im Hauptbett sowie bei Überschreiten der Kapazität des Flussbettes in dessen Vorland nachbildet. Zusätzlich zur Berechnung des Fließzeitgrids aus dem Digitalen Höhenmodell wird hierfür eine Fließzeitabelle für den Gerinneabfluss angelegt, wofür verschiedene Gerinneparameter vorgegeben sind, die zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit nach MANNING-STRICKLER

benötigt werden. Die Berechnung der Translation des Gerinneabflusses erfolgt nach dem Ansatz der *kinematischen Welle*:

$$c \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad [\text{m/s}] \quad (5.7)$$

c	Translationsgeschwindigkeit der Welle	[m/s]
h	Wasserstand	[m]
x	In horizontaler Richtung zurückgelegte Strecke	[m]
t	Zeit	[s]

Die kinematische Welle stellt eine Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen dar, welche unter der Voraussetzung zulässig ist, dass die zu berechnenden Durchflüsse näherungsweise stationär sind und keine signifikanten Rückstauereffekte auftreten.

Die Gerinneretention bzw. -diffusion wird getrennt für Hauptbett und Vorland mit Hilfe von zwei *Einzellinearspeichern* (siehe Gl. 5.6, S. 113) simuliert.

5.4 GÜTE DER MODELLIERUNG

Als statistisches Maß für die Güte der Anpassung der simulierten Abflussganglinie an die an einem Pegel gemessene wird die *Efficiency* nach NASH & SUTCLIFFE (1970) verwendet:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [-] \quad (5.8)$$

$$= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad [-]$$

x_i	Gemessener Abfluss im Zeitintervall i	[mm/Zeiteinheit]
$\bar{x}$	Mittlerer gemessener Abfluss	[mm/Zeiteinheit]
x'_i	Simulierter Abfluss im Zeitintervall i	[mm/Zeiteinheit]
n	Anzahl der Zeitintervalle	[-]

Die in Gl. 5.8, S. 114 vorgenommene Umformung erlaubt die Berechnung der Efficiency bereits während der Modellierung, da dann nicht der mittlere gemessene Wert über den gesamten betrachteten Zeitraum bekannt sein muss. Zur stärkeren Gewichtung der Niedrigwasserabflüsse, die für die Simulation des Wasserhaushaltes von Bedeutung sind, wird außerdem eine *logarithmierte Efficiency* berechnet. Die Werte für R^2 bewegen sich zwischen $-\infty$ bis $+1,0$. Für $R^2 = 1,0$ sind gemessene und simulierte Ganglinie identisch.

Statistische Gütemaße erlauben jedoch keine Aussage darüber, ob die der Abflussentstehung zugrundeliegenden Mechanismen durch das Modell zufriedenstellend beschrieben werden. Wie eine weitergehende Plausibilitätsprüfung von Modellierungsergebnissen aussehen kann, wurde bereits in Kap. 2.5.5 erörtert.

5.5 ERWEITERUNGEN DES MODELLS

Aus den in Kap. 5.3.5.4 angestellten Überlegungen heraus wurden die Erweiterungen in das Bodenmodell der *Topmodelversion* von WASIM-ETH eingebettet. Um sicherzustellen, dass WASIM-ETH auch wie bisher betrieben werden kann, wurde die Struktur des in Kap. 5.3.5.1 beschriebenen Bodenmodells nicht angetastet. Dementsprechend wurden sämtliche Neuerungen so in das bestehende Bodenmodell eingefügt, dass sie durch entsprechende Angaben in der Steuerdatei des Modells aktiviert beziehungsweise deaktiviert werden können. Die den Neuerungen zugrundeliegenden Ideen sind nicht auf WASIM-ETH beschränkt, sondern lassen sich auch in andere Modelle integrieren.

5.5.1 Makroporenfluss

Bisher wird in WASIM-ETH der Boden als homogenes, meist isotropes und immer monoporöses Medium behandelt. Dementsprechend kann der Einfluss von Makroporen im Modell nur anhand erhöhter sogenannter *effektiver hydraulischer Leitfähigkeiten* der Bodenmatrix wiedergegeben werden. Der Nachteil hieran ist, dass anstelle der Umgehung der Bodenmatrix auf bevorzugten Fließwegen eine unabhängig von der Bodenfeuchte insgesamt raschere vertikale Fließbewegung des Wassers simuliert wird. In der Topmodelversion gibt es daneben die Möglichkeit, einen bestimmten Prozentsatz des Infiltrations- bzw. Sättigungsüberschusses wieder infiltrieren zu lassen sowie oberhalb einer bestimmten Grenzniederschlagsintensität sämtliches Niederschlagswasser direkt in den Grobporenspeicher einzuleiten. Beide Möglichkeiten, den Einfluss von Makroporen nachzubilden, haben den Nachteil, dass die zugehörigen Parameter weder mit belegbaren Werten versehen werden können noch eine Differenzierung verschiedener Landnutzungen erlauben.

In der neuen Berechnungsroutine werden Makroporen als zusätzlicher *Speicherraum* aufgefasst, der sowohl zur *Bodenoberfläche* als auch zur *Bodenmatrix* Kontakt hat. Das Fassungsvermögen der Makroporen errechnet sich aus der *Makroporosität* des Bodens sowie der *Tiefe*, bis zu der sich die nach der Modellvorstellung vertikalen Makroporen erstre-

cken. Diese beiden Größen sind in der Landnutzungstabelle des Modells getrennt für jede Landnutzung festzulegen. Dabei ist zu beachten, dass Makroporosität und Tiefe neben der Landnutzung auch von den Bodeneigenschaften abhängen. Deshalb müssen unter Umständen in der Landnutzungstabelle Landnutzungs-/Bodenkombinationen voneinander unterschieden werden.

Die *Füllung* des Makroporenraums erfolgt auf zwei Wegen: (1) durch *Infiltrationsüberschuss*, den das Infiltrationsmodell vorgibt sowie (2) durch *Sättigungsüberschuss* der Bodenmatrix, der im Bodenmodell anhand des Topmodel-Ansatzes berechnet wird. Ist die Bodenmatrix noch nicht gesättigt, so ist eine kurzfristige Füllung der Makroporen mit Infiltrationsüberschuss über das Makroporenvolumen hinaus möglich. Voraussetzung dafür ist, dass diese zusätzliche Wassermenge innerhalb des Zeitschritts von der Bodenmatrix aufgenommen werden kann, was vom Entleerungsverhalten des Makroporenspeichers abhängt. Dieses Konzept stellt eine Vereinfachung des von BRONSTERT (1999a) für die Hangskala vorgestellten Ansatzes dar.

Verschlämmung (siehe Kap. 5.5.2) sorgt dafür, dass der Zugang zu den Makroporen von der Bodenoberfläche her teilweise verschlossen wird. Dies hat zur Folge, dass entstehender *Infiltrationsüberschuss* nur noch bedingt in die Makroporen eindringen kann (BERKENHAGEN, 1998). Auf die Aufnahme von Sättigungsüberschuss über die Bodenmatrix hat die Verschlämmung hingegen keinen Einfluss.

Die *Entleerung* des Wassers aus den Makroporen in die Bodenmatrix erfolgt ausschließlich in den *Grobporenspeicher* des Bodenmodells, da dieser sowohl Anschluss an den Interflowspeicher als auch an den Basisabflussspeicher hat. Dieses Vorgehen wird der Modellvorstellung gerecht, dass Makroporen (1) eine schnelle Tiefensickerung und Umgehung der Bodenmatrix ermöglichen sowie (2) bei Vorhandensein bevorzugter Fließwege in lateraler Richtung eine rasche unterirdische Reaktion auf Starkniederschläge begünstigen. Die Abgabe von Wasser an den Grobporenspeicher erfolgt abhängig vom *Bodenfeuchtedefizit* und der *Speicherkonstante* des Makroporenspeichers, die in der Steuerdatei des Modells teilgebietsbezogen definiert wird:

$$l_{pot} = SM \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{k_{SM}}} \right) \cdot c_{\Theta} \quad [\text{mm/h}] \quad (5.9)$$

SM Speichereinhalt des Makroporenspeichers [mm] k_{SM} Auslaufkonstante des Makroporenspeichers [h]	Δt Länge eines Zeitschritts [h] c_{Θ} Sättigungsdefizit des Bodenspeichers [0 bis 1] q_{pot} Wassermenge, die innerhalb eines Zeitschritts maximal von den Makroporen an die Bodenmatrix abgegeben werden kann, wenn das Sättigungsdefizit des Grobporenspeichers dies zulässt [mm/h]
---	--

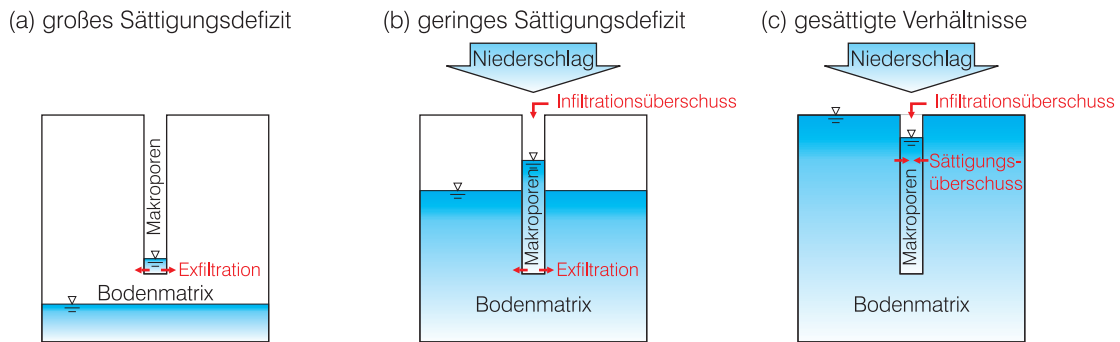


Abb. 5.3 Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen

Abb. 5.3, S. 116 gibt vereinfacht die Wirkungsweise der Makroporenroutine für verschiedene Bodenfeuchteverhältnisse wieder. Gesättigte Verhältnisse schließen eine Abgabe von Wasser aus den Makroporen an die Bodenmatrix aus.

Diese Ausführungen sollen nicht darüber hinwegtäuschen, dass Angaben zu Makroporosität und zur Tiefenerstreckung von Makroporen in der Literatur spärlich und selten übertragbar sind. Gleiches gilt für die *Interaktion* zwischen Makroporen und Matrix, die von der Modellerweiterung sehr vereinfacht wiedergegeben wird. Da jedoch die Bedeutung von Makroporen für die Abflussbildung bei Starkniederschlägen unstrittig ist, wird einer unsicheren Berücksichtigung der Makroporendynamik der Vorzug gegeben vor der Alternative, diese zu ignorieren.

5.5.2 Verschlammung

Verschlammung (siltation, soil surface sealing) bezeichnet die Bildung einer geringdurchlässigen Schicht an der Bodenoberfläche als Folge der Aufprallwirkung von Regentropfen während *Starkniederschlägen*. Dieser Vorgang setzt sich im wesentlichen aus den Teilprozessen Aggregatzerfall, Aggregatverformung und Partikeleinregelung zusammen und bewirkt eine Verdichtung der Bodenoberfläche bis in eine Tiefe von mehreren Millimetern. Ver-

schlammung wird begünstigt durch einen geringen *Bodenbedeckungsgrad* sowie einen hohen Anteil einregelbarer Partikel in Verbindung mit einem geringen Anteil aggregatstabilisierender Substanzen wie Ton- und Humusteilchen. Als besonders verschlammungsanfällig gelten ackerbaulich genutzte Böden aus Löss (AUERSWALD, 1993). Auslöser von Verschlammung sind nach ROTH et al. (1995) Starkniederschläge mit einer Intensität von mindestens 5 mm/h.

Einen guten Überblick über den Einfluss des *Bodenbedeckungsgrades* auf Verschlammung geben ebenfalls ROTH et al. (1995): Beregnungsversuchen im Labor zufolge tritt eine nennenswerte Abnahme der Infiltrationsrate erst unterhalb eines Bodenbedeckungsgrades von 0,55 (entspricht 55 % Bodenbedeckung) auf. Da bei diesen Versuchen mit einer extremen Intensität von ungefähr 40 mm/h beregnet wurde, kann dieser Bodenbedeckungsgrad bereits als Obergrenze für Verschlammung aufgefasst werden. Eine weitere von ROTH et al. zitierte Untersuchung im *Hangmaßstab* zeigt, dass ein Teil des lokal in verschlammten Bereichen gebildeten Oberflächenabflusses hangabwärts an vor Verschlammung geschützten Stellen wieder infiltriert. Dieser Effekt tritt erst unterhalb von Bodenbedeckungsgraden von 0,3 in den Hintergrund.

Über die Stärke der Abnahme der *hydraulischen Leitfähigkeit* durch Verschlammung gibt sehr unter-

schiedliche Angaben. HELMING (1992) nennt als Größenordnung für die Abnahme der Leitfähigkeit durch Verschlammung einen Faktor 10. Eine in ROTH et al. (1995) beschriebene Untersuchung gibt für eine Parabraunerde aus Löss bei Verschlammung eine hydraulische Leitfähigkeit von etwa $2 \cdot 10^{-7}$ m/s an. Gegenüber der Leitfähigkeit typischer Lössböden in der Bodentabelle von WASIM-ETH stellt dies eine Abnahme um einen Faktor 3 dar. Unterhalb der Verschlammungsschicht entsteht Unterdruck, der eine Sogwirkung auf infiltrierendes Niederschlagswasser ausübt. Aus diesem Grund liegen die Infiltrationsleitfähigkeiten verschlammter Böden in der Regel um einen Faktor 10-20 über der Leitfähigkeit der Verschlammungsschicht allein.

Die für WASIM-ETH I entwickelte Verschlammungsroutine bewirkt zum einen eine *Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit* an der Bodenoberfläche bei der Berechnung der Infiltration. Zum anderen verschließen sich bei Verschlammung die Öffnungen der *Makroporen* an der Bodenoberfläche, so dass kein Niederschlagswasser mehr von der Bodenoberfläche her in die Makroporen eindringen kann (siehe *Kap. 5.5.1*). Kennwert für die Stärke der Verschlammung ist ein dimensionsloser sogenannter *maximaler Verschlammungsfaktor* mit einem Wertebereich von 0 bis 1. Dieser maximale Verschlammungsfaktor wird abhängig von der aktuellen Niederschlagsintensität und dem aktuellen Bodenbedeckungsgrad gegebenenfalls abgemindert. Die durch Verschlammung verringerte hydraulische Leitfähigkeit ergibt sich aus folgendem einfachen Zusammenhang:

$$k_{silt} = k_f \cdot C_{silt} \quad [\text{m/s}] \quad (5.10)$$

k_{silt}	Hydraulische Leitfähigkeit des verschlammten Bodens	[m/s]
k_f	Unverschlammte hydraulische Leitfähigkeit aus der Bodentabelle	[m/s]
C_{silt}	Aktueller Verschlammungsfaktor	[-]

Der maximale Verschlammungsfaktor C_{max} wird landnutzungsbezogen in der Steuerdatei des Modells definiert. Entsprechend dem oben gesagten und den bisherigen Erfahrungen mit der Verschlammungsroutine können hierfür Werte zwischen 0,3 und 0,1 oder darunter als realistisch angesehen werden.

Unterhalb einer Niederschlagsintensität von 5 mm/h und oberhalb eines Bodenbedeckungsgrades von 0,5 tritt im Modell keine Verschlammung auf, d.h. der aktuelle Verschlammungsfaktor ist dann 1. Ab einer Niederschlagsintensität von mehr als 10 mm/h sowie einem Bodenbedeckungsgrad von 0 verschlammte der Boden stärkstmöglich, d.h. der aktuelle Verschlammungsfaktor entspricht dann dem in der Steuerdatei festgelegten Maximalwert. Im Übergangsbereich zwischen den genannten Grenzwerten errechnet sich der aktuelle Verschlammungsfaktor wie folgt aus dem maximalen Verschlammungsfaktor sowie dem Mittelwert der Einflüsse von Niederschlagsintensität und Bodenbedeckungsgrad:

$$C_{silt} = C_{max} + 1 - C_{max} \cdot \frac{C_{cover} + C_{PI}}{2} \quad [-] \quad (5.11)$$

C_{silt}	Aktueller Verschlammungsfaktor	[-]
C_{max}	Maximaler Verschlammungsfaktor	[-]
C_{cover}	Verschlammungsfaktor des aktuellen Bodenbedeckungsgrades	[-]
C_{PI}	Verschlammungsfaktor der aktuellen Niederschlagsintensität	[-]

C_{cover} und C_{PI} ergeben sich aus einer linearen Beziehung, die in *Abb. 5.4*, S. 118 graphisch dargestellt ist.

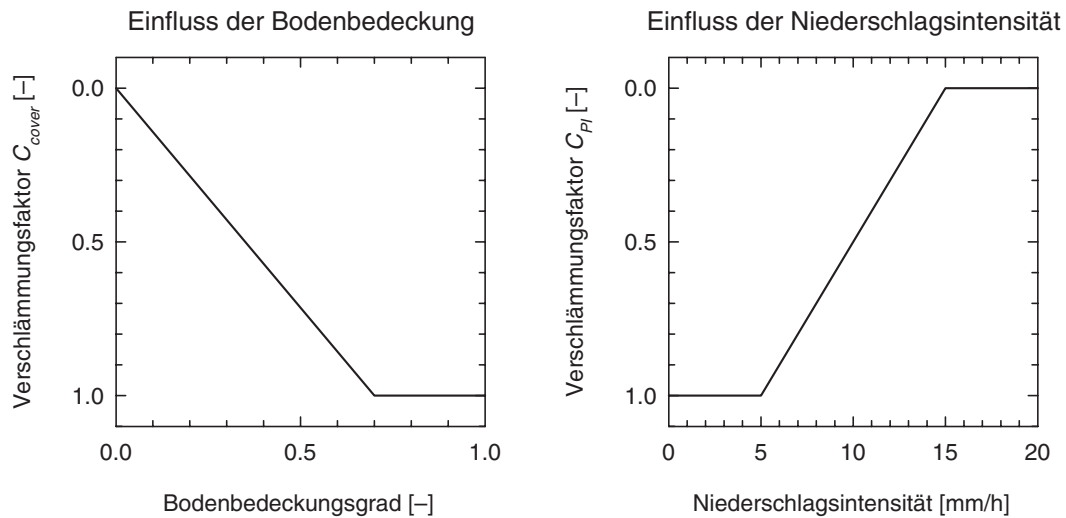


Abb. 5.4 Einfluss von Bodenbedeckung und Niederschlagsintensität auf die Ausprägung einer Verschlammungsschicht in der Verschlammungsroutine für WaSiM-ETH

Kommt es bei einem Starkregenereignis zur Verschlammung der Bodenoberfläche, so bleibt die Verschlammungsschicht bei geringer biologischer Aktivität im Extremfall bis zur Ernte erhalten (HELMING, 1992). Eine zwischenzeitlich durchgeführte Lockerung des Oberbodens hingegen zerstört eine Verschlammungsschicht. Da zur Entwicklung der Verschlammungsschicht meist keine Angaben verfügbar sind, wird im Modell analog zu einer Idee von SCHRÖDER (2000) behelfsweise davon ausgegangen, dass sich die Bodenoberfläche über einen längeren Zeitraum hinweg regeneriert, was mit folgender Beziehung ausgedrückt wird:

$$C_{silt}t_i = C_{silt}t_{i-1} + 0.01 \cdot \frac{\Delta t}{24} \cdot C_{silt}t_{i-1} \quad [-] \quad (5.12)$$

$C_{silt}(t_i)$	Aktueller Verschlammungsfaktor im laufenden Zeitschritt t_i	[-]
$C_{silt}(t_{i-1})$	Aktueller Verschlammungsfaktor im vorangegangenen Zeitschritt t_{i-1}	[-]
Δt	Größe eines Modellierungszeitschritts bezogen auf die 24 Stunden eines Tages	[h]

Ausgehend von einem Verschlammungsfaktor $C_{silt}(t_0) = 0,3$ ergibt sich aus Gl. 5.12, S. 118 mit dem gewählten Regenerierungsfaktor von 0,01 eine ungefähr vier Monate andauernde Regenerationsphase des Bodens nach einem Starkregenereignis. Die Re-

generationsphase endet spätestens mit der *Ernte*, deren Zeitpunkt sich aus der Phänologie der Landnutzung ergibt.

5.5.3 Versiegelung

Bisher werden in WASIM-ETH Siedlungsflächen im Bodenmodell als geringdurchlässige Böden mit geringer Speicherkapazität behandelt, um so deren mittleres Verhalten bei Niederschlägen abzubilden. Tatsächlich bestehen Siedlungsflächen zwar einerseits aus asphaltierten, gepflasterten oder überbauten Teilbereichen, deren Oberfläche nahezu keine Infiltration zulässt. Andererseits gibt es aber genauso auch Bereiche wie Grünstreifen, Gärten oder Parkanlagen, in denen gute Infiltrationsbedingungen und Bodenspeicherverhältnisse bestehen können. Ein Mittelwert aus diesen Teilbereichen überschätzt zwangsläufig den Einfluss der *versiegelten Flächen* auf die Abflussbildung bei Starkniederschlägen und unterschätzt zugleich die ausgleichende Wirkung von *Freiflächen* auf den Wasserhaushalt in Siedlungsgebieten.

Um diese Form der *Heterogenität* innerhalb einzelner Gitterzellen (*subgrid variability*) explizit beschreiben zu können, wird der auf Siedlungsflächen fallende Niederschlag entsprechend des *Versiegelungsgrades* einer Zelle auf einen versiegelten und einen unversiegelten Bereich aufgeteilt. Das Mo-

dellkonzept ist jedoch nicht an Siedlungsflächen gebunden, sondern ermöglicht auch die Berücksichtigung von Wegenetzen in landwirtschaftlich genutzten Bereichen, von Straßen außerhalb von Siedlungen sowie generell von kleinflächiger oder linienhafter Infrastruktur, die bei Maschenweiten des Landnutzungsgrids von 100×100 m und mehr meist der räumlichen Aggregation zum Opfer fällt.

Die Festlegung des Versiegelungsgrades einer Landnutzung erfolgt in der Landnutzungstabelle des Modells. Auf diese Weise können auch Siedlungsbereiche mit unterschiedlicher Bebauungsdichte voneinander unterschieden werden, insofern Angaben zu deren räumlicher Verteilung vorliegen.

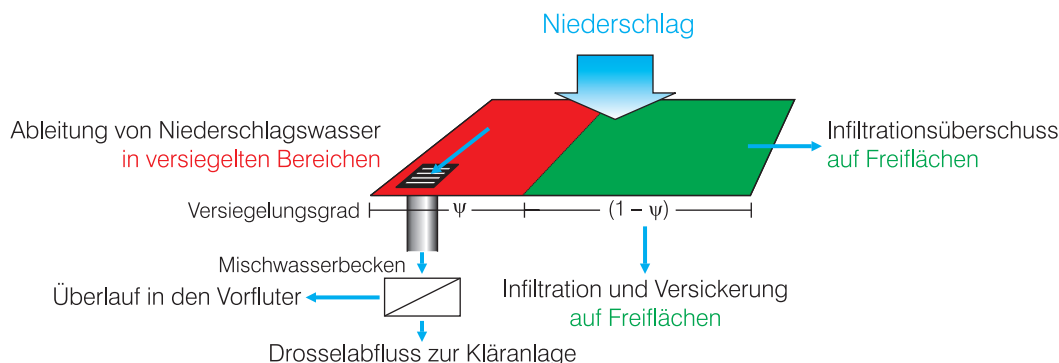


Abb. 5.5 Modellkonzept zur expliziten Berücksichtigung versiegelter und an die Kanalisation angeschlossener Bereiche innerhalb einer Gitterzelle

Wie Abb. 5.5, S. 119, zeigt, gelangt der auf versiegelte Teilflächen fallende Niederschlag, sofern ein Anschluss besteht, zunächst in die *Kanalisation*. Der auf Freiflächen fallende Niederschlag hingegen kann entsprechend der Bodenfeuchte und der Bodeneigenschaften entweder infiltrieren und versickern oder als Infiltrationsüberschuss unmittelbar zum Direktabfluss beitragen. Der Niederschlag auf unversiegelte Teilflächen einer Gitterzelle lässt sich deshalb wie folgt bilanzieren:

$$P \cdot (1 - \psi) = In_u + Ex_u \quad [\text{mm/h}] \quad (5.13)$$

P	Niederschlag auf eine Gitterzelle	[mm/h]
ψ	Versiegelungsgrad	[-]
Ex_u	Infiltrationsüberschuss auf unversiegelten Teilflächen	[mm/h]
In_u	In unversiegelten Teilflächen infiltrierendes Wasser	[mm/h]

Einfluss der Kanalisation

Niederschlag, der auf versiegelte Bereiche fällt, die im sogenannten *Mischsystem* entwässert werden, gelangt zusammen mit häuslichem und industriellem Abwasser in die *Kanalisation*. Wird dabei die

Transportkapazität des Kanalnetzes bzw. die Aufnahmekapazität einer Kläranlage überschritten, so wird das überschüssige Wasser an ein nahegelegenes Fließgewässer abgegeben. Um zu verhindern, dass auf diese Weise das am stärksten kontaminierte Gemisch aus verschmutztem Regenwasser und Abwasser vom Beginn eines Niederschlagsereignisses (auch Spülstoß genannt) ungeklärt einem Gerinne zugeführt wird, gibt es in der Kanalisation sogenannte *Mischwasserbecken*, die eine Zwischenspeicherung ermöglichen. Das in Mischwasserbecken gespeicherte Wasser wird über einen *gedrosselten Ablauf* verzögert an eine Kläranlage abgegeben. Überschreitet die Niederschlagsmenge sowohl die Kapazität des gedrosselten Ablaufs als auch das Aufnahmevermögen eines Mischwasserbeckens, so wird das überschüssige Niederschlagswasser über ein sogenanntes Entlastungsbauwerk nahezu ohne Verzögerung zum Gewässernetz (Vorfluter) abgeleitet. Diese Wassermenge trägt in der Folge genauso zum *Direktabfluss* bei wie Infiltrationsüberschuss auf Freiflächen (siehe Gl. 5.13, S. 119 und Gl. 5.14, S. 120).

Der Rückhalt, den Mischwasserbecken in versiegelten Bereichen bieten, wird im Modell durch

die mittlere *Speicherkapazität der Mischwasserbecken* SK_{max} und die *Transportkapazität des Drosselabflusses* q_{SK} aus diesen Becken charakterisiert. Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass der Teil des Wassers, der über den Drosselabfluss an die Kläranlage abgegeben wird, stark verzögert am Abflussgeschehen teilnimmt. Der Drosselabfluss in Richtung Kläranlage wird zu diesem Zweck vereinfachend an den *Basisabflussspeicher* abgegeben. Folgende Gleichung dokumentiert die beschriebene Aufteilung des Niederschlages in die Komponenten Speicherung, Drosselabfluss und Überlauf:

$$\begin{aligned} P \cdot \psi &= \Delta SK + q_{SK} \quad [\text{mm/h}] \quad \text{für } SK < SK_{max} \\ P \cdot \psi &= Ex_s + q_{SK} \quad [\text{mm/h}] \quad \text{für } SK = SK_{max} \end{aligned} \quad (5.14)$$

P	Niederschlag auf eine Gitterzelle	[mm/h]
ψ	Versiegelungsgrad	[-]
Ex_s	Überlauf in den Vorfluter	[mm/h]
ΔSK	Speicherzuwachs in den Mischwasserbecken	[mm/h]
SK	Aktueller Speicherinhalt der Mischwasserbecken	[mm]
SK_{max}	Speicherkapazität der Mischwasserbecken	[mm]
q_{SK}	Konstanter Drosselabfluss aus den Mischwasserbecken zur Kläranlage	[mm/h]

Richtwerte für SK_{max} und q_{SK} lassen sich aus den Bemessungsgrundlagen für Entwässerungssysteme im Arbeitsblatt A 128 der ABWASSERTECHNISCHEN VEREINIGUNG E.V. (1992) oder in BISCHOF (1993) ableiten. Für die Speicherkapazität von Mischwasserbecken kann danach ein Wert von 2 bis 3 mm angesetzt werden. Die Transportkapazität des Drosselabflusses für Niederschlagswasser bewegt sich abhängig vom aktuellen Abasseraufkommen in einer Größenordnung von 0,3 bis 0,6 mm/h (zur Parametrisierung siehe auch Kap. 5.5.6.2).

5.5.4 Dezentraler Rückhalt

Analog zur Interzeption sorgt der Rückhalt in Mulden, die durch Unebenheiten der Geländeoberfläche entstehen oder gezielt angelegt werden, für eine oberirdische Speicherung von Niederschlagswasser. Im Unterschied zur Interzeptionsspeicherung kann jedoch Wasser, das an der Bodenoberfläche gespeichert ist, mit Verzögerung versickern und so am Bodenwasserhaushalt teilnehmen. Der Begriff »dezentraler Rückhalt« ist als Überbegriff für natürliche

Hohlformen einerseits sowie gezielt angelegte Versickerungsmulden andererseits zu verstehen.

Ähnlich wie der in Kap. 5.5.1 eingeführte Makroporenspeicher *füllt* sich der dezentrale Rückhalt im Modell (1) mit *Infiltrationsüberschuss* aus dem Infiltrationsmodell sowie (2) mit *Sättigungsüberschuss*, der als *return flow* aus dem Boden austritt. Allerdings *füllt* sich der dezentrale Rückhalt erst dann, wenn die Aufnahmefähigkeit der Makroporen für Infiltrations- bzw. Sättigungsüberschuss erschöpft ist. Die Füllung des dezentralen Rückhalts wird ausschließlich von der *Speicherkapazität* des Rückhalts begrenzt, die in der Landnutzungstabelle des Modells definiert ist.

Die *Entleerung* des dezentralen Rückhalts erfolgt als Versickerung in die Bodenmatrix. Dabei füllen sich zunächst die pflanzenverfügbaren *Mittelporen* und anschließend die Mittelporen unterhalb der aktuellen Wurzelzone. Sind die Mittelporen gesättigt, so wird das infiltrierende Wasser an die *Grobporen* abgegeben. Ist der Boden insgesamt gesättigt, so verbleibt das Wasser im dezentralen Rückhalt. Die Versickerung von Wasser aus einem dezentralen Rückhalt wird im Modell durch die *hydraulische Leitfähigkeit der Bodenoberfläche* gesteuert. Diese wird unabhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit der Bodentabelle des Modells als Landnutzungsparameter festgelegt oder als Grid eingelesen. Damit wird bei natürlichen Hohlformen der frühkindlichen Erfahrung Rechnung getragen, dass am Boden einer Mulde sedimentiertes Feinmaterial auch bei sonst hoher hydraulischer Leitfähigkeit des Bodens eine schnelle Versickerung verhindert. In Bezug auf gezielt angelegt Versickerungsmulden bedeutet dies, dass das definierte Entleerungsverhalten des dezentralen Rückhalts unabhängig von den Bodeneigenschaften eines Pixels explizit berücksichtigt werden kann. Die Versickerung aus dem dezentralen Rückhalt in den Boden beginnt erst, wenn in einem Zeitschritt weder Infiltrations- noch Sättigungsüberschuss auftreten, da beide Größen Indikatoren für die Erschöpfung der Aufnahmefähigkeit der Bodenoberfläche darstellen.

5.5.5 Grundwasserentzug

Sind in einem Gebiet Grundwasserentnahmen oder ein Grundwasserabstrom am Durchflusspegel vorbei bekannt, so können diese Verlustglieder der

Wasserbilanz eines Einzugsgebietes bislang in WASIM-ETH I nur als *Ableitung* vom Gesamtabfluss des Gebietes abgezogen werden. Dies hat den Nachteil, dass (1) der Grundwasserentzug nicht auf Teileinzugsgebiete bezogen werden kann und (2) der Direktabfluss den Grundwasserentzug genauso speist wie der Basisabfluss.

Auch in der neuen Berechnungsroutine wird Grundwasser nicht direkt zellweise dem Speicher der gesättigten Zone entnommen, sondern dem *teilgebietsweise* zusammengefassten *Basisabfluss* entzogen, bevor dieser zu den anderen Abflusskomponenten eines Teileinzugsgebietes addiert wird.

Als *Randbedingungen* für den Entzug von Grundwasser in einem Teileinzugsgebiet dienen (1) eine *Mindestbasisabflussmenge*, oberhalb derer Wasser entzogen werden darf, (2) der *Anteil Basis-*

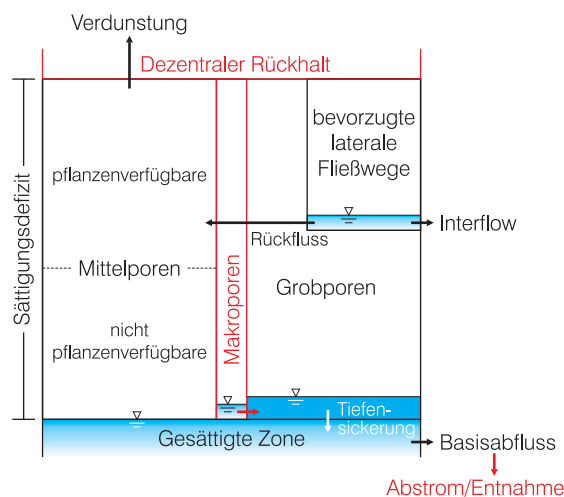
abfluss, der entzogen werden soll und (3) eine *maximale Wassermenge*, die pro Tag entzogen werden darf.

5.5.6 Übersicht über das erweiterte Bodenmodell

5.5.6.1 Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells

Alle vorgestellten Erweiterungen von WASIM-ETH I sind als *Zusätze* zum bisherigen Bodenmodell zu verstehen, dessen Funktionsweise in Abb. 5.2, S. 110 illustriert ist. Ein direkter Vergleich von Abb. 5.6, S. 121 mit Abb. 5.2, S. 110 zeigt die neu geschaffenen Möglichkeiten, die die Modellerweiterungen eröffnen.

(a) großes Sättigungsdefizit



(b) geringes Sättigungsdefizit

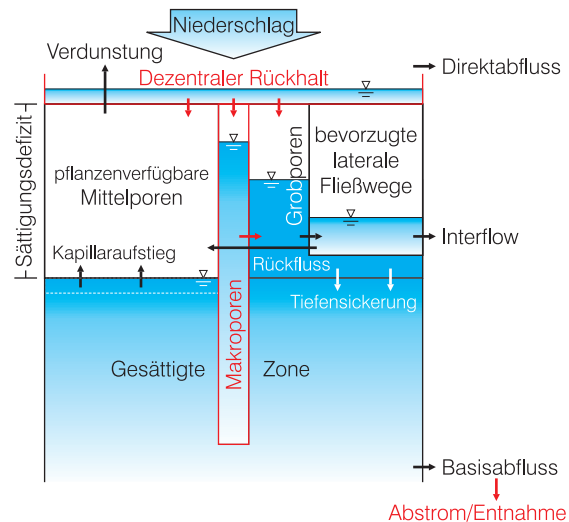


Abb. 5.6 Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells

Auf die Darstellung der Berücksichtigung von *sub-grid variability* in versiegelten Bereichen wurde in Abb. 5.6, S. 121 der Übersichtlichkeit wegen verzichtet. Gleiches gilt für die Wirkung von Verschlämmung auf die Füllung der Makroporen.

5.5.6.2 Parameterisierung der Modellerweiterungen

Neben der Prozesskenntnis und den wünschenswerten zusätzlichen Informationen zum Zustand der

Landoberfläche, die durch die Erweiterungen in die modellhafte Beschreibung der Abflussbildung eingebracht werden, ergibt sich aus den neuen Berechnungsroutinen auch eine Vergrößerung der *Modellunsicherheit*. Diese spiegelt sich am deutlichsten in den neuen Kenngrößen wider, die dem Modellanwender bei der Nutzung der Modellerweiterungen abverlangt werden. Eine Übersicht über die neu eingeführten Modellparameter, die mit Ausnahme der teilgebietsweise definierten Auslaufkonstante des Makroporenspeichers und den Parametern zum

Grundwasserentzug in der Landnutzungstabelle abgelegt sind, gibt Tab. 5.4, S. 122.

Tab. 5.4 Übersicht über die Parameter der Modellerweiterungen

Modellerweiterung	Parameter	Einheit	Bedeutung
Makroporen	n_{SM}	Vol.-%	Makroporosität
	d_{SM}	m	Tiefe, bis in die sich die Makroporen erstrecken
	k_{SM}	h	Entleerungskonstante des Makroporenspeichers
Verschlämmung	C_{max}	–	Maximaler Verschlämmungsfaktor
Versiegelung	ψ	–	Versiegelungsgrad
	SK_{max}	mm	Speicherkapazität von Mischwasserbecken
	q_{SK}	mm/h	Drosselabfluss aus Mischwasserbecken
Dezentraler Rückhalt	SR_{max}	mm	Speicherkapazität des Rückhalts
	k_{SR}	m/s	Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenoberfläche
Grundwasserentzug	QB_{min}	mm/d	Mindestbasisabflussmenge für GWentzug
	XT	–	Anteil Basisabfluss, der entzogen werden soll
	XT_{max}	mm/d	Maximale Menge, die entzogen werden darf

Insgesamt wurde darauf geachtet, die eingeführten Kenngrößen an messbaren Werten zu orientieren. Keine Rücksicht wurde hingegen darauf genommen, ob allgemeingültige Messungen für diese Kenngrößen in der Mesoskala existieren.

Tab. 5.5, S. 122 zeigt, wie die Parameter der Modellerweiterungen für das Einzugsgebiet der Lein parameterisiert wurden. Die anschließende Diskussion der neuen Parameter ist als Hilfestellung für die Parameterisierung des erweiterten Bodenmodells in anderen Einzugsgebieten gedacht.

Tab. 5.5 Landnutzungsabhängige Parameter der Modellerweiterungen am Beispiel der Parameterisierung für das Einzugsgebiet der Lein (Bezeichnungen siehe Tab. 5.4, S. 122)

Landnutzung	Makroporen		Verschlämmung	Dezentraler Rückhalt		Versiegelung
	n_{SM} [Vol.-%]	d_{SM} [m]	C_{max} [–]	SR_{max} [mm]	k_{SR} [m/s]	ψ [–]
Siedlung	0,2	1,0	1,0	0,5	$1 \cdot 10^{-8}$	0,35
Industrie	0,2	1,0	1,0	0,5	$1 \cdot 10^{-8}$	0,60
Flughafen	0,3	0,3	1,0	0,5	$1 \cdot 10^{-8}$	0,30
Abbaufäche	0,2	1,0	1,0	0,5	$1 \cdot 10^{-8}$	0,50
Grünfläche	0,4	1,0	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,10
Sportanlage	0,3	1,0	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,20
Wintergetreide	1,0	1,5	0,9	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Brache	1,0	1,5	0,9	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Blattfrüchte	1,0	1,5	0,9	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02

Landnutzung	Makroporen		Verschläm- mung	Dezentraler Rück- halt		Versiegelung
	n_{SM} [Vol.-%]	d_{SM} [m]	C_{max} [-]	SR_{max} [mm]	k_{SR} [m/s]	ψ [-]
Sommergetreide	1,0	1,5	0,9	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Wein	1,0	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Obst	1,0	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Wiese / Weide	1,2	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Parzellenstruktur	1,0	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Landw. / Natur	1,0	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,01
Laubwald	2,4	1,4	1,0	1,5	$1 \cdot 10^{-8}$	0,01
Nadelwald	2,0	1,0	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,01
Mischwald	2,2	1,2	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,01
Natürl. Grünland	2,0	1,5	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,02
Wald / Sträucher	2,0	1,2	1,0	1,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,01
Wasser / Feuchtfäche	0,0	0,0	1,0	0,0	$1 \cdot 10^{-8}$	0,0

Die *Makroporenparameter* n_{SM} und d_{SM} , aus denen sich die Speicherkapazität der Makroporen SM_{max} ergibt, lassen sich in ihrer Größenordnung aus Literaturwerten abschätzen, wie sie in Kap. 2.2.3.1 genannt werden. Danach liegt die Makroporosität meist unter 1 Vol.-%. 2 Vol.-% stellen nach diesen Angaben bereits einen sehr hohen Wert dar. Analog hierzu ist eine flächendeckende vertikale Erstreckung von Makroporen in eine Tiefe von mehr als 2 m in den allermeisten Fällen auszuschließen. Zur Interaktion zwischen Bodenmatrix und Makroporen gibt es jedoch kaum Angaben, weswegen die Auslaufkonstante k_{SM} des Makroporenspeichers auch eine sehr unsichere Größe darstellt. Kritisch daran ist, dass die Auslaufkonstante neben der Abgabe von Wasser an die Bodenmatrix auch steuert, ob innerhalb eines Zeitschritts kurzfristig über die Speicherkapazität der Makroporen hinaus Infiltrationsüberschuss aufgenommen und wieder abgegeben werden kann, was massive Auswirkungen auf den Einfluss der Makroporen im Modell hat.

Die Dynamik von *Verschlämmung* ist durch den *Bodenbedeckungsgrad* und die *Niederschlagsintensität* vorgegeben. Deren maximale Auswirkung auf die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenoberfläche von Ackerland wird jedoch über den ausgesprochen sensitiven Parameter C_{max} gesteuert, der den in Kap. 5.5.2 zitierten Studien zufolge zwischen 0,3 und 0,1 angesiedelt werden kann. Andere Studien

legen allerdings eine wesentlich größere Bandbreite für diesen Parameter nahe.

Als allgemein gebräuchliche urbanhydrologische Kenngröße ist der *Versiegelungsgrad* ψ ein klar definierter Parameter (siehe Kap. 2.2.2.2). Die digitalen Daten des Statistischen Bundesamtes zur Bodenbedeckung der Bundesrepublik Deutschland unterscheiden zwischen dichter Bebauung der Kernstädte, wo der Versiegelungsgrad ungefähr von 0,5 bis 0,9 reicht und lockerer Bebauung, für die ein Wertebereich von 0,1 bis 0,5 als realistisch angesehen werden kann. Die Angabe eines Versiegelungsgrades ist aber genauso auch für andere Landnutzungen sinnvoll. Wie in Kap. 2.2.3.2 bereits erwähnt, nehmen beispielsweise Wirtschaftswege im Bundesdurchschnitt ungefähr 1,5% der landwirtschaftlich genutzten Fläche ein.

Als wichtigste Einflussgröße für die Retention von Niederschlagswasser in der Kanalisation wird die Dynamik von Mischwasserbecken angesehen, deren Speicher- und Abgabeverhalten über die Parameter *Speicherkapazität* SK_{max} und *Transportkapazität* q_{SK} des Drosselabflusses für Niederschlagswasser gesteuert wird. Für die Speicherkapazität von Mischwasserbecken kann bezogen auf die an das Mischsystem angeschlossene Fläche ein Wert von 2 bis 3 mm angesetzt werden. Die Transportkapazität des Drosselabflusses aus Mischwasserbecken ist insgesamt – ebenfalls bezogen auf die angeschlosse-

ne versiegelte Fläche – in grober Näherung auf den zweifachen sogenannten Trockenwetterabfluss ausgelegt, der sich aus häuslichem und industriellem Abwasser sowie Fremdwasser, das z.B. in Form von Grundwasser in die Kanalisation eindringt, zusammensetzt. Dies gilt jedoch nur für Bereiche mit vorwiegend häuslichem Abwasser. Der Trockenwetterabfluss beträgt dort im 24-Stunden-Mittel in etwa 0,15 bis 0,3 mm/h. Welcher Anteil der Transportkapazität aber tatsächlich für die Ableitung von Niederschlagswasser zur Verfügung steht, hängt vom (in der Regel unbekannten) Abwasseraufkommen während des Niederschlagsereignisses ab. SIEKER et al. (1999) beispielsweise setzen als Näherungswerte für das Saarland eine mittlere Speicherkapazität SK_{max} von 2,5 mm und einen mittleren Trockenwetterabfluss von 0,25 mm/h an. Über den gedrosselten Ablauf können danach zusätzlich zum Abwasser im Mittel ungefähr 0,5 mm/h Niederschlagswasser (zweifacher Trockenwetterabfluss) an die Kanalisation abgegeben werden.

Die Wirkung von dezentralem Rückhalt wird durch die Parameter *Speicherkapazität* und *Infiltrationsleitfähigkeit* physikalisch fundiert charakterisiert. Die Parameterbestimmung für die Speichere Wirkung von Unebenheiten der Geländeoberfläche kann sich allerdings nur auf wenige Untersuchungen stützen. Die in Kap. 2.1.5.4 zitierten Angaben legen für SR_{max} einen großen Wertebereich von zwischen 1 und 10 mm nahe. Für die hydraulische Leitfähigkeit k_{SR} an der Bodenoberfläche einer Hohlform kann analog zur Verschlämmung eine Verminderung der hydraulischen Leitfähigkeit aus der Bodentabelle um eine Größenordnung angesetzt werden. Insgesamt ist der Parameter k_{SR} aber von eher untergeordneter Bedeutung, da die Entleerung des dezentralen Rückhalts ohnehin erst dann beginnt, wenn in einem Zeitschritt weder Infiltrations- noch Sättigungsüberschuss auftreten.

Die Parameter zur Erfassung von *Grundwasserentnahmen* oder eines *Grundwasserabstroms* sind Behelfsgrößen, die nur anhand ihrer Auswirkungen bestimmt werden können. Es empfiehlt sich daher, den modellierten Grundwasserentzug über mehrere Jahre hinweg zu bilanzieren und an Abschätzungen zu validieren, die oft bestenfalls als Jahressummenwerte vorliegen. Der Parameter XT sorgt dafür, dass der Grundwasserentzug proportional zur Basisabflussmenge ansteigt. Dies ist im Fall eines *Grund-*

wasserabstroms plausibel. *Grundwasserentnahmen* jedoch orientieren sich meist ausschließlich am Wasserbedarf, der vom Basisabfluss unabhängig ist. Aus diesem Grund sollte dem simulierten zeitlichen Verlauf des Grundwasserentzugs nicht zu viel Bedeutung beigemessen werden. Um die Dynamik der Basisabflussreaktion insbesondere bei Hochwasser nicht unbegründet zu überprägen, sollte außerdem XT_{max} nicht zu groß gewählt werden. Der Wertebereich für die Absolutwerte QB_{min} und XT_{max} richtet sich nach dem Wertebereich des Basisabflusses des betrachteten Einzugsgebietes.

5.5.7 Sensitivitätsanalyse für das erweiterte Bodenmodell

Als *Sensitivität* eines Modellparameters wird im Zusammenhang mit hydrologischer Modellierung die Stärke des Einflusses eines Parameters auf das Modellergebnis bezeichnet. Dass es das Wort Sensitivität nicht gibt, ist für Hydrologen unerheblich. Bei einer *Sensitivitätsanalyse* werden die Modellparameter variiert und die *Parameteränderungen* zu den dadurch hervorgerufenen *Änderungen des Modellergebnisses* in Beziehung gesetzt. *Sensitive/empfindliche* Parameter verändern das Modellierungsergebnis bereits bei kleinen Variationen des Parameters deutlich, *insensitive/unempfindliche* Parameter beeinflussen das Ergebnis hingegen kaum. SOROOSHIAN & GUPTA (1995) bezeichnen unempfindliche Parameter, die sich ohne wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis in weiten Grenzen variieren lassen, auch als schlecht definierte Parameter. Sensitivitätsanalysen dienen dazu, die Parameter zu identifizieren, die einen großen bzw. kleinen Einfluss auf das Modellergebnis ausüben. Desweiteren geben Sensitivitätsanalysen Aufschluss darüber, in welchem Wertebereich der Einfluss eines Parameters am größten bzw. kleinsten ist.

Leider hängt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse für ein hydrologisches Einzugsgebietsmodell nicht nur vom jeweils betrachteten Parameter ab, sondern auch von:

- (1) den Einzugsgebietseigenschaften sowie der räumlichen Auflösung der physiographischen Daten (BRASINGTON & RICHARDS, 1998).
- (2) den klimatologischen Randbedingungen sowie der zeitlichen Auflösung der meteorologischen

Daten (CRYER & HAVENS, 1999; KIM & DELLEUR, 1997).

- (3) den Werten, die für die anderen Modellparameter gewählt werden (SOROOSHIAN & GUPTA, 1995).

Aufgrund der sehr guten Datengrundlage wurde die Sensitivitätsanalyse für das Einzugsgebiet der Lein durchgeführt. Ein weiterer Vorteil des Leingebietes ist in diesem Zusammenhang, dass dort Hochwasser sowohl als Folge konvektiver Niederschläge mit hoher Intensität als auch als Folge langanhaltender advektiver Niederschläge entstehen, also unter verschiedenen *klimatologischen Randbedingungen* und aufgrund unterschiedlicher dominanter Abflussbildungsmechanismen. Die Analyse erfolgte auf der Basis von fünf konvektiven und sechs advektiven Starkregenereignissen, die zu Hochwassern mit Wiederkehrintervallen zwischen 2 und 8 Jahren führten.

Da die Modellerweiterungen und deren Parameter der verbesserten Beschreibung der Abflussbildung infolge von Starkregen dienen sollen, wurden für die Sensitivitätsanalyse ausschließlich Hochwasserereignisse modelliert. Die Parameter der Modellerweiterungen wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse innerhalb einer festgelegten Bandbreite stufenweise um den für den Ist-Zustand ermittelten Wert herum variiert, wie dies beispielsweise bei MUÑOZ-CARPENA et al. (1999) beschrieben ist. Die anderen Parameter wurden jeweils beim ermittelten Wert belassen. Aufgrund der Vielzahl von Parametern und der vergleichsweise langen Rechenzeit des Modells war es nicht möglich, die Sensitivität eines Parameters systematisch auch für verschiedene Kombinationen der *anderen* Parameter zu bestimmen, wie dies z.B. CRYER & HAVENS (1999) oder KIM & DELLEUR (1997) darstellen. Das Verhalten der an die Landnutzung gekoppelten neuen Parameter wurde nicht global, sondern jeweils für einzelne Landnutzungsgruppen wie z.B. Acker oder Wald untersucht und die Ergebnisse auf die gesamte Einzugsgebietsfläche *normiert*, um die Interpretation zu erleichtern.

Die Sensitivität der neuen Modellparameter wurde angesichts der grundsätzlich unterschiedlichen Abflussbildungsbedingungen für *konvektive* und *advektive* Ereignisse getrennt analysiert. Als

Maß für den Einfluss einer Parameteränderung auf das Modellergebnis dienen das *Abflussvolumen* und das *Abflussmaximum* während eines Hochwassers. Bezugspunkte für Abflussvolumen und -maximum wiederum sind die Simulationsergebnisse mit den *Parameterwerten*, wie sie für die Modellierung des Ist-Zustandes im Leingebiet bestimmt wurden. Für die Parameterwerte des Ist-Zustandes ist die Abflussänderung entsprechend Null.

5.5.7.1 Sensitivität der Makroporenparameter

Für die Sensitivitätsanalyse des Makroporenmoduls wurden die Landnutzungsparameter Makroporosität n_{SM} und Vertikalerstreckung der Makroporen d_{SM} entsprechend ihrer modellinternen Verwendung direkt zum *Makroporenvolumen* SM_{max} zusammengefasst und für die Ackerflächen variiert. Die *Speicherkonstante* des Makroporenspeichers k_{SM} , die teileinzugsgebietsbezogen definiert ist, wurde für das gesamte Gebiet verändert. Abb. 5.7, S. 126 illustriert die Abhängigkeit des Modellergebnisses von diesen beiden Größen. Die für den Ist-Zustand im Leingebiet ermittelten Parameterwerte sind jeweils schwarz gepunktet gekennzeichnet.

Aus der Reaktion des Modells auf ein verändertes *Makroporenvolumen* geht hervor, dass das *Vorhandensein* von Makroporen bei konvektiven Niederschlägen mit hoher Intensität einen erheblichen Einfluss auf das Infiltrationsverhalten und damit auch auf Abflussvolumen und -maximum hat. Oberhalb eines Mindestmakroporenvolumens von 5 bis 10 mm verliert die Kenntnis der exakten Größe des Makroporenvolumens an Bedeutung – vorausgesetzt dass die Abgabe von Wasser aus den Makroporen an die Bodenmatrix so rasch erfolgt, dass die Aufnahmefähigkeit der Makroporen für Niederschlag sich nicht erschöpft. Genauso gilt für die Entleerungskonstante des Makroporenspeichers, dass bei konvektiven Ereignissen oberhalb eines Wertes von 5 bis 6 h der Einfluss der Konstante auf das Ergebnis abnimmt, da intensive Niederschläge, die die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix überschreiten und dementsprechend nur von den Makroporen aufgenommen werden können, selten länger als 3 bis 4 Stunden andauern.

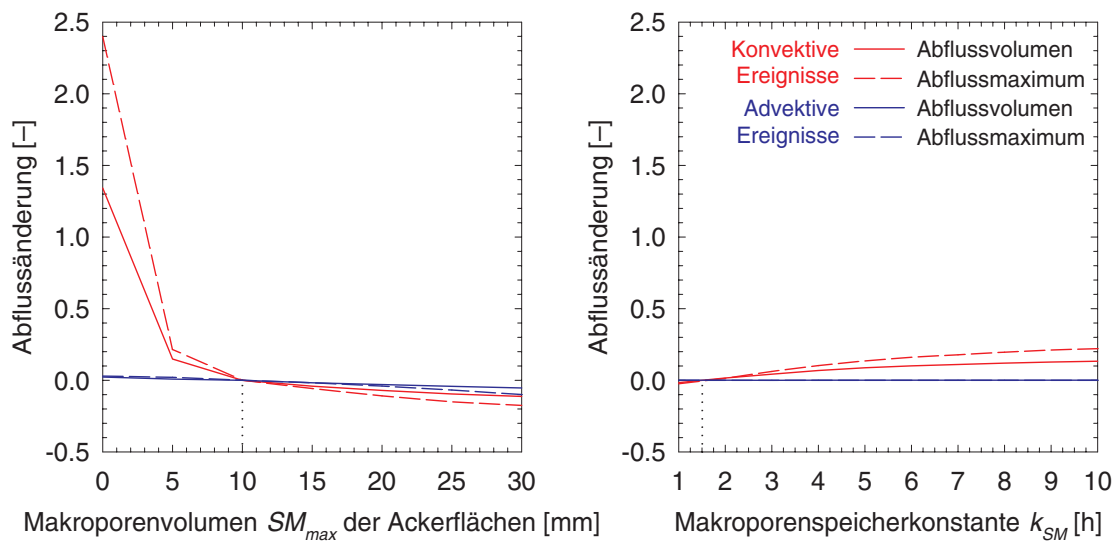


Abb. 5.7 Sensitivität des Makroporenvolumens (zusammengesetzt aus Makroporosität und Vertikalerstreckung der Makroporen) beziehungsweise der Makroporenspeicherkonstante

Während advektiver Niederschlagsereignisse mit oft hoher Vorfeuchte wird die Interaktion zwischen Makroporen und Bodenmatrix vor allem von der *Bodenfeuchte* bestimmt. Infiltrationsüberschuss ist aufgrund der vergleichsweise geringen Niederschlagsintensitäten von untergeordneter Bedeutung. Dementsprechend hat die Speicherkonstante des Makroporenraums hier auch nahezu keinen Einfluss auf das Modellergebnis. Gering ist aber auch der Einfluss des Makroporenvolumens. Der Makroporenraum füllt sich bei gesättigtem Boden von der Bodenmatrix her mit Wasser, nimmt dann jedoch kaum mehr an der Abflussbildungsdynamik teil.

5.5.7.2 Sensitivität der Verschlämmungsparameter

Das Auftreten von Verschlämmung ist im entwickelten Modellansatz an die Unterschreitung eines bestimmten *Bodenbedeckungsgrades* sowie die Überschreitung einer bestimmten *Niederschlagsintensität* geknüpft. Sind diese Bedingungen nicht er-

füllt und ist der Boden auch nicht mehr von einem vorangegangenen Ereignis verschlamm, so wird das Verschlammungsmodul übergangen. Da die im Leingebiet aufgezeichneten konvektiven Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten fast ausnahmslos im Juni und Juli auftraten, liegt der modellierte Bodenbedeckungsgrad nur für das Hochwasser vom September 1987 unter dem aus Literaturwerten abgeleiteten Schwellenwert. In Kombination mit üblichen Annahmen für den Rückgang der Durchlässigkeit an der Bodenoberfläche, wie sie bei Beregnungsversuchen ermittelt werden, ergibt sich durch die Verschlammung eine extreme Überschätzung dieses Hochwassers.

Wie das Diagramm auf der linken Seite von Abb. 5.8, S. 127 demonstriert, reagiert das Modell sehr sensitiv auf den *Verschlammungsfaktor* C_{max} , der den maximalen Rückgang der hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenoberfläche vorgibt. Das arithmetische Mittel aus fünf Ereignissen ohne Verschlammung und dem Ereignis vom September 1987 verwischt diesen Eindruck allerdings völlig.

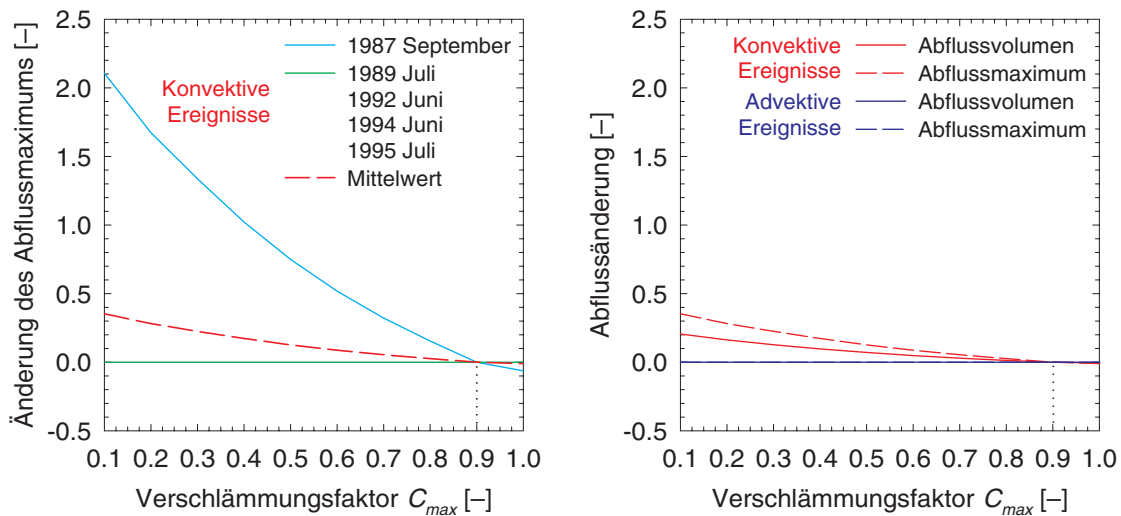


Abb. 5.8 Sensitivität des Verschlammungsfaktors für Ackerflächen

Die rechte Seite von Abb. 5.8, S. 127 zeigt den Mittelwert der *konvektiven* Ereignisse zusammen mit den für die *advectiven* Ereignisse berechneten Reaktionen. Aufgrund der deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten der advectiven Ereignisse wird der Schwellenwert für die Niederschlagsintensität nur während einzelner Zeitschritte geringfügig überschritten. Änderungen des simulierten Abflusses sind deshalb bei den advectiven Ereignisse trotz des geringen Bodenbedeckungsgrades in den Wintermonaten optisch kaum erkennbar.

5.5.7.3 Sensitivität der Versiegelungsparameter

Um dem unterschiedlichen Ausmaß von Versiegelung in Siedlungsgebieten und von Versiegelung durch landwirtschaftliche Infrastruktur Rechnung zu tragen, wurde der für jede Landnutzung definierte *Versiegelungsgrad* ψ bei der Sensitivitätsanalyse für Siedlungen und Ackerflächen getrennt variiert. Abb. 5.9, S. 128 zeigt die starke Sensitivität des Mo-

dells für Veränderungen des Versiegelungsgrades. Die Skalierung ist so gewählt, dass die Stärke der Abflussänderungen für beide Landnutzungen optisch direkt miteinander verglichen werden kann. Auf diese Weise wird deutlich, dass sich die Abflussänderungen in der selben Größenordnung bewegen. Dass Änderungen des Versiegelungsgrades sich auf den Ackerflächen stärker auswirken als in den Siedlungsbereichen, ist gebietsbedingt und hängt mit der gegenüber den Böden in Siedlungsgebieten tendenziell höheren hydraulischen Leitfähigkeit der Ackerböden zusammen, die dem Infiltrationsprozess durch Versiegelung entzogen werden.

Die simulierten Abflussänderungen sind wiederum für intensive konvektive Niederschlagsereignisse wesentlich ausgeprägter als für langanhaltende advective. Dieses Verhalten des Modells deckt sich mit der Erfahrung, dass kurze intensive Niederschläge die Kanalisation stärker belasten als ergiebige langanhaltende und dementsprechend auch eher zu einer Überlastung des Kanalnetzes sowie zur Abflussverschärfung führen.

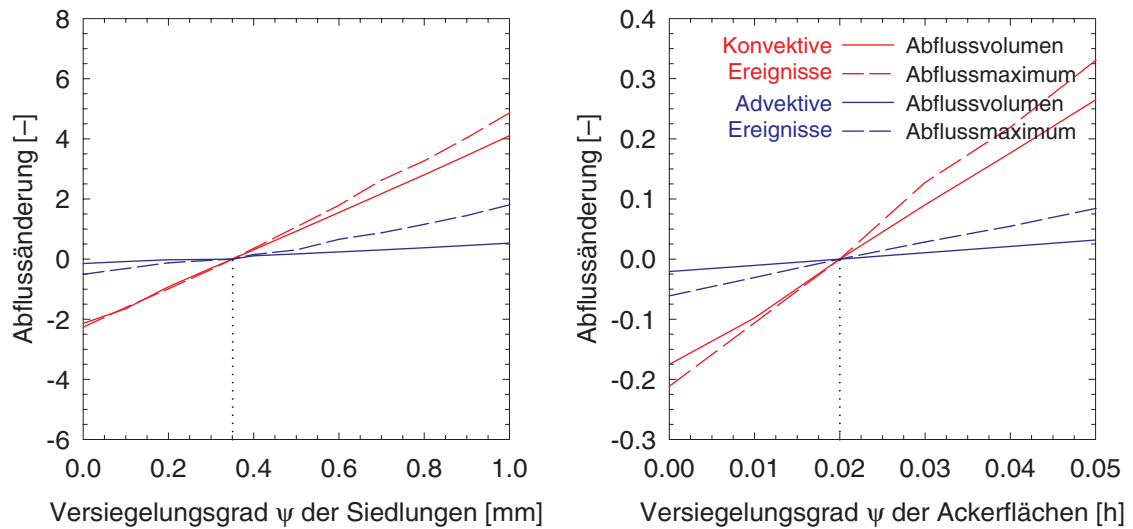


Abb. 5.9 Sensitivität des Versiegelungsgrades von Siedlungs- bzw. Ackerflächen

Die teileinzugsgebietsweise definierten Parameter zur Beschreibung des Ablauf- und Speicherverhaltens der Kanalisation q_{SK} und SK_{max} wurden jeweils

für das gesamte Einzugsgebiet verändert. Deren Sensitivität zeigt Abb. 5.10, S. 128.

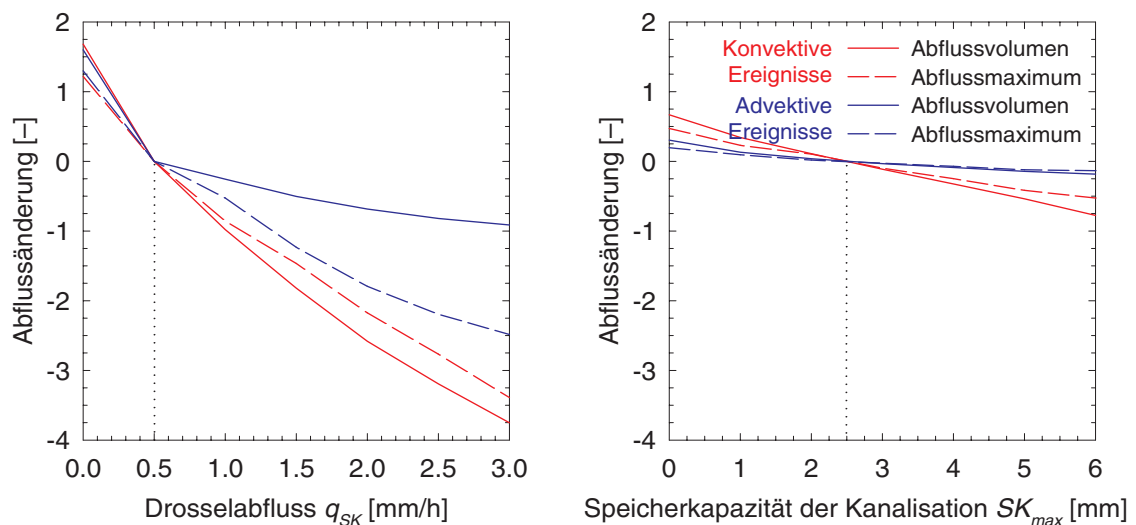


Abb. 5.10 Sensitivität des Drosselabflusses aus den Mischwasserbecken in Richtung Kläranlage und der Speicherkapazität der Mischwasserbecken

Während die Berücksichtigung des Drosselabflusses q_{SK} aus den Mischwasserbecken in Richtung Kläranlage einen fast durchweg großen Einfluss auf das Modellergebnis hat, bewirkt die Speicherung im Kanalnetz SK nur einen geringen Abflussrückgang,

der mit wachsender Niederschlagsmenge immer mehr an Bedeutung verliert.

Der vergleichsweise geringe Rückgang des Hochwasservolumens advektiver Ereignisse bei Erhöhung des Drosselabflusses ergibt sich daraus, dass bei langanhaltenden Hochwasserereignissen

auch das an eine Kläranlage abgeführte Wasser mit Verzögerung zum Hochwasser beiträgt.

5.5.7.4 Sensitivität des dezentralen Rückhaltes

Die *Speicherkapazität* des dezentralen Rückhaltes SR_{max} wurde für die Sensitivitätsanalyse getrennt für Acker- bzw. Waldflächen variiert. Deren Einfluss

wurde für natürliche Mulden untersucht, deren Untergrund häufig durch eingeschwemmte Schwebstoffe abgedichtet ist. Für die Darstellung solcher Mulden wurde deshalb eine mit $1 \cdot 10^{-8}$ m/s entsprechend geringe *hydraulische Leitfähigkeit* k_{SR} der Bodenoberfläche gewählt. Die in Abb. 5.11, S. 129 gezeigten Resultate der Sensitivitätsanalyse geben daher aber nicht das Infiltrationsverhalten gezielt eingerichteter Versickerungsmulden wieder.

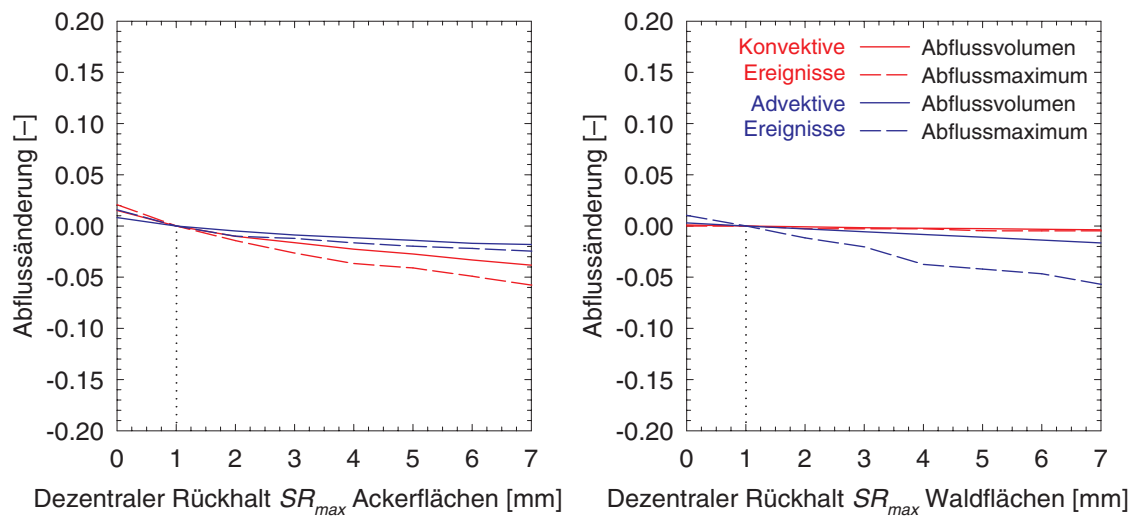


Abb. 5.11 Sensitivität der Speicherkapazität des dezentralen Rückhaltes

Der Einfluss des dezentralen Rückhaltes auf den Gebietsabfluss ist in Kombination mit einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenoberfläche insgesamt klein, da sich die Speicherfähigkeit des Rückhaltes nach Erreichen der Speicherkapazität aufgrund der langsamen Versickerung des gespeicherten Wassers in den darunterliegenden Boden nur langsam erneuert. Auffallend ist die unterschiedliche Reaktion des Modells auf eine Änderung der Speicherkapazität des dezentralen Rückhaltes von Acker- bzw. Waldflächen. Während der Rückhalt auf Ackerflächen vor allem auf die Abflussbildung *konvektiver* Ereignisse Einfluss nimmt, zeigt sich auf den Waldflächen eine nennenswerte Abflussänderung nur als Folge *advektiver* Niederschläge. Da sich Waldflächen im Leingebiet vor allem im Festgesteinsbereich mit geringmächtigen und gut durchlässigen Böden befinden, entsteht auf diesen Flächen selbst bei hohen Niederschlagsinten-

sitäten nahezu kein *Infiltrationsüberschuss*, der eine Füllung der Mulden bewirken würde. Bei langanhaltenden advektiven Niederschlägen mit hoher Vorfeuchte hingegen bildet sich in Gewässernähe bevorzugt *Sättigungsüberschuss*, der von den Mulden aufgenommen wird und so zu einer verringerten Abflussbildung führt. Die Ackerflächen im Gebiet sind vorwiegend Lössbereiche mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit und hohem Aufnahmevermögen für Niederschlagswasser. Hieraus resultiert eine im Vergleich zu den Waldflächen höhere Neigung zur Bildung von Infiltrationsüberschuss während konvektiver Ereignisse und eine geringere Neigung zur Sättigung des Bodens. Dieses Phänomen unterstreicht die Abhängigkeit der Parametersensitivität von den physiographischen Gebietseigenschaften sowie den meteorologischen Rahmenbedingungen.

5.5.7.5 Übersicht über die Sensitivität der neuen Modellparameter

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Bedeutung und Funktion verbietet sich ein direkter zahlenmäßiger Vergleich der Sensitivität aller untersuchten Parameter. Sinnvoll ist jedoch ein Vergleich der verschiedenen *Speicher*, die in das erweiterte WASIM-ETH integriert wurden, da sich diese Speicher ausschließlich durch die Art ihrer Füllung und Entleerung unterscheiden, nicht aber in deren interner Struktur. Bei allen drei Speichern – dem Makroporenspeicher *SM*, der Speicherung im Kanalnetz *SK* und dem dezentralen Rückhalt *SR* – handelt es sich um ein über eine Rasterzelle bzw. den versiegelten Anteil einer Rasterzelle gemittelt Volumen zur Aufnahme von Niederschlagswasser. Dass aber gerade das Füllungs- und Entleerungsverhalten den Einfluss eines Speichers auf das Modellergebnis bestimmt, illustriert Abb. 5.12, S. 130. Verglichen werden die Änderung von Abflussvolumen bzw. -maximum als Reaktion auf eine Erhöhung der jeweiligen *Speicherkapazität* um 1 mm. Der Vergleich bezieht sich auf den Wertebereich von 0 bis 5 mm Speicherkapazität. Die Darstellung ist ebenso

wie die bisherigen flächennormiert. Flächennormiert bedeutet, dass die Abflussänderungen vom Flächenanteil der jeweils betroffenen Landnutzungen auf die gesamte Einzugsgebietsfläche hochgerechnet wurden.

Als Folge der konstanten und vom *Feuchtezustand* des Gebietes *unabhängigen* Abgabe von Wasser aus den Mischwasserbecken der Kanalisation an eine Kläranlage ergibt sich für die Speicherkapazität der Mischwasserbecken eine hohe Sensitivität, da ständig neuer Speicherraum für weitere Niederschläge frei wird. Deutlich geringer ist bereits die Sensitivität des Makroporenraums, da Makroporen zwar bei hohen Niederschlagsintensitäten entstehenden *Infiltrationsüberschuss* rasch an die ungesättigte Zone weiterleiten und damit wieder Speicherraum freimachen. Bei *gesättigtem* Boden infolge langanhaltender Niederschläge jedoch können die Makroporen kein Wasser an die Bodenmatrix abgeben. Die Folgen eines gesättigten Bodens gelten umso mehr für natürliche Mulden, aus denen das gespeicherte Wasser aufgrund der durch abgesetzte Schwebstoffe meist geringdurchlässigen Bodenoberfläche ohnehin nur langsam in den Boden infiltrieren kann.

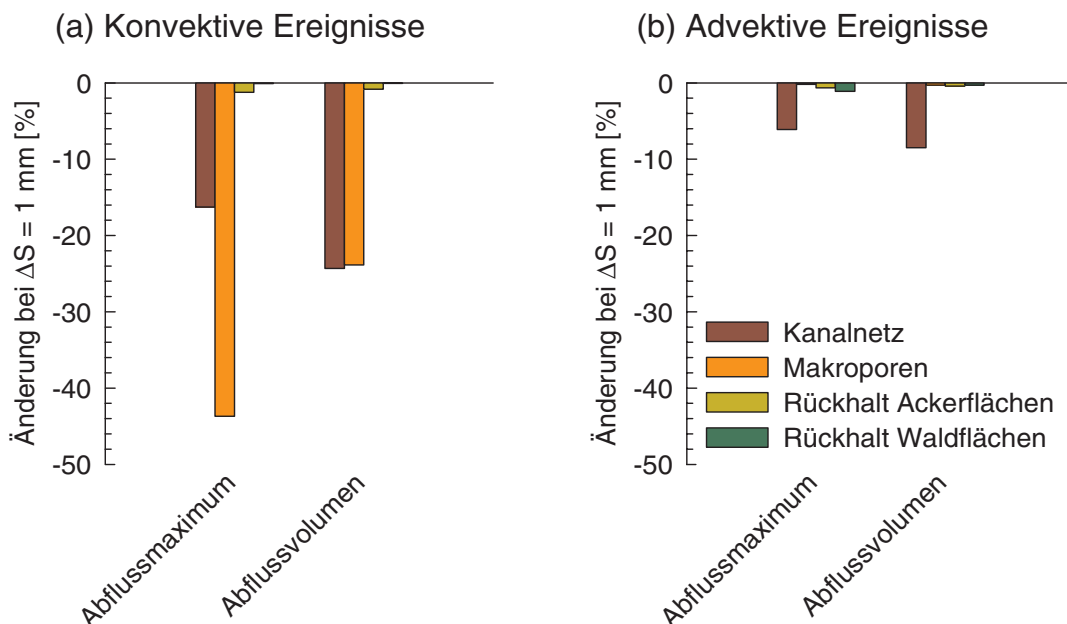


Abb. 5.12 Vergleich der Sensitivität verschiedener Speicher in Erweiterungen für das hydrologische Modell WaSiM-ETH

Tab. 5.6, S. 131 ist der Versuch, ungeachtet der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den neu hinzugekommenen Parametern, eine Übersicht über deren Sensitivität zu geben. Die Anmerkungen sind als Zugeständnis an diese Komplexität zu verstehen. Sie erschließen sich aus dem bisher in Kap. 5.5.7 beschriebenen.

Die Sensitivität fast aller Parameter ist für konvektive Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten bedeutend größer als für langanhaltende advektive Ereignisse mit hoher Vorfeuchte. Während advektiver Ereignisse sind vor allem die Parameter

zur Charakterisierung der Auswirkungen von Versiegelung wichtig, allerdings analog zu den anderen betrachteten Parametern mit abnehmender Tendenz bei wachsender Niederschlagsmenge und Ereignisdauer. Insgesamt gering ist die Sensitivität des dezentralen Rückhalts unter der Voraussetzung einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenoberfläche, wie sie in natürlichen Mulden vorherrscht. Für Versickerungsmulden mit besseren Infiltrationsbedingungen ist die Sensitivität des dezentralen Rückhalts höher.

Tab. 5.6 Übersicht über die Sensitivität der neuen Modellparameter bei unterschiedlichen klimatologischen Randbedingungen

Modellerweiterung / Parameter	Symbol	Sensitivität		Anmerkungen (*)
		konvektiv	advektiv	
Makroporen				
Makroporenvolumen	SM_{max}	+++*	–	Für 0 bis 5 mm Speichervolumen
Entleerungskonstante	k_{SM}	++*	–	Abhängig von der Ereignisdauer
Verschlämmung				
Verschlämmungsfaktor	C_{max}	+++*	–	ergibt unrealistische Resultate
Versiegelung				
Versiegelungsgrad	ψ	+++	+*	Abhängig von der Ereignisdauer
Speicherkapazität	SK_{max}	+++*	–	Für 0 bis 5 mm Speichervolumen
Drosselabfluss	q_{SK}	++	+*	Abhängig von der Ereignisdauer
Dezentraler Rückhalt				
Speicherkapazität	SR_{max}	–*	–	Für 0 bis 5 mm Speichervolumen bei schlechten Infiltrationsbedingungen

Neben dem modellspezifischen Verhalten der neuen Parameter lassen sich aus der Sensitivitätsanalyse aber auch allgemeingültige Zusammenhänge ableiten.

Abb. 5.12, S. 130 und Tab. 5.6, S. 131 machen deutlich, dass die Speicherung von Niederschlagswasser im Einzugsgebiet nur dann einen nennenswerten Einfluss auf die Hochwasserentstehung hat, wenn sie insbesondere bei konvektiven Ereignissen die Funktion eines kurzfristigen Zwischenspeichers während Phasen hoher Niederschlagsintensität er-

füllt oder wie im Falle der Makroporen den Zugang zu zusätzlichem Speicherraum erschließt. Ansonsten sind sehr große Speicherkapazitäten erforderlich, um die Hochwasserentstehung merklich zu beeinflussen.

Bei der Simulation von advektiven Hochwassern muss besonderes Augenmerk auf den Auswirkungen von Versiegelung liegen. Die Bedeutung der anderen vom Modell erfassten Einflüsse tritt dann in den Hintergrund.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

6.1 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG DES IST-ZUSTANDES

Aufgrund der sehr guten klimatologischen und hydrologischen Datenlage wurde das Einzugsgebiet der Lein genutzt, um exemplarisch Untersuchungen durchzuführen, die stellvertretend auch für die anderen beiden Gebiete Gültigkeit besitzen. Hierzu zählen die Entwicklung der Modellerweiterungen und die Sensitivitätsanalyse für die Parameter der Modellerweiterungen (siehe Kap. 5.5.7). Gleiches gilt für die in Kap. 6.2.2 beschriebene hydrologische Modellierung der als Sensitivitätsszenarien bezeichneten extremen Besiedlungsszenarien (Karte 6.1, S. 141). Sie dokumentieren die Fähigkeit des Modells zur Simulation von Landnutzungsänderungen sowohl bezüglich ihrer *Ausdehnung* als auch ihrer *räumlichen Lage*.

6.1.1 Lein

6.1.1.1 Vorgehensweise

Zunächst ist versucht worden, mit den beiden bestehenden Versionen von WASIM-ETH das hydrologische Verhalten des Einzugsgebietes der Lein im Ist-Zustand zu simulieren, und zwar einerseits die langfristige Entwicklung der Bodenfeuchte im *Tageszeitschritt* und andererseits die Hochwasserentstehung während extremer Niederschlagsereignisse im *Stundenzeitschritt*. Dabei hat sich gezeigt, dass die im *Tageszeitschritt* simulierten Bodenfeuchteverteilungen nur bedingt als Anfangsfeuchtwerte für einzelne Hochwasserereignisse zu gebrauchen waren,

da diese Anfangsfeuchtwerte sich aufgrund der *Nichtlinearität* der simulierten hydrologischen Prozesse deutlich von im *Stundenzeitschritt* simulierten Bodenfeuchteverteilungen unterschieden. Dementsprechend ließen sich auch keine Parameter für das Bodenmodell finden, die sowohl für Tages- als auch für Stundenzeitschritte Gültigkeit besessen hätten. Als Konsequenz hieraus wird auf systematische Langzeitsimulationen im Tageszeitschritt verzichtet. Stattdessen wird auch die Vorgeschichte der einzelnen Hochwasserereignisse im Stundenzeitschritt modelliert. Die Vorlaufzeit beträgt dabei abhängig vom Niederschlagsgeschehen im Vorfeld des Ereignisses bis zu zwei Monate.

Als problematisch hat sich außerdem erwiesen, dass sowohl die TOPMODEL-Version als auch die Richards-Gleichungs-Version des Modells die extreme Aufnahmefähigkeit von Lössböden für Niederschlagswasser nicht nachbilden konnten, da die tabellierte hydraulische Leitfähigkeit dieser Böden vergleichsweise gering ist und nicht dem tatsächlichen Aufnahmevermögen strukturierter Lössböden entspricht. Weiterhin ist der Beitrag der Siedlungsflächen zum Hochwasserabfluss aufgrund der Näherung, Siedlungsflächen als ausgesprochen geringdurchlässige Böden zu behandeln, bei weitem überschätzt worden. Diese Erfahrungen sind in die Entwicklung der in Kap. 5.5 beschriebenen Modellerweiterungen eingeflossen.

Das angestrebte Ziel, sämtliche ausgewählte Hochwasserereignisse mit *einem universellen* Para-

metersatz für das Bodenmodell zu simulieren, musste fallengelassen werden. Dies liegt darin begründet, dass der verwendete TOPMODEL-Ansatz die geomorphologischen Verhältnisse in der Lössregion Kraichgau nicht widerspiegeln kann, da die Topographie der Geländeoberfläche nur einen geringen Zusammenhang zum hydraulischen Gradienten der gesättigten Zone aufweist (siehe Kap. 5.3.5.1). Für konvektive Ereignisse ist der Beitrag unterirdischer

Fließprozesse an der Abflussbildung überschätzt, für winterliche zyklonale Niederschläge unterschätzt worden. Um diesem Dilemma zu entgehen, wurden die ausgewählten Hochwasser in konvektive und advective Ereignisse unterteilt und das Modell für beide Ereignischarakteristika getrennt kalibriert. Die Kalibrierung ist für jeweils zwei bzw. drei Ereignisse erfolgt, die übrigen Ereignisse dienten zur Validierung der gewählten Parametersätze.

Tab. 6.1 Güte der hydrologischen Simulationen für das Leingebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency nach NASH & SUTCLIFFE (1970)

Konvektive Ereignisse			Advective Ereignisse		
Zeitpunkt	Efficiency	lg-Efficiency	Zeitpunkt	Efficiency	lg-Efficiency
1987, September	0,89	0,86	1982, Dezember	0,89	0,80
1989, Juli	0,85	0,76	1983, Mai	0,77	0,71
1992, Juni	0,90	0,95	1988, März	0,83	0,83
1994, Juni	0,97	0,89	1990, Februar	0,92	0,76
1995, Juli	0,89	0,95	1993, Dezember	0,86	0,70
—	—	—	1997, Februar	0,93	0,85
Mittelwert	0,90	0,88	Mittelwert	0,87	0,78

Tab. 6.1, S. 134 dokumentiert die durchweg hohe statistische Güte der Anpassung des Modells an die gemessenen Hochwasser (siehe Kap. 5.4).

6.1.1.2 Simulationsergebnisse

Wie Abb. 6.1, S. 135 zeigt, tragen die verschiedenen Abflussbildungsmechanismen bei konvektiven und advectiven Niederschlagsereignissen auf ganz unterschiedliche Weise zur Hochwasserentstehung bei. Konvektive Niederschlagsereignisse sind im Leingebiet vor allem auf die Sommermonate mit tendenziell geringerer Bodenfeuchte beschränkt und

zeichnen sich durch hohe Niederschlagsintensitäten aus, welche die Entstehung von Direktabfluss aus Infiltrationsüberschuss und der Überlastung von Kanalisationssystemen begünstigen. Ergiebige advective Niederschlagsereignisse mit geringer Niederschlagsintensität treten insbesondere in Spätherbst und Frühjahr auf. Charakteristisch für diese Zeiträume ist eine tendenziell hohe Bodenfeuchte, die zu einer verstärkten Beteiligung unterirdischer Fließprozesse an der Hochwasserentstehung beiträgt, die Entstehung von Sättigungsflächen fördert und in der Folge zum vermehrten Auftreten von Sättigungsflächenabfluss führt.

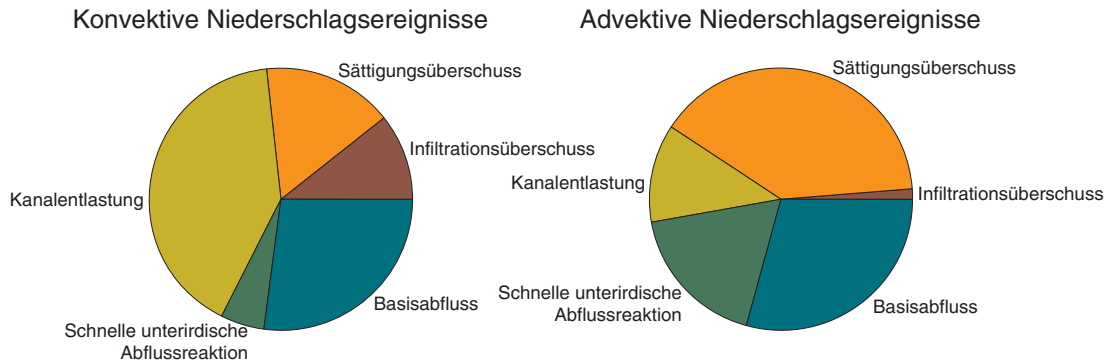


Abb. 6.1 Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Lein-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf fünf konvektive und sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren

Das Wissen um diese Zusammenhänge ist auch in die Modellkalibrierung eingeflossen, und die simulierten Abflusskomponenten sind dementsprechend zu einem Teil das Produkt dieses *subjektiv* in die Kalibrierung eingebrachten sogenannten Expertenwissens. Dies schränkt die Aussagekraft der Modellergebnisse insofern ein, als dass sich die simulierte *Aufteilung* der Abflusskomponenten nicht an gemessenen Daten überprüfen lässt. Von großem

Vorteil ist jedoch, dass die Modellstruktur es erlaubt, in anderen Gebieten experimentell gewonnene Erkenntnisse über die Wechselwirkung der verschiedenen Abflussbildungsmechanismen in die Simulationen einfließen zu lassen.

In Abb. 6.2, S. 135 ist beispielhaft für ein konvektives und ein advektives Niederschlagsereignis die Simulation zweier im Leingebiet aufgetretener Hochwasser dargestellt.

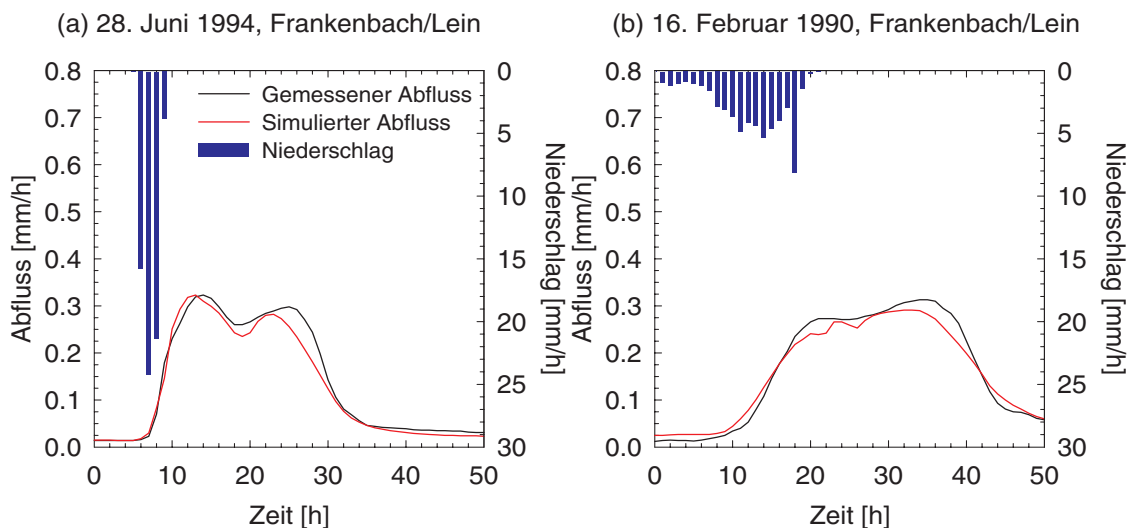


Abb. 6.2 Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Lein am Beispiel (a) eines konvektiven und (b) eines advektiven Niederschlagsereignisses

Diese Darstellung dient als Referenz für die nachfolgenden hydrologischen Simulationen verschiede-

ner Landnutzungsszenarien, die ebenfalls für diese beiden Ereignisse graphisch aufbereitet wurden.

6.1.2 Körsch

6.1.2.1 Vorgehensweise

Im Vergleich zur Lein ist die Datenlage in Bezug auf tägliche Niederschlagsdaten für das Körschgebiet schlecht. Dies gilt um so mehr für zeitlich hochauflösende Niederschlagsdaten. Lediglich zwei Niederschlagsstationen befinden sich im Gebiet selbst. Dementsprechend wurden für die hydrologische Modellierung etliche angrenzende Stationen hinzugezogen, unter denen sich auch mehrere Stationen mit hoher zeitlicher Auflösung befinden. Dieses

Manko wirkt sich insbesondere auf die Modellierung räumlich sehr heterogener und meist eng begrenzter konvektiver Ereignisse aus, was sich an der im Vergleich zur Lein geringen Güte der hydrologischen Simulationen für derartige Ereignisse ablesen lässt (siehe *Tab. 6.2*, S. 136). Desweiteren zeigen sich bei der Modellierung des stark verstärkten Körschgebietes die Grenzen einer vereinfachten Repräsentation versiegelter Bereiche mit Anschluss an die Kanalisation. Dies wirkt sich ebenfalls insbesondere auf die Simulation konvektiver Ereignisse mit ihrer hohen zeitlichen und räumlichen Dynamik und Heterogenität aus.

Tab. 6.2 Güte der hydrologischen Simulationen für das Körschgebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency nach NASH & SUTCLIFFE (1970)

Konvektive Ereignisse			Advektive Ereignisse		
Zeitpunkt	Efficiency	lg-Efficiency	Zeitpunkt	Efficiency	lg-Efficiency
1983, August	0,66	0,68	1982, Dezember	0,88	0,79
1985, Juli	0,59	0,74	1983, Mai	0,71	0,80
1986, April	0,74	0,87	1988, März	0,72	0,86
1992, Juli	0,96	0,83	1990, Februar	0,92	0,79
1995, Juli	0,64	0,83	1993, Dezember	0,92	0,90
—	—	—	1994, April	0,91	0,84
Mittelwert	0,72	0,79	Mittelwert	0,84	0,83

Neben den in *Tab. 6.2*, S. 136 dokumentierten Ereignissen wurden noch verschiedene andere im Sommerhalbjahr aufgetretene Ereignisse modelliert, deren Niederschlagsgeschehen sich anhand der Daten nicht eindeutig einem bestimmten Witterungstyp zuordnen ließ. Wie beim Leingebiet wurde das hydrologische Modell getrennt für konvektive und advektive Ereignisse kalibriert, wobei jeweils für alle simulierten konvektiven bzw. advektiven Ereignisse dieselben Parametersätze Verwendung fanden.

6.1.2.2 Simulationsergebnisse

Im betrachteten Zeitraum von 1980 bis 1996 sind an der Körsch keine bedeutenden Hochwasser aufge-

treten. Dementsprechend decken die simulierten Ereignisse auch nur ein kleines Spektrum möglicher Hochwasser ab.

Ein Vergleich der Abflusskomponenten, wie sie für verschiedene konvektive und advektive Ereignisse simuliert wurden (*Abb. 6.3*, S. 137), bestätigt die Zusammenhänge, die bereits für die Abflussbildung im Einzugsgebiet der Lein genannt wurden. *Infiltrationsüberschuss* entsteht fast ausschließlich während konvektiver Ereignisse, eine *Überlastung des Kanalnetzes* tritt ebenfalls insbesondere während Ereignissen mit hohen Niederschlagsintensitäten auf.

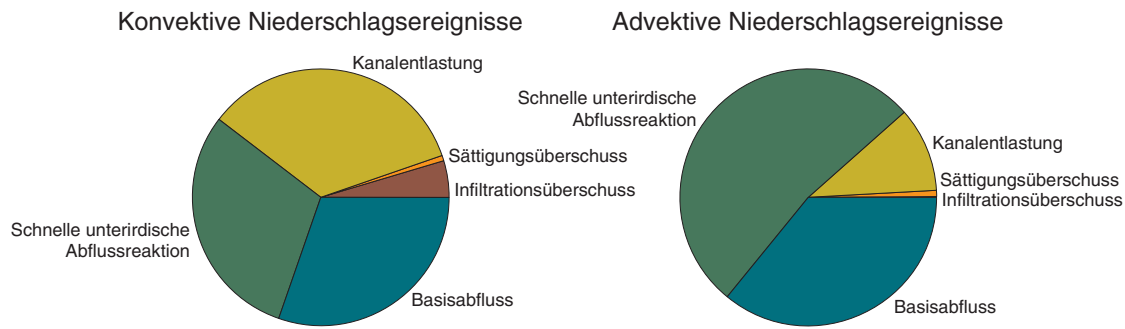


Abb. 6.3 Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Körorsch-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf fünf konvektive und sechs advective Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen einem und vier Jahren

Aufgrund der tendenziell größeren hydraulischen Leitfähigkeit der Böden sowie geringerer Niederschlagsintensitäten während der beobachteten konvektiven Niederschlagsereignisse ist der simulierte Anteil dieser Prozesse am Hochwasservolumen jedoch etwas geringer als im Leingebiet. Ein deutlicher Unterschied zwischen Lein und Körorsch besteht in der Aufteilung der unterirdischen Abflusskompo-

nenten sowie im Auftreten von Sättigungsüberschuss, welcher eng an die unterirdische Abflusssentstehung gekoppelt ist. Die Aufteilung der unterirdischen Abflusskomponenten durch das Modell wird jedoch stark von der zeitlichen Dynamik der Hochwasserreaktion bestimmt, was nicht zwingend Rückschlüsse auf die beteiligten Abflussbildungsprozesse zulässt.

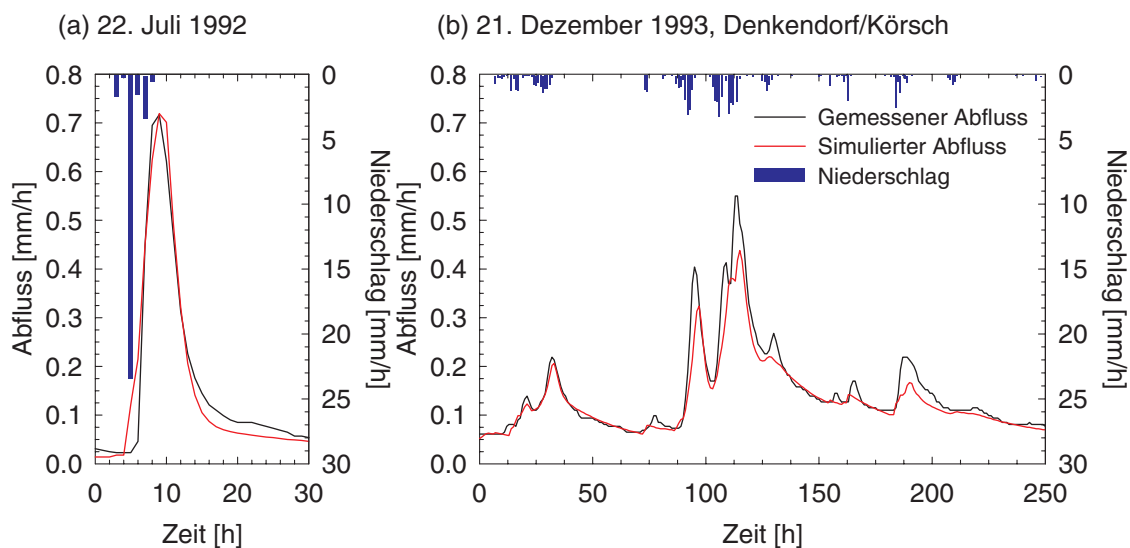


Abb. 6.4 Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Körorsch am Beispiel (a) eines konvektiven und (b) eines advectiven Niederschlagsereignisses

Zur Illustration der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung im Körorschgebiet wurden aus den simulierten Ereignissen zwei herausgegriffen, die einerseits vom Modell gut wiedergegeben werden und außerdem den

grundsätzlichen Unterschied zwischen der Hochwasserentstehung infolge intensiver Gewitterregen sowie langanhaltender zyklonaler Niederschläge verdeutlichen (siehe Abb. 6.4, S. 137).

6.1.3 Lenne

6.1.3.1 Vorgehensweise

Das Niederschlagsgeschehen im Einzugsgebiet der Lenne ist gut durch tägliche Niederschlagsdaten dokumentiert. Stündliche Daten liegen jedoch in digitaler Form nur an einer Station und für einen kurzen Zeitraum vor.

Dennoch wurden die Simulationen für das Lenne-Gebiet aus zwei Gründen im Stundenzeitschritt durchgeführt: zum einen, um eine Vergleichbarkeit mit den Simulationsergebnissen für die anderen beiden Einzugsgebiete zu gewährleisten und zum zweiten, um der hohen Dynamik der Abflussbildungsprozesse infolge von Starkniederschlägen gerecht zu werden. Hierfür wurden die täglichen Daten zeitlich disaggregiert. In dem Zeitraum, für den stündli-

che Daten vorlagen, geschah dies anhand der zeitlichen Verteilung dieser stündlichen Daten. Im restlichen Zeitraum wurde mangels besserer Information eine einfache dreieckige Verteilung der Niederschläge über den Tag hinweg angenommen. Die Ableitung des Maximums dieser Dreiecksverteilung erfolgte ebenfalls anhand der stündlichen Daten. Ein solches Vorgehen erscheint insofern zulässig, als dass die Hochwasserereignisse im betrachteten Zeitraum ausnahmslos die Folge langanhaltender advektiver Regenfälle mit tendenziell kleinen Niederschlagsintensitäten waren. Von Schneeschmelzprozessen dominierte Hochwasserereignisse wurden von den Berechnungen ausgeschlossen, da bei Vorhandensein einer mächtigen Schneedecke Aussagen über den Einfluss der Landnutzung auf die Infiltrationsbedingungen kaum möglich sind.

Tab. 6.3 Güte der hydrologischen Simulationen für das Lennegebiet berechnet als Efficiency beziehungsweise logarithmierte Efficiency nach NASH & SUTCLIFFE (1970)

Zeitpunkt	Efficiency	lg-Efficiency
1988, Dezember	0,84	0,93
1990, Februar	0,64	0,82
1990, Dezember	0,79	0,82
1991, Dezember	0,75	0,81
1993, Januar	0,84	0,82
1993, Dezember	0,78	0,90
1994, März	0,79	0,88
Mittelwert	0,78	0,85

Wie Tab. 6.3, S. 138 zeigt, spiegelt sich die im Vergleich zur Lein schlechtere Datenlage auch in einer geringeren Güte der Hochwassersimulationen wider. Die Niedrigwasserabflüsse werden der logarithmierten Efficiency zufolge vom Modell vergleichsweise gut wiedergegeben.

6.1.3.2 Simulationsergebnisse

Die innerhalb des Simulationszeitraums aufgetretenen mehrjährigen Hochwasser im Einzugsgebiet

der Lenne sind ausnahmslos auf langanhaltende advektive Niederschlagsereignisse mit hoher Vorfeuchte zurückzuführen – teilweise verbunden mit Schneeschmelze. Aufgrund der tendenziell geringen Niederschlagsintensitäten während solcher Ereignisse treten dabei die Infiltrationseigenschaften gegenüber den Eigenschaften des Untergrundes in den Hintergrund. Abb. 6.5, S. 139 veranschaulicht, dass dieser Zusammenhang vom hydrologischen Modell gut wiedergegeben wird.

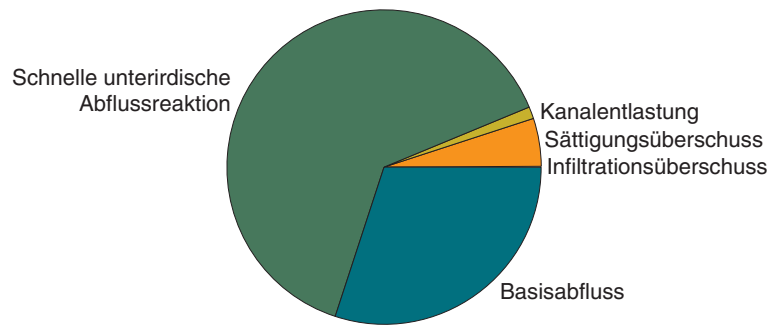


Abb. 6.5 Vom erweiterten hydrologischen Modell WASIM-ETH simulierte Abflusskomponenten für das Lenne-Einzugsgebiet als gemittelte Reaktion auf sieben advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren

Da die Morphologie des Lennegebietes von einer Kombination aus geringdurchlässigem Tongestein, meist deutlich durchlässigerem (peri-)glazialen Hangschutt und geringmächtigen Böden bestimmt wird, dominieren rasche, unterirdische Abflussreaktionen (siehe Kap. 3.4.2). Infiltrationsüberschuss

hingegen spielt den Simulationen zufolge aufgrund der guten Durchlässigkeit der Böden und der geringen Niederschlagsintensitäten während der betrachteten Ereignisse nahezu keine Rolle. Dementsprechend gering ist auch der Einfluss der Landoberfläche auf die Abflussbildung.

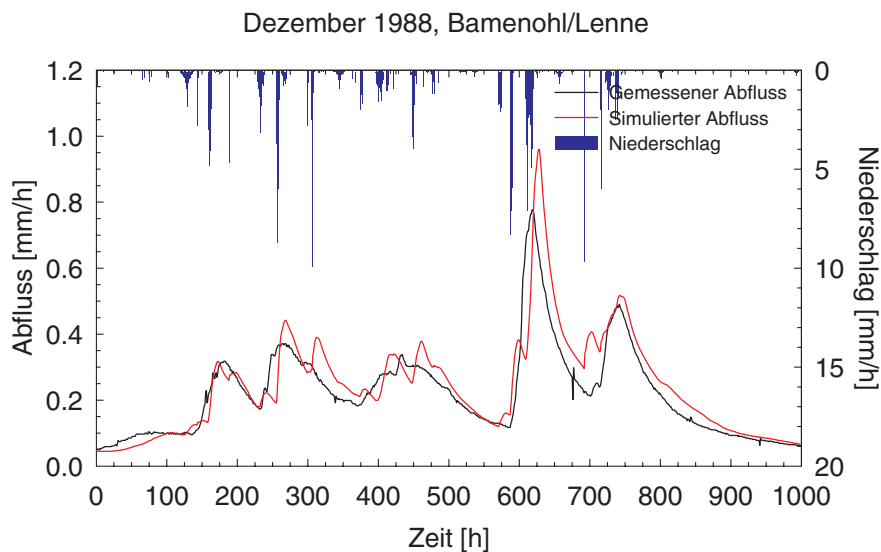


Abb. 6.6 Simulation von Hochwassern im Einzugsgebiet der Lenne am Beispiel eines advektiven Niederschlagsereignisses mit einer Jährlichkeit von etwa 2 Jahren

In Abb. 6.6, S. 139 ist beispielhaft die Simulation eines im Dezember 1988 an der Lenne aufgetretenen Hochwassers dargestellt. Ergiebige Niederschläge im Vorfeld des Hochwasserereignisses sorgten für eine sehr hohe Vorfeuchte im Gebiet, was eine starke Reaktion des Einzugsgebietes auf die neuerlichen Niederschläge um den 20. Dezember herum

(nach etwa 650 h) begünstigte. Dies erklärt auch den hohen Abflussbeiwert für dieses Ereignis von 0,63 (vgl. Tab. 3.5, S. 91). Dieses typische ›Weihnachts-hochwasser‹ war nur zu einem geringen Maß durch Schneeschmelze in den höheren Lagen des Gebietes beeinflusst.

6.2 EXEMPLARISCHE SENSITIVITÄTSSZENARIEN

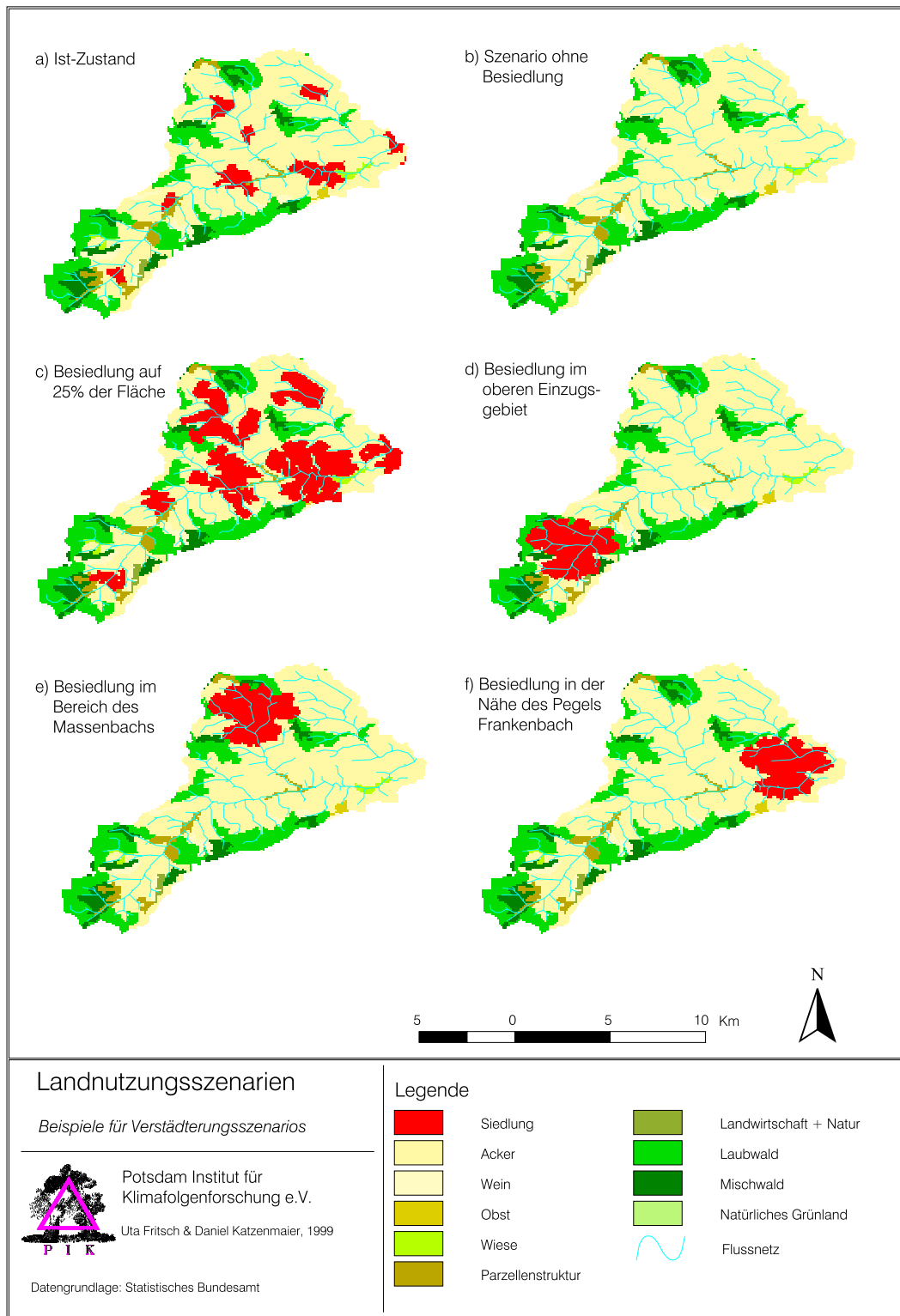
6.2.1 Szenarien für das Leingebiet

In der öffentlichen Diskussion wird häufig die steigende Versiegelung als eine der Hauptursachen für die Zunahme der Hochwasserentstehung genannt. Um den Einfluss der Größe und Lage von versiegelten Flächen innerhalb des Einzugsgebiets abschätzen zu können, muss zunächst geprüft werden, inwieweit sich diese Abhängigkeiten mit dem hydrologischen Modell darstellen lassen. Zu diesem Zweck bieten sich Sensitivitätsszenarien an, welche die Extreme ausloten und eine Lageabhängigkeit demonstrieren sollen. Dafür wurden sechs verschiedene Verstärkungsszenarien entworfen, die in *Karte 6.1*, S. 141 dargestellt sind. Bei diesen Szenarien wird zur Vereinfachung nicht zwischen Industriegebieten und Siedlung unterschieden, um den Einfluss der Bebauung auf die Hochwasserentstehung leichter interpretierbar zu machen.

Zwar unterscheiden sich diese beiden Landnutzungen im Versiegelungsanteil, haben aber im Vergleich zu den anderen Landnutzungen einen ähnli-

chen Effekt auf den Wasserhaushalt. Als Referenz für die einzelnen Szenarien dient der Ist-Zustand a). Das Szenario b) ohne Besiedlung kann Aufschluss über den Gesamteinfluss der Bebauung im Untersuchungsgebiet liefern. Außerdem dient es zur Quantifizierung des Versiegelungseinflusses insgesamt. Ein entgegengesetztes Extremszenario nimmt eine Verstärkung von über 25% der Fläche an. Dieses Szenario wurde mit Hilfe der in *Kap. 4.3* beschriebenen Technik erstellt. Der Versiegelungsgrad von 25% entspricht dem der Körsch und kann so für einen Vergleich der beiden Gebiete untereinander herangezogen werden. Die Szenarien d) bis f) sollen als didaktische Szenarien den Einfluss der Lage der Siedlung im Untersuchungsgebiet darstellen.

Dafür wurden Szenarien ohne Anwendung der Technik mit einer Beispielssiedlung erstellt, die entweder in obere Einzugsgebietsbereiche oder in der Nähe des Pegels platziert ist. Die Modellierungsergebnisse *Kap. 6.2.2.2* zeigen, inwieweit die Lageeffekte für die Hochwasserentstehung eine Rolle spielen.



Karte 6.1 Sensitivitätsszenarien für die Bewertung des Siedlungseinflusses für das Einzugsgebiet der Lein

6.2.2 Auswirkungen auf das Leingebiet

6.2.2.1 Ausdehnung der Siedlungsflächen

Abb. 6.7, S. 142 zeigt die hydrologischen Auswirkungen extremer Besiedlung (Karte 6.1, S. 141, Bild c), fehlender Besiedlung (Karte 6.1, S. 141,

Bild b) sowie der Besiedlung im Jahr 1844 (Karte 6.2, S. 146) im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustandes (Karte 6.1, S. 141, Bild a). Der Versiegelungsgrad von Siedlungspixeln und deren Zustand der Kanalisation sind für alle Simulationen identisch, wurden also für den Zustand im Jahr 1844 nur flächenmäßig an die historischen Verhältnisse angepasst.

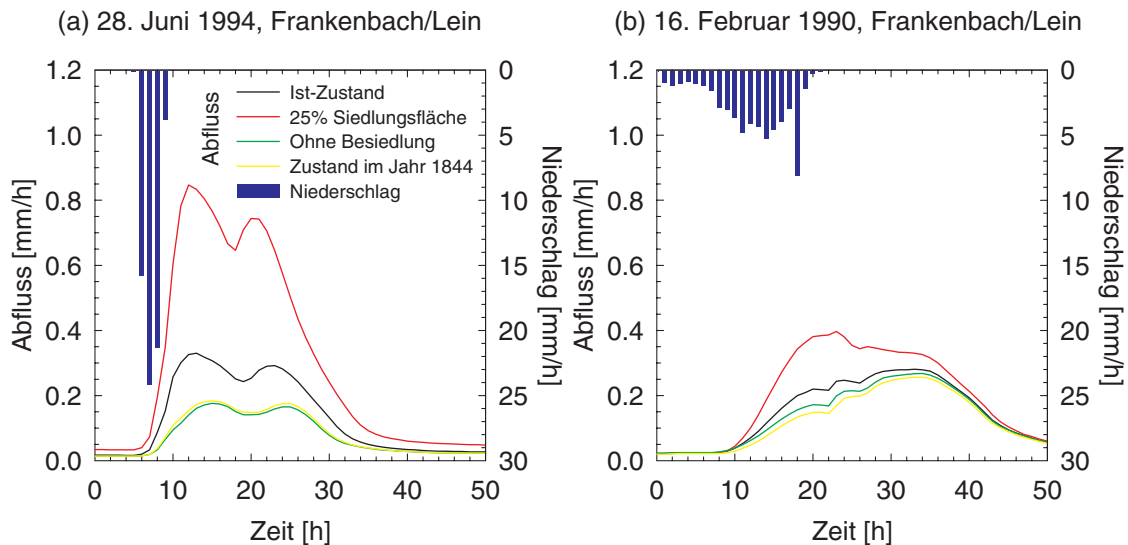


Abb. 6.7 Simulation der hydrologischen Auswirkung verschiedener Besiedlungsanteile im Einzugsgebiet der Lein beispielhaft für (a) ein konvektives und (b) ein advektives Niederschlagsereignis; Anteil der Siedlungsflächen am Einzugsgebiet 0,8% im Jahr 1844 und 7,4% (incl. Industrie) im Ist-Zustand

Die Simulationen zeigen zum einen die merkliche Verschärfung von Hochwasserereignissen bei einer Zunahme der Siedlungsfläche gegenüber dem fiktiven Zustand ohne Besiedlung. Zum anderen wird aber auch deutlich, dass diese Hochwasserverschärfung für sommerliche Starkregenereignisse hoher Intensität wesentlich ausgeprägter ist als für langanhaltende winterliche Niederschlagsereignisse mit geringer Niederschlagsintensität und hoher Vorfeuchte. Diese bekannten Zusammenhänge werden vom Modell plausibel wiedergegeben.

Der Einfluss von Siedlungsflächen auf die Hochwasserentstehung beschränkt sich aber nicht auf die tendenzielle Erhöhung von Abflussmaximum und Abflussvolumen, sondern drückt sich auch in einer Verschiebung des Anteils der verschiedenen Abflussbildungsmechanismen an der Hochwasserentstehung aus. Abb. 6.8, S. 143 zeigt diese

Veränderung anhand von Mittelwerten – wiederum getrennt für konvektive und advektive Ereignisse. Gemeinsam ist beiden Ereignistypen eine Zunahme der *Direktabflusskomponente* zuungunsten der *unterirdischen Abflusskomponenten*, womit langfristig auch eine Verringerung der Grundwasserneubildung einhergeht. Die Gründe für die Zunahme von Direktabfluss liegen einerseits im Anwachsen der an die Kanalisation angeschlossenen Fläche und damit verstärkter *Mischwasserentlastung* in den Vorfluter. Andererseits führen die innerhalb von Siedlungsbereichen häufig verdichteten Böden zu verstärktem *Infiltrationsüberschuss*. Außerdem zeigt sich, wie sehr die Entstehung von Sättigungsflächen und *Sättigungsflächenabfluss* an das Vorhandensein *lateralen unterirdischen Abflusskomponenten* gekoppelt ist, da Siedlungsflächen hier ebenfalls einen Rückgang bewirken.

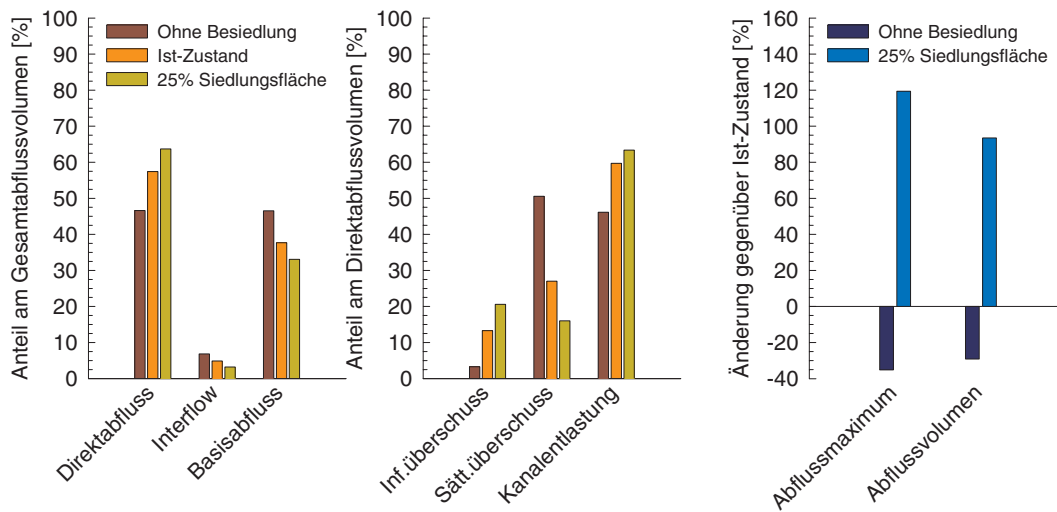
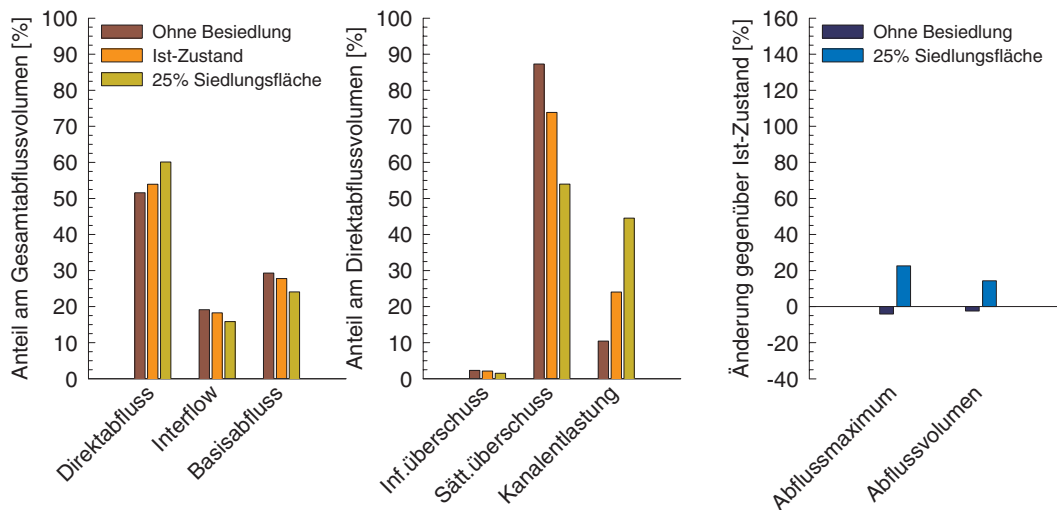
(a) Mittelwerte für *konvektive* Niederschlagsereignisse(b) Mittelwerte für *advektive* Niederschlagsereignisse

Abb. 6.8 Simulierte Auswirkung verschiedener Besiedlungsanteile auf die Anteile der Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Lein an der Hochwasserentstehung für (a) fünf konvektive und (b) sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren

Bedingt durch die *beschleunigte Abflusskonzentration* im Bereich von Siedlungsflächen verschärft sich – ebenfalls für beide Ereignistypen – das Abflussmaximum stärker als das Hochwasservolumen. Die-

se Verschärfung ist auch im Mittel für konvektive Ereignisse erheblich stärker als für advektive Ereignisse.

Tab. 6.4 Erhöhung von Hochwasservolumen und Abflussmaximum für die sechs ausgewählten advektiven Ereignisse bei Zunahme der Siedlungsfläche auf 25% der Einzugsgebietsfläche (sortiert nach der Stärke der Abflussverschärfung) und deren Zusammenhang zu Basisabflussanteil, Dauer und Wiederkehrintervall

Jahr, Monat	Erhöhung gegenüber dem Ist-Zustand		Simulierter Basisabflussanteil am Volumen [%]	Dauer [h]	Jährlichkeit ca. [a]
	Maximum [%]	Volumen [%]			
1990, Februar	41	26	18	150	2
1993, Dezember	38	20	17	250	8
1997, Februar	27	19	18	150	7
1982, Dezember	18	12	26	225	3
1983, Mai	8	8	38	300	4
1988, März	3	0,9	50	650	3
Mittelwert	23	14	28	290	4,5

Ein anderer wichtiger Zusammenhang ergibt sich aus der Gegenüberstellung der betrachteten advektiven Ereignisse. Werden die Ereignisse – wie in Tab. 6.4, S. 144 dargestellt – nach den Auswirkungen der Siedlungszunahme auf den Abfluss sortiert, so zeigt sich für die zur Verfügung stehenden Ereignisse unterhalb einer Jährlichkeit von zehn Jahren:

- (1) Es besteht eine starke Korrelation zwischen den Auswirkungen und der *Ereignisdauer* sowie dem *Basisabflussanteil*. Sowohl die Dauer als auch der Basisabflussanteil sind indirekte Indikatoren für eine ausgedehnte Periode ergiebiger Niederschläge mit der Folge eines hohen Sättigungsgrades im Einzugsgebiet.
- (2) Es existiert nahezu kein Zusammenhang zwischen den Auswirkungen und der Größe des *Abflussmaximums* bzw. der *Ereignisjährlichkeit*.

Das bedeutet aber auch, dass die Hochwasserereignisse von 1983, 1988 und 1990 im *Leingebiet* auf ganz unterschiedliche Weise zu den entsprechenden Hochwassern im *Rheingebiet* beigetragen haben:

- (1) Das Ereignis im Februar 1990 unterscheidet sich mit 10,0 m³/s im Abflussscheitel nur unwesentlich von dem im Frühjahr 1988 mit 10,2 m³/s. Der simulierte *Einfluss der Landnutzung* (in diesem Fall der Siedlungszunahme) ist jedoch im einen Fall deutlich ausgeprägt und im anderen

Fall verschwindend gering. Dies ist auf den unterschiedlichen Sättigungsgrad des Einzugsgebietes zurückzuführen, der sich sowohl aus der *Vorgeschichte* als auch aus den *Niederschlagscharakteristika* des Ereignisses selbst ergibt.

- (2) Die *kleinen Jährlichkeiten* der Hochwasser im Leingebiet stehen *großen Jährlichkeiten* der katastrophalen Hochwasser im Rheingebiet gegenüber. Dies zeigt, dass die beliebte Argumentationskette »katastrophales Hochwasser – Böden gesättigt – Landnutzung spielt keine Rolle« nicht zwingend zutrifft, da sich katastrophale Hochwasserereignisse in großen Einzugsgebieten oft aus dem *ungünstigen Zusammenwirken* unspektakulärer kleiner Hochwasser in einer großen Zahl der Teileinzugsgebiete ergeben.

6.2.2.2 Lage der Siedlungsflächen

Abb. 6.9, S. 145 illustriert den Einfluss der *Lage* von Siedlungsflächen im Gebiet sowohl auf den zeitlichen Verlauf eines Hochwasserereignisses als auch auf die Abflussbildung. Die tatsächliche räumliche Verteilung der Siedlungsflächen (Ist-Zustand + 20% Siedlungsfläche, ohne Abb.) ist dabei einer Konzentration der Siedlungsfläche im oberen Teil des Gebietes (*Karte 6.1*, S. 141, Bild d), in der Mitte des Gebietes (*Karte 6.1*, S. 141, Bild e) sowie unten am Gebietsauslass (*Karte 6.1*, S. 141, Bild f) gegenübergestellt.

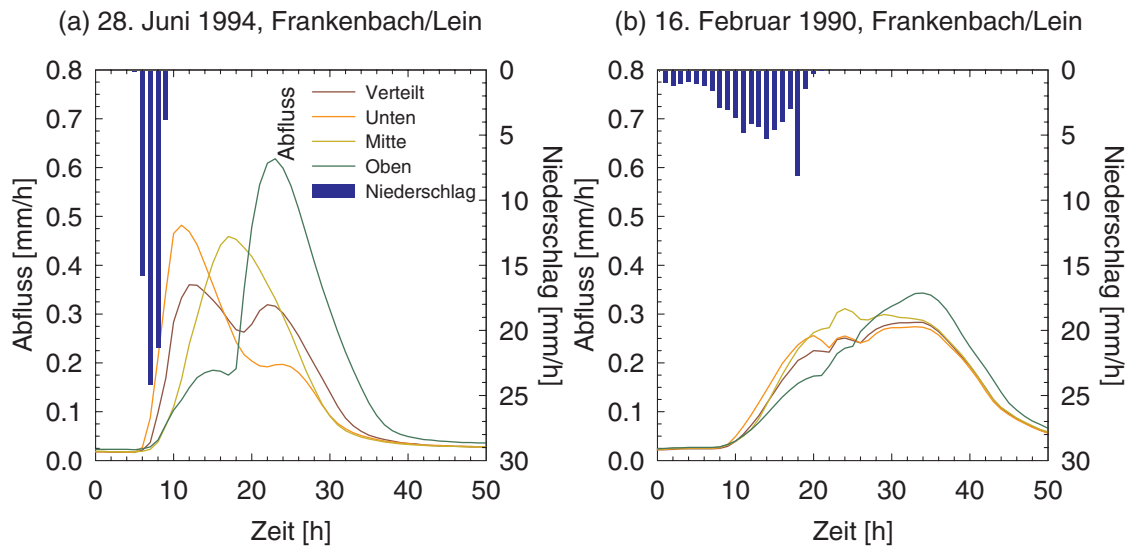


Abb. 6.9 Simulation der hydrologischen Auswirkung verschiedener räumlicher Verteilungen der Siedlungsflächen im Leingebiet beispielhaft für (a) ein konvektives und (b) ein advektives Niederschlagsereignis; Anteil der Siedlungsflächen am Einzugsgebiet in allen vier Szenarien circa 9%

Aufgrund der kurzen Dauer und hohen Intensität des ausgewählten konvektiven Ereignisses ist der Zusammenhang zwischen veränderter Siedlungsverteilung und dem Hochwasserverlauf auch hier wieder deutlicher ausgeprägt als für das advektive Ereignis. Neben einer zeitlichen Verlagerung und Verschärfung der Hochwasserspitze führt eine Konzentration der Siedlungsfläche im oberen Teil des Einzugsgebietes aber auch zu einer Zunahme des Abflussvolumens, wohingegen sich das Abflussvo-

lumen bei einer Konzentration der Siedlungsflächen im mittleren oder unteren Teil kaum ändert. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass sich das Zentrum des Gewitterniederschlags beim ausgewählten Ereignis im oberen Teilgebiet befand. Zum anderen werden durch eine fiktive Besiedlung im oberen Teilgebiet tendenziell durchlässigere Böden versiegelt als in den beiden anderen Fällen, so dass sich hier die negativen Auswirkungen der Versiegelung besonders stark bemerkbar machen.

6.3 HISTORISCHE LANDNUTZUNG

6.3.1 Lein

6.3.1.1 Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung

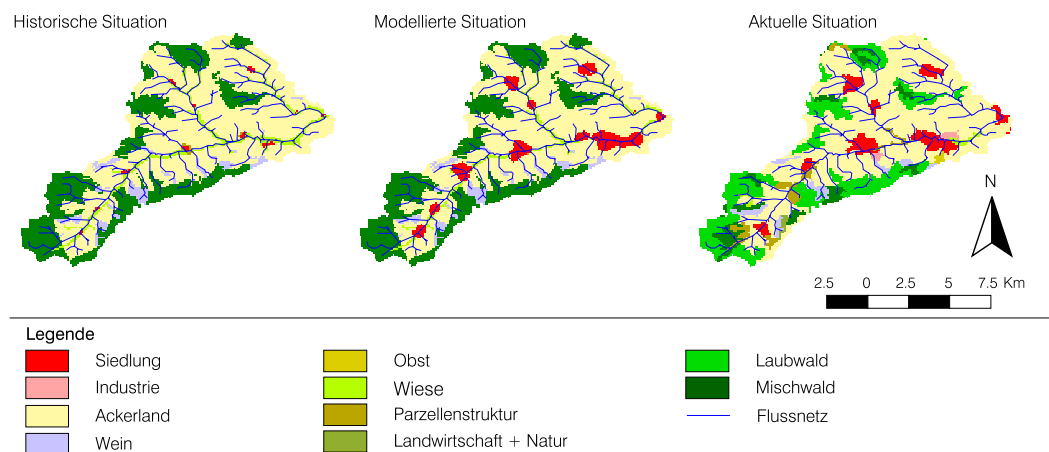
Die Modellierung der historischen Landnutzungsänderungen kann nicht zur Simulation der vollständigen Geschichte einer Landschaft dienen, weil komplexe geschichtliche Ereignisse wie z.B. Krieg und Landreformen nicht durch ein einfaches Rastermodell wiedergegeben werden können. Sie eignet sich vielmehr zu dem Zweck, die aktuellen Landnutzungsänderungen in einen historischen Kontext

zu stellen (VERBURG et al., 1999) und singuläre, lineare Entwicklungen zu simulieren.

Eine Validierung der in Kap. 4.2.1 beschriebenen Szenariotechnik erfolgte anhand historischer topographischer Karten. Die Anwendung der Siedlungserweiterungstechnik für die Modellierung der Versiegelung von 1844 auf den heutigen Stand stellt eine Validierung der Szenariotechnik dar. Als Datengrundlage dienten die im TOPOGRAPHISCHE ATLAS ÜBER DAS GROSSHERZOGTUM BADEN im Maßstab 1:50000 verzeichneten Landnutzungen aus dem Jahre 1844. Die Differenzierungsmöglichkeiten der verschiedenen Landnutzungen beschränken sich auf

die Kategorien Siedlung, Acker, Wein, Wiese, Kleingärten und Wald. Diese wurden digitalisiert und auf 100×100 m Pixelgrösse gerastert. Ein Vergleich zwischen der historischen Landnutzungskarte (siehe *Karte 6.2*, S. 146) und dem aktuellen Landnutzungsmuster der Lein zeigt eine annähernd unveränderte Verteilung von Acker und Waldbestand, begründet durch die hohe Bodenfruchtbarkeit in diesem Gebiet. Lediglich ein etwa 100 bis 150 m breiter Uferrandstreifen entlang des Flusslaufs unterscheidet sich von der heutigen Ackerfläche. Die heutigen Siedlungen existierten als kleine Dörfer in der direkten Nachbarschaft des Flusslaufs schon zum Zeitpunkt der historischen Aufnahme. Im Gegensatz zu heute unterschieden sich die Siedlungen untereinander kaum in der Größe. Ihr Flächenanteil am gesamten Einzugsgebiet lag 1844 bei 0,76%.

Da die naturräumlichen Bedingungen für die Verstädterung kaum Beschränkungen setzen, spielt die Eignungsbewertung hierfür nur eine untergeordnete Rolle. Als Eignungskriterium wurden deshalb lediglich die klassifizierte Hangneigung und eine Entwicklungsachse, die sich im Falle des Leingebiets am Mitte- und Unterlauf der Lein orientiert, verwendet. Bei der Kombination mit der Nachbarschaftsanalyse zeigte die Validierung, dass die Anforderung an die Anzahl bereits vorhandener Siedlungsnachbarn nicht zu hoch gesetzt werden darf, weil dies sonst zu einer unrealistischen kugelförmigen Entwicklung von Siedlungen führt. Deshalb wurde zunächst das Kriterium der benötigten Nachbarn bis auf zwei erforderliche Siedlungspixel gekürzt und anschließend das der Eignung.



Karte 6.2 Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Lein

Pixel auf der Entwicklungsachse wurden unabhängig vom Eignungsanspruch bevorzugt in Siedlung umgewandelt, sofern sie die Nachbarschaftsbedingung erfüllten. Mit diesen Randbedingungen der Verstädterungssimulation konnte der Siedlungszuwachs seit 1844 bis auf den heutigen Stand mit einer Korrelation von 0,5 nicht exakt, doch im Vergleich mit den heutigen Corinedaten zufriedenstellend nachgebildet werden, wie *Karte 6.2*, S. 146 beweist.

6.3.1.2 Hydrologische Simulation

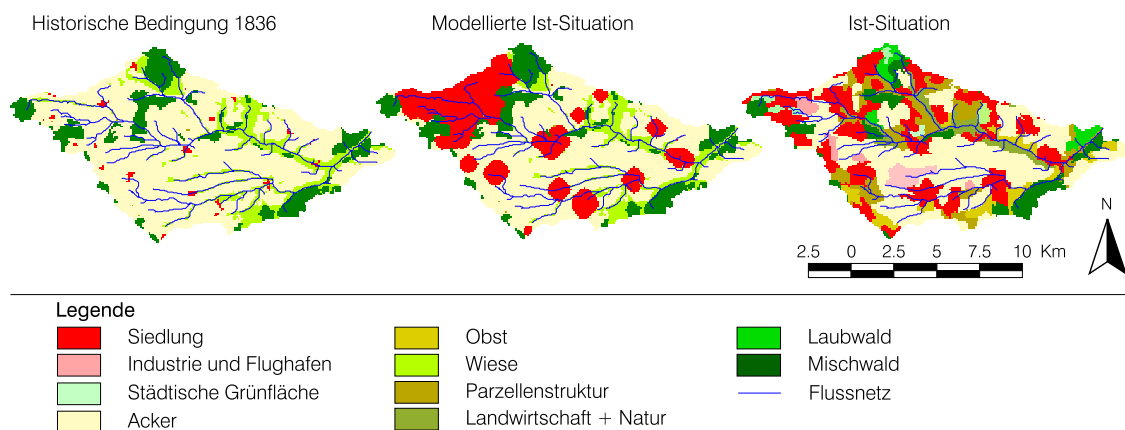
Das Ergebnis der hydrologischen Modellierung für den Zustand des Gebietes im Jahr 1844 wurde in *Kap. 6.2.2.1* im Zusammenhang mit den Sensitivitätsszenarien zum Einfluss der räumlichen Ausdehnung von Siedlungsflächen dargestellt.

6.3.2 Körsch

6.3.2.1 Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung

Für eine Validierung wurden die erkennbaren Landnutzungen der TOPOGRAPHISCHEN KARTE VON DEM KÖNIGREICHE WÜRTTEMBERG aus dem Jahre 1836 im Maßstab 1:50000 digitalisiert und auf $100 \times 100\text{m}$ Pixelgröße gerastert. Die historische Situation (siehe Karte 6.3, S. 147) zeigt, verglichen mit den heutigen Bedingungen, ein ähnliches Landnutzungsmuster von Acker- und Waldfläche. Die Siedlungsfläche hingegen nahm damals nur 1,3% der Einzugsgebietsfläche ein und bestand aus kleinen Dörfern, von denen aus die umliegenden fruchtbaren Böden bewirtschaftet wurden. Viele von die-

sen haben sich seitdem stark ausgebreitet und existieren heute als große Wohndörfer des verstärkten Raums Stuttgart. Die starke Besiedlung, die als Folge der Ausbreitung von Stuttgart im Nordwesten des Einzugsgebiets, statt gefunden hat, kann nicht alleine auf der historischen Datenbasis der Landnutzung modelliert werden. Die Keimzelle der Stadterweiterung liegt nicht im Untersuchungsgebiet und kann daher keinen Einfluss ausüben. Eine Modellierung auf dieser Basis bis auf das Niveau des heutigen Verstärterungsanteils setzt den Siedlungsschwerpunkt auf die Filderflächen. Deshalb muss die Entwicklung durch Achsen gesteuert werden. Dies wurde durch den Oberlauf der Körsch realisiert, der im Nordwesten die Siedlungsausbreitung für die Simulation begünstigt hat.



Karte 6.3 Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Körsch

Das Ergebnis der modellierten Ist-Situation zeigt die Tauglichkeitsgrenzen der Szenariotechnik. Da die Simulation eine Erhöhung der Versiegelung um 1800% der Anzahl der Siedlungspixel unter historischen Bedingungen darstellt, sinkt die Wahrscheinlichkeit, die aktuelle Verstärterungsverteilung zu treffen. Die Siedlungen müssen sich aus wenigen Zellen zu großen Dörfern ausbreiten und nehmen als Resultat der Szenariotechnik runde, unrealistische Formen an. Sind in der historischen Karte nur sehr kleine Siedlungen, dann werden sie von der Modellierung nicht erfasst und entwickeln sich nicht. Getreu dem Motto »wo nichts ist, kann auch nichts werden« fehlen Siedlungen, die in der histori-

schen Karte nicht vorhanden sind auch im Ergebnis der Modellierung. Während die Industriegebiete sich meistens an Siedlungen anschließen, werden sie durch die Modellierung so gut es geht abgedeckt. Der Flughafen hingegen ist keiner direkten Folgeentwicklung der Landnutzung entsprungen, sondern konkret geplant worden. Dieser Vorgang kann durch die Modellierung nicht nachempfunden werden. Obwohl etwa 55% des modellierten Ist-Zustands mit dem tatsächlichen Siedlungsmuster übereinstimmen, hat das Ergebnis durch die große zusammenhängende Siedlungsfläche im Nordosten und den übrigen fast kreisrunden Siedlungen, wenig Realitätsnähe. Die Validierung muss für die besonde-

ren Umstände des Untersuchungsgebiets und der enormen Wachstumsrate, als mäßig eingestuft werden. Einer Siedlungserweiterung vom heutigen Zustand in die Zukunft können deshalb bessere Ergebnisse prognostiziert werden, weil der Status quo der Verstädterung als Ausgangsbasis richtungsweisend und die Versiegelungserhöhung begrenzt sind.

6.3.2.2 Hydrologische Simulation

Die Entwicklung der Landnutzung im Körschgebiet seit 1836 ist vor allem von einer massiven Zunahme der Siedlungsfläche gekennzeichnet, die von 1,3 % der Einzugsgebietsfläche im Jahr 1836 auf ungefähr

25 % angewachsen ist. Hinzu kommen 4 %, die vom Stuttgarter Flughafen bzw. von Industrie eingenommen werden. Abb. 6.10, S. 148 zeigt deutlich, wie sehr die Verstädterung im Körschgebiet zu einer Abflussverschärfung im Bereich häufig auftretender konvektiver Ereignisse – hier im Juli 1992 – geführt hat. Gerade kurze und intensive Gewitterniederschläge sind prädestiniert für eine Überschreitung der Transportkapazität der Kanalisation und damit für eine »Entlastung« in ein nahegelegenes Fließgewässer, welche im Ist-Zustand für das gezeigte Ereignis fast die Hälfte des Hochwasservolumens ausmacht.

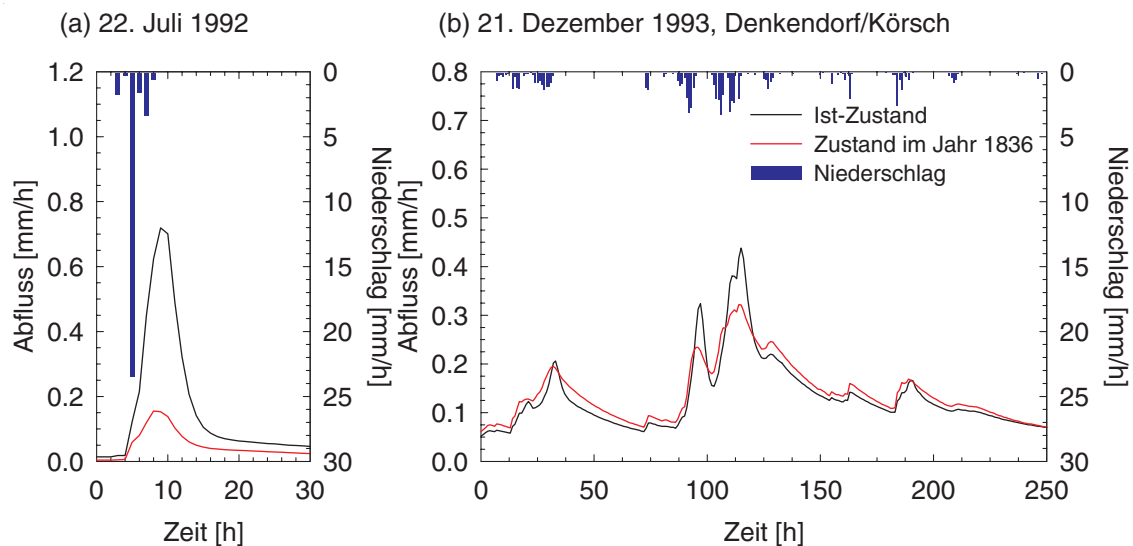


Abb. 6.10 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch mit der erweiterten Version von WASIM-ETH für den Ist-Zustand und einen historischen Zustand aus dem Jahr 1836

Der abflussverschärfende Einfluss der Siedlungsflächen ist aber auch für advective Ereignisse, wie das im Dezember 1993 aufgetretene, deutlich zu erkennen: Vor Erreichen des Hochwasserscheitels übt die Kanalisation im Ist-Zustand einen geringfügig hochwasserdämpfenden Einfluss aus. Dafür wird jedoch ein um etwa 25 % erhöhtes Hochwassermaximum simuliert – wiederum als Folge der Entlastung der Kanalisation in das Gewässernetz. Für advective Ereignisse mit größerer Jährlichkeit und hoher Vorfeuchte verliert dieser Effekt an Bedeutung für das Hochwasservolumen, da dann die Abflusssentstehung in unversiegelten Bereichen zunimmt.

6.3.3 Lenne

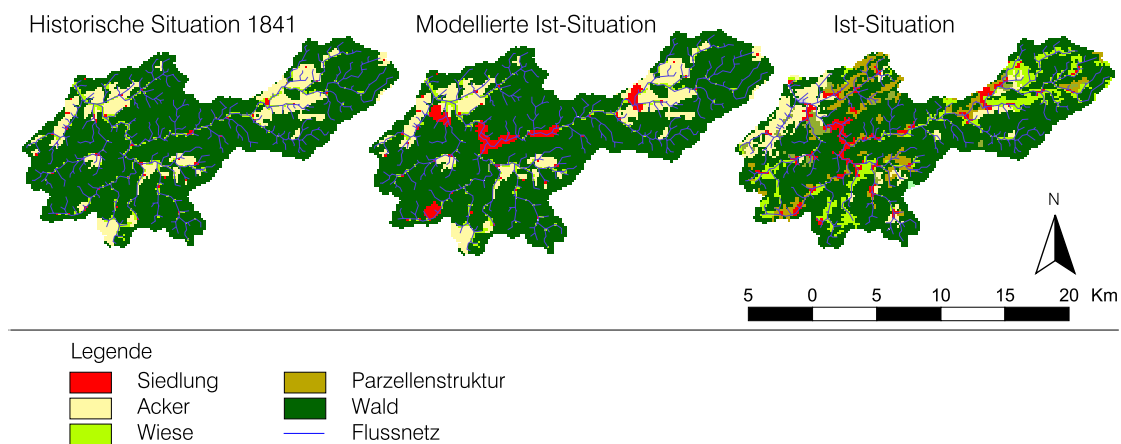
6.3.3.1 Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung

Die *Topographische Karte vom Rheinland und Westfalen* (1:80 000) aus dem Jahr 1841 dient als historische Datengrundlage für eine Validierung der Siedlungssimulation für dieses Gebiet. Dazu wurden, wie schon in Kap. 6.3.1.1 beschrieben, die verzeichneten Landnutzungen Siedlung, Acker, Wiese, Parzellen und Wald digitalisiert. Ein Vergleich zwischen der aktuellen und der historischen Landnut-

zung (Karte 6.4, S. 149) zeigt, ähnlich wie im Einzugsgebiet der Lein, bis auf die Siedlung keine grundsätzliche Veränderung der Landnutzungsverhältnisse. Aus der Karte konnte bis auf die Wiese entlang des Flusslaufs nicht unterschieden werden, ob es sich bei den offenen Flächen um Acker- oder Grünlandnutzung handelt. Der vermeintliche Mehranteil von 5% an Ackerfläche in der historischen Karte darf deshalb nicht überinterpretiert werden. Vielmehr interessiert der überbaute Anteil der Fläche, der 1841 bei nur 0,82% lag. Als Überprüfung, inwieweit sich die Technik auch für diesen Landschaftstyp eignet, wurde auf der Grundlage der historischen Verhältnisse bis auf den Anteil der heute versiegelten Flächen modelliert. Der Vergleich zwischen der modellierten Landschaft und dem Ist-Zu-

stand zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit einer Korrelation von 33%.

Da die Karte mit den historischen Bedingungen kaum Siedlungen größer zwei Pixel enthält, spielt bei der Simulation die Entwicklungsachse eine entscheidende Rolle. Diese wird durch die Morphologie des Gebiets maßgeblich bestimmt und folgt der alten Eisenbahnlinie aus dem Jahre 1861, die den wirtschaftlichen Aufschwung des Gebiets verantwortete. Ähnlich wie an der Lein kann die Entwicklungsachse dem Unterlauf des Flusses gleichgesetzt werden. Die an dieser Achse gelegenen Gemeinden, die zur Stadt Lennestadt zusammen geschlossen wurden, haben sich trotz steiler Neigungswinkel bis auf die Hanglagen ausgebreitet.



Karte 6.4 Vergleich von historischer, modellierter und aktueller Siedlungsausbreitung an der Lenne

Dort wurden, bedingt durch den Platzmangel entlang des Tales und die Überschwemmungshäufigkeit der Lenne, besonders durch den Einfamilienhaussiedlungsbau Ende der 70er Jahre die Hanglagen infrastrukturell erschlossen. Ebenfalls entscheidend ist die Bedeutung des Gebiets als touristisches Naherholungsgebiet für das Ruhrgebiet, so dass die Orte mit Mittelgebirgscharakter deshalb eine relativ starke Ausbeutung erfahren haben. Die treffende Expansionssimulation der flussaufwärts gelegenen Stadt Schmallenberg ist durch die günstigen Bedingungen von geringer Hangneigung zu erklären.

6.3.3.2 Hydrologische Simulation

Ebenso wie für die Simulationen der historischen Zustände an Lein und Körsch wurden auch für das Lennegebiet lediglich die damalige Ausdehnung und Verteilung der Siedlungen berücksichtigt, die 1841 ungefähr 0,8% der Einzugsgebietsfläche einnahmen. Die Parameter zur Beschreibung von Versiegelungsgrad und Ausbaugrad der Kanalisation wurden nicht an die Situation im Jahr 1841 angepasst.

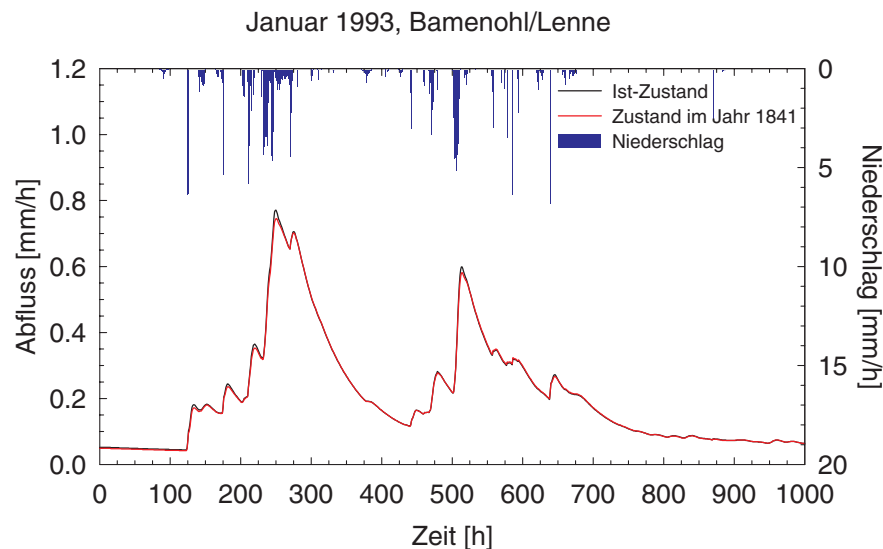


Abb. 6.11 Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und die Landnutzung im Jahr 1841

Abb. 6.11, S. 150 vergleicht die Simulationen des Ist-Zustandes und der historischen Situation für ein im Januar 1993 aufgetretenes Hochwasser. Der Abflussbeiwert für dieses Ereignis ist mit 0,56 etwas kleiner als für das oben gezeigte Hochwasser vom Dezember 1988 (Abb. 6.18, S. 159), was vor allem auf die geringeren Niederschläge im Vorfeld des Hochwassers und damit auf eine tendenziell gerin-

gere Bodenfeuchte zurückzuführen ist. Dennoch zeigt die Modellierung einen nur sehr geringen hochwasserverschärfenden Einfluss der heutigen Besiedlung, der für das gezeigte Ereignis bezogen auf das Abflussmaximum kaum über 3% beträgt und im Mittel für alle simulierten Ereignisse sogar noch darunter liegt. Die Gründe für dieses Verhalten wurden bereits in Kap. 6.2.2.1 diskutiert.

6.4 VERSTÄDTERUNG

6.4.1 Lein

6.4.1.1 Landnutzungstrends

Leider existieren für das Einzugsgebiet der Lein keine ausreichend lange Zeitreihen über die Verteilung der Flächennutzung, so dass keine sinnvollen Trends aus den Daten des STATISTISCHEN LANDESAMTES BADEN-WÜRTTEMBERG abgeleitet werden können. Ausgehend von den Beschreibungen in Kap. 3.2.4 und Kap. 3.3.5 handelt es sich bei diesem Gebiet um eine typische Gegend, die sich im Umbruch zwischen ursprünglich landwirtschaftlich geprägter Struktur zu Wohnsiedlung und Dienstleistungsgewerbe befindet. Dazu werden zusätzliche Siedlungsflächen benötigt. Die Landnutzungsszena-

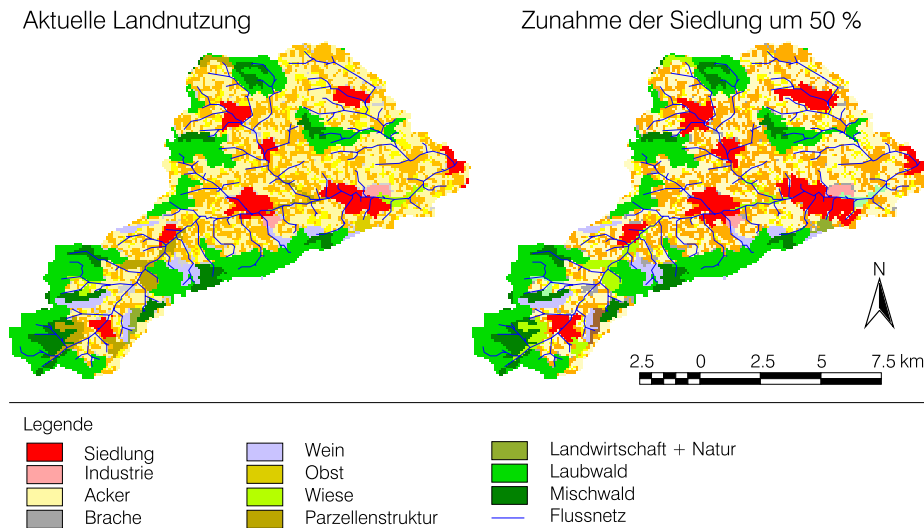
rien gehen von diesem Trend aus und setzen Ausbreitungsgrade fest, die räumlich umgesetzt werden.

6.4.1.2 Szenarien

Siedlungsgebiete haben sich in Deutschland, trotz der Einbrüche durch die beiden Weltkriege, kontinuierlich ausgedehnt. Im stark landwirtschaftlich geprägten Leingebiet besitzen sie einen dörflichen Charakter. Durch die Nähe zur prosperierenden Industriestadt Heilbronn und der nachlassenden Bedeutung der Landwirtschaft als Haupteinverberbsquelle unterliegt dieses Gebiet, wie schon in Kap. 3.2.4 erwähnt, einem anhaltenden Siedlungszuwachs. Ein Verstädterungsszenario für das Untersuchungsgebiet der Lein mit dem Szenarioziel von 50% Zuwachs von den bestehenden 7,4% auf 11,1% Sied-

lungsfläche erscheint deshalb realistisch. Damit wird etwa der bundesdeutsche Durchschnitt von 11,8% erreicht (DOSCH & BECKMANN, 1999). Das Ergebnis aus Eignungsbewertung und Nachbarschaftsanalyse in Karte 6.5, S. 151 zeigt eine realis-

tische Verteilung der erweiterten Siedlungsgebiete. Diese breiten sich hauptsächlich auf Kosten der Ackerflächen aus, was mit dem allgemein rückläufigen Trend landwirtschaftlich genutzter Fläche korrespondiert (DOSCH & BECKMANN, 1999).



Karte 6.5 Verstädterungsszenario mit 50 % Zunahme an Siedlungsfläche

Entlang des Unterlaufs der Lein stellen Bahnlinie und Verbindungsstraße nach Heilbronn eine Entwicklungsachse dar. Die daran angrenzenden Siedlungen Schwaigern und Leingarten sind bisher schon größer als die peripher gelegenen und nehmen für die überörtliche Versorgung eine höhere Bedeutung ein. Diese Flächen erfahren deshalb auch in der Simulation ein stärkeres Wachstum.

6.4.1.3 Hydrologische Auswirkungen

Die Sensitivitätsszenarien aus Kap. 6.2 mit bis zu 25 % Siedlungsfläche im Leingebiet stellen Extreme für die Siedlungsentwicklung dar, die in näherer Zukunft nicht zu erwarten sind. Im folgenden werden deshalb mit einer Zunahme der *Siedlungs- und Industrie*flächen um 10 bzw. 50 % (von 7,4% auf 8,1

bzw. 11,1 % der Einzugsgebietsfläche) die Auswirkungen eines realistischeren Wachstums dargestellt.

Um die Bedeutung einer differenzierten Behandlung von Siedlungsflächen bei der hydrologischen Modellierung zu demonstrieren, sind den Ergebnissen des *erweiterten* WASIM-ETH in Abb. 6.13, S. 152 zum Vergleich Berechnungsergebnisse für die Version von WASIM-ETH mit *Richards-Gleichung* gegenübergestellt (Abb. 6.12, S. 152). Die Unterschiede sind frappierend und zeigen deutlich, dass die Näherung des bisherigen Modells, Siedlungspixel komplett als Flächen mit geringdurchlässigem Boden zu betrachten, zu einer starken Überschätzung der Auswirkungen von Siedlungsflächen auf die Hochwasserentstehung führt. Außerdem findet keine ausreichende Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Randbedingungen von konvektiven und advektiven Ereignissen statt.

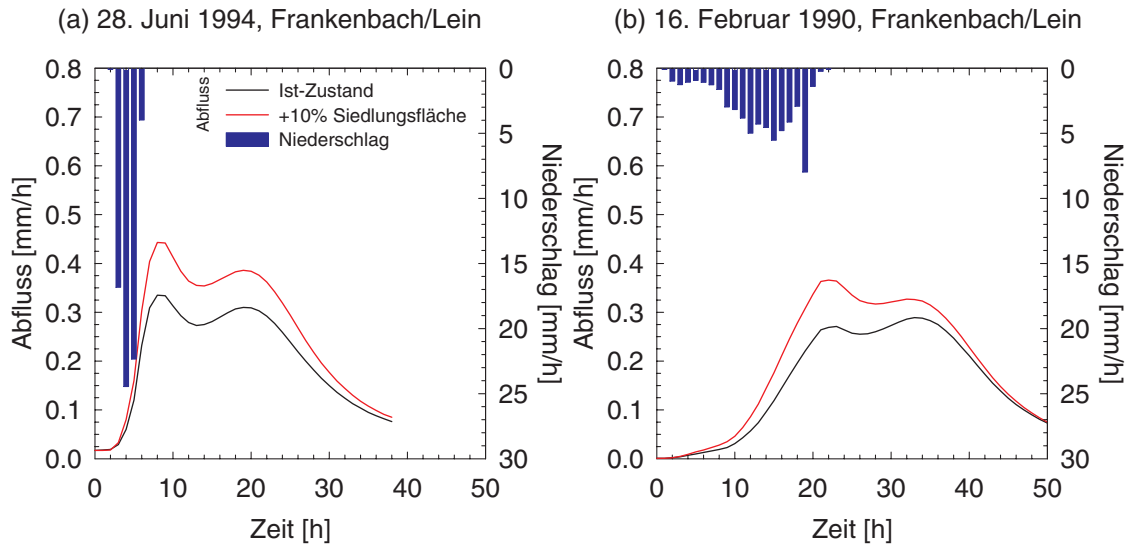


Abb. 6.12 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Verstärkungsszenario mit der Version von WASIM-ETH mit Richards-Gleichung

Die Simulation mit dem erweiterten WASIM-ETH in Abb. 6.13, S. 152 bestätigt die bei der Simulation der Sensitivitätsszenarien gemachte Erfahrung, dass die negativen Auswirkungen von Versiegelung auf

die Hochwasserentstehung für konvektive Ereignisse (abhängig von der Vorfeuchte) wesentlich ausgeprägter sind als für advektive Ereignisse.

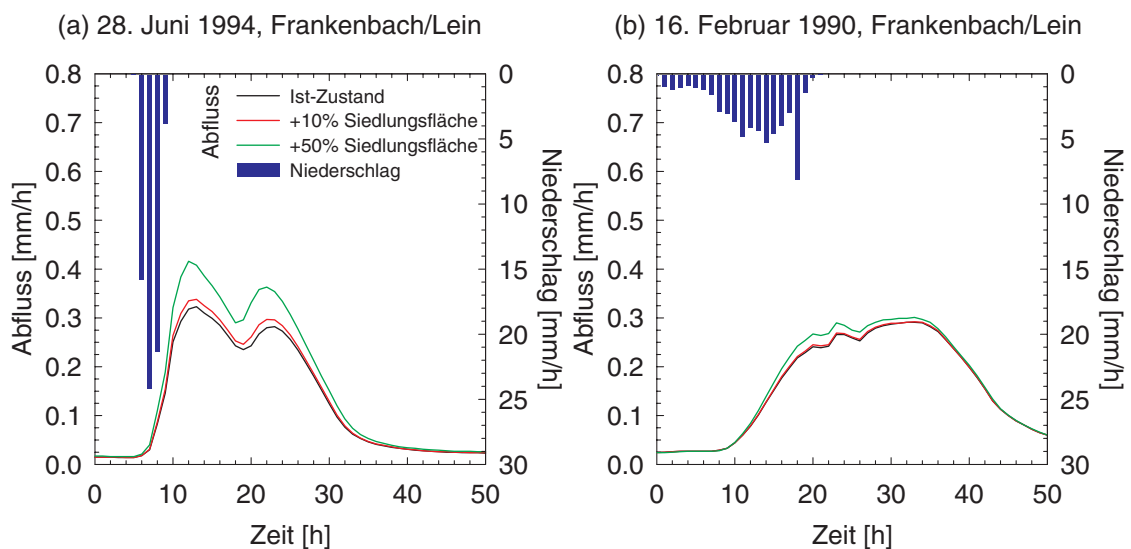


Abb. 6.13 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und zwei Verstärkungsszenarien mit der erweiterten Version von WASIM-ETH

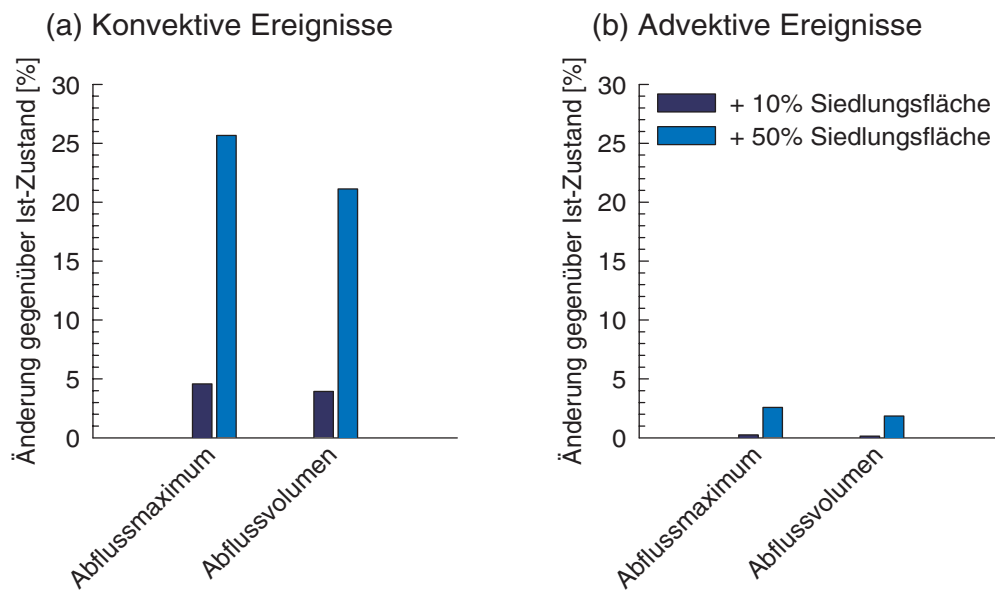


Abb. 6.14 Simulierte Änderung von Abflussmaximum und Abflussvolumen im Einzugsgebiet der Lein als Reaktion auf zwei Verstädterungsszenarien und gemittelt für (a) fünf konvektive und (b) sechs advektive Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren

Wie Abb. 6.14, S. 153 zeigt, gilt dieser Zusammenhang auch im Mittel für alle simulierten Ereignisse.

Der starke negative Einfluss von Siedlungsflächen auf die Hochwasserentstehung bei hohen Niederschlagsintensitäten wird jedoch noch deutlicher, wenn die Zunahme von Abflussmaximum und -volumen dem Flächenanteil der zusätzlich versiegelten Bereiche an der Einzugsgebietsfläche gegenübergestellt werden. Der Versiegelungsgrad im Leingebiet wird wegen des ländlichen Charakters der Siedlungen für die hydrologische Modellierung auf 0,35 geschätzt. Das bedeutet, dass 35 % eines jeden Siedlungspixels im Leingebiet als *undurchlässig* angesehen werden und als *an die Kanalisation angeschlossen* gelten. Bei einem Wachstum der Siedlungsflächen um 50 % steigt der Anteil der Siedlungs- und Industrieflächen an der Einzugsgebietsfläche um 3,7 % (von 7,4 auf 11,1 %). Dies wiederum entspricht bei einem Versiegelungsgrad von 0,35 einem Anteil *zusätzlich versiegelter Flächen* an der Einzugsgebietsfläche von lediglich 1,3 %.

6.4.2 Körsch

6.4.2.1 Landnutzungstrends

Daten zur Flächennutzungsentwicklung aus der Bildschirmtablette »Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung« (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN WÜRTTEMBERG, 1998) wurden für die Jahre 1981, 1985, 1991, 1993 und 1997 linear interpoliert. Abb. 6.15, S. 154 zeigt das Flächenverhältnis der Landnutzungskategorien *Siedlung*, *landwirtschaftlich genutzte Fläche* und *Wald* seit Beginn der 80er Jahre als durchgezogene Linien. Für diese Datenbasis wurden verschiedene Trends (A bis D) abgeleitet und bis zum Jahr 2050 verlängert:

- (a) Trend A: Ableitung des Trends zwischen 1991 und 1997,
- (b) Trend B: Ableitung des jüngsten Trends zwischen 1993 und 1997,
- (c) Trend C: Ableitung des gesamten Trends zwischen 1981 und 1997,
- (d) Trend D: Gemittelter Trend aus den Einzeltrends der Basisdaten.

Unter der Annahme, dass sich die zukünftige Entwicklung aus den historischen Trends ableiten lässt,

wurde die Extrapolation der 90er Jahre (Trend A) als Hauptszenario angenommen. Die Trends B bis D zeigen die Spanne der möglichen Entwicklungstendenzen, die sich aus den unterschiedlichen Zeitspannen zur Ableitung der Trends ergeben. Generell ist für alle Trends eine stetige Ausbreitung der Siedlungs- auf Kosten der landwirtschaftlich genutzten Fläche zu beobachten. Der Waldanteil erfährt einen

leicht ansteigenden Trend. Am stärksten divergieren die verschiedenen Extrapolationen für die Siedlungsentwicklung. Da diese Landnutzungs-kategorie so dynamisch ist, werden für die Szenarien pauschal 10% und 50% Zunahme angenommen und deren Eintrittszeitraum gemäß den verschiedenen Trends angegeben. Für die beiden anderen Kategorien werden lediglich die Tendenzen berücksichtigt.

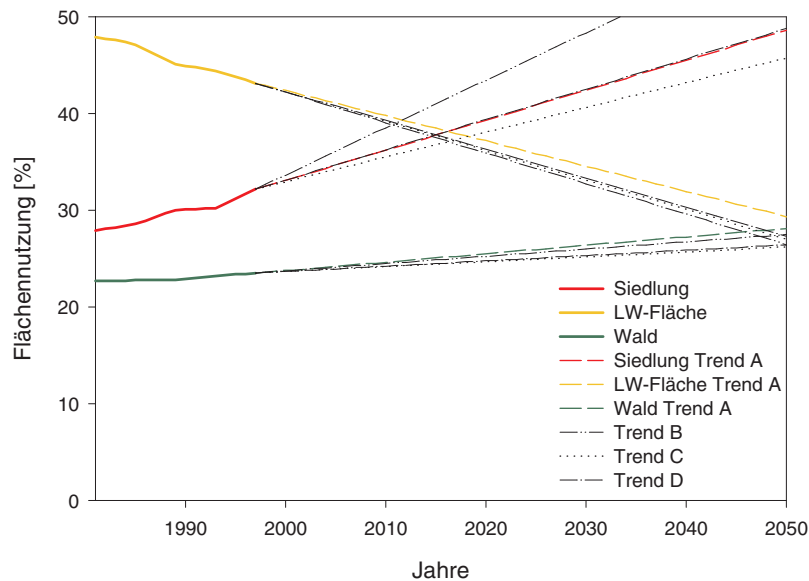


Abb. 6.15 Interpolierte Flächennutzungsentwicklung bis zum Jahr 2050 für das Einzugsgebiet der Korsch

Die prozentualen Unterschiede der Nutzungskategorien der Flächenerhebung und der Auswertung der CORINE-Landnutzungsdaten ergeben sich aus unterschiedlicher Datenbasis und Bezugsfläche.

6.4.2.2 Szenarien

Das Einzugsgebiet der Korsch besitzt mit der Nähe zur Großstadt Stuttgart eine produktive Keimzelle für stetig ansteigende Bebauung. Neben der Wohnbebauung nimmt der industrielle Bedarf an Fläche eine bedeutende Rolle ein. DOSCH & BECKMANN (1999) prognostizieren für das Umland westdeutscher Agglomerationsräume den stärksten Zuwachs an überbauter Fläche. Dabei kann es ihrer Meinung

nach zu einem Zusammenwachsen zu Metropolitanregionen kommen.

Exemplarisch wird für dieses Einzugsgebiet eine drastische Siedlungsentwicklung angenommen. Die Wohnbebauung wächst dabei um 50% von 27% auf 40% der Einzugsgebietsfläche an. Die Industrie, die in den letzten Jahren immer größere Flächen beansprucht hat, erfährt in diesem Szenario einen Zuwachs von gut 2% auf etwa 5% der Einzugsgebietsfläche. Als Entwicklungsachsen dienen die Autobahnen, die durch das Einzugsgebiet verlaufen. Tab. 6.5, S. 155 zeigt eine Abschätzung über den Eintrittszeitraum nach den in Kap. 6.4.2.1 beschriebenen Trendberechnungen.

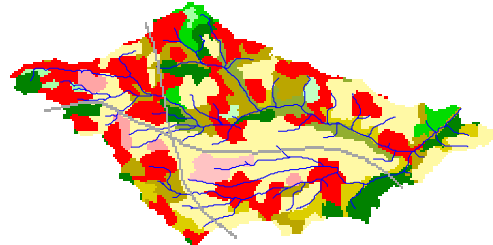
Tab. 6.5 Übersicht über das Eintrittsjahr der Szenarienannahmen für Verstädterung

	Trend A	Trend B	Trend C	Trend D
10% mehr Siedlungsfläche im Jahre	2008	2004	2010	2007
50% mehr Siedlungsfläche im Jahre	2054	2033	2066	2053

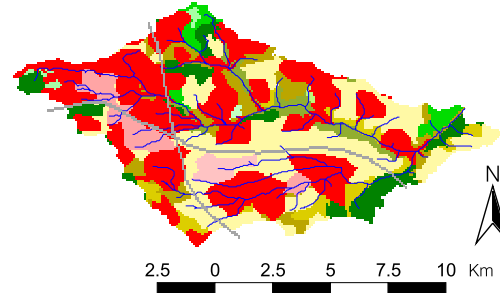
Auf die Darstellung des Szenarios für 10% Zunahme wird verzichtet, weil es sowohl in der Modellierung mit LUCK als auch in der hydrologischen Modellierung kaum Auswirkungen zeigt. Das Model-

lierungsergebnis für 50% Zunahme ist auf Karte 6.6, S. 155 dargestellt. Es stellt ein plausibles Stadtbild von Stuttgart dar, das sich von Nordwesten her in die Landschaft erstreckt.

Aktuelle Situation



Szenario Situation

**Legende**

■ Siedlung	■ Obst	■ Mischwald
■ Industrie	■ Wiese	■ Wald-Strauch-Übergang
■ Flughafen	■ Parzellenstruktur	■ Entwicklungsachse (Autobahn)
■ Städtische Grünfläche	■ Landwirtschaft + Natur	— Flussnetz
■ Sportanlage	■ Laubwald	
■ Acker	■ Nadelwald	

Karte 6.6 Verstädterungsszenario für die Körch mit einer Siedlungszunahme von 50 % und einer Industriegebietserweiterung um 100 %

Die Industriegebiete schließen sich zu einem großen Komplex zusammen, was eine Verstärkung der Standortvorteile für die Industrie beinhalten könnte. Die simulierte Bebauung findet in diesem Szenario nur auf ursprünglicher Ackerfläche statt, weil zum einen andere Flächen mit geringerer Nutzungsintensität häufig als Ausgleich für die neue Bebauung nicht überbaut werden dürfen. Außerdem bietet die Landwirtschaft im Umland einer prosperierenden Stadt im Vergleich zu Bauland nur geringe Rentabilität. Die Szenariotechnik eignet sich dem zufolge unter der Berücksichtigung von zusätzlicher Infor-

mation über die Lage der Entwicklungsachsen auch für die Simulation der Ausbreitung von großen Städten in deren Umland.

6.4.2.3 Hydrologische Auswirkungen

Die Mechanismen, die bereits in Kap. 6.2.2.1 für den Vergleich des Ist-Zustandes mit einem historischen Zustand geringerer Versiegelung beschrieben wurden, gelten genauso auch für in die Zukunft gerichtete Verstädterungsszenarien.

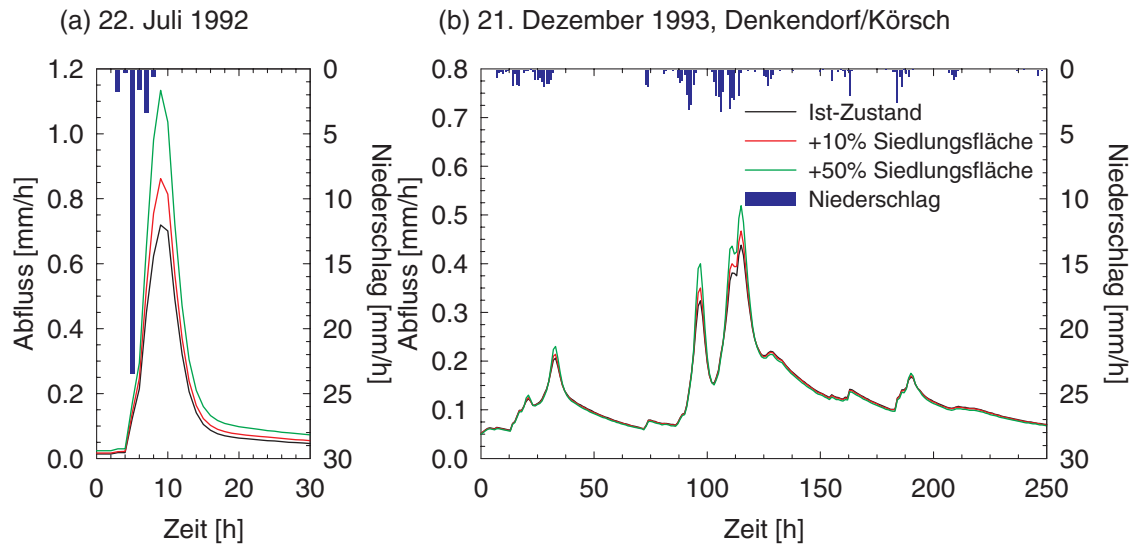


Abb. 6.16 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Korsch für den Ist-Zustand und zwei Verstärkungsszenarien mit der erweiterten Version von WASIM-ETH

Abb. 6.16, S. 156 illustriert sowohl die starke Verschärfung des Hochwassermaximums für das exemplarisch dargestellte konvektive Ereignis wie auch eine merkliche Scheitelerhöhung für das abgebildete advektive Ereignis.

6.4.3 Lenne

6.4.3.1 Landnutzungstrends

Aus den GEMEINDEDATEN VON NORDRHEIN-WESTFALEN (1998) wurden die Flächennutzungsanteile der Kategorien *Siedlungsfläche*, *landwirtschaftlich genutzte Fläche* und *Waldfläche* prozentual für die Jahre 1978, 1980, 1984, 1988, 1990 durchgehend bis 1996 zusammengestellt und linear interpoliert.

Für diese Datenbasis wurde entsprechend der Beschreibung in Kap. 6.4.3.1 die Trends A bis D berechnet. Abb. 6.17, S. 157 zeigt das Ergebnis für das Einzugsgebiet der Lenne. Die Entwicklung des Waldanteils divergiert für die unterschiedlichen Trendverlängerungen in leichte Zu- oder Abnahme. Generell ist für den Wald keine drastische Veränderung bis zum Jahre 2050 zu erwarten. Die Siedlungsentwicklung verläuft mit schwach steigender Tendenz. Die größten Flächenverluste werden einheitlich für alle Trends für die landwirtschaftlich genutzten Flächen berechnet. Da die Landwirtschaft durch EU-Regelungen beeinflusst wird, können diese Trendberechnungen nur als Tendenz angesehen werden.

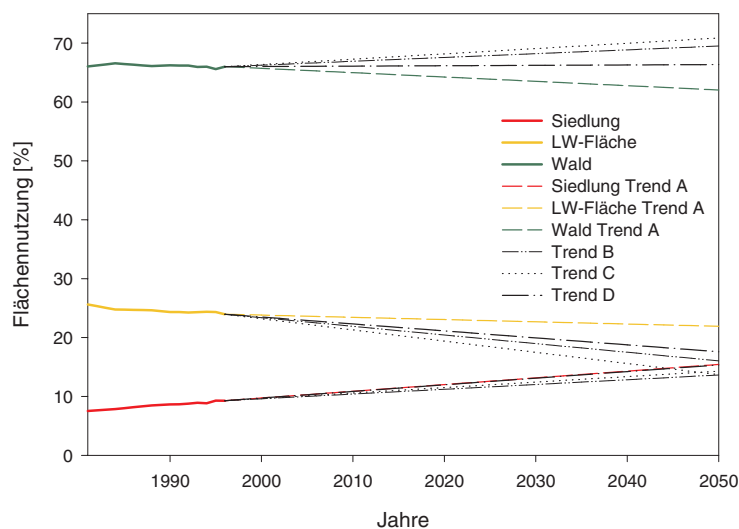


Abb. 6.17 Interpolierte Flächennutzungsentwicklung bis zum Jahre 2050 für das Einzugsgebiet der Lenne

6.4.3.2 Szenarien

Das Einzugsgebiet der Lenne unterscheidet sich von Lein und Körsch in ihrer Landnutzungsdynamik aufgrund der rückläufigen Bevölkerungsentwicklung und der abgeschiedenen Lage. Dennoch wird das Siedlungswachstum auch in solchen ländlich geprägten Kreisen anhalten, weil die landschaftliche Attraktivität künftig für einen hohen Siedlungsflä-

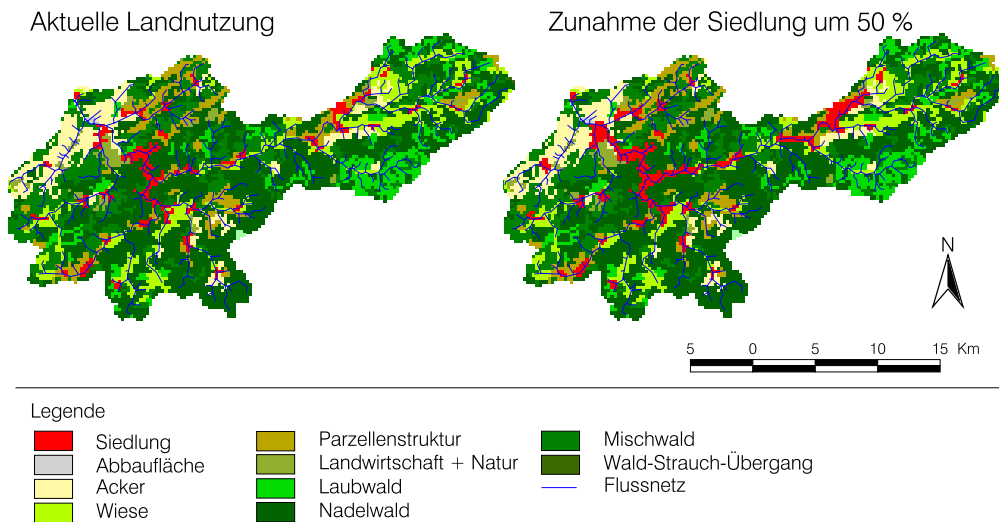
chenzuwachs sorgen wird und das Gewerbe im Allgemeinen immer flächenintensiver wird (DOSCH & BECKMANN, 1999). Dabei kommt es dort zu einer Bereitstellung von viel Siedlungs- und Infrastrukturfläche für weniger Einwohner. Tab. 6.6, S. 157 gibt gemäß der in 6.4.2.1, S. 153 beschriebenen Trends den berechneten Eintrittszeitraum für den pauschal angenommenen Verstädterungszuwachs an.

Tab. 6.6 Überblick über das Eintrittsjahr der Szenarienannahmen für Verstädterung

	Trend A	Trend B	Trend C	Trend D
10% mehr Siedlungsfläche im Jahre	2004	2007	2004	2005
50% mehr Siedlungsfläche im Jahre	2037	2054	2038	2046

Karte 6.7, S. 158 zeigt das Ergebnis der Simulation, bei der von einer Zunahme der überbauten Fläche von 50% ausgegangen wurde. Der simulierte Versiegelungsanteil entspricht mit 7% der Einzugsgebietsfläche dem der Lein. Auf die Darstellung des

Szenarios von 10% Zunahme wird verzichtet, da aufgrund seines geringen Anfangsversiegelungsanteils die Landnutzungsänderungen kaum erkennbar sind.



Karte 6.7 Verstädterungsszenario für die Lenne mit einer Siedlungszunahme von 50 %

Die Szenariosituation zeigt einen Siedlungszuwachs besonders in der Gemeinde Schmallenberg. Diese Tendenz hatte sich bereits bei der Validierung gezeigt. Schmallenberg bietet als Touristenzentrum sowohl im Sommer als auch im Winter attraktive Angebote, so dass der Fremdenverkehr, der hauptsächlich aus dem Ruhrgebiet gespeist wird, einen solchen Siedlungszuwachs möglich macht. Entlang der Hauptentwicklungachse schließen sich die Lücken zwischen den einzelnen Gemeinden von Lenne- und besiedeln die Talaue im Unterlauf fast vollständig. Diese Simulation zeigt zwar einen wahrscheinlich nicht in naher Zukunft zu erwartenden Siedlungszuwachs. Dennoch könnte die Allokation der Siedlungsexpansion als plausibel bezeichnet werden, weil sie die historische Entwicklung fortschreibt.

6.4.3.3 Hydrologische Auswirkungen

Der Einfluss dieser zusätzlichen Flächenversiegelung auf das bereits beschriebene Hochwasser im Dezember 1988 ist anhand eines optischen Vergleichs der für beide Gebietszustände modellierten Hochwasserganglinien (Abb. 6.18, S. 159) kaum auszumachen. Sowohl die simulierte Erhöhung des Abflussmaximums als auch des Hochwasservolumens bewegt sich für fast alle Ereignisse unter 1 %. Angesichts der *geomorphologischen* Verhältnisse im Lennegebiet und den Eigenschaften von Niederschlagsereignissen, die dort zu Hochwassern führen, ist dieses Ergebnis plausibel.

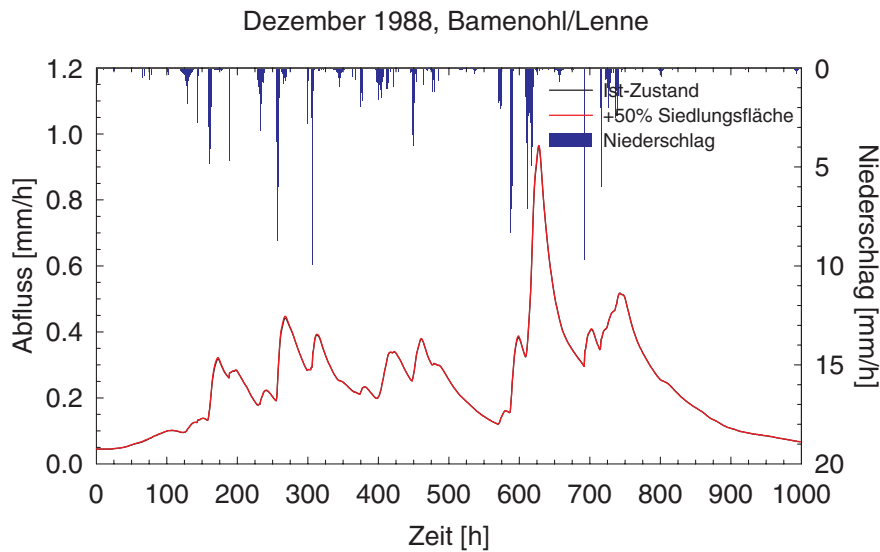


Abb. 6.18 Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Verstärkungsszenario

Ob der gefallene Niederschlag versickert und dort bei hoher Vorsättigung des Untergrundes eine rasche unterirdische Abflussbildungsreaktion provoziert oder aus einer überlasteten Siedlungsentwässerung an einen nahegelegenen Vorfluter abgegeben wird, ist bei derart langandauernden Niederschlägen

für den Hochwasserverlauf zweitrangig. Diese Aussage gilt jedoch nicht für die *Wasserqualität* während eines Hochwasserereignisses, die durch die Abgabe von verschmutztem Wasser aus versiegelten Gebieten an nahegelegene Fließgewässer erheblich beeinträchtigt werden kann.

6.5 FLÄCHENSTILLLEGUNG

6.5.1 Lein

6.5.1.1 Kalibrierung des Stilllegungsmoduls an der Lein

Da die Bewertung der unterschiedlichen Ertragspotentiale einer Landschaft mit der in *Kap. 4.2.2* beschriebenen Technik in Anlehnung an unterschiedliche Literaturquellen erfolgt und auf nur wenige Eingangsdaten gestützt ist, muss die Vorgehensweise anhand von zusätzlicher Information kalibriert werden. Als Basis dazu dient das in dem integrierten Modell SWIM (SOIL AND WATER INTEGRATED MODEL) enthaltene Pflanzenmodell, das einen vereinfachten EPIC-Ansatz (WILLIAMS, 1995) verfolgt. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in KRYSA NOVA et al. (1998) zu finden. Die räumliche Diskretisierung von SWIM basiert auf Hydrotopen, hydrologisch einheitlich reagierenden Flächen, die

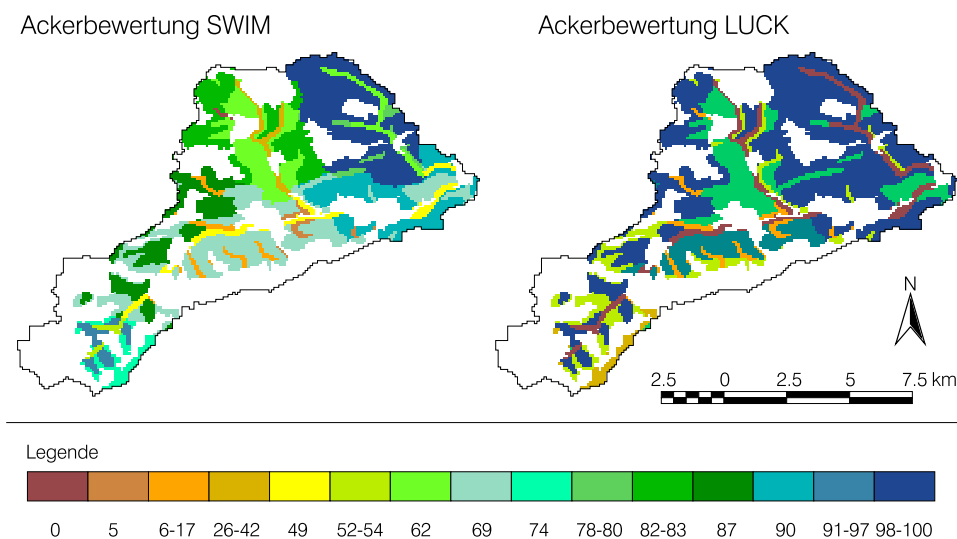
durch Teileinzugsgebiete, den darin vorkommenden Böden und deren Landnutzung abgegrenzt werden. Das integrierte Pflanzenmodell simuliert das Wachstum von parameterisierten Ackerfrüchten, deren Wachstum durch einen der Stressfaktoren Temperatur, Nährstoffe oder Wasser gehemmt werden kann. Die Ertragsleistung jeder Hydrotopfläche wird in dt/ha als Jahresergebnis und in Durchschnittswerten tabellarisch ausgegeben. Mit Hilfe ihrer Hydrotopzugehörigkeit können diese als relative Gütemaße den Flächen des Einzugsgebiets zugeordnet werden, um eine Vergleichsbasis zu dem von LUCK bestimmten Verteilungsmuster des Ertragspotentials darzustellen.

Für die Kalibrierung wurde das Modell SWIM hydrologisch auf die Verhältnisse des Leingebietes eingestellt. Anschließend fand eine Ertragsmodellierung für fünf unterschiedliche Ackerfrüchte über einen Zeitraum von je acht Jahren statt, um ein cha-

rakteristisches Ertragssimulationsergebnis für dieses Gebiet zu erhalten. Als Anbaufrüchte wurden Kartoffeln und Mais als Vertreter für Blattfrüchte ausgewählt, Sommergerste als wichtigste Sommergetreideart und Roggen, Weizen und Gerste die wesentlichen Repräsentanten für Wintergetreide. Dadurch wird eine Abdeckung der gesamten Vegetationsperiode gewährleistet. Gleichzeitig werden die in der Fruchtfolge häufig auftretenden Anbaufrüchte berücksichtigt. Für die Auswertung wurden die Durchschnittserträge auf Werte zwischen null und hundert genormt, ein Mittelwert jeder der drei Anbaukategorien ermittelt und anschließend durch die Bildung eines Mittelwerts aus den Teilergebnissen zu einem Endwert je Pixel zusammen geführt. Dieser Endwert nimmt durch diese Prozedur auch nur Werte zwischen null und hundert an. Allerdings können durch die Mittelung das Minimum und Maximum von den Normierungsgrenzen differieren. Das Endergebnis der Bewertung wird auf die Hydrotopflächen übertragen und ist auf der linken Seite von Karte 6.8, S. 160 zu sehen. Das Ergebnis

zeigt einen deutlichen Einfluss der unterschiedlichen Bodentypen. Die Parabraunerde wird dabei vor Braunerde, Auenboden und Rendzina eingestuft. Unterschiede innerhalb der Bodentypen ergeben sich aus der internen Berechnung der Interpolation der Klimadaten. Diese Unterschiede sind allerdings gering und werden deshalb nicht weiter verfolgt.

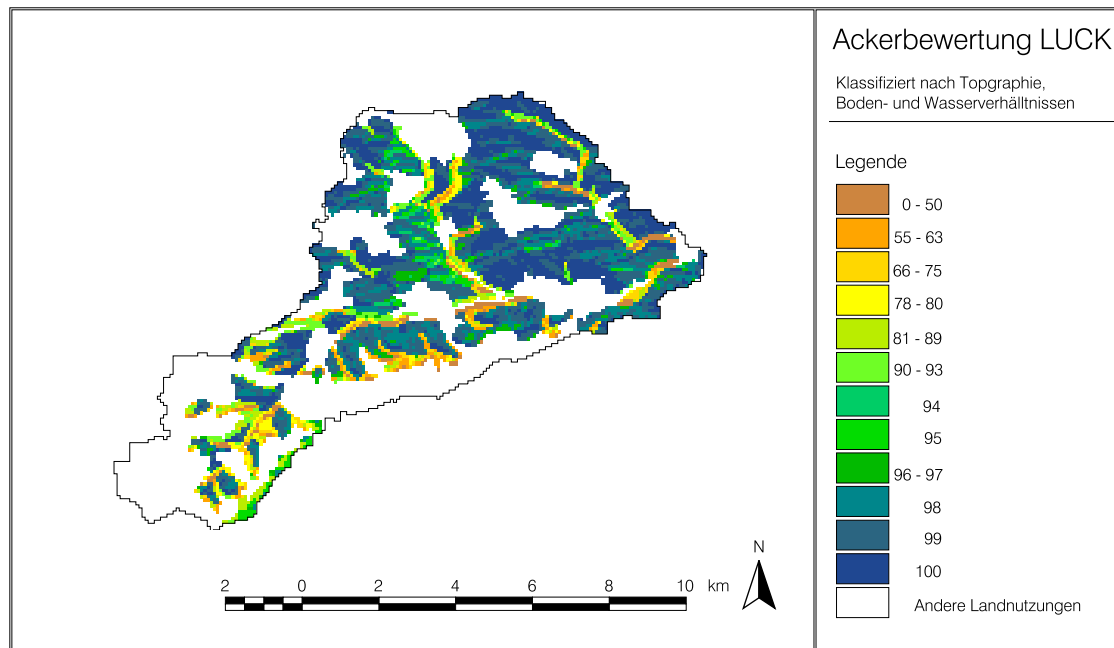
Da in SWIM das Pflanzenwachstum nur auf der Basis von Boden- und Wassereigenschaften und ohne anbautechnische Limitierung simuliert wird, muss für eine Kalibrierung des Ackerbewertungsmoduls in LUCK ein Vergleich unter Verzicht auf die Bewertung der Hangneigung, Exposition und mechanische Bearbeitbarkeit erfolgen. Das Ergebnis dieser Bewertung zeigt die rechte Seite der Karte 6.8, S. 160. Die integrierte Bewertung von LUCK wurde mit dem gemittelten SWIM-Ergebnis als Referenz verglichen und daran teilweise kalibriert. Obwohl sich die methodischen Ansätze beider Modelle grundlegend von einander unterscheiden, konnte eine Angleichung vom LUCK an das SWIM Ergebnis erfolgen.



Karte 6.8 Vergleich der Ertragspotentialbewertung durch SWIM und LUCK

Ein Vergleich der beiden Karten zeigt Gemeinsamkeiten in der Bewertung der ackerbaulich rentablen Böden. Unterschiede für die Böden Pararendzina und Auenboden bleiben bestehen. Für geringmä-

tige Böden wie Pararendzinen simuliert SWIM aufgrund ihrer daraus resultierenden mangelnden Durchwurzelungsfähigkeit und Trockenheit mäßige Ertragsleistung.



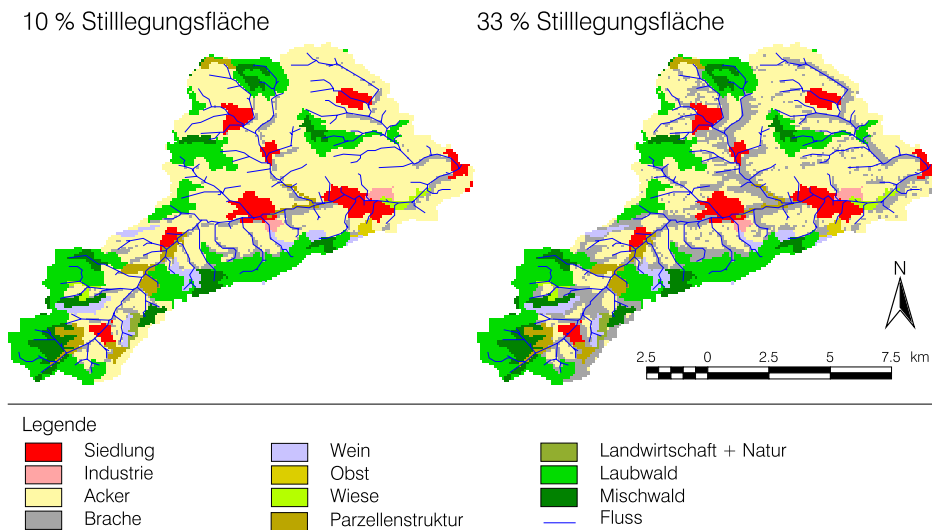
Karte 6.9 Bewertung der Ackerflächen durch LUCK unter Berücksichtigung aller Kriterien.

LUCK hingegen bewertet stärker nach der Bodenart, wobei der Lössanteil in diesem Bodentyp eine gute Wasserversorgung garantiert und deshalb für ein besseres Ertragspotential als für die schweren Auenlehme sorgt. Hier wurde das Wissen über die Aussage der Modellergebnisse gestellt, so dass keine weitere Anpassung erfolgte. Die kalibrierte Bewertung wurde anschließend um die topographischen Eigenschaften ergänzt, was in *Karte 6.9*, S. 161 als Resultat gezeigt wird. Dieses Ergebnis stellt die Grundlage der automatischen Suche nach den möglichen Stilllegungsflächen dar.

6.5.1.2 Szenario

Die Auswirkungen der *Agenda 2000* werden, wie schon in *Kap. 2.4.1.2* beschrieben, unterschiedlich interpretiert. Da in diesem Rahmen die Subventionsleistungen der EU-Kommission an eine obligatorische Stilllegungsquote von 10% der landwirtschaftlich genutzten Fläche gekoppelt ist, wird sich diese Forderung weitgehend durchsetzen. Darüber

hinaus können freiwillig bis maximal 33% der Fläche mit Ausgleichsanspruch stillgelegt werden. Für diese beiden Szenarien wird das in *Kap. 4.2.2* beschriebene Verfahren der Ertragspotentialsbewertung angewandt, welches ein relatives Gütegefälle des Einzugsgebiets bestimmt. Hierfür wird angenommen, dass Standorte mit niedrigem Ertrag vorrangig stillgelegt und Gunstflächen weiterhin bewirtschaftet werden. Deshalb werden die schlechteren Standorte innerhalb des Einzugsgebiets für eine Stilllegung gewählt. Dabei werden Eigentumsfragen vernachlässigt, was zum einen dadurch gerechtfertigt werden kann, dass durch Sozialbrache und Pacht ein gewisser Spielraum in der Flächenverteilung der bewirtschafteten Flächen gegeben ist. Der Pachtanteil der bewirtschafteten Fläche lag 1999 im alten Bundesgebiet bei über 50% (BMELF, 2000). Andererseits liegen keine Informationen über die Eigentumsfragen vor, so dass sie auch nicht berücksichtigt werden könnten. Basierend auf diesen Annahmen zeigt *Karte 6.10*, S. 162 die möglichen Auswirkungen der *Agenda 2000*.



Karte 6.10 Mögliche Auswirkungen der Agenda 2000 auf das Einzugsgebiet der Lein.

Die niedrigen Ertragspotentiale entlang des Flusslaufs konzentrieren die Stilllegungsflächen in diesem Bereich. Dies ist durch die ungünstigen Eigenschaften der Auenböden hinsichtlich des Wasserpotentials und des Bearbeitungspotentials zu erklären. Das Szenario von 33% Stilllegung ist für dieses fruchtbare und thermisch begünstigte Gebiet sehr unwahrscheinlich und dient nur als ein hypothetisches Szenario. Das Ergebnis zeigt, dass sich bei der Ausweitung der Suche nach potentiellen Stilllegungsflächen der topographische Aspekt durchsetzt, was die Auswahl einzelner Zellen aus den bestehenden Ackerflächen zeigt.

6.5.1.3 Hydrologische Auswirkungen

Wie bereits in *Kap. 2.4.1.2* erläutert, können temporär stillgelegte Flächen verschieden ausgeprägt sein, da die Agenda 2000 auf diesen Flächen sowohl Grünland als auch den Anbau nachwachsender Rohstoffe wie Raps gestattet. Bei der Parameterisierung wurde von einem gegenüber der Ackernutzung etwas geringeren Vegetationsbedeckungsgrad ausgegangen. Dieser geringere Vegetationsbedeckungsgrad begünstigt die Entstehung von *Infiltrationsüberschuss*.

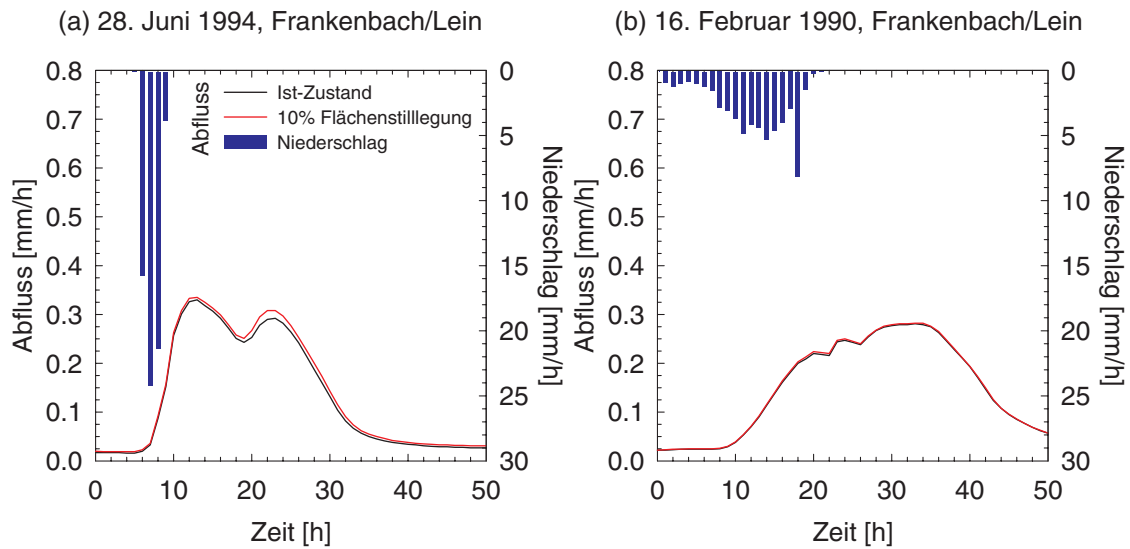


Abb. 6.19 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Szenario zur möglichen Stilllegung von Ackerfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH

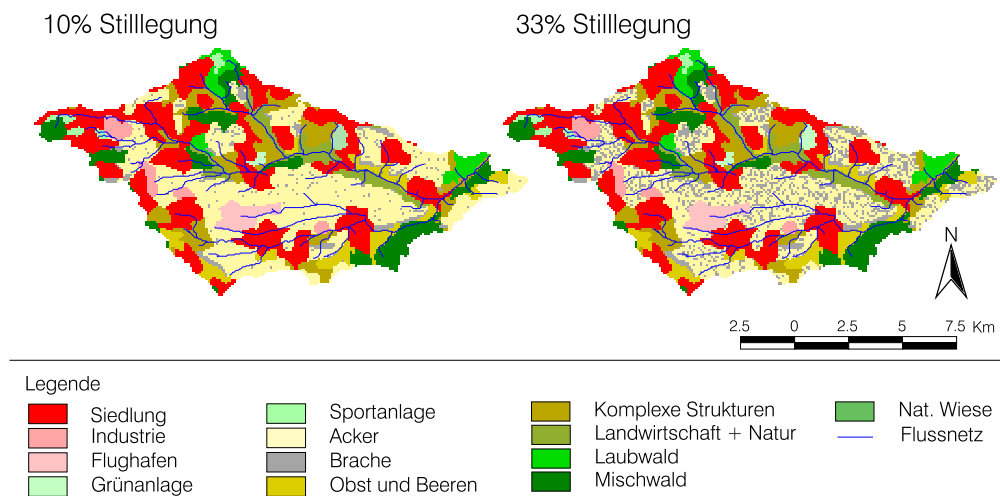
Die modellierten Auswirkungen der Flächenstilllegung sind für das advektive Ereignis mit geringen Niederschlagsintensitäten erwartungsgemäß marginal. Da sich die Bedeckungsgrade für die stillgelegten Flächen im Juni nur wenig unterscheiden, ist jedoch auch für das konvektive Ereignis nur eine geringe Zunahme der beiden Abflussspitzen zu erkennen.

6.5.2 Körsch

6.5.2.1 Szenario

Für das Einzugsgebiet der Körsch spielt die Landwirtschaft in der Beschäftigungsstruktur eine unter-

geordnete Rolle. Dennoch wird angestrebt, Flächen in der Bewirtschaftung zu halten, um das Landschaftsbild in dieser ursprünglich landwirtschaftlich orientierten Gegend zu sichern und ein bundesweites Angebot an Agrarprodukten zu gewährleisten. Deshalb wird auch in diesem Gebiet weiterhin landwirtschaftlich gewirtschaftet werden, obwohl es als wirtschaftlicher Faktor keine treibende Kraft darstellt. Dementsprechend werden sich auch in diesem Gebiet die Maßnahmen der *Agenda 2000* bemerkbar machen. *Karte 6.11*, S. 164 zeigt wie sich diese im Körschgebiet niederschlagen könnten.



Karte 6.11 Mögliche Auswirkungen der Agenda 2000 im Körsch-Einzugsgebiet

Das Ergebnis dieser Simulation spiegelt die überwiegende Homogenität des Untersuchungsgebiets wieder. Außer dem Grabenbruch, der ohnehin nicht für die landwirtschaftliche Produktion genutzt wird, werden den Flächen ähnliche Ertragspotentiale zugewiesen. Über 80% der Ackerflächen werden aufgrund der geringen Hangneigung und den homogenen Bodenverhältnissen mit dem gleichen Ertragspotential bewertet. Da die naturräumlichen Bedingungen nur wenige eindeutige Grenzertragsflächen ausweisen, tritt bei der Modellierung mit LUCK die zufällige Verteilung der Stilllegungsflächen in den Vordergrund. Diese gleichmäßige Verteilung wird dem unsicheren Charakter der Simulation von selektiver Stilllegung gleichwertiger Flächen gerecht. Insgesamt ist die Simulation als ein in

Zukunft mögliches Szenario denkbar und somit zufriedenstellend.

6.5.2.2 Hydrologische Auswirkungen

Die Parameterisierung stillgelegter Flächen wurde bereits in Kap. 6.5.1.3 im Zusammenhang mit den Auswirkungen von Flächenstilllegungen an der Lein erläutert.

Für das in Abb. 6.20, S. 165 dargestellte Gewitterereignis beträgt der simulierte Anteil von Infiltrationsüberschuss am Gesamtabfluss im Ist-Zustand nur rund 5%. Für das zyklonale Ereignis vom Dezember 1993 wird aufgrund der geringen Niederschlagsintensitäten keinerlei Infiltrationsüberschuss simuliert.

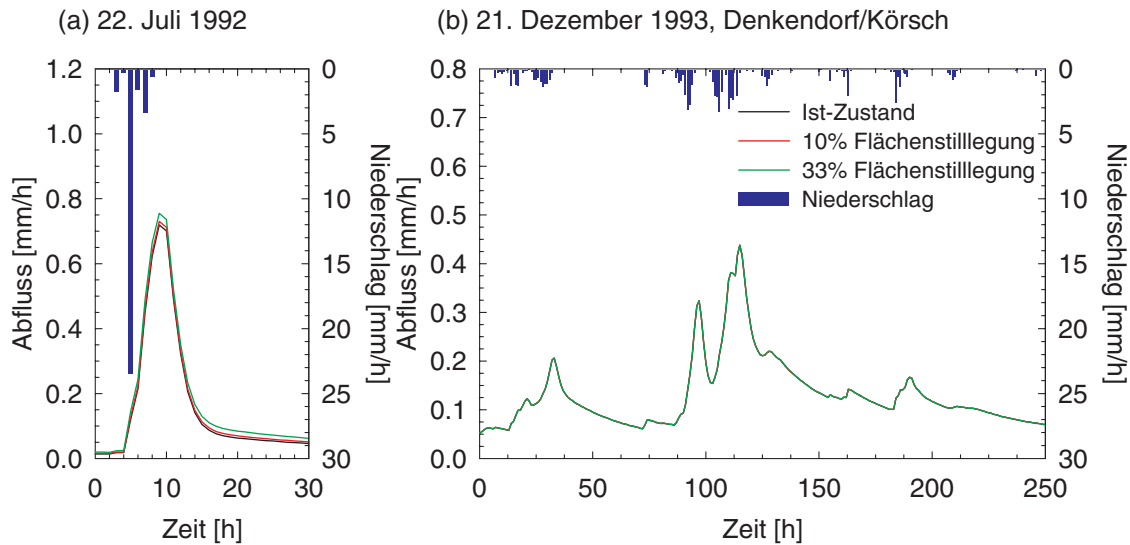


Abb. 6.20 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und zwei Szenarien zur möglichen Stilllegung von Ackerfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH

Da aber Infiltrationsüberschuss für die betrachteten Ereignisse insgesamt von untergeordneter Bedeu-

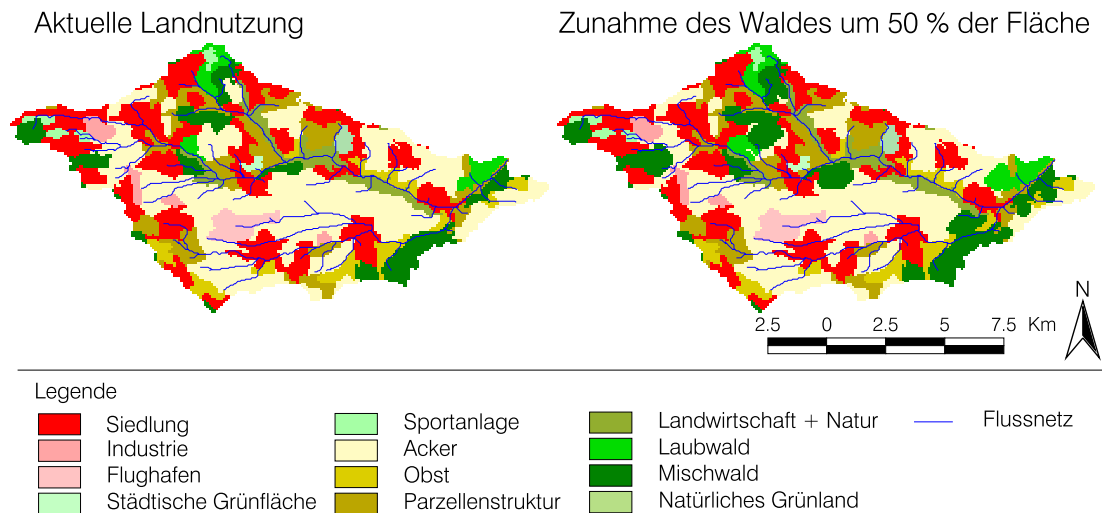
tung ist, wirkt sich die Flächenstilllegung kaum abflussverschärfend aus.

6.6 AUFFORSTUNG

6.6.1 Szenario für das Körschgebiet

Wie schon in Kap. 2.4.1.3 und Kap. 4.2.3.1 beschrieben, übernimmt der Wald wichtige Aufgaben wie zum Beispiel als Rohstoffquelle, zur Erhaltung des Landschaftsbildes und als Kohlendioxidsenke zur möglichen Minderung des bedenklich zunehmenden Treibhauseffekts. In stark anthropogen überprägten Landschaften, wie das Einzugsgebiet der Körsch, liegt der Waldanteil bei nur etwa 12%, weil die intensive Landwirtschaft und der Besiedelungsdruck des Ballungsraums Stuttgart die Landschaft stark beanspruchen. Gerade in solchen Gebieten sollte nach STICHMANN (2000) gezielte Aufforstung betrieben werden, um den Naturhaushalt

des Kulturrums zu entlasten, obwohl die Ausbildung dieser Schutzfunktionen erst nach Erreichen eines Reifestadiums stattfindet. Über die Form der Neubewaldung gibt es unterschiedliche Ansichten. Während z.B. AMMER (2000) die Aufforstung als Gliederung von ausgeräumten Landschaften durch die Betonung von wichtigen Landschaftselementen, wie z.B. Flussläufe oder Relief, nutzen möchte, halten BURSCHEL & WEBER (2000) die Aufforstung von Grenzertragsflächen für realistischer. Karte 6.12, S. 166 zeigt ein Szenario, bei dem versucht wurde, die Anpflanzungen an bestehende Waldflächen anzuschließen und dabei bevorzugt Grenzertragsflächen zu nutzen.



Karte 6.12 Waldmehrunngsszenario um 50 % im Einzugsgebiet der Körsch

Das Ergebnis der Simulation zeigt eine Waldvermehrung von 12% Waldanteil auf 18% der Fläche. Dabei haben sich sowohl Laub- als auch Mischwald um 50% auf angrenzenden Ackerflächen vermehrt, so dass die vorhandenen Bestände erweitert wurden. Die Modellierung zeigt den meisten Waldzuwachs im Unterlauf der Körsch, weil dort der Wald überwiegend an Ackerfläche angrenzt und diese aufgrund größerer Hangneigungen niedrigere Ertragspotentiale erreichen. Auf den Fildern gibt es kaum Wald, so dass dort der Zuwachs sehr gering bleibt. Dies spiegelt sich schon in den historischen Bedingungen (siehe Karte 6.3, S. 147) wieder und wird deshalb als realistisch angesehen. Zusätzlich grenzt südlich an das Untersuchungsgebiet das Waldgebiet Schönbuch. Dennoch sollte Wald mit seinen wichtigen Funktionen nicht nur Naturschutzflächen überlassen werden, sondern jede Landschaft ihre Vielfaltigkeit und ihre natürlichen Schutzfunktionen selbst bewahren. Die Neuaufforstung kann

entweder der natürlichen Sukzession überlassen werden oder durch gezieltes Anpflanzen von Pionierbaumarten zur Ausbildung eines Vorwaldes erfolgen. Beide Methoden gewährleisten dem gewünschten Endwald ausreichend Schutz zum Heranwachsen.

6.6.2 Hydrologische Auswirkungen

Aufforstung erfolgt im Szenario auf stillgelegten landwirtschaftlichen Flächen. Dies hat gegenüber dem Ist-Zustand – einen ausgewachsenen Waldbestand vorausgesetzt – eine höhere Interzeptionsspeicherkapazität zur Folge. Darüber hinaus wird bei der Parameterisierung der veränderten Nutzung davon ausgegangen, dass Waldböden aufgrund der geringeren Bearbeitungsintensität meist eine bessere Aggregatstruktur und einen höheren Anteil an Makroporen aufweisen, was eine Verbesserung der Infiltrationsbedingungen mit sich bringt.

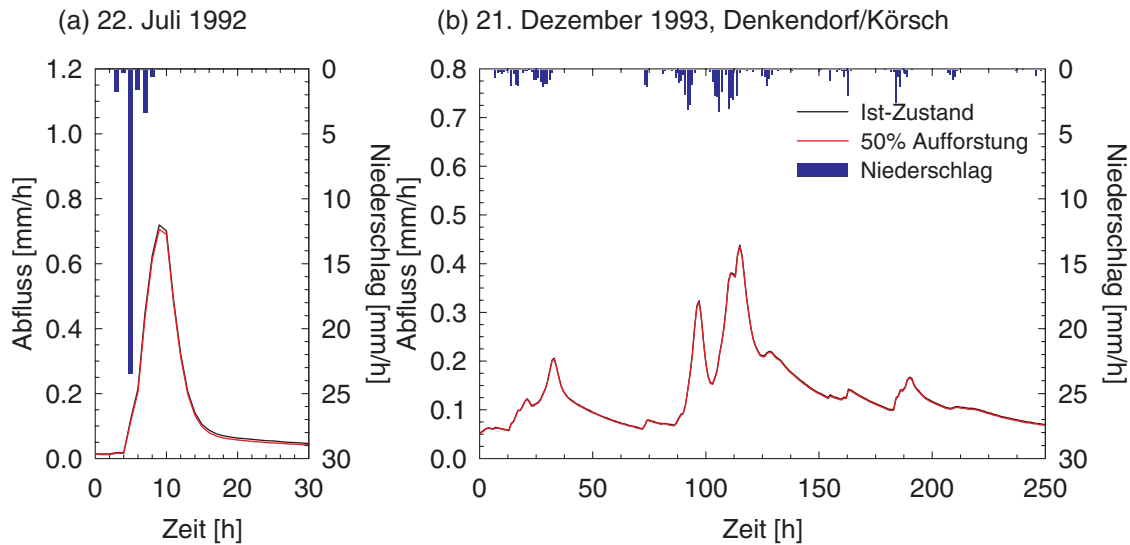


Abb. 6.21 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und eine Aufforstung des Gebietes um 50% relativ zur bestehenden Waldfläche mit der erweiterten Version von WASIM-ETH

Dennoch wirkt sich die modellierte Aufforstung selbst bei kleinen Hochwassern wie den in Abb. 6.21, S. 167 gezeigten kaum auf die Hochwasserentstehung aus. Die Gründe hierfür sind, wie schon in Kap. 6.5.2.2 für die Flächenstilllegungen beschrieben, im geringen Einfluss der veränderten Infiltrationsbedingungen auf die Hochwasserentstehung

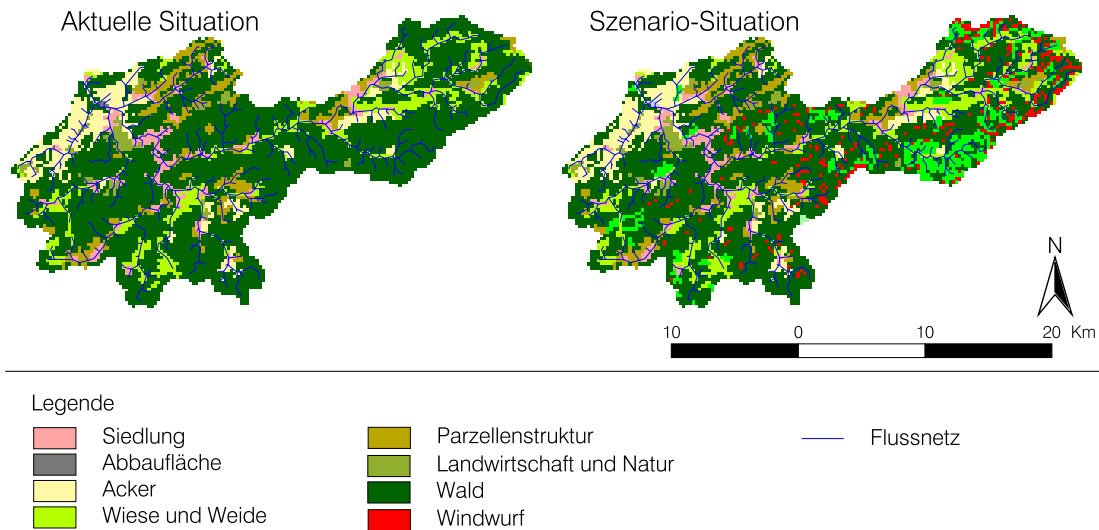
während der betrachteten Ereignisse zu suchen. Da die Infiltrationskapazität der Böden außerhalb versiegelter Bereiche für diese Ereignisse keinen bzw. kaum einen limitierenden Faktor für den Rückhalt von Niederschlagswasser darstellt, sind die Auswirkungen von moderaten Veränderungen hier auch entsprechend gering.

6.7 STURMSCHÄDEN

6.7.1 Szenario für das Lennegebiet

Das Einzugsgebiet der Lenne hat auf Grund seiner strukturschwachen Mittelgebirgslage eine sehr langsame Landnutzungsänderungsdynamik. Die statische Landnutzungsstruktur wird außer durch den permanenten Siedlungsbau im wesentlichen nur durch natürliche Extremereignisse wie z.B. extreme

Witterungserscheinungen beeinflusst. Da in jüngster Vergangenheit Sturmschäden in Teilen Deutschlands zu erheblichem Waldverlust geführt haben, wird ein Szenario über einen Schaden von 5% der Waldfläche angenommen. Kriterien für die Suche der gefährdetsten Standorte wird durch die in Abb. 4.6, S. 99 beschriebenen Ausweisung gestellt. Karte 6.13, S. 168 stellt das Ergebnis der Simulation dar.



Karte 6.13 Windwurfszenario auf 5% der Waldfläche

Das Windwurfszenario zeigt eine vermehrte Gefährdung im Oberlauf der Lenne und damit im höheren Teil des Untersuchungsgebiets. Dies ist durch die Klassifizierung von exponierten Standorten zu erklären. Bei der Auswahl wird nicht in Laub-, Misch- und Nadelwald unterschieden. Die Simulation des Windwurfs hat zu 85% Nadelwald, zu 11% Laubwald und nur zu 4% Mischwald als gefährdet eingestuft. Der überwiegende Anteil der Nadelwaldgefährdung erscheint realistisch, weil Nadelmonokulturen in der Vergangenheit häufig als zwar nicht standortgerechte aber wirtschaftlich rentable Aufforstung gepflanzt wurden. Große Pflanzdichten, wie sie z.B. bei Fichtenbeständen häufig vorkommen, lassen Jungbestände relativ instabil und stressanfällig aufwachsen (Huss, 2000). Diese Art von Wirtschaftswald kann in der Regel keinen ausreichenden Widerstand gegen Störungen, wie z.B. Sturmbelastung, aufbringen. Obwohl diese Gefährdungsabschätzung bisher nicht validiert ist, kann das Ergebnis als Windwurfszenario zur Abschätzung des Einflusses von partieller Entwaldung auf die Hochwasserentstehung genutzt werden.

6.7.2 Hydrologische Auswirkungen

Im verwendeten Szenario sind 5% der Waldfläche in exponierter Lage von Windwurf betroffen. Als Folgenutzung für den Wald wurden Wiesenflächen angenommen. Wesentliche Unterschiede in der Parameterisierung von Wiese gegenüber den verschiedenen Waldarten liegen im Hinblick auf die Abflussbildung vor allem bei einer etwas geringeren gewählten *Makroporosität* und einer geringeren *Interzeptionsspeicherung*.

Zur Illustration der Auswirkungen von Windwurf auf die Hochwasserentstehung (Abb. 6.22, S. 169) dient das bereits in 6.3.3.2, S. 149 beschriebene Hochwasserereignis. Auch für dieses Szenario ist aufgrund der *geomorphologischen* Beschaffenheit des Gebietes optisch kein Unterschied zwischen der Simulation des Ist-Zustandes und des durch Sturm geschädigten Waldbestandes auszumachen. Die Abflusserhöhung beträgt sowohl für den Hochwasserscheitel als auch für das Hochwasservolumen weniger als 1%.

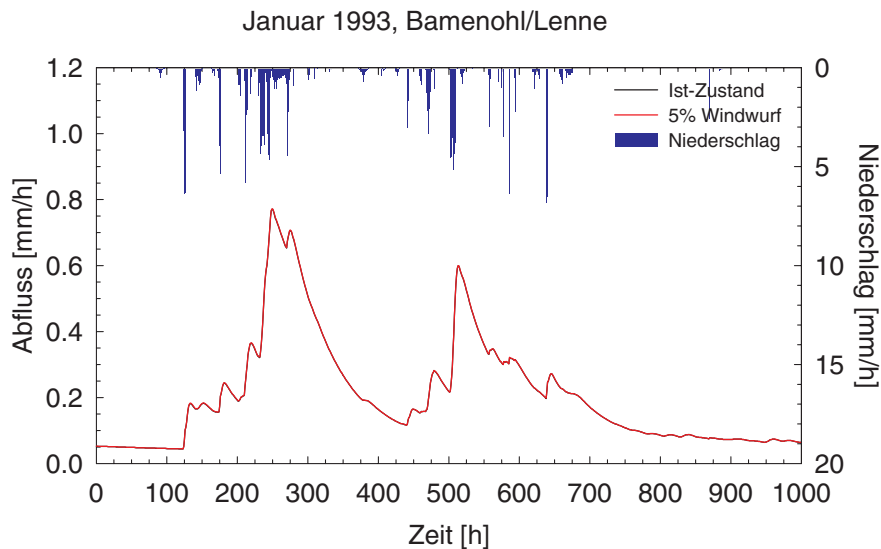


Abb. 6.22 Simulation eines etwa 2-jährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und Windwurf auf 5% der Waldfläche

Da die *Infiltrationskapazität* der Böden bei den betrachteten Ereignissen bedingt durch die geringen Niederschlagsintensitäten jedoch nahezu kein limitierender Faktor ist, ändert die verringerte Makroporosität nur sehr wenig am Abflussgeschehen. Die *Interzeptionsspeicherkapazität* beträgt für die verwendeten Werte des Blattflächenindex abhängig von der Jahreszeit rund 1 bis 2 mm für Wiese und 2 bis 5 mm für Mischwald bzw. 4 bis 6 mm für Nadelwald. Dies hätte auf den von Windwurf betroffenen Flächen entsprechend eine Verringerung der Interzeptionsspeicherkapazität von im Winter *maximal* rund 3 mm zur Folge. Angesichts einer Niederschlagsmenge von etwa 100 mm bis zum Hochwas-

serscheitel und 230 mm für den gesamten in Abb. 6.22, S. 169 gezeigten Zeitraum ist es deshalb plausibel, dass sich die Hochwassersituation infolge des simulierten Sturmschäden nur unwesentlich ändert.

Dass dieses Modellierungsergebnis trotz der Unsicherheiten in der Parameterisierung keineswegs ein Artefakt der Modellkonzeption ist, sondern sich auch mit den Erkenntnissen aktueller empirischer Untersuchungen deckt, wurde bereits in Kap. 2.2.6.1 belegt. Dies muss betont werden, da Wald in der Vergangenheit häufig sehr undifferenziert und dementsprechend fahrlässig als Lösung jeglicher Hochwasserprobleme gepriesen wurde.

6.8 MULCHSAATSZENARIO

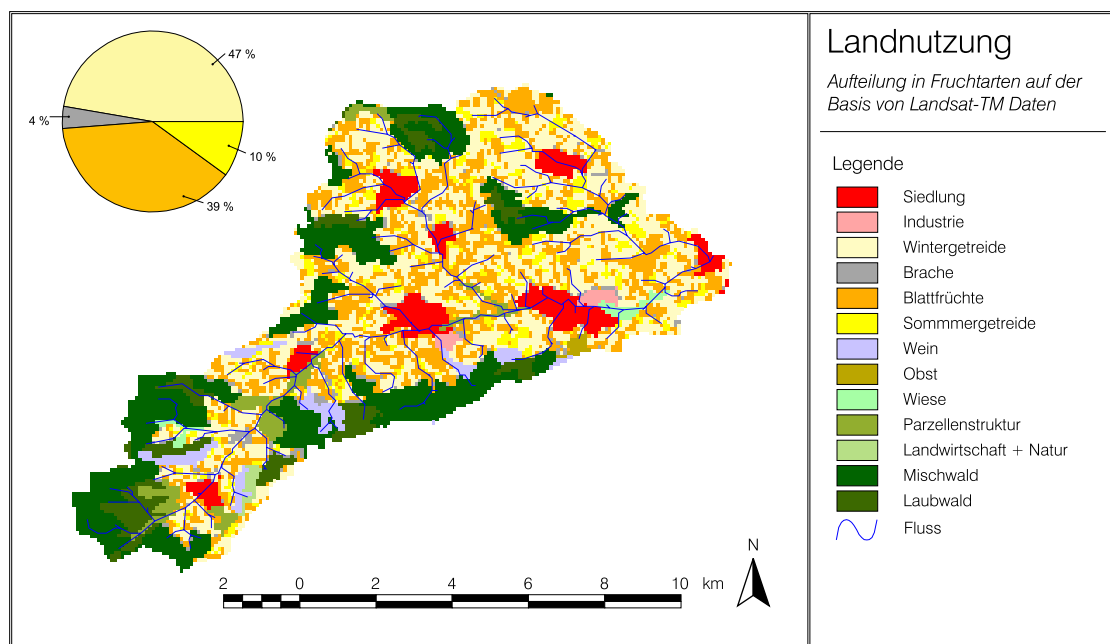
6.8.1 Verteilung der Ackerfrüchte im Leingebiet

Das Einzugsgebiet der Lein unterliegt, wie schon in Kap. 3.2 beschrieben, wegen seiner klimatischen und pedogenen Gunstlage intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Die Auswertung der Gemeindestatistik des STATISTISCHEN LANDESAMTS BADEN-WÜRTTEMBERG (1998) zeigt eine Anbaufolge mit einem Getreideanteil von etwa 60%. Dabei dominiert der Winterhalmfruchtanbau (etwa 47% der Acker-

fläche), weil er mit verhältnismäßig geringer Bearbeitungsintensität den größten Ertrag garantiert. Nach Angaben des STATISTISCHEN LANDESAMTS BADEN-WÜRTTEMBERG (1998) dominieren Winterweizen auf 27% und Wintergerste auf 19% der Ackerfläche. Roggenanbau hat in diesem Gebiet nur geringe Bedeutung. Bedingt durch einen geringen Viehbestand in dieser Region ist Sommergetreide hauptsächlich durch Sommergerste und Hafer vertreten und nimmt an der Lein nur etwa 10% der Fläche ein. Auf Grund der klimatischen Gunstlage und

der hohen Bodenfruchtbarkeit erweist sich für dieses Gebiet ein großer Blattfruchtanteil von fast 40% als rentabel. Innerhalb der Fruchtfolge werden darunter Hackfrüchte, Futterfrüchte und Mais zusammengefasst (OEHMICHEN, 1986). Der prozentuale Anteil der Brache beträgt nur etwa 4% der Bewirtschaftungsfläche. Stillgelegte Flächen müssen mit einer Zwischenfrucht begrünt werden. In der Regel wird diese Zwischenfrucht nicht geerntet, sondern untergepflügt.

Die räumliche Berücksichtigung der Verteilung der verschiedenen Fruchtarten orientiert sich an detaillierten Landsat-Satellitenbild-Klassifizierung von ganz Baden-Württemberg, die von der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt wurde. Karte 6.14, S. 170 zeigt sowohl die prozentuale Aufteilung der Ackerfrüchte, als auch eine räumlich plausible Verteilung.



Karte 6.14 Räumliche Verteilung der Ackerfrüchte an der Lein

6.8.2 Szenario für das Leingebiet

Das Belassen von Ernterückständen auf dem Feld und dessen Bedeckung mit Stroh oder Fremdmaterialien wird in der landwirtschaftlichen Praxis als Mulchung bezeichnet. Unter anderem dient Mulchen dazu, den Boden während Phasen geringer Vegetationsbedeckung vor Verschlammung und Erosion zu schützen und gleichzeitig die Infiltrationseigenschaften zu verbessern. Weitere Vorteile des Mulchens sind eine Düngung des Bodens sowie eine Steigerung der Bioaktivität im Boden (siehe Kap. 2.2.3.1). Da das Mulchmaterial aber auch einem Pilzbefall der Kulturpflanzen Vorschub leistet, ist die Anwendung dieser Technik meist mit ver-

stärktem Fungizideinsatz verbunden und deren Nutzen daher insgesamt umstritten.

Nach einer für das Leingebiet zur Verfügung stehenden klassifizierten Landsat-TM-Szene werden auf etwa 23% der Einzugsgebietsfläche Blattfrüchte angebaut, die durch ihren geringen Bodenbedeckungsgrad bis ins späte Frühjahr hinein für Verschlammung disponiert sind. Für das MulchszENARIO wird deshalb angenommen, dass die gesamte von Blattfrüchten bestandene Fläche einer Mulchung unterzogen wird, was bei einer Untersuchung von LEICHTFUSS & KIVUMBI (1995) zu einer Steigerung der Makroporosität um 50% und einer Zunahme der hydraulische Leitfähigkeit um 20% geführt hat. Diese Werte flossen direkt in die Parameterisierung

des Modells ein. Außerdem wurde der Bodenbedeckungsgrad für die Blattfruchtflächen im Winter von 5 % auf 50 % erhöht.

6.8.3 Hydrologische Auswirkungen

Zusätzlich zu den äußerst geringen Auswirkungen der durch Mulchung veränderten Boden- und Landnutzungsparameter auf die Hochwassersituation ist in Abb. 6.23, S. 171 die Bandbreite der *Modellunsicherheit* dargestellt, welche sich aus dem nur sehr

vage bekannten *Austausch von Wasser* zwischen Makroporen und umgebender Bodenmatrix ergibt. Dieser Sachverhalt wurde bereits bei der Beschreibung des Makroporenmoduls in Kap. 5.5.1 und dessen Parameterisierung in Kap. 5.5.6 diskutiert. Für die advektiven Ereignisse ist der Einfluss der Interaktion zwischen Makroporen und Feinboden so gering, dass die gepunktet dargestellte Bandbreite sich mit bloßem Auge nicht von der eigentlichen Szenarioganglinie unterscheiden lässt.

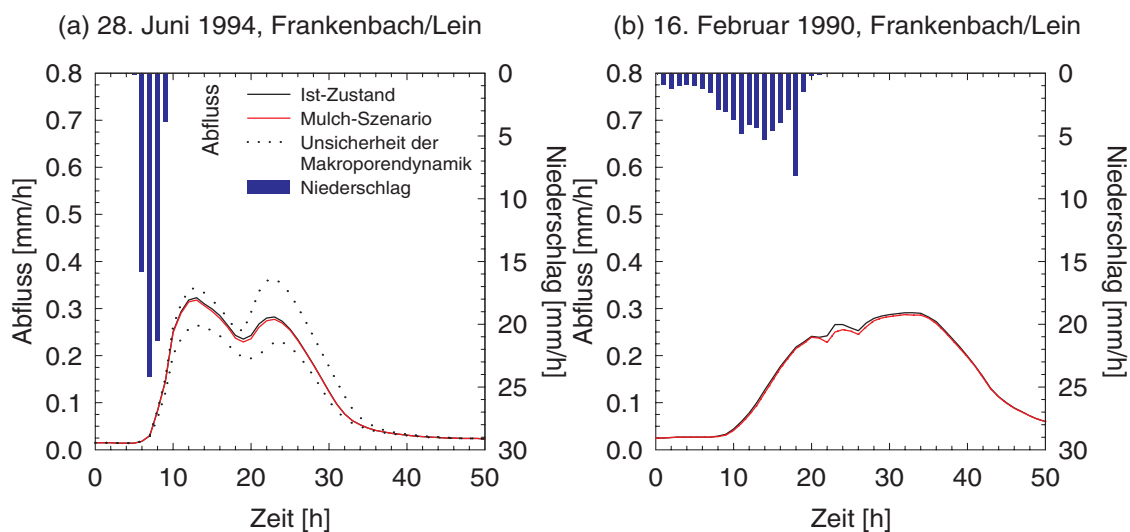


Abb. 6.23 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Mulchsaatszenario für die 23 % der Einzugsgebietsfläche mit Blattfruchtanbau

Die in Kap. 5.5.7 beschriebene Sensitivitätsanalyse für die Modellerweiterungen hat ergeben, dass der Parameter, der die *Interaktion* zwischen Makroporen und Bodenmatrix steuert, oberhalb eines Mindestvolumens aktiver Makroporen das Modellergebnis wesentlich stärker beeinflusst als die Parameter, die das *Makroporenvolumen* im Boden festlegen. Um dies zu demonstrieren, wurde die Entleerungskonstante des Makroporenspeichers k_{SM} , die neben der Bodenfeuchte die Interaktion zwischen Makroporen und Bodenmatrix bestimmt, von dem durch Kalibrierung ermittelten Wert von 1,5 h einmal auf 0,5 h erniedrigt und einmal auf 3 h erhöht. Diese Variationsbreite ist willkürlich. Je kleiner der Wert für die Entleerungskonstante ist, desto schneller perkoliert das von den Makroporen aufge-

nommene Wasser in tiefere Bodenschichten, wo es bei *geringer Bodenfeuchte* und den Bodenverhältnissen in weiten Teilen des Leingebietes nur noch zu einem sehr geringen Teil zum Hochwasser beiträgt. Bei *hoher Bodenfeuchte* hingegen dominiert das Sättigungsdefizit des Bodens die Geschwindigkeit der Abgabe von Wasser aus den Makroporen an die Bodenmatrix. Im Extremfall, das heißt bei gesättigten Verhältnissen, füllen sich die Makroporen aus dem Sättigungsüberschuss des umgebenden Feinbodens, worauf der Parameter k_{SM} keinen Einfluss hat. Dies ist auch der Grund für die nahezu unsichtbaren Auswirkungen einer Veränderung der Makroporendynamik während der advektiven Ereignisse. Erfreulicherweise ist dieser Zusammenhang kein Modellartefakt, sondern Ausdruck dessen, dass die star-

ke Heterogenität innerhalb der Bodenzone mit zunehmender Bodenfeuchte ausgeglichen wird.

Die geringen simulierten Auswirkungen der Mulchsaat auf die Hochwasserentstehung scheinen den Ergebnissen von Beregnungsversuchen zu widersprechen, die meist eine deutliche Reduktion der Entstehung von Infiltrationsüberschuss zeigen. In der Regel werden diese Versuche jedoch mit *unrealistisch hohen Niederschlagsintensitäten -und dauern* durchgeführt, wie sie im gesamten Zeitraum, für den an der Lein stündliche Niederschlagsmessungen vorliegen, noch nicht einmal an einzelnen Stationen aufgezeichnet wurden. Beispiele für Versuche, die im Kraichgau auf Löss durchgeführt wurden, enthält ein Artikel von PFEIL (1998). In einem Versuch wurde über zwei Stunden hinweg mit mehr als 50 mm/h beregnet, um Infiltrationsüberschuss zu provozieren (siehe Kap. 2.2.3.1). Ein ebenfalls zitierter Infiltrationsversuch weist für den schlechtesten Standort eine Versickerungsrate von 5 mm/min aus, was 300 mm/h entspricht. Demgegenüber wurden im Zeitraum von 1982 bis 1997 im Leingebiet nur während 5 Stunden Niederschlagssummen von mehr als 30 mm/h gemessen, der Höchstwert betrug 44 mm/h. Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen lokal durchgeführten Beregnungsversuchen und der Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Starkregenereignis besteht darin, dass die Experimente nichts über *den weiteren Weg des Wassers* aussagen, das am unteren Rand der Beregnungsanlage als Infiltrationsüberschuss aufgefangen wird (siehe Kap. 2.1.4 zu den Skalen von Abflussprozessen). Außerdem sind Konvektivzellen, die Niederschläge hoher Intensität bewirken, in der Regel auf eine Fläche von wenigen Quadratkilometern begrenzt, so dass größere Einzugsgebiete nur äußerst

selten *flächendeckend* mit hoher Intensität überregnet werden (siehe Kap. 2.1.3 zu den Skalen von Niederschlägen).

Fast alle der im Leingebiet zwischen 1982 und 1997 aufgetretenen hochwasserrelevanten konvektiven Starkregenereignisse fanden in Zeiten mit hoher Bodenbedeckung statt, so dass das in Kap. 5.5.2 beschriebene neue Verschlammungsmodul für WASIM-ETH nicht systematisch getestet werden konnte. Ein Ereignis im September 1987, das nach der Getreideernte stattgefunden haben muss, zeigt jedoch bei der Simulation trotz mutmaßlich geringer Bodenbedeckung auf den abgeernteten Feldern eine nur geringfügig andere Abflussbildungsdynamik als die anderen Ereignisse. Werden zur Parameterisierung der durch Verschlammung reduzierten hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenoberfläche Daten von Beregnungsversuchen herangezogen, so wird das gemessene Hochwasser vom Modell um ein Vielfaches überschätzt. Wird das Verschlammungsmodul dahingegen generell deaktiviert, so resultiert für das September-Ereignis nur eine geringfügige Unterschätzung der gemessenen Ganglinie. Auch dies ist ein Indiz dafür, wie wenig *unter extremen Bedingungen* und *auf kleinen Flächen* durchgeführte Beregnungsversuche zur Quantifizierung der Hochwasserentstehung im Einzugsgebietsmaßstab beitragen können.

Diese Ergebnisse ändern jedoch nichts an der Tatsache, dass Verschlammung und die damit verbundene Erosion im Kraichgau ein reales Problem darstellen. Glaubt man den Simulationen ungeachtet der Unsicherheiten bei der Parameterisierung der veränderten Bodeneigenschaften, so ist Hochwasserschutz wahrscheinlich das schwächste unter den vielen guten Argumenten, die für konservierende Bodenbearbeitung sprechen.

6.9 NIEDERSCHLAGSVERSICKERUNG IN SIEDLUNGSGEBIETEN

6.9.1 Szenario für das Leingebiet

Nach dem Aktionsplan Hochwasser der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins IKSR (1998) sollen im Zeitraum von 1998 bis 2020 etwa 2500 km² oder 1,3% der Einzugsgebietsfläche des Rheins von rund 190000 km² entsiegelt werden. Übertragen auf das Einzugsgebiet der Lein bedeutet

dies, dass dort das Niederschlagswasser von rund 54% der versiegelten Fläche in den Siedlungsgebieten *gespeichert* oder *versickert* werden müsste, um die Wirkung der geforderten Entsiegelung zu erzielen. Dieser hohe Wert ergibt sich daraus, dass der Anteil der Siedlungsfläche an der Einzugsgebietsfläche im Leingebiet deutlich unter dem Durch-

schnitt für die alten Bundesländer liegt (siehe Kap. 2.2.2.2).

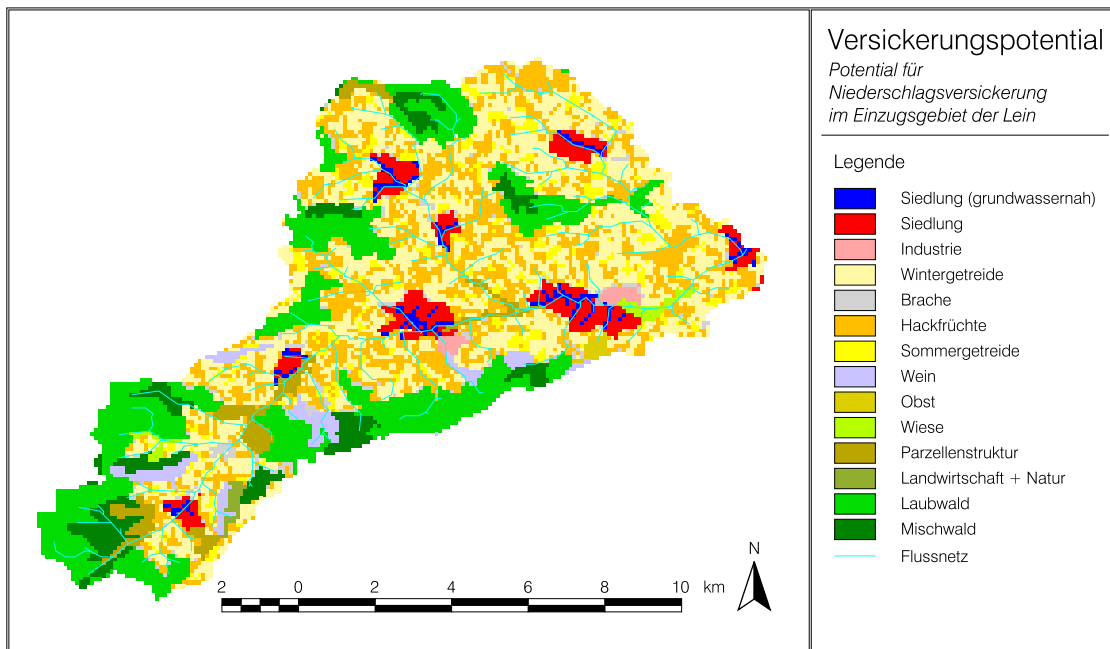
Bei der Modellierung der Wirksamkeit von Versickerungsmaßnahmen werden zwei Szenarien betrachtet:

- (1) Die Versickerungsmaßnahmen werden gleichmäßig auf alle Siedlungsflächen im Gebiet verteilt. Dies entspricht einer Verringerung des bei der Modellierung verwendeten Versiegelungsgrades der Siedlungsflächen um 54% von 0,35 auf 0,16.
- (2) Die 25% der Siedlungsflächen, die *potentiell grundwassernahe Standorte* darstellen, werden von der Versickerung ausgeschlossen. Um auf den verbleibenden 75% der Siedlungsflächen das gleiche Entsiegelungsäquivalent zu erzielen wie bei einer Einbeziehung aller Siedlungsflächen, wird dort der Versiegelungsgrad um 74% von 0,35 auf 0,09 gesenkt und die Muldenspeicherung auf den zugehörigen Freiflächen entsprechend intensiviert. Ein Anschluss von 74%

der geeigneten versiegelten Fläche an Versickerungsmulden entsprechenden Ausmaßes würde allerdings mit großer Wahrscheinlichkeit an der Verfügbarkeit von Freiflächen scheitern.

Als Kriterium für potentiell geringe Grundwasserflurabstände wird vereinfachend der *topographische Index* verwendet. Auf eine Einbeziehung der digitalen Bodendaten in eine Eignungsbewertung wird verzichtet, da diese in Siedlungsgebieten aufgrund der starken und heterogenen anthropogenen Überprägung nur sehr eingeschränkte Gültigkeit besitzen. Das Resultat der Bewertung ist in Karte 6.15, S. 173 dargestellt.

Andere Eignungskriterien für die Anwendbarkeit von Versickerungsmaßnahmen wie beispielsweise das Relief, das Vorkommen von Altlasten, die Bebauungs- und Entwässerungsstruktur oder die generelle Verfügbarkeit von Grünflächen (DEMUTH et al., 1998) wurden für die Modellierung nicht berücksichtigt, da zur Erfassung dieser Parameter detaillierte Untersuchungen vor Ort vonnöten wären.



Karte 6.15 Versickerungspotential im Einzugsgebiet der Lein bei Ausschluss der 25% der Siedlungsflächen mit den höchsten Werten für den topographischen Index als Kriterium für potentiell geringe Grundwasserflurabstände

An Standorten mit gut durchlässigen Böden reicht für die Niederschlagsversickerung häufig eine einfache Versickerungsmulde aus. Mäßig durchlässige Böden erfordern zusätzlichen Speicherraum, der beispielsweise in Form eines Kiesbetts unter der Versickerungsmulde bereitgestellt werden kann. In

ungünstigen Fällen ist zusätzlich ein Anschluss an die Kanalisation nötig, um ein Überlaufen der Mulde zu verhindern (siehe Abb. 6.24, S. 174). Diese Maximalvariante bedeutet allerdings einen erheblich größeren Investitionsaufwand bei vergleichsweise geringem Wirkungsgrad.

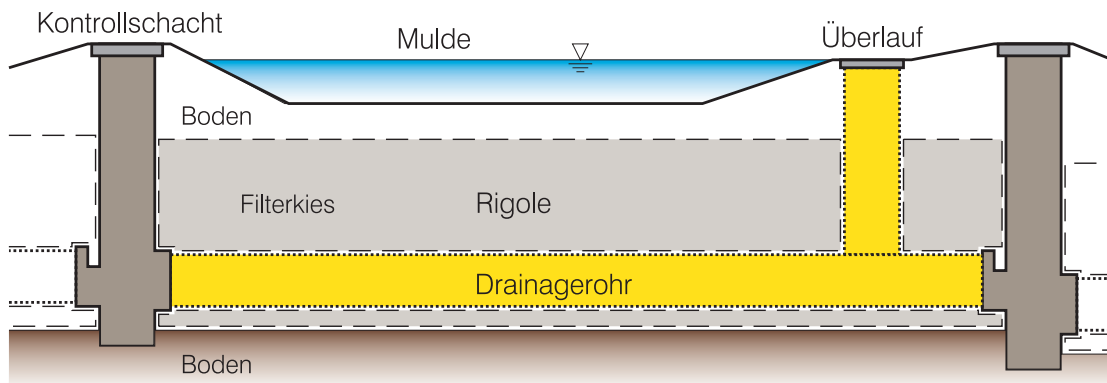


Abb. 6.24 Bausteine eines Mulden-Rigolen-Elements (nach SIEKER, 1995)

Die Speicherleistung von Versickerungsmulden kann, bezogen auf die angeschlossene versiegelte Fläche, mit rund 40 mm angesetzt werden (übliche Werte liegen nach SIEKER, mündliche Auskunft, zwischen 30 und 50 mm). Bedingt durch den allgemein gehaltenen Aufbau des neu entwickelten Modells zur Berücksichtigung versiegelter Flächen (siehe Abb. 5.5, S. 119) wird dieses Speichervolumen gemittelt über den ganzen unversiegelten Bereich eines Siedlungspixels als dezentraler Rückhalt (siehe Kap. 5.5.4) bereitgestellt. Im Unterschied zur tatsächlichen Funktionsweise von Versickerungsmulden füllt sich der dezentrale Rückhalt im Modell aber erst entweder bei Überschreitung der Infiltrationskapazität des Bodens oder bei dessen Sättigung. Dies hat tendenziell eine *Überschätzung* der Wirksamkeit von Versickerungsmaßnahmen für die

Dämpfung des *Abflussmaximums* zur Folge. Ob dahingegen bei einer Überlastung der Versickerungsmulde ein Anschluss an die Kanalisation besteht oder die Mulde einfach überläuft, spielt für die Modellierung nur eine untergeordnete Rolle, da das überlaufende Wasser in beiden Fällen mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Direktabfluss beiträgt.

6.9.2 Hydrologische Auswirkungen

Die Wirkung der oben beschriebenen Versickerungsmaßnahmen zeigt Abb. 6.25, S. 175. Der Unterschied zwischen der gleichverteilten Variante und der optimierten Variante unter Ausschluss der grundwassernahen Standorte fällt gering aus und ist anhand der Hochwasserganglinien kaum erkennbar.

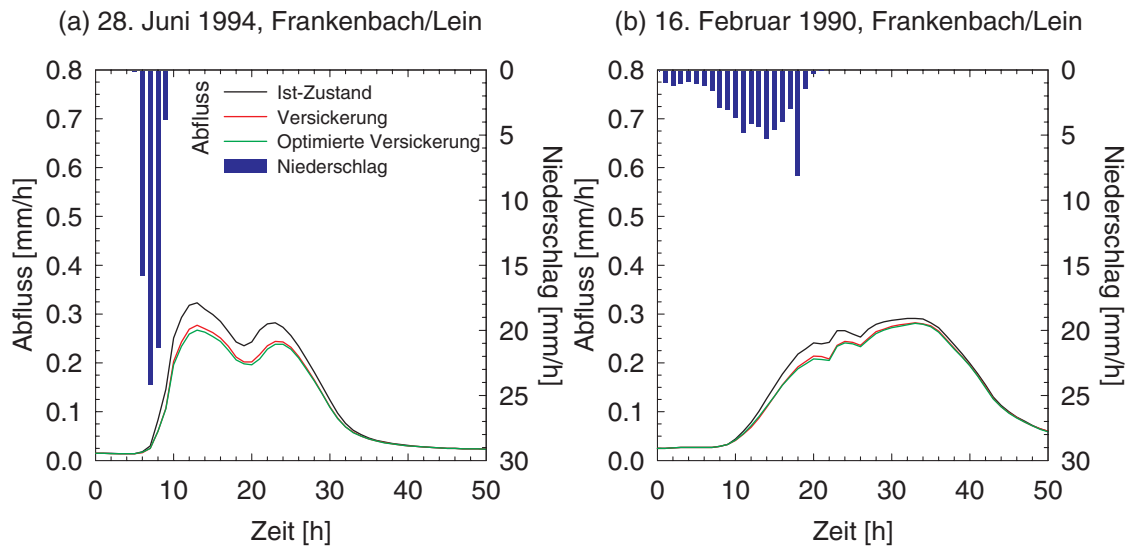


Abb. 6.25 Simulation zweier etwa 3-jährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und zwei Szenarien zur Niederschlagsversickerung in Siedlungsgebieten bei Anschluss von 1,3% der Einzugsgebietsfläche

Da im Sommer aufgrund der geringeren Bodenfeuchte die Neigung zur Bildung von Sättigungsflächen ohnehin gering ist, überrascht der schwache Einfluss der optimierten Variante auf die Hochwasserdämpfung des konvektiven Ereignisses nicht. In Bezug auf die sehr geringen Auswirkungen der optimierten Variante auf das advective Ereignis ist davon auszugehen, dass aufgrund der hohen Vorfeuchte die Speicherkapazität des Bodens für Niederschlagswasser insgesamt gering war. Dies hat zur Folge, dass in weiten Teilen der an Versickerungsanlagen angeschlossenen Siedlungsfläche vor allem das oberirdische Speichervolumen der Mulde und weniger deren Versickerungsleistung zur Hochwasserdämpfung beiträgt.

Die in Abb. 6.26, S. 176 wiedergegebene mittlere Wirksamkeit der simulierten Versickerungsmaßnahmen dokumentiert, dass konvektive Ereignisse aufgrund geringerer Vorfeuchte und tendenziell kleinerer Niederschlagsmengen deutlich stärker abgemindert werden als advective.

Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Anbindung versiegelter Flächen an Versickerungsmulden lassen sich außerdem anhand eines Vergleichs mit dem Szenario eines 50%-igen Wachstums der Sied-

lungsfläche ziehen. Dieses Verstärkungsszenario bildet sozusagen das Gegenstück zum Versickerungsszenario, da im einen Fall 1,3% der Einzugsgebietsfläche zusätzlich versiegelt und im anderen Fall 1,3% versiegelter Einzugsgebietsfläche weitestgehend von der Kanalisation abgekoppelt werden. Abb. 6.14, S. 153 und Abb. 6.26, S. 176 bieten hierzu eine quantitative Gegenüberstellung.

Eine Betrachtung der Veränderungen für *sommerliche Starkregenereignisse* zeigt, dass auch bei optimierter Standortwahl die Versiegelung des Bodens nicht ungeschehen gemacht wird. Zumindest liegt die *Verminderung* des Hochwasservolumens durch Versickerungsmaßnahmen aber für diese Ereignisse in derselben *Größenordnung* wie die *Zunahme* des Hochwasservolumens bei zusätzlicher Versiegelung.

Auch die Auswirkungen von Versiegelung beziehungsweise Versickerungsmaßnahmen als Reaktion auf *zyklonale Niederschlagsereignisse* liegen in derselben Größenordnung. Hier sind jedoch die Versickerungsmulden insofern im Vorteil, als dass sie bei gesättigtem Boden noch Speicherraum an der Bodenoberfläche zur Verfügung stellen, der zu einer Reduktion des Hochwasservolumens beiträgt.

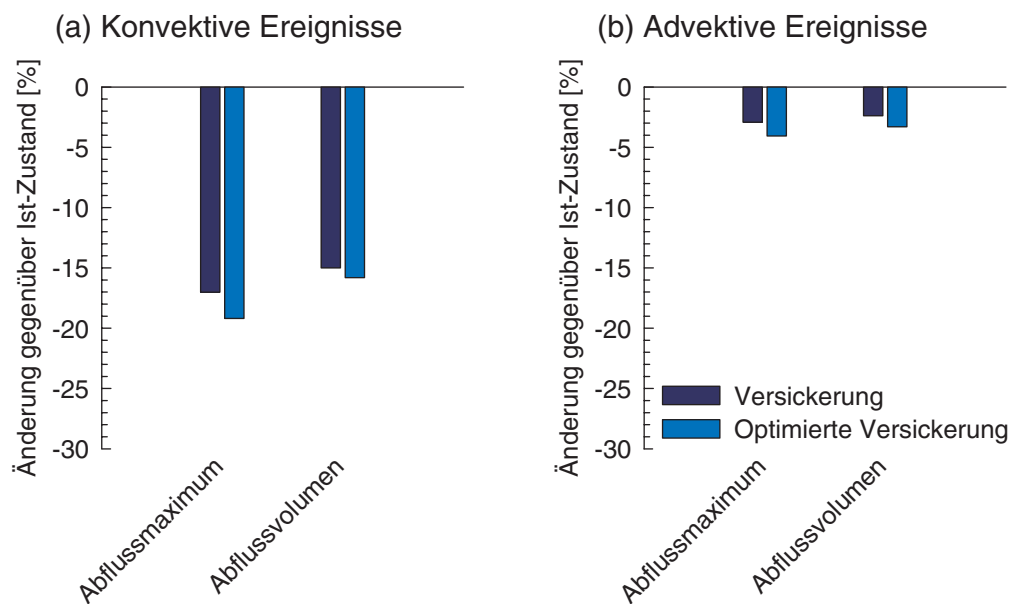


Abb. 6.26 Simulierte Änderung von Abflussmaximum und Abflussvolumen im Einzugsgebiet der Lein als Reaktion auf zwei Szenarien zur Niederschlagsversickerung in Siedlungsgebieten und gemittelt für (a) fünf konvektive und (b) sechs advective Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 8 Jahren

Wie bereits für das extreme Verstädterungsszenario anhand von Tab. 6.4, S. 144 erläutert, variiert auch die Wirksamkeit von Versickerungsmaßnahmen ins-

besondere für die einzelnen *advectiven* Ereignisse stark. Dies belegt Tab. 6.7, S. 176.

Tab. 6.7 Verminderung von Hochwasservolumen und Abflussmaximum für sechs advective Ereignisse bei einer Anwendung von Versickerungsmaßnahmen auf 54% der versiegelten Fläche (optimierte Variante sortiert nach der Wirksamkeit) und deren Zusammenhang zu Basisabflussanteil, Dauer und Wiederkehrintervall

Jahr, Monat	Verminderung gegenüber dem Ist-Zustand		Simulierter Basisabflussanteil am Volumen [%]	Dauer [h]	Jährlichkeit ca. [a]
	Maximum [%]	Volumen [%]			
1990, Februar	3,4	5,4	21	150	2
1993, Dezember	8,2	4,7	19	250	8
1997, Februar	6,0	4,1	20	150	7
1982, Dezember	4,6	3,5	28	225	3
1983, Mai	1,4	1,4	40	300	4
1988, März	0,7	0,5	52	650	3
Mittelwert	4,0	3,3	30	290	4,5

Die Verminderung der *Abflusssumme* schwankt für die modellierten advectiven Ereignisse je nach Vor-

feuchte und Ereignischarakteristika zwischen 0,5% und 5,4%. Diese Beobachtung unterstreicht die Tat-

sache, dass Pauschalaussagen zur Wirksamkeit von Versickerungsmaßnahmen nicht möglich sind. Dies gilt um so mehr, als dass die zur Verfügung stehenden, durch hochaufgelöste Daten dokumentierten Hochwasserereignisse nur ein kleines Spektrum möglicher Hochwasser widerspiegeln. Vor allem

Hochwasser mit großen Wiederkehrintervallen werden von der Datengrundlage nicht abgedeckt. Sicher ist aber, dass bei zunehmender Niederschlagsmenge der Einfluss der Muldenspeicherung gegenüber dem Niederschlagsvolumen an Bedeutung verliert.

Auswirkungen von Klimaänderungen

7.1 ERSTELLUNG DER KLIMASZENARIEN

Klima ist nach BLÜTHGEN (1966) der für ein bestimmtes Gebiet charakteristische Ablauf der Witterung während eines längeren Zeitraums, welcher sich in einer charakteristischen Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte ausdrückt.

In der öffentlichen Diskussion wird häufig vergessen, dass sich *Klimaänderungen* zwar auch in veränderten *Witterungsextremen* widerspiegeln, jedoch nicht an *einzelnen Witterungsereignissen* festgemacht werden können. Klimaänderungen können nur über einen *längeren Zeitraum* anhand von zahlreichen Extremereignissen nachgewiesen werden. Da aber Extremereignisse definitionsgemäß selten auftreten, sind auch mögliche Aussagen hierüber unsicherer als Aussagen über eine Änderung der *Klimamittelwerte*. In Kap. 2.3 wurden bereits mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und auf Hochwasser beschrieben. Dabei wurde deutlich, mit welcher großen Unsicherheiten Untersuchungen hierzu behaftet sind und wie wenig Informationen es bislang zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf hydrologische Extreme wie Hochwasser gibt.

In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Ansätze vorgestellt, mittels derer die Berechnungen *globaler Zirkulationsmodelle* für die Simulation *lokal auftretender Witterungsereignisse* nutzbar gemacht werden können (siehe Kap. 2.3.2.5). In der vorliegenden Studie wird hierfür das *expanded downscaling* von BÜRGER (1996) verwandt, dessen Grundzüge im weiteren erläutert werden.

7.1.1 Szenariotechnik

7.1.1.1 Statistical downscaling

Statistical downscaling basiert auf der Annahme, dass das Lokalklima (L) direkt vom Muster der globalen Zirkulation (G) abhängt und dass dieser Zusammenhang mathematisch beschrieben werden kann:

$$l = f(g) \quad (7.1)$$

- | | |
|-----|---|
| l | lokale Messgröße an einem bestimmten Zeitpunkt
(z.B. Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag) |
| g | Mess- bzw. Simulationsgröße der globalen Zirkulation an einem bestimmten Zeitpunkt
(z.B. Geopotentielle Höhe der 500 hPa-Fläche) |

Dieses Verfahren hat sich zur Simulation beispielsweise der lokalen Entwicklung der Lufttemperatur oder des Luftdrucks über längere Zeiträume hinweg bewährt. Wesentliche Nachteile des herkömmlichen *statistical downscaling* für Untersuchungen zu Wetterextremen sind nach BÜRGER (1996) folgende:

- (1) Die starke räumliche und zeitliche *Variabilität* von lokalen Wetterdaten wird nur mangelhaft nachgebildet, da sie sich aus Klimamodellen ableitet, die für die Beschreibung großräumiger und langfristiger Änderungen ausgelegt sind. Dieser Mangel wirkt sich besonders negativ

auf die Simulation von Niederschlägen aus, deren Variabilität für die Hochwassermodellierung von entscheidender Bedeutung ist.

- (2) Das Verfahren setzt voraus, dass die simulierten Größen *normalverteilt* sind. Diese Annahme gilt in Näherung für Größen wie Lufttemperatur oder Luftdruck, trifft jedoch für Niederschläge und insbesondere Starkniederschläge nicht zu.

7.1.1.2 Expanded downscaling

Um die Nachteile des herkömmlichen statistical downscaling zu minimieren, hat BÜRGER (1996) das Verfahren des *expanded downscaling* entwickelt. Wesentliche Unterschiede zu den herkömmlichen Verfahren sind folgende:

- (1) Anstelle von *täglichen Werten* für die Messgrößen des lokalen Klimas werden anhand der großräumigen Zirkulation *tägliche Kovarianzen* dieser Messgrößen simuliert. Dies führt dazu, dass die *Variabilität* des lokalen Klimas bei der Simulation erhalten bleibt.
- (2) Die verwendeten Zeitreihen der Klimavariablen werden *normalisiert*. Dies ist erforderlich, da Klimavariablen in der Regel *nicht normalverteilt*, das Verfahren jedoch eigentlich nur für normalverteilte Größen gilt.

Die Methode hat zudem die Eigenschaft, dass aus einer Zeitreihe, die in der Vergangenheit an einer Klima- oder Niederschlagsstation gemessen wurde, die klimatologischen Randbedingungen extrahiert und durch klimatologische Randbedingungen eines *zukünftigen Klimas* ersetzt werden können. Diese Möglichkeit wird im vorliegenden Fall genutzt, um das hydrologische Jahr 1994 (von Nov. 1993 bis Okt. 1994), in dem in allen drei Untersuchungsgebieten Hochwasser auftraten, um etwa 100 Jahre in die Zukunft zu transferieren. Dieser Transfer ist als *Gedankenexperiment* aufzufassen, bei dem der Witterungsverlauf des hydrologischen Jahres 1994 erhalten bleibt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass sie einen direkten Vergleich der hydrologische Modellierung des *Ist-Zustandes* mit den Bedingungen des *Klimaszenarios* gestattet.

Im folgenden wird dargestellt, wie die von Herrn Bürger berechneten Klimaszenarien für die vorliegende Studie erstellt wurden.

Analyse gemessener Zeitreihen

Zur Charakterisierung des Klimas im Ist-Zustand wurde der Zeitraum von 1970 bis 1997 gewählt, für den in allen drei Untersuchungsgebieten die Daten von jeweils zwei Klimastationen und einer ausreichenden Anzahl von Niederschlagsstationen zur Verfügung stehen. Diese 28jährige Periode stellt eine gute Datenbasis für die Klimaszenarien dar. Im Idealfall wird für Klimastudien eine 30jährige Periode benutzt, wobei sich die Verwendung der Periode von 1961 bis 1990 durchgesetzt hat, um die Vergleichbarkeit verschiedener Studien zu gewährleisten. Dies war aufgrund der Datenlage im vorliegenden Fall nicht möglich.

Die gemessenen Daten $I(t)$ werden hinsichtlich ihrer statistischen Eigenschaften (Mittelwert, Extremwerte, Variabilität etc.) analysiert und in Beziehung zur großräumigen Zirkulation $g(t)$ gesetzt. Daten zur großräumigen Zirkulation stehen in Form von Re-Analysen eines Wettervorhersagemodells zur Verfügung, das von den *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) in den USA betrieben wird. Mit diesem Modell werden nicht nur Wettervorhersagen berechnet, sondern auch vergangene Wetterlagen nachsimuliert.

Aus dem Zusammenhang zwischen gemessenen Daten und großräumiger Zirkulation werden die Vorschriften für die Übertragung (*downscaling*) des großräumigen Klimaszenarios auf die Untersuchungsgebiete im Ist-Zustand abgeleitet (siehe Gl. 7.1, S. 179).

Normalisierung der gemessenen Zeitreihen

Wie bereits erwähnt, werden die Zeitreihen der lokalen Messgrößen normalisiert, um den Voraussetzungen des downscaling-Verfahrens genüge zu tun. Die Normalisierung der Zeitreihen geschieht anhand einer sogenannten *probability integral transformation* (probit) und funktioniert in beide Richtungen:

$$\begin{aligned} X \rightarrow Y &= \Psi_C(X) \\ Y \rightarrow X &= \Psi_C^{-1}(Y) \end{aligned} \quad (7.2)$$

X	Gemessene Zeitreihe für einen bestimmten Zeitraum
Y	Normalisierte Zeitreihe für diesen Zeitraum
Ψ_C	Transformationsfunktion oder Probit einer Zeitreihe (der Index C bezeichnet die Abhängigkeit der Transformation vom großräumigen Klima)

Ein wichtiges Ergebnis dieser Normalisierung ist, dass damit einfache Beziehungen für Mittelwert und Standardabweichung gelten. Für annähernd normalverteilte Tageswerte von beispielsweise Luft- und Wasserdampfdruck oder Lufttemperatur sieht diese Beziehung folgendermaßen aus:

$$Y = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (7.3)$$

μ Mittelwert
 σ Standardabweichung

Für nicht normalverteilte Größen wie tägliche Niederschläge können Mittelwert und Standardabweichung nach BÜRGER (1996) in guter Näherung so berechnet werden:

$$Y = \alpha + \ln(X + e^\beta) \quad (7.4)$$

α Mittelwert nicht normalverteilter Größen
 β Standardabweichung nicht normalverteilter Größen

Transfer gemessener Zeitreihen in die Zukunft

Ausgangspunkt für die Modellierung eines zukünftigen Klimas in den drei Untersuchungsgebieten ist ein Klimaszenario, das mit dem Globalen Zirkulationsmodell ECHAM4/OPYC3 des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg simuliert wurde. Für den CO₂-Anstieg wurde der Fall »business as usual« zugrundegelegt, wie er vom *Intergovernmental Panel on Climate Change* als Szenario IS95a definiert wurde (IPCC, 1995).

Mittels expanded downscaling werden hieraus, getrennt für alle drei Einzugsgebiete, *lokale Szenarien* sowie die *probit-Parameter* berechnet, die das Szenarioklima charakterisieren. Der Transfer des hydrologischen Jahres 1994 in die Zukunft erfolgt

dann anhand der probit-Parameter, die in die Transformationsfunktion Ψ einfließen. Deren Abhängigkeit vom großräumigen Klima ist durch die Indizes C (Klima im Ist-Zustand) und C^* (Klima im Szenario-Zustand) gekennzeichnet:

$$\begin{aligned} X_{1994} \rightarrow Y &= \Psi_C(X) \\ Y \rightarrow X_{1994}^* &= \Psi_{C^*}^{-1}(Y) \end{aligned} \quad (7.5)$$

X_{1994} Zeitreihe des hydrologischen Jahres 1994
 X_{1994}^* Um etwa 100 Jahre in die Zukunft transferierte Zeitreihe des hydrologischen Jahres 1994
 C Klima des Ist-Zustandes im Zeitraum von 1970 bis 1997
 C^* Klima des Szenarios für den Zeitraum von 2070 bis 2097

Dabei wird zunächst die Klimatologie des Ist-Zustandes aus dem Witterungsverlauf extrahiert und anschließend die Klimatologie des Szenarios für den Zeitraum von 2070 bis 2097 auf den Witterungsverlauf aufgeprägt. Ergebnis sind veränderte tägliche Daten der Temperatur, Luftfeuchte und des Niederschlages für das hydrologische Jahr 1994*.

7.1.2 Szenarien

Um der Dynamik der Abflussbildung infolge von Starkniederschlägen Rechnung zu tragen, werden die hydrologischen Simulationen für diese Studie im *Stundenzeitschritt* durchgeführt (siehe Kap. 6.1). Die meteorologischen Zeitreihen für das zukünftige Klima beinhalten jedoch lediglich *tägliche* Werte. Da für einige Niederschlagsstationen (im Ist-Zustand) hochaufgelöste Daten zur Verfügung stehen, konnten die täglichen Niederschlagswerten des Klimaszenarios auf Stundenwerte *disaggregiert* werden. Dabei wird implizit davon ausgegangen, dass sich die zeitliche Verteilung der Niederschläge innerhalb des Tages im hydrologischen Jahr 1994* gegenüber dem Ist-Zustand nicht verändert hat.

Tab. 7.1 Gebietsniederschlag im hydrologischen Jahr 1994 und für das Klimaszenario 1994*

	Gebietsniederschlag [mm/a]			Änderung [%]
	Langjähriges Mittel	1994	1994* (2070–2097)	
Lein	770	840	670	-20
Körsch	680	830	630	-24
Lenne	1350	1590	1360	-15

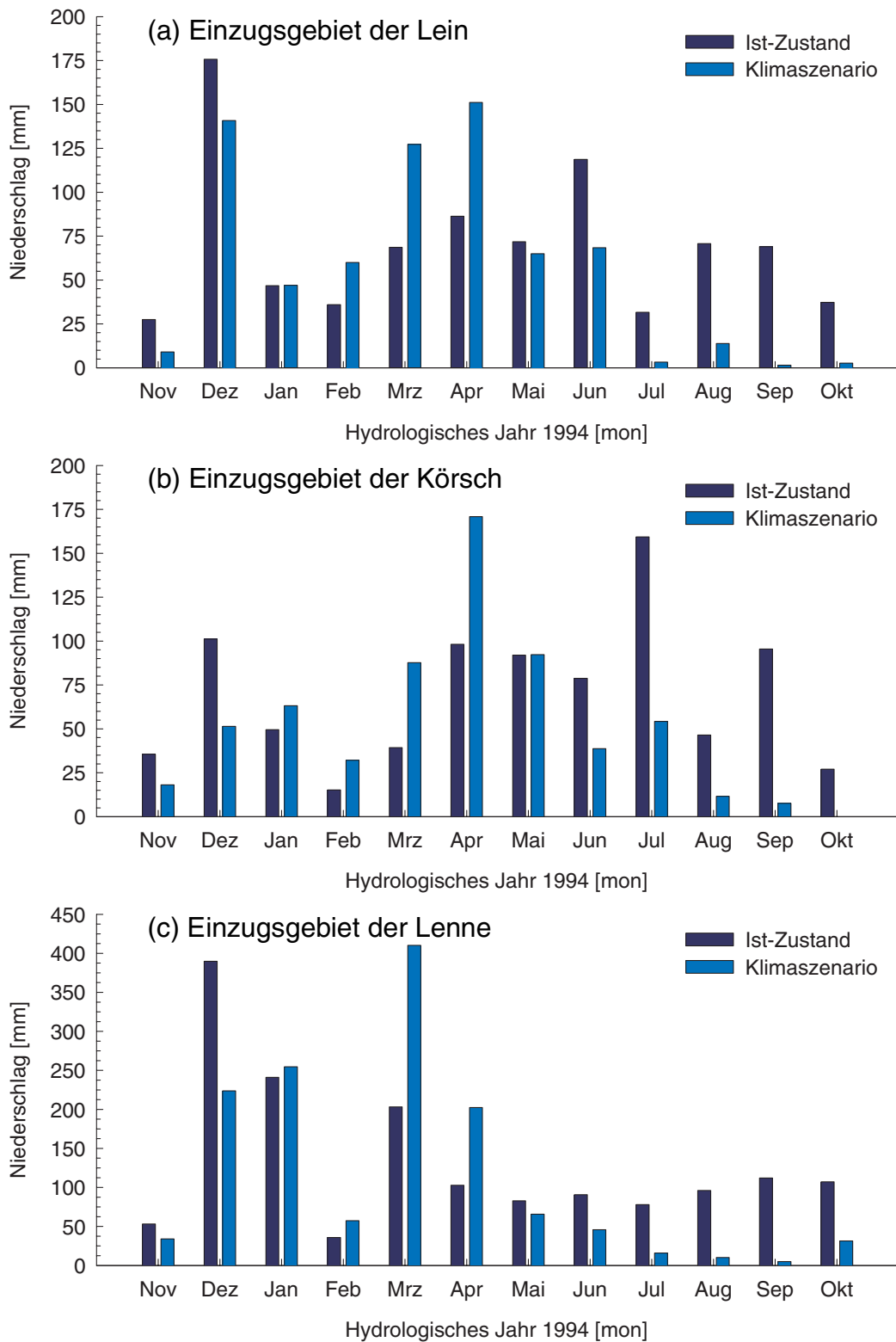


Abb. 7.1 Monatlicher Niederschlag in den drei Untersuchungsgebieten für das hydrologische Jahr 1994 und eine Projektion dieses hydrologischen Jahres um etwa 100 Jahre in die Zukunft (Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097)

Mit WASIM-ETH wurden zunächst die Gebietsniederschläge für das gesamte hydrologische Jahr im Ist-Zustand und für das Klimaszenario interpoliert. Tab. 7.1, S. 181 zeigt, dass unter Szenariobedingungen (etwa 100 Jahre später) der jährliche Niederschlag in allen drei Gebieten *stark abnimmt*. Außerdem wird deutlich, dass das hydrologische Jahr 1994 ein sehr feuchtes Jahr war. Die prozentuale Abnahme des Niederschlages ist jedoch von dieser Besonderheit des Jahres 1994 weitestgehend unabhängig, spiegelt also vor allem die veränderte Kli-

matologie wider. Neben einer Niederschlagsabnahme findet in den Untersuchungsgebieten auch eine deutliche *Verschiebung* der Niederschläge innerhalb des Jahres statt (siehe Abb. 7.1, S. 182). Eine merkliche Abnahme des monatlichen Niederschlages weisen die Monate November und Dezember auf, wohingegen der Niederschlag insbesondere in den Monaten März und April in den Untersuchungsgebieten deutlich zunimmt. Für alle Sommermonate und den frühen Herbst wird ein drastischer Rückgang des Niederschlages simuliert.

7.2 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG DER AUSWIRKUNGEN

Die im folgenden dokumentierten Simulationen der Auswirkungen einer Klimaänderung wurden für alle drei Gebiete im *Stundenzeitschritt* durchgeführt und anschließend für die graphische Darstellung der veränderten Abflussganglinien zu *Tageswerten* aggregiert. Aufgrund ihrer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität können *konvektive* Niederschläge von Globalen Zirkulationsmodellen nicht wiedergegeben werden. Dementsprechend stößt auch das *expanded downscaling* hier an eine Grenze. Deshalb

beschränkt sich die Modellierung auf das hydrologische Winterhalbjahr von November 1993 bis Mai 1994 mit ergebnissen *advektiven* Niederschlägen.

7.2.1 Lein

Wie Abb. 7.2, S. 183 illustriert, entsteht durch die in Kap. 7.1.2 beschriebene zeitliche Verschiebung des Niederschlagsregimes im Szenario-Zustand eine neue Hochwassersituation an der Lein.

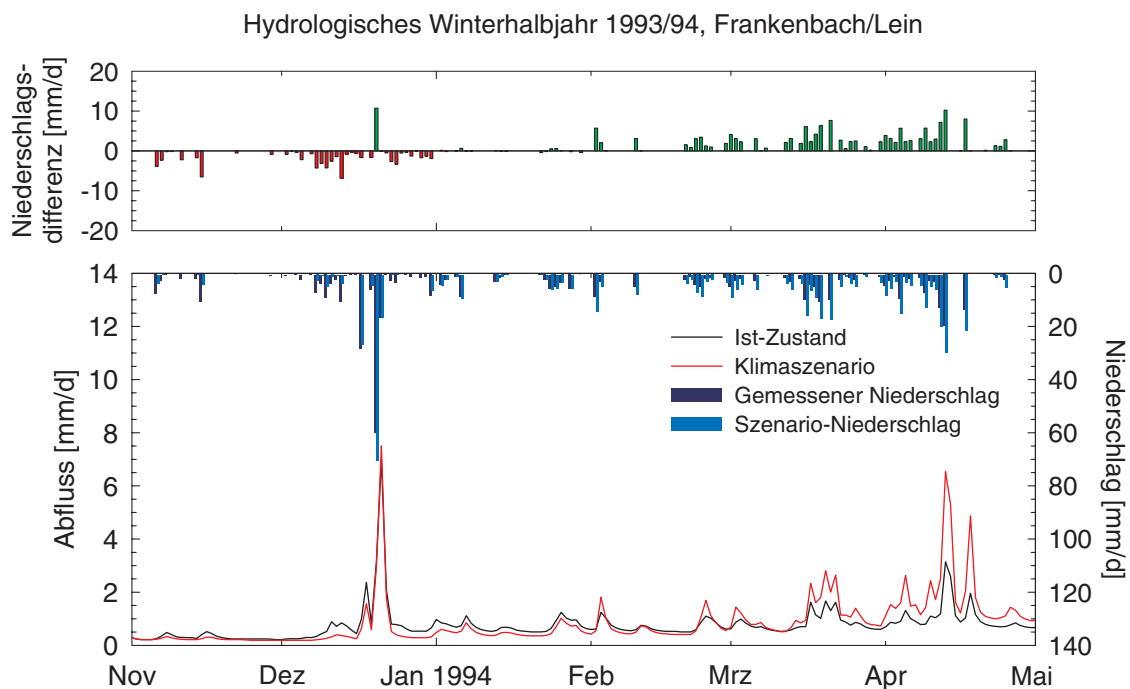


Abb. 7.2 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

Um zu verdeutlichen, in welcher Weise sich die Niederschläge im Szenario-Zustand ändern, ist in Abb. 7.2, S. 183 neben den simulierten Abflussganglinien für den Pegel Frankenbach auch die Differenz zwischen dem Gebietsniederschlag für das Szenariojahr 1994* und das tatsächliche Jahr 1994 zu sehen. Noch klarer als in der Übersicht der monatlichen Niederschläge im Leineinzugsgebiet zeigt sich hier die tendenzielle Verschiebung des Niederschlagsregimes unter zukünftigen Klimabedingungen mit Rückgang im November und Dezember und Zunahme im März und April.

Auffallend ist die starke Zunahme des Tagesniederschlags am 20. Dezember trotz Abnahme des monatlichen Niederschlags. Diese ergibt sich aus einer *erhöhten Variabilität* für Starkniederschläge, die anhand des expanded downscaling für das zukünftige Klima berechnet wurde. Dies erklärt auch, warum das Weihnachtshochwasser im Szenario-Zu-

stand bei geringerer Vorfeuchte nahezu dasselbe Abflussmaximum erreicht wie im Ist-Zustand.

7.2.2 Körsch

Die Szenarioniederschläge für das Körschgebiet bestätigen die Tendenz (Abb. 7.3, S. 184), die für das nur etwa 50 km nördlich gelegene Einzugsgebiet der Lein beschrieben wurde. Lediglich die simulierte Variabilität der Niederschläge ist an der Körsch etwas höher als im Leingebiet, was sich in häufigeren Abweichungen von der generellen Tendenz äußert. Abb. 7.3, S. 184 zeigt außerdem eine Abschwächung des Dezemberhochwassers sowie eine starke Verschärfung des im April aufgetretenen Hochwassers für die Szenarioklimatologie. Diese mögliche Entwicklung hin zu vermehrten Hochwassern im Frühjahr ist unabhängig von den besonderen Gegebenheiten des hydrologischen Jahres 1994.

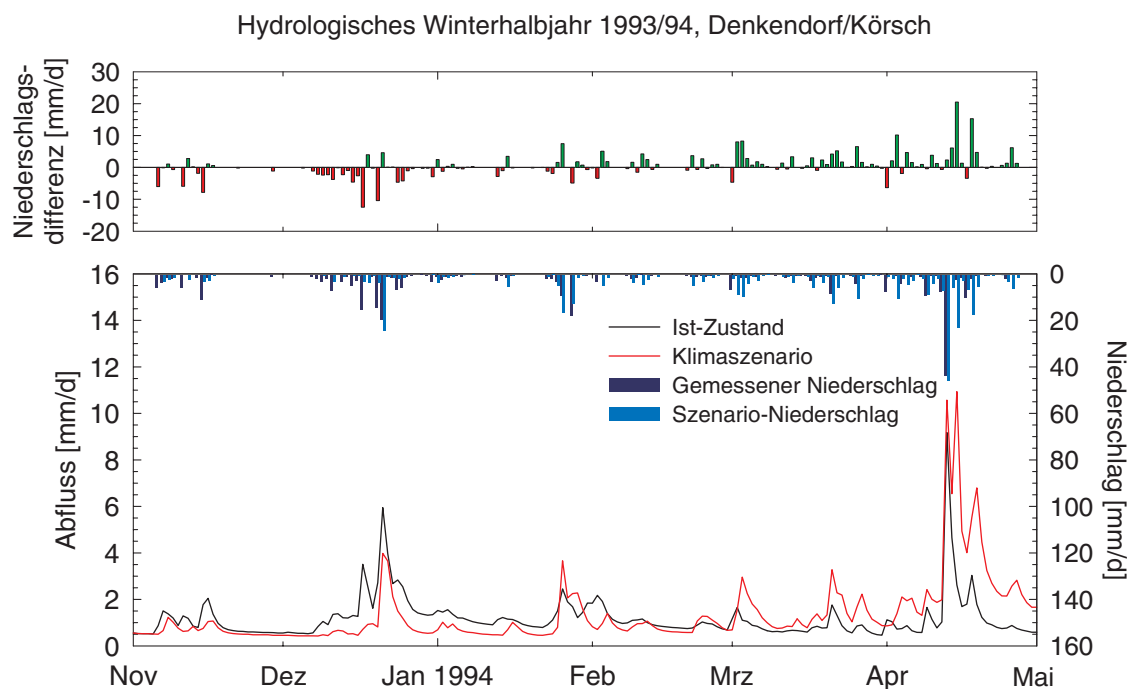


Abb. 7.3 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

7.2.3 Lenne

Am deutlichsten zeigt sich die Verschiebung des Niederschlagsregimes unter den Bedingungen des

Klimaszenarios im Einzugsgebiet der Lenne (siehe Abb. 7.4, S. 185), das aufgrund seiner Topographie einen wesentlich höheren Jahresniederschlag aufweist als die anderen beiden Untersuchungsgebiete.

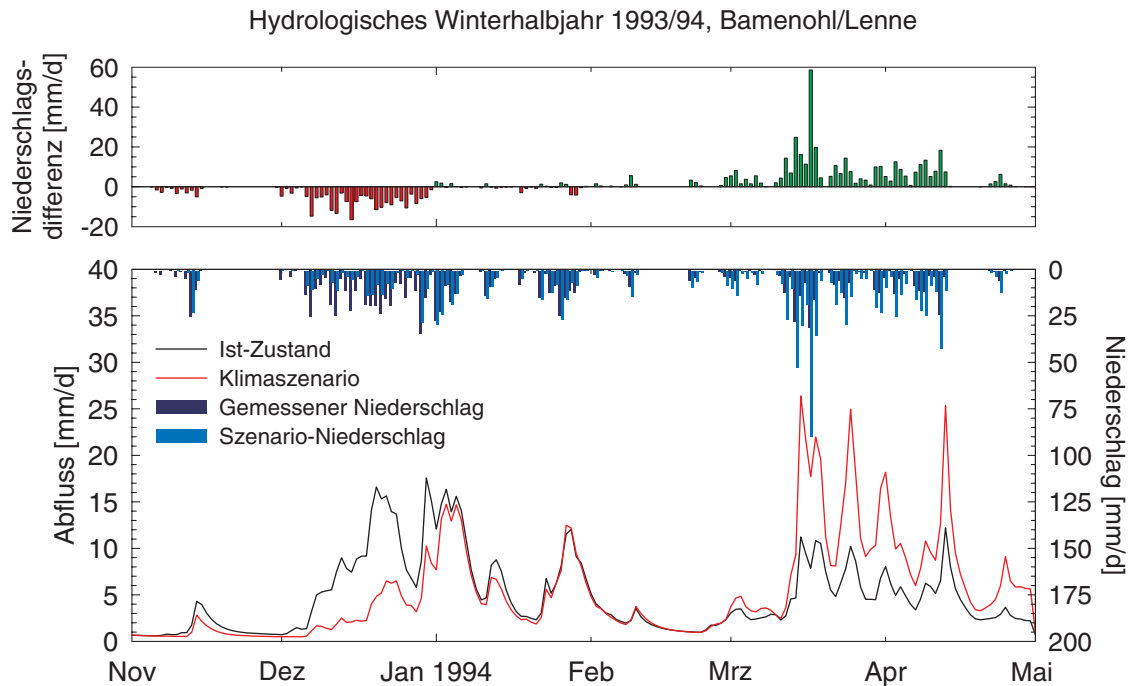


Abb. 7.4 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

Dementsprechend ist auch die Änderung der Hochwassersituation mit starkem Rückgang des Weihnachtshochwassers und drastischer Verschärfung des Frühjahrshochwassers noch ausgeprägter als an Lein und Körsch.

Zusätzlich zu den *lokalen* Folgen einer zukünftig vermehrten Entstehung von *Frühjahrshochwas-*

sern infolge *ergiebigere advektiver Niederschläge* hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Hochwassersituation im *gesamten Rhein-Einzugsgebiet*. Damit stiege die Wahrscheinlichkeit, dass derartige niederschlagsbedingte Hochwasser im deutschen Teil des Rheingebietes mit *Schneeschmelzabflüssen* aus den Alpen zusammentreffen.

Diskussion und Ausblick

8.1 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

8.1.1 Landnutzungsszenarien

Die Generierung von räumlichen Landnutzungsszenarien wurde mit dem Modell LUCK durchgeführt, das eigens für die vorliegende Studie entwickelt und an die verfügbaren Daten angepasst wurde. Da die Landnutzungsverhältnisse sich in einem ständigen Wandel befinden, kann hier nur die Situation zum Zeitpunkt der Datenaufnahme berücksichtigt werden. Wie schon in *Kap. 3.2.7.1* erwähnt, birgt die CORINE-Landnutzungsdatenbasis *Schwachstellen* in der räumlichen Auflösung und der Klassifizierung. Die Datengrundlage einer Biotopkartierung, die durch eine feinere Klassifizierung und Informationen über linienhafte Elemente eine detailliertere Ableitung über das Veränderungspotenzial einer Landnutzung zulässt, würde eine wesentliche Verbesserung für die Modellierung darstellen.

Veränderungen der Landnutzung beziehen sich in der Regel nicht auf die Grenzen eines hydrologischen Einzugsgebiets, welche deshalb keine hinreichende *räumliche Einheit* zur Modellierung darstellen können. Wie im Beispiel der Körsch deutlich geworden ist, wo das impulsgebende Zentrum nicht im Untersuchungsgebiet liegt und deshalb die Validierung der historischen Entwicklung Probleme bereitet hat, spielen für die Landschaftsentwicklung außer den biotischen und abiotischen Eigenschaften der Landschaft die sozialen Verflechtungen zu den verschiedenen Siedlungen für die Landnutzungsentwicklung eine entscheidende Rolle. Zur Linderung dieses Mankos wurden z.T. gewichtete Entwicklungssachsen hinzugefügt.

Auf der mesoskaligen Ebene sind noch keine standardisierten, allgemeingültigen Methoden zur Landschaftsbewertung entwickelt worden (VOLK & STEINHARDT, 1999). Für die Beurteilung der relativen Eignung für eine neue Landnutzung werden deshalb in LUCK Parameter abgeleitet, welche die verschiedenen Veränderungspotenziale beschreiben sollen. *Kriterium für die Parameter* war in erster Linie ihre *Relevanz* andererseits aber auch ihre *Verfügbarkeit*. Die im Modell verwendeten Parameter werden alle aus den Basisdaten Bodenart und Bodentyp, digitales Höhenmodell und Landnutzung abgeleitet, um den Bedarf der benötigten Eingangsdaten auf das Nötigste zu begrenzen. Da das Ergebnis nicht mehr Informationen wiedergeben kann, als die Eingangsdaten zur Verfügung stellen, wurde versucht mit sinnvollen Parameterkombinationen die Eignung eines Standortes für eine Landnutzung zu beschreiben. Obwohl die Einschätzung der jeweiligen Relevanz der Parameter nach bestem Wissen über die Zusammenhänge in der Landnutzung getroffen wurden, stellen sie eine subjektive Charakterisierung der Landschaft für eine Eignung dar. Um diesem Unsicherheitsfaktor Rechnung zu tragen, wurden das Verstärkerungs- und das Ackermodule validiert. Für das Windwurfmodul standen keine Daten dafür zur Verfügung.

Aus der Modellierung können folgende Ergebnisse abgeleitet werden:

- (1) *Verstärkerungsmodul*: Ausschlaggebend für die Güte der Modellierung sind die Ausgangsvertei-

lung der Siedlungen und die Zuwachsrates für das Szenario. Die Verstädterung kann nur an bestehenden Siedlungen ansetzen und somit keine Neuerschließung modellieren. Überschreitet die Zuwachsrates einen Schwellenwert, verformen sich die Siedlungen in dem Szenario durch die Modellierung zu unrealistischen, runden Formen. Entscheidend ist außerdem die Lage der Entwicklungsachsen, welche die Modellierung innerhalb des Untersuchungsgebietes gewichtet. Entwicklungen auf der »grünen Wiese«, wie sie für Industrie- und Gewerbegebiete immer häufiger entstehen, können mit diesem Modell nicht nachempfunden werden. Validiert wurde das Modul an Hand von historischen Karten.

- (2) *Ackermodul*: Die Bewertung des Ertragspotenzials (Abb. 4.3, S. 97) wurde an existierende Schemata aus der Literatur angepasst. Eine Überprüfung der Einschätzung der berechneten »Ackerzahlen« erfolgte an der Lein mit Hilfe des ökohydrologischen Modells SWIM (KRYSANOVA et al., 1998), dessen Ertragsmodellierung nicht angezweifelt wurde. Fraglich bleibt, ob die relative Güte der Standorte aus den vorhandenen Parametern ableitbar ist und ob die zufällige Verteilung, die bei homogenen Bedingungen angenommen wird, als realistisch angesehen werden kann. Problematisch ist außerdem die Vernachlässigung der Besitzverhältnisse und die Zugänglichkeit der Felder, was der fehlenden Information darüber zuzuschreiben ist.
- (3) *Windwurfmodul*: Obwohl die in Kap. 4.2.3.2 beschriebenen Parameter zur Einschätzung der Windwurfgefährdung eines Bestands gewiss eine Rolle spielen, beeinflussen Baumart, Pflanzdichte, Bestandesalter und Vitalität der Bestockung die Stabilität eines Waldes weitaus mehr. Da diese Informationen aus den CORINE-Landnutzungsdaten nicht ableitbar sind, stellt das Modul einen an die Datenlage angepassten Ersatz für die Modellierung dieser Landnutzungsveränderungen dar.

Trotz aller berechtigten Einwände muss der Genauigkeitsanspruch der Modellierung von Landnutzungsszenarien im Zusammenhang mit der Fragestellung der Untersuchung, der Datenverfügbarkeit und der Maßstabsebene gesehen werden. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen wurde

eine Lösung für die Erstellung von räumlich differenzierten Landnutzungsszenarien gefunden, die eine gute Datenbasis für die Quantifizierung von Landnutzungsänderungen mit Hilfe der hydrologischen Modellierung darstellt.

8.1.2 Hydrologische Modellierung von Landnutzungsänderungen

Bei der Weiterentwicklung des hydrologischen Modells WASIM-ETH ist auf eine detaillierte Beschreibung und Parameterisierung des Einflusses der Landnutzung auf die Bodenzone großer Wert gelegt worden. Dies wurde mit einer Zunahme der *Modellunsicherheit* erkauft, die exemplarisch für das Mulchsaatszenario dargestellt wurde. Diese Modellunsicherheit ist ein Spiegelbild der Wissenslücken, die aufgrund der Datenverfügbarkeit sowie der Heterogenität der Bodeneigenschaften und der Variabilität der Feuchtebedingungen in der Bodenzone die Forschung auf diesem Gebiet auch in Zukunft begleiten werden.

Die Erfassung der *Ausgangsbedingungen* von Hochwassern setzt neben einer realistischen Bodengefeuchtesimulation auch eine angemessene Beschreibung der Grundwasserverhältnisse voraus, die in den meisten Modellen – einschließlich der verwendeten Version von WASIM-ETH – nur bedingt gegeben ist. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn die Hochwasserentstehung, wie beispielsweise im Fall der Lenne, von unterirdischen Fließprozessen dominiert wird. Allerdings ist dann auch der Einfluss der Landnutzung von untergeordneter Bedeutung.

Ein großer Fortschritt für die Bearbeitung der Fragestellung ist die Berücksichtigung der *räumlichen Verteilung* der Landnutzung und deren Veränderungen sowohl bei der *Erstellung der Landnutzungsszenarien* als auch bei der *hydrologischen Modellierung*.

Starkniederschläge sind die Ursache sämtlicher hier betrachteten Hochwasser. Die Erfassung der *raumzeitlichen Niederschlagsdynamik* spielt daher eine entscheidende Rolle für die Qualität der hydrologischen Modellierung. Sie ist im Prinzip durch die Interpolation des Niederschlages für jede einzelne Rasterzelle gewährleistet, hängt aber wesentlich von der Dichte und Güte des Niederschlagsmessnetzes ab.

Exemplarische Ergebnisse der hydrologischen Modellierung für die drei Untersuchungsgebiete sind folgende:

- (1) Am Beispiel der Lein konnte gezeigt werden, welche große Bedeutung die *lagegetreue Darstellung der Landnutzung* im hydrologischen Modell insbesondere bei kleinräumig auftretenden Niederschlägen z.B. aus Gewitterzellen hat. Die Lage eines fiktiven Siedlungszentrums hatte bei der Modellierung einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Höhe der Hochwasserspitze als auch auf die Gestalt der Hochwasserganglinie.
- (2) Eine Zunahme der *Siedlungsflächen* im Einzugsgebiet der Lein um 50 % hätte den Simulationen zufolge je nach Rahmenbedingungen sehr unterschiedliche Auswirkungen: selbst bei gleichem Wiederkehrintervall des Hochwassers von etwa 3 Jahren schwankt danach die Zunahme des Hochwassersmaximums zwischen 0 % für ein *langanhaltendes zyklonales Niederschlagsereignis* mit hoher Vorfeuchte und beinahe 30 % für einen *intensiven Gewitterregen* bei geringer Vorfeuchte.
- (3) Wie das Beispiel des Lennegebietes illustriert, ist *Waldbestand* entgegen der nach wie vor weit verbreiteten Meinung kein Indiz für einen per se geringen Beitrag zur Hochwasserentstehung. Richtig ist, dass ein natürlicher Wald bessere Speichereigenschaften (Interzeption, Streuspeicher) aufweist als andere Landnutzungen und Waldböden oft gute Infiltrationseigenschaften besitzen. Da aber Wälder in Mittelgebirgen häufig auf geringmächtigen Böden stocken, sind Waldflächen insbesondere in Kombination mit geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert für *rasche unterirdische Abflussbildung*.
- (4) Die Anwendung eines *Mulchsaatszenarios* für die Lein hat ergeben, dass die *Unsicherheit der Modellierung von Makroporendynamik* während konvektiver Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten weit größer ist als der mutmaßliche Einfluss des Mulchsaatverfahrens auf die Hochwasserentstehung in der *Mesoskala*. Inwiefern dies ein Artefakt des Modellansatzes ist, bedarf, soweit möglich, der experimentellen Überprüfung.
- (5) Die starke hochwasserverschärfende Wirkung von *Versiegelung* bei *kurzen und intensiven Gewitterniederschlägen kleiner Jährlichkeit* konnte beispielsweise für das Einzugsgebiet der Körsch demonstriert werden. Dort wäre den Simulationen zufolge das Abflussmaximum eines im Jahr 1992 aufgetretenen konvektiven Ereignisses im Siedlungszustand des Jahres 1836 (1,3 % Siedlungsfläche) nur rund ein Sechstel so groß gewesen wie im Ist-Zustand (25 % Siedlungsfläche).
- (6) Prinzipiell unterliegen gezielt eingesetzte *Versickerungsmaßnahmen für versiegelte Flächen in Siedlungsgebieten* denselben Einschränkungen, wie sie für die Auswirkungen des Einflusses der Versiegelung selbst formuliert worden sind. Dies haben Simulationen für das Leingebiet gezeigt. Deren Nutzen ist dementsprechend groß während intensiver konvektiver Niederschläge mit geringer Vorfeuchte, deutlich kleiner aber hingegen für langanhaltende advektive Niederschläge mit hoher Vorfeuchte, da dann die Aufnahmefähigkeit sowohl des natürlichen Bodens als auch der Versickerungsanlage zurückgeht.

Die anhand der hydrologischen Modellierung gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch nicht auf die Einzugsgebiete von Lein, Körsch und Lenne beschränkt, sondern lassen auch die Ableitung allgemein gültiger kausaler Zusammenhänge zu:

- (1) Bedeutung der *Niederschlagscharakteristika*:
 - (a) *Niederschlagsintensität*
Der Einfluss der Landoberfläche ist für *konvektive* Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten größer als für *advektive* Niederschlagsereignisse mit meist deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten.
 - (b) *Niederschlagsvolumen*
Je größer das Niederschlagsvolumen, desto geringer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (2) Bedeutung der *Anfangsbedingungen*:
Je trockener das Gebiet zu Beginn des Ereignisses, desto größer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (3) Bedeutung der *Infiltrationsbedingungen*:
Liegt die Infiltrationskapazität in derselben Größenordnung wie die Niederschlagsintensität, dann ist der Einfluss von Änderungen der Landoberfläche für die Hochwasserentstehung am größten.

(4) Bedeutung der *Geomorphologie*:

Stellt die Durchlässigkeit der Bodenoberfläche keine Begrenzung für die Infiltration dar, so ist der *Gesteinsuntergrund* der entscheidende Faktor für die Hochwasserentstehung. Die Landnutzung übt dann nur einen sehr geringen Einfluss auf die Abflussbildung aus.

(5) Bedeutung der *Ereignisgröße*:

Die Höhe des Abflussmaximums oder dessen *Jährlichkeit* als Maß für die Größe eines Hochwasserereignisses ist ein nur bedingt tauglicher Indikator für die Stärke des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung. Die *Jährlichkeit* sagt weder etwas über die meteorologischen Randbedingungen eines Hochwassers aus noch über die räumliche Verteilung der Hochwasserentstehung im Gebiet.

(6) Bedeutung der *räumlichen und zeitlichen Skala*:

In Gebieten von bis zu mehreren hundert Quadratkilometern können sowohl konvektive als auch advektive Niederschlagsereignisse zu Hochwassern führen.

In den großen Flussgebieten Mitteleuropas entstehen Hochwasser hingegen vor allem als Folge großräumiger und langanhaltender zyklonaler Regenfälle – unter Umständen in Kombination mit Schneeschmelze. Für diese Art von Ereignissen ist der Einfluss der Landoberfläche geringer als für konvektive Starkniederschläge. Konvektive Niederschlagsereignisse sind in großen Gebieten aufgrund deren lokalen Charakters von untergeordneter Bedeutung.

ches erlaubt, das Klimasignal eines in der Vergangenheit aufgetretenen hydrologischen Jahres durch ein zukünftiges Klimasignal zu ersetzen, ohne dessen Witterungsverlauf zu ändern. Mit Hilfe dieses Kunstgriffs ist es möglich, das hydrologische Jahr 1994 direkt einem hydrologischen Jahr 1994* gegenüberzustellen, dem das Klima des Zeitraums von 2070 bis 2097 aufgeprägt wird, wie es von einem Globalen Zirkulationsmodell simuliert wurde.

Für alle drei Gebiete ergibt sich im Szenario-Zustand für das letzte Drittel des 21. Jahrhunderts neben einer Erwärmung eine deutliche *Verschiebung des Niederschlagsregimes* sowie ein ungefähr 20prozentiger *Rückgang des Jahresniederschlages* für die betrachteten Ausschnitte des Rheingebietes. Der Rückgang des Jahresniederschlages ist in erster Linie die Folge einer drastischen Abnahme der Niederschläge in den Sommermonaten. Die Verschiebung im Niederschlagsregime setzt sich zusammen aus einer tendenziellen Abnahme der Niederschläge insbesondere im November und Dezember sowie einer Zunahme vor allem in den Monaten März und April. Entsprechend wird in Zukunft mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit für Weihnachtshochwasser und einem gesteigerten Auftreten von Frühjahrshochwassern zu rechnen sein. Außerdem weisen die Klimaszenarien auf eine zunehmende Variabilität im Bereich von Starkniederschlägen und damit auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Niederschläge hin.

Zusätzlich zu den *lokalen* Folgen einer zukünftig vermehrten Entstehung von *Frühjahrshochwassern* infolge *ergiebigere advektiver Niederschläge* hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Hochwassersituation im *gesamten Rhein-Einzugsgebiet*. Damit stiege die Wahrscheinlichkeit, dass derartige niederschlagsbedingte Hochwasser im deutschen Teil des Rheingebietes mit *Schneeschmelzabflüssen* aus den Alpen zusammentreffen.

8.1.3 Hydrologische Modellierung von Klimaänderungen

Die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung wird anhand eines Verfahrens (*expanded downscaling*) untersucht, wel-

8.2 AUSBLICK

8.2.1 Landnutzungsszenarien

Die modellgestützte Erstellung von Landnutzungsszenarien ist ein noch junger Zweig der angewandten Landschaftsökologie. Ihr Nutzen als Methode zur Verbesserung des Verständnisses potenzieller

Auswirkungen anthropogen induzierter Landschaftsveränderung ist unumstritten (WENKEL, 1999). Um als Landnutzungsszenariomodell zur Lösung von nutzungsbedingten Umweltproblemen beitragen zu können, ist eine Analyse und Bewertung der Landschaft mit Hilfe von relevanten Para-

metern und geeigneten Indikatoren vonnöten. Für die Entwicklung eines übertragbaren Bewertungsschemas auf der Mesoskala müssen diese Werte validiert und in ihrer Sensitivität analysiert werden. Dazu besteht dringender Forschungsbedarf.

Eine zunehmende Verbindung von fachspezifischem Wissen über die einzelnen Landnutzungskategorien könnte zu einem fruchtbaren Ergebnis führen, das räumlich abhängige und unabhängige Aspekte wie z.B. demographische Daten berücksichtigt. Damit könnten Szenarien besser an die reale Dynamik angepasst und ihnen damit eine breitere Anwendbarkeit verliehen werden.

Die Szenarioprojektionen der prozentualen Landnutzungsveränderung können zwar nach der Definition des Begriffs Szenario (siehe Kap. 2.4.3) wie im vorliegenden Projekt einfach ohne Berechnung angenommen werden. Dennoch besteht der Wunsch nach konsistenten Angaben darüber, inwieweit die Szenarien eine potenzielle Zukunft darstellen. Eine lineare Interpolation der Daten aus der Vergangenheit in die Zukunft kann dies nicht leisten, weil Landnutzung eine anthropogen getriebene Dynamik besitzt, die überwiegend politik- und wirtschaftsbezogen reagiert. Prognosen mit unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit können nur mit Hilfe komplexer Analysen der einzelnen Triebkräfte unter Anwendung eines sozioökonomischen Modells getroffen werden.

8.2.2 Abflussbildung und deren Modellierung

Die Einbeziehung räumlicher Daten zu Topographie, Landnutzung und Böden hat sich mittlerweile als Standard für prozessorientierte hydrologische Forschung etabliert. Demgegenüber ist der *Gesteinsuntergrund* in den meisten hydrologischen Modellen vergleichsweise schlecht repräsentiert. Gerade für die Simulation von Hochwasserereignissen in den großen Flussgebieten Mitteleuropas, deren Genese nicht in erster Linie auf der Entstehung von Infiltrationsüberschuss beruht, würde eine verbesserte Beschreibung der *unterirdischen Abflussbildung* einen erheblichen Erkenntnisgewinn bedeuten.

Das Wissen über die *Abflussbildung auf landwirtschaftlichen Flächen* stützt sich bislang vor allem auf Beregnungsversuche, die im Rahmen der

Erosionsforschung auf kleinen Flächen und mit extrem hohen Niederschlagsintensitäten durchgeführt wurden. Deren Nutzen für die Modellierung der Auswirkung von Landnutzungsänderung in großen Flussgebieten ist dementsprechend gering. Dennoch werden die Ergebnisse derartiger Versuche auch von Wissenschaftlern undifferenziert zitiert, um sich beispielsweise in der Diskussion um die Rheinhochwasser der vergangenen Jahre zu profilieren. Hilfreicher wären in diesem Zusammenhang großflächigere Untersuchungen, die mit realistischen Niederschlagsintensitäten arbeiten und das Phänomen der Re-Infiltration von Infiltrationsüberschuss näher beleuchten.

Die große Bedeutung von *Makroporen* für die Abflussbildung wurde bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten erkannt. Bisher finden Makroporen dennoch nur in wenigen hydrologischen Modellen Berücksichtigung, da eine Bestimmung der Makroporendynamik bereits in der Hangskala mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Hieran wird sich zwar aufgrund der extremen Variabilität der damit verbundenen Fließprozesse auch in naher Zukunft nichts ändern. Trotzdem sollte in Zukunft einem systematischen Umgang mit dieser Unsicherheit der Vorzug gegeben werden vor der Nichtbeachtung des Einflusses von Makroporen auf die Abflussbildung.

8.2.3 Landschafts- und Gewässerschutz

Das große Interesse der Öffentlichkeit an spektakulären Hochwasserkatastrophen hat in der jüngeren Vergangenheit dazu beigetragen, wichtigen Belangen Gehör zu verschaffen, die auf andere Weise kein Echo gefunden hätten. Zu diesen Belangen zählen Landschafts- und Gewässerschutz, deren Erfolge für den Laien oft kaum ersichtlich sind und sich daher politisch nur schlecht vermarkten lassen.

Landschaft, die als ein Spiegel des Verhältnisses einer Gesellschaft zu ihrer Umwelt angesehen werden kann (ANTROP, 1999), ist eine begrenzte Ressource, an die verschiedenste Entwicklungsansprüche gestellt werden. Um dabei ein stabiles und funktionierendes Landnutzungsmuster zu erhalten, spielt ein sensibler Umgang mit dem Flächenverbrauch eine grosse Rolle. Ungebremschte Bautätigkeit von Verkehrsfläche, Wohnraum und Industriegebieten, implizieren nicht nur die hier erörterte erhöhte

Hochwassergefährdung, sondern gefährden außerdem die Biodiversität aufgrund von verminderter Habitatstrukturqualität und verleihen der Landschaft durch uniforme und rationelle Bauweisen einen Mangel an Identität.

Den Simulationen zufolge hat *Flächenversiegelung* je nach Ereignischarakteristika einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf die Hochwasserentstehung. Gerade bei konvektiven Niederschlägen mit hoher Intensität ist aber nicht nur eine *drastische* lokale Hochwasserverschärfung die Folge, sondern auch eine *Verschlechterung der Wasserqualität*. Diese ergibt sich bei Überlastung der Kanalisation aus der Abgabe eines Gemisches aus ungeklärtem Abwasser und verschmutztem Regenwasser an ein nahegelegenes Fließgewässer mit den entsprechenden negativen Folgen für das Ökosystem. Die Hochwasserverschärfung bewirkt außerdem eine erhöhte *mechanische Belastung des Gerinnebettes* durch das vermehrte Auftreten hoher Abflüsse, was unter anderem die Lebensbedingungen im Gewässer negativ beeinflusst und zu verstärkter Erosion im Gewässerbett führt.

Infiltrationsüberschuss auf landwirtschaftlichen Flächen führt in der Mesoskala bedingt durch Re-Infiltration hangabwärts nicht zwangsläufig zu verstärkter Hochwasserentstehung. *Verschlämmung* und *Bodenerosion* sind jedoch nicht nur Merkmale des Auftretens von Infiltrationsüberschuss auf unbewachsenen Flächen, sondern bedingen zudem an der Bodenoberfläche eine Verschlechterung des Luft- und Wasserhaushaltes, erhöhten Nährstoffaustrag sowie Bodendegradation. Diese Folgen einer unangepassten Bewirtschaftungsweise sollten auch unabhängig von Belangen des Hochwasserschutzes vermieden werden.

8.2.4 Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

Wie die Diskussion der hydrologischen Modellierungsergebnisse (Kap. 8.1.2) zeigt, sind pauschale Aussagen zum Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung aufgrund der entscheidenden Bedeutung der *Randbedingungen* unzulässig. Zu diesen Randbedingungen zählen in erster Linie Gebiets- und Ereignisseigenschaften, die Witterung vor dem Ereignis sowie der räumliche und zeitliche Maßstab, über den Aussagen getroffen wer-

den. Dies wurde in der vorliegenden Studie konsequent berücksichtigt, in der Vergangenheit aber häufig vernachlässigt.

Allgemein gilt aber, dass die Landnutzung einen deutlichen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben kann. Dies gilt am meisten für *versiegelte Flächen*, die insbesondere bei intensiven Gewitterregen in der Regel eine starke *Abflussverschärfung* bewirken. Bei langanhaltenden advektiven Niederschlägen ist deren negativer Einfluss in der Regel zwar geringer, kann aber dennoch abhängig von den Randbedingungen auch für den Hochwasserverlauf in großen Flussgebieten relevant sein und sollte daher nicht vernachlässigt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung fließen in das Projekt LAHOR ein, das sich mit dem Einfluss der Landoberfläche und von Ausbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet beschäftigt. LAHOR ist Bestandteil der INTERREG Rhein-Maas-Aktivitäten (IRMA) der Europäischen Union.

8.2.5 Auswirkungen von Klimaänderungen

Wie bereits mehrfach betont, sind *Globale Zirkulationsmodelle* insbesondere für die Simulation langfristiger Entwicklungen des Klimas ausgelegt. *Extremereignisse* hingegen sind zwar Bestandteil des Klimas, werden aber von diesen Modellen nur unzureichend wiedergegeben. Die in dieser Studie verwendete Methode des expanded downscaling macht die Klimaszenarien Globaler Zirkulationsmodelle zum einen nutzbar für Untersuchungen im *Einzugsgebietsmaßstab* und bewirkt zum zweiten eine verbesserte Darstellung der *Variabilität* von Extremereignissen unter veränderten Klimabedingungen. Aussagen über die zukünftige Variabilität *konvektive Starkregenereignisse* sind jedoch derzeit auch mit Hilfe des expanded downscaling aufgrund des extremen Skalenunterschiedes zwischen der Maschenweite Globaler Zirkulationsmodelle und der Ausdehnung einer Gewitterzelle noch nicht möglich.

Der Mitte Januar vorgestellte IPCC-Bericht (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001) macht deutlich, dass die *globale Erwärmung* mit etwa 1,4 bis 5,6 K innerhalb der nächsten 100 Jahre noch stärker ausfallen wird als bisher an-

genommen. Die stärksten Auswirkungen der prognostizierten Erwärmung auf das Ökosystem werden in den hohen Breiten erwartet, die geringsten in den inneren Tropen. Wie auch die vorliegende Studie gezeigt hat, wird die Erwärmung im Rheingebiet mit großer Wahrscheinlichkeit zu drastischen Änderungen im Niederschlagsregime sowie zu einer Zunahme von Extremereignissen führen. Um dieser re-

alen Bedrohung zu entgehen, wäre ein generelles Umdenken nötig, was derzeit nicht erkennbar ist.

Nach Abschluss des Projektes stellt sich die Frage, wie viel Wissen über die Situation der Umwelt noch angehäuft werden muss, um das kollektive Verdrängungspotenzial zu überbieten. Bis dahin gilt:

»Man soll die Dinge nicht so tragisch nehmen, wie sie sind.« (Karl Valentin)

Literatur

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. & Rasmussen, J. (1986a): An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. & Rasmussen, J. (1986b): An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Ambroise, B., Beven, K.J. & Freer, J. (1996): Toward a generalisation of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity. *Water Resources Research*, 32(7), 2135-2145.
- Anderson, G.M. & Burt, T.P. (1990): Subsurface runoff. In: Anderson, G.M. & Burt, T.P. (Eds.): *Process studies in hillslope hydrology*, New York, 365-400.
- Antrop, M. (1999): Background concepts for integrated landscape analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 77, 17 - 28.
- Arnell, N.W. (1992): Factors controlling the effects of climate change on river flow regiments in a humid temperate environment. *Journal of Hydrology*, 132, 321-342.
- Arnell, N.W. (1994): Hydrology and climate change. In: Calow, P. & Petts, G.E. (Eds.): *The rivers handbook*, 2, Blackwell, Oxford.
- Arnell, N.W. (1995): Scenarios for hydrological climate change impact studies. In: Oliver, H.R. & Oliver, S.A. (Eds.): *The role of water and the hydrological cycle in global change*, Berlin, Heidelberg, New York, 389-407.
- Arnell, N.W. & Reynard, N.S. (1996): The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183, 397-424.
- Auerswald, K. (1993): *Bodeneigenschaften und Bodenerosion (Relief, Boden, Paläoklima, 8)*. Stuttgart.
- Baade, J. (1994): Geländeexperiment zur Verminderung des Schwebstoffaufkommens in landwirtschaftlichen Einzugsgebieten (Heidelberger Geographische Arbeiten, 95). Heidelberg.
- Bachmann-Erdt, G. et al. (1994): *Hausgemachte Überschwemmungen: Maßnahmenvorschläge zur Vorsorge gegen zukünftige Hochwasserschäden (Umweltbundesamt, Texte 21/94)*. Berlin.
- Bárdossy, A. (1994): Modelle zur Abschätzung der regionalen hydrologischen Folgen einer Klimaänderung (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Karlsruhe, Heft 47). Karlsruhe.

- Bárdossy, A. & Caspary, H.J. (1990): Detection of climate change in Europe by analyzing european atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 155-167.
- Bárdossy, A. & Plate, E.J. (1992): Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resources Research*, 28(5), 1247-1259.
- Bastian, O., Bernhardt, A., Bieler, J., Haase, G., Horn, W., Mander, Ü. & Mannsfeld, K. (1994): Ansätze der Landschaftsbewertung. In: Bastian, O. (Ed.): *Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft*, Jena, 188 - 211.
- Bathurst, J.C. & O'Connell, P.E. (1992): Future of distributed modelling - the Système Hydrologique Européen. *Hydrological Processes*, 6, 265-277.
- Baumgartner, A. & Liebscher, H.-J. (1990): *Allgemeine Hydrologie*. Berlin, Stuttgart.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Ed.) (1998): *Spektrum Wasser I - Hochwasser*. München.
- Becker, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): *Regionalisierung in der Hydrologie*, Weinheim, 16-32.
- Becker, A., Güntner, A. & Katzenmaier, D. (1999): Required integrated approach to understand runoff generation and flow path dynamics in catchments. In: Leibundgut, C., McDonnell, J. & Schultz, G. (Eds.): *Integrated methods in catchment hydrology – tracer, remote sensing and new hydrometric techniques* (IAHS Publication no. 258), Wallingford, 3-9.
- Berkenhagen, J. (1998): Die Morphologie von Oberflächenverschlammungen bei varierten Entstehungsbedingungen und ihre Bestimmung mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie (Technische Universität Berlin, Bodenökologie und Bodengeneese, Heft 30). Berlin.
- Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset, A.E. & Surfleet, C.G. (2000): Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233, 102-120.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.
- Beven, K.J. & Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18, 1311-1325.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N. & Tagg, A.F. (1984): Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69, 119-143.
- Beven, K.J. (1989): Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Beven, K.J. (1989): Interflow. In: Morel-Seytoux, H.J. (Ed.): *Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and practice*, Dordrecht.
- Beven, K.J. (1991a): Infiltration, soil moisture and unsaturated flow. In: Bowles, D.S. & O'Connell, P.E. (Eds.): *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*, Dordrecht, 137-151.
- Beven, K.J. (1991b): Scale considerations. In: Bowles, D.S. & O'Connell, P.E. (Eds.): *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*, Dordrecht, 357-371.
- Beven, K.J. & Binley, A.M. (1992): The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298.
- Beven, K.J. (1993): Estimating transport parameters at the grid scale - on the value of a single measurement. *Journal of Hydrology*, 143, 109-123.
- Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R. & Freer, J. (1995): TOPMODEL. In: Singh, V.P. (Ed.): *Computer models of watershed hydrology*, Colorado, 627-668.
- Beven, K.J. (1996a): A discussion of distributed hydrological modelling. In: Abbott, M.B. & Refsg-

- aard, J.C. (Eds.): Distributed hydrological modelling, Dordrecht, Boston, London, 255-278.
- Beven, K.J. (1996b): Response to comments on 'A discussion of distributed hydrological modelling' by J.C. Refsgaard et al. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (Eds.): Distributed hydrological modelling, Dordrecht, Boston, London, 289-295.
- Binley, A., Beven, K.J. & Elgy, J. (1989): A physically based model for heterogeneous hillslopes – 1. Runoff production. *Water Resources Research*, 25, 1227-1233.
- Bismuth, C., Garber, W.-D. & Merz, R. (Eds.) (1998): Ursachen der Hochwasserentstehung und ihre anthropogene Beeinflussung (Umweltbundesamt, Texte 18/98). Berlin.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995): Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*, 9, 312-329.
- Blöschl, G., Grayson, R.B. & Sivapalan, M. (1995): On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling. *Hydrological Processes*, 9, 312-329.
- Blöschl, G. (1996): Prozeßnahe Niederschlag-Abfluß-Modellierung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, 156-164.
- Blüthgen, J. (1966): Allgemeine Klimageographie. Berlin.
- Bonell, M. (1993): Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, 150, 217-275.
- Bonell, M. (1998): Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(4), 765-785.
- Boormann, D.B. & Sefton, C.E.M. (1997): Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change*, 35, 415-434.
- Bork, H.-R., Dalchow, C., Kächele, H., Pierr, H.-P. & Wenkel, K.-O. (1995): Agrarlandschaftswandel in Nordostdeutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen. Berlin.
- Brasington, J. & Richards, K. (1998): Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. *Computers & Geosciences*, 24(4), 299-314.
- Bronstert, A., Seiert, S. & Oberholzer, G. (1993): Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkungen auf das Abflußverhalten ländlicher Gebiete (Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, Heft 3). Stuttgart.
- Bronstert, A. (1994): Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 46). Karlsruhe.
- Bronstert, A. (Ed.) (1996): Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK Report No. 17). Potsdam.
- Bronstert, A. (1997): Klimaänderungen und Hochwasser - Zusammenhänge und Auswirkungen. In: Immendorf, R. (Ed.): Hochwasser. Ursachen - Wirkungen - Strategien, Köln, 163-182.
- Bronstert, A. (1999a): Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 13, 21-48.
- Bronstert, A., Bürger, G., Heidenreich, M., Katzenmaier, D. & Köhler, B. (1999b): Effects of climatic change influencing storm runoff generation: basic considerations and a pilot study in Germany. In: Balabanis, P., Bronstert, A., Casale, R. & Samuels, P. (Eds.): The impact of climate change on flooding and sustainable river management (Proceedings of the final RIBAMOD Workshop, Wallingford, 26-27 February 1998, European Commission, DG XII, Environment and Climate Programme), Luxembourg, 325-340.

- Brutsaert, W. (1992): Evaporation into the atmosphere. Dordrecht.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland (Eds.) (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (1996): Zur Neuorientierung der Landnutzung in Deutschland. Schriftenreihe des BML, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 453.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (1996): Alternativen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung auf Grenzstandorten in den neuen Bundesländern. Schriftenreihe des BML, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 457. (b)
- Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (1999): Agenda 2000: Auswirkungen für die Landwirtschaft und die ländlichen Räume Brandenburgs.
- Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (2000): Agenda 2000 - Pflanzlicher Bereich, Agrarumweltmaßnahmen. Öffentlichkeitsarbeit.
- Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (2000): Land - und Forstwirtschaft in Deutschland 2000.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (2000): Unser Wald - Natur und Wirtschaftsfaktor zugleich. Bonn.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (2000): Bericht über den Zustand des Waldes 1999. Bonn.
- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G.L., Gellens, D. & Meulenberghs, F. (1988): Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance - a case study for Belgium. Journal of Hydrology, 99, 319-347.
- Bultot, F., Dupriez, G.L. & Gellens, D. (1990): Simulation of land use changes and impacts on the water balance - a case study for Belgium. Journal of Hydrology, 114, 327-348.
- Bultot, F., Gellens, D., Spreafico, M. & Schädler, B. (1992): Repercussions of a CO₂-doubling on the water balance - a case study in Switzerland. Journal of Hydrology, 137, 199-208.
- Burt, T.P. (1989): Storm runoff generation in small catchments in relation to the flood response of large basins. In: Beven, K.J. & Carling, P. (Eds.): Floods: Hydrological, sedimentological and geomorphological implications, New York, 11-35.
- Buttle, J.M. (1994): Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. Progress in Physical Geography, 18(1), 16-41.
- Bürger, G. (1996): Expanded downscaling for generating local weather scenarios. Climate Research, 7, 111-128.
- Cannell, M.Q.R. (1982): World Forest Biomass and Primary Production Data. London.
- Calder, I.R. (1992): Hydrologic effects of land-use change. In: Maidment, D.R. (Ed.): Handbook of hydrology, New York, 13.1-13.50.
- Caspary, H.J. (1990): Auswirkungen neuartiger Waldschäden und der Bodenversauerung auf das Abflußverhalten von Waldgebieten (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 37). Karlsruhe.
- Caspary, H.J. (1996): Die Winterhochwasser 1990, 1993 und 1995 in Südwestdeutschland- Signale einer bereits eingetretenen Klimaänderung. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der UdBW München, 56a, 169-183.
- Caspary, H.J. & Bardossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? Wasser & Boden, 47(3), 18-24.

- Change Impacts Review Group (CCIRG) (1991): The potential impact of climate change in the United Kingdom. London.
- Chiew, F.H.S., Whetton, P.H., McMahon, T.A. & Pittock, A.B. (1995): Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 167, 121-147.
- Chen, C. & Wagenet, R.J. (1992): Simulation of water and chemicals in macropores. Part 1: Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow. *Journal of Hydrology*, 130, 105-126.
- Clausen, C.-D., von Kamp, H., Müller, H., Thünkler, M., Vogler, H. & Luszkat, M. (1985): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 100000. Erläuterungen zu Blatt C5114 Siegen. Krefeld.
- Cryer, S.A. & Havens, P.L. (1999): Regional sensitivity analysis using a fractional factorial method for the USDA model GLEAMS. *Environmental Modelling & Software*, 14, 613-624.
- Cubasch, B., Santer, D. & Hegerl, G.C. (1995): Klimamodelle - wo stehen wir ? *Phys. Bl.*, 51(4), 269-277.
- Cypris, C., Hemme, T., Kleinhanss, W., Kreins, P., Manegold, D., Offermann, F. & Osterburg, B. (1997): Modellrechnung zu Auswirkung der Agenda 2000 in der deutschen Landwirtschaft. Braunschweig.
- Cypris, C. (2000): Szenarien und Prognosen zur künftigen Landwirtschaft in Deutschland und deren umweltpolitische Bedeutung. Bonn.
- Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J.C.J., Lang, H., Middelkopp, H., Parmet, B.W.A.H., Schädler, B., Schulla, J. & Wilke, K. (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resource management in the Rhine basin. Lelystad.
- Dabbert, S., Kilian, B. & Umstätter, J. (1998): Umweltwirkungen der Agenda 2000 im Agrarbereich. Sonderbeilage bei Agrar-Europe, 19.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (Ed.) (1985): DIN 4045: Abwassertechnik - Begriffe. Berlin.
- Dikau, R. (1983): Der Einfluß von Niederschlag, Vegetationsbedeckung und Hanglänge auf Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen. *Geomethodica*, 8, 149-177.
- Diercke Weltatlas (1991): Diercke Weltatlas. Braunschweig.
- Dooge, J.C.I. (1986): Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research*, 22, 46S-58S.
- Dosch, F. & Beckmann, G. (1999): Siedlungsflächenentwicklung in Deutschland - auf Zuwachs programmiert. In: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Ed.): Steuerung der Flächennutzung, 8, 493-510.
- Drake, B.G. (1992): The impact of rising CO₂ on ecosystem production. *Water, Air and Soil Pollution*, 64, 25-44.
- Dunne, T. & Black, R.D. (1970): An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6, 478-490.
- Dunne, T. (1978): Field studies of hillslope flow processes. In: Kirkby, M.J. (Ed.): Hillslope hydrology, New York, 227-293.
- Dunn, C.P., Sharpe, D.M., Guntenspergen, G.R., Stearns, F. & Yang, Z. (1990): Methods for Analysing Temporal Changes in Landscape Pattern. In: Turner, M.G. & Gradner, R.H. (Eds.): Quantitative Methods in Landscape Ecology, 82.
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Berlin.
- Dyck, S. (1997): Wasser in Extremen (Vortrag, gehalten am 29.1.1997 an der Universität Freiburg). Freiburg.

- Eguiguren, L.E.S. (1997): Watermanagement in Ecuador. Stuttgart.
- Ely, L.L., Enzel, Y., Baker, V.R. & Cayan, D.R. (1993): A 5000-year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States. *Science*, 262, 410-412.
- Engel, H. (1997): Die Ursachen der Hochwasser an Rhein- natürlich oder selbst gemacht. In: Immen-dorf (Ed.): Hochwasser - Natur im Überfluß, Heidelberg.
- Engel, H. (1998): Wirkungsabschätzung von Was-serrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins (IKSR-Bericht Nr. 101). Koblenz.
- Europäische Union (1998): Agenda 2000 - Land-wirtschaft. http://www.europa.eu.int/en/comm/dg06/ag2000/text/text_de.htm.
- Ewen, J. & Parkin, G. (1996): Validation of catch-ment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Method. *Journal of Hydrology*, 175, 583-594.
- Faeh, A. (1997): Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation - a study based on the numerical simulation of hillslope experiments (Dissertation an der ETH Zürich). Zürich.
- Feldwisch, N. (1999): Wiederherstellung des natür-lichen Abflußgeschehens durch Maßnahmen der Landnutzung - Land- und forstwirtschaftliche Maß-nahmen (Studie im Auftrag des Deutschen Verban-des für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.). Bergisch Gladbach.
- Fenner, S. (1997): Langjährige Verdichtungswir-kung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. *Zeitschrift für Pflanzenernäh-rung und Bodenkunde*, 160, 157-164.
- Fennessy, M.J. & Xue, Y. (1997): Impact of USGS vegetation map on GCM simulations over the united states. *Ecological Applications*, 7(1), 22-33.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. & Todini, E. (1996): Physical interpretation and sensitivity analy-sis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 175, 293-338.
- Frederick, K.D. & Major, D.C. (1997): Climate change and water resources. *Climatic Change*, 37, 7-23.
- Freer, J., McDonnell, J., Beven, K.J., Brammer, D., Burns, D., Hooper, R.P. & Kendal, C. (1997): Topo-graphic controls on subsurface storm flow at the hillslope scale for two hydrologically distinct small catchments. *Hydrological Processes*, 11, 1347-1352.
- Frielinghaus, M. (Ed.) (1997): Merkblätter zur Bodenerosion Brandenburg 1997. Müncheberg.
- Gellens, D. & Roulin, E. (1998): Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 210, 242-258.
- Germann, P.F. (1990): Macropores and hydrologic hillslope processes. In: Anderson, G.M. & Burt, T.P. (Eds.): *Process studies in hillslope hydrology*, New York, 327-363.
- Geyger, E. (1977): Leaf area productivity in grass-lands. In: Krause, W. (Ed.): *Application of vegeta-tion science to grassland husbandry*, the Hague.
- Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (1991): *Geologie von Baden-Württemberg*. Stuttgart.
- Giorgi, F. & Mearns, L.O. (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 191- 216.
- Gleick, P.H. (1989): Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*, 27(3), 329-344.
- Grabs, W. (Ed.) (1997): *Impact of climate change on hydrological regimes and water resources manage-ment in the rhine basin*. Lelystad.

- Grayson, R.B., Moore, I.D. & McMahon, T.A. (1992): Physically based hydrologic modeling, 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 28, 2659-2666.
- Grayson, R.B., Blöschl, G. & Moore, I.D. (1995): Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C. In: Singh, V.P. (Ed.): *Computer models of watershed hydrology*, Colorado, 669-696.
- Güntner, A., Uhlenbrook, S., Seibert, J. & Leibundgut, C. (1999): Multi-criterial validation of TOP-MODEL in a mountainous catchment. *Hydrological Processes*, accepted.
- Gutknecht, D. (1996): Abflußentstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, 134-144.
- Harms, R.W. (1986): Auswirkungen der Urbanisierung auf den Hochwasserabfluß kleiner Einzugsgebiete - Verfahren zur quantitativen Abschätzung (DVWK-Schriften, 75). Hamburg, Berlin.
- Hay, L.E., McCabe, G.J., Wolock, D.M. & Ayers, M.A. (1991): Simulation of precipitation by weather type analysis. *Water Resources Research*, 27(4), 493- 501.
- Helming, K. (1992): Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion (Bodenökologie und Bodengene, Band 7). Berlin.
- Hendel, M. (1995): Klima. In: Marcinek, L. (Ed.): *Physische Geographie Deutschlands*, Gotha.
- Herrmann, A. (1992): Abflussbildung in Oberflächengewässern. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): *Regionalisierung in der Hydrologie*, Weinheim, 291-303.
- Hewitson, B.C. & Crane, R.G. (1996): Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7, 85-95.
- Hewlett, J.D. & Hibbert, A.R. (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W.E. & Lull, H.W. (Eds.): *Proceedings of the International Symposium of Forest Hydrology*, Norwich, 275-290.
- Hough, M.N. (1990): Agrometeorological aspects of crops in the United Kingdom and Ireland. Bracknell, UK.
- Hoyningen-Huene, J.v. (1983): Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. In: Hoyningen-Huene, J.v., Wohlrab, B., Sokollek, V., Süßmann, W.,
- Huss, J. (2000): Waldvermehrung als waldbauliches Aufgabenfeld. In: *Stiftung Wald in Not* (Ed.): *Wir brauchen mehr Wald - Leitfaden zur Waldvermehrung*, Band 10, Bonn, 12 - 30.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995): *Climate change 1995. The science of climate change*. Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.) (2001): *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge.
- Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR) (Ed.) (1998): *Aktionsplan Hochwasser*. Koblenz.
- Ihringer, J. (1992): Regionalisierung des Abflußbeitrages. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): *Regionalisierung in der Hydrologie*, Weinheim, 304-332.
- Jenkins, L. (1997): Selecting a Variety of Futures for Scenario Development. *Technological Forecasting and Social Change*, 55, Number 1, 15-20.
- Jensen, K.H. & Mantoglou, A. (1992): Future of distributed modelling. *Hydrological Processes*, 6, 255-264.
- Jones, J.A.A. (1971): Soil piping and stream channel initiation. *Water Resources Research*, 7, 602-610.
- Kahnt, G. (1995): *Minimal-Bodenbearbeitung*. Stuttgart.

- Kenneweg, H. & Weckwerth, H. (1994): Einführung in die Theorie und Methodik der Landschaftsplanung. Berlin.
- Kiely, G. (1999): Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations. *Advances in Water Resources*, 23, 141- 151.
- Kim, S. & Delleur, J.W. (1997): Sensitivity analysis of extended TOPMODEL for agricultural watersheds equipped with tile drains. *Hydrological Processes*, 11(9), 1243-1261.
- Kimball, B.A., Mauney, J.R., Nakayama, F.S. & Idso, S.B. (1993): Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio*, 104/105, 65-75.
- Kirnbauer, R., Pirkel, H., Haas, P. & Steidl, R. (1996): Abflußmechanismen - Beobachtung und Modellierung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, 15-26.
- Kleeberg, H.-B. & Cemus, J. (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): *Regionalisierung in der Hydrologie*, Weinheim, 1-15.
- Kleeberg, H.-B. (Ed.) (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie* (Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung). Weinheim.
- Kleeberg, H.-B. & Rother, K.-H. (1996): Hochwasserflächenmanagement in Flußeinzugsgebieten. *Wasser & Boden*, 48(2), 24-32.
- Kleinhanß, W. (1998): Einsatz des Modellverbundes der AG "Modellgestützte Politikberatung" zur Agenda 2000. In: *Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V. (Ed.): Landnutzung und Umwelt*, Bonn, 5 - 20.
- Klemeš, V. (1986b): Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.
- Kleyer, M. (1996): Urbanisierungsprozesse in der Kulturlandschaft. In: Konold, W. (Ed.): *Naturlandschaft - Kulturlandschaft*, Landsberg, 229 - 242.
- Klink, H.J. (1995): Vegetation. In: Liedtke & Marcinek (Ed.): *Physische Geographie Deutschlands*, Gotha.
- Knox, J.C. (1993): Large increase in flood magnitude in response to modest changes in climate. *Nature*, 361, 430-432.
- Koehler, G. (1992): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrhein-Gebiet. *WB*, 44(1), 11-15.
- Koehler, G. (1993): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet (Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Ministerium für Umwelt, Rheinland-Pfalz). Mainz.
- Koehler, G. (1996): Hochwasser - hausgemacht? *Der Bürger im Staat*, 46(1), 55-59.
- Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 87). Zürich.
- Kreins, P. (1997): Grünlandnutzung. In: *Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V. (Ed.): Landnutzung und Umwelt*, Bonn, 37-52.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I. & Becker, A. (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling*, 106(261-289).
- Kuczera, G. & Mroczkowski, M. (1998): Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of data. *Water Resources Research*, 34(6), 1481-1489.
- Kwadijk, J.C.J. (1991): Sensitivity of the river Rhine discharge to environmental change, a first tentative assessment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 627-637.
- Lahmer, W. & Becker, A. (1998): Dynamische skalenübergreifende Modellierung des Wasser- und

- Stoffhaushalts in Gebieten des pleistozänen Tieflands (Statusbericht WaStor). Potsdam.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Ed.) (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Stuttgart.
- Leavesley, G.H. (1994): Modeling the effects of climate change on water resources – a review. *Climatic Change*, 28, 159-177.
- Leavesley, G.H. & Stannard, L.G. (1995): The Precipitation-Runoff Modeling System PRMS. In: Singh, V.P. (Ed.): *Computer models of watershed hydrology*, Colorado, 281-310.
- Leemans, R. & Zuidema, G. (1995): Evaluating changes in land cover and their importance for global change. *Tree*, 10(2), 76-81.
- Lehnhardt, F., Brechtel, H.M. & Boness, M. (Eds.): *Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt* (DVWK Schriften, 57), Hamburg, Berlin, 1-53.
- Leichtfuss, A. & Kivumbi, D. (1995): Quantifizierung von Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen. Darmstadt.
- Leser, H. & Klink, H.J. (Eds.) (1988): *Handbuch und Kartieranleitung Geoökologische Karte 1:25000*. Trier.
- Leser, H., Haas, H.-D., Mosimann, T. & Paesler, R. (1991): *Wörterbuch der Allgemeinen Geographie*. Braunschweig.
- Liebscher, H.-J. (1991): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt. *Wasserwirtschaft*, 81(1), 5-10.
- Liebscher, H.-J. et al. (1995): Entwicklung eines mathematischen Modells zur Untersuchung des Einflusses von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Hochwasser- und Niedrigwasserabfluß im Einzugsgebiet der Mosel sowie Echtzeitvorhersage unter Verwendung von Fernerkundungstechniken. UBA Forschungsbericht Wasser 102 01 304.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. & Bergström, S. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, 272-288.
- Loaiciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J. & Schwarz, H. (1996): Global warming and the hydrological cycle. *Journal of Hydrology*, 174, 83-127.
- Luft, G. & Morgenschweis, G. (1984): Zur Problematik großterrassierter Flurbereinigung im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. *ZKF*, 25, 138-148.
- Marks, R.M., Müller, M., Leser, H. & Klink, H.J. (Eds.) (1992): *Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushalts*. Trier.
- Meijering, M.P.D. (1995): Hochwasserrückführung im Gelstertal - Schlußfolgerungen aus einer Einzugsgebietsanalyse. In: Tönsmann, F. (Ed.): *Hochwasserschutz - Kasseler Wasserwirtschaftliches Symposium 1994* (Kasseler Wasserbau-Mitteilungen, 2/1995), Kassel, 195-202.
- Mendel, H.G., Fischer, P. & Herrmann, A. (1997): *Hochwasser - Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht* (Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-1022). Koblenz.
- Menzel, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (Zürcher Geographische Schriften, Heft 67). Zürich.
- Meyer, W.B. & Turner, B.L. (1992): Human population growth and global land use/land cover change. *Annu Review Ecological Systems*, 23, 39-61.
- Miller, J.R. & Russel, G.L. (1992): The impact of global warming on river runoff. *Journal of Geophysical Research*, 97(D3), 2757- 2764.
- Mitscherlich, G. (1978): *Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologische Grundlage des Waldwachstums*. Frankfurt am Main.
- Möller, D., Weinmann, B., Kirschner, M. & Kuhlmann, F. (1998): *GIS - basierte Simulation regionaler Landnutzungsprogramme. Agrarwirtschaft in der Informationsgesellschaft*.

- Monteith, J.L. (1975): Vegetation and the atmosphere - Vol. 1: Principles. London.
- Mosimann, T. (1999): Angewandte Landschaftsökologie - Inhalte, Stellung und Perspektiven. In: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D. & Gerold, G. (Eds.): Angewandte Landschaftsökologie, Berlin, 5 - 24.
- Mroczkowski, M., Raper, G.P. & Kuczera, G. (1997): The quest for more powerful validation of conceptual catchment models. *Water Resources Research*, 33(10), 2325-2335.
- Müller, N. (1987): Wie stark beeinflussen Umweltveränderungen den Hochwasser-Abfluß? (Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Universität Freiburg). Freiburg.
- Münch, A. (1993): AKWA-M - Programmdokumentation. Dresden.
- Muñoz-Carpena, R., Parsons, J.E. & Gilliam, J.W. (1999): Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology*, 214, 111-129.
- Nemec, J. (1993): Comparison and selection of existing models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and of different scales (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Report no. II-7, under the auspices of the CHR). Lelystad.
- O'Connell, P.E. & Todini, E. (1996): Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview. *Journal of Hydrology*, 175, 3-16.
- O'Callaghan, J.O. (1996): Land Use: The interaction of economics ecology and hydrology. London.
- Øverland, H. (1990): Einfluß der Landnutzung auf Hochwasserabfluß und Schwebstofftransport (Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 35). München.
- Panagoulia, D. & Dimou, G. (1997): Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change – Part 1: Models, model properties, and experimental design. *Journal of Hydrology*, 194, 15-37.
- Panagoulia, D. & Dimou, G. (1997): Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change – Part 2: Hydrological response for alternative climates. *Journal of Hydrology*, 194, 38-63.
- Panagoulia, D. & Dimou, G. (1997): Sensitivity of flood events to climate change. *Journal of Hydrology*, 191, 208-222.
- Parkin, G., O'Donnell, G., Ewen, J., Bathurst, J.C., O'Connell, P.E. & Lavabre, J. (1996): Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 175, 595-613.
- Parry, M.L. (1992): The potential effect of climate change on agriculture and land use. *Adv. Ecol. Res.*, 22, 63-92.
- 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 Research*, 22(8), 1263-1273.
- Pfützner, G., Kaden, S., Krone, A. & Flacke, W. (1992): Flächendifferenzierte Einzugsgebietsmodellierung bei Anwendung eines Geographischen Informationssystems. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 36, 48-56.
- Plate, E.J. (1992): Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): Regionalisierung in der Hydrologie, Weinheim, 33-43.
- Ragab, R. & Cooper, J.D. (1993a): Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements. *Journal of Hydrology*, 148, 109-131.
- Ragab, R. & Cooper, J.D. (1993b): Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 2. Predicted vs.

in situ measurements and evaluation of methods. *Journal of Hydrology*, 148, 133-147.

Rausch, R., Simon, T., Swoboda, F.D. & Kolokotronis, V. (1995): Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg - Heilbronner Mulde (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg). Freiburg.

Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. & Shirmohammadi, A. (1992): Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D.R. (Ed.): *Handbook of hydrology*, New York, 5.1-5.51.

Refsgaard, J.C. & Knudsen, J. (1996): Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7), 2189-2202.

Refsgaard, J.C. & Storm, B. (1996): Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (Eds.): *Distributed hydrological modelling*, Dordrecht, Boston, London, 41-54.

Refsgaard, J.C., Storm, B. & Abbott, M.B. (1996): Comment on 'A discussion of distributed hydrological modelling' by K.J.Beven. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (Eds.): *Distributed hydrological modelling*, Dordrecht, Boston, London, 279-287.

Regierungspräsident Arnsberg (1989): *Gebietsentwicklungsplan*, Regierungsbezirk Arnsberg.

Regional Verband Franken (1988): *Landschaftsrahmenplan.- Landschaftsanalyse und Freiraumbewertung*.

Regional Verband Franken (1995): *Region Franken.- Regionalplan*. Heilbronn.

Regional Verband Mittlerer Neckar (1986): *Materialien zur Entwicklung der Agrarstruktur in der Region Mittlerer Neckar*. Stuttgart.

Reynolds, J.F., Kemp, P.R., Acock, B., Chen, J. & Moorhed, D.L. (1996): Progress, Limitations, and Challenges in Modeling the Effects of Elevated CO₂

on Plants and Ecosystems. In: Koch, G.W. & Mooney, H.A. (Eds.): *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*, San Diego.

Riebsame, W.E., Meyer, W.E. & Turner, B.L. (1994): Modeling land use and cover as part of global environmental change. *Climatic change*, 28, 45-64.

Ritsema, C.J., Oostindie, K. & Stolte, J. (1996): Evaluation of vertical and lateral flow through agricultural loessial hillslopes using a two-dimensional computer simulation model. *Hydrological Processes*, 10, 1091-1105.

Robinson, M. (1990): *Impact of improved land drainage on river flows* (Institute of Hydrology, Wallingford, Report 113). Wallingford.

Rutter, A.J. & Morton, A.J. (1977): A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological parameters. *Journal of Applied Ecology*, 14, 567-588.

Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. & Morton, A.J. (1971): A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9, 367-384.

Rutter, A.J., Morton, A.J. & Robins, P.C. (1975): A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, 12, 367-380.

Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H. & Schwertmann, U. (1992): *Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart.

Schreider, S.Y., Jakeman, A.J., Pittock, A.B. & Whetton, P.H. (1996): Estimation of possible climate change impacts on water availability, extreme flow events and soil moisture in the Goulburn and Ovens Basins, Victoria. *Climatic Change*, 34, 513-546.

- Schröder, R. (2000): Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten (Bonner Geographische Abhandlungen, 101). Bonn.
- Schulla, J. & Jasper, K. (1999): Modellbeschreibung WaSiM-ETH. Zürich.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen (Zürcher Geographische Schriften, Heft 69). Zürich.
- Seibert, J., Bishop, K.H. & Nyberg, L. (1999): A test of TOPMODEL's ability to predict spatially distributed groundwater levels. Hydrological Processes, submitted.
- Sieker, F. (1995): Schriftliche Stellungnahme zur Anhörung des Bundestagsausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 15. Mai 1995. In: Deutscher Bundestag (Ed.): Hochwasserkatastrophe - Hilfen und Möglichkeit vorbeugender Maßnahmen, Bonn, Teil I, 105-117.
- Simunek, J., Vogel, T. & van Genuchten, M.T. (1992): The SWMS-2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media (US Salinity Laboratory, Research Report No. 126). Riverside, California.
- Sklash, M.G. & Farvolden, R.N. (1979): The role of groundwater in storm runoff. Journal of Hydrology, 43, 45-65.
- Sklash, M.G., Stewart, M.K. & Pearce, A.J. (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2. A case study of hillslope and low-order stream response. Water Resources Research, 22(8), 1273-1282.
- Sorooshian, S. & Gupta, V.K. (1995): Model calibration. In: Singh, V.P. (Ed.): Computer models of watershed hydrology, Colorado, 23-68.
- Statistisches Bundesamt (1997): Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (1998): Statistik von Baden-Württemberg. In: Gemeindestatistik 1997, Heft 2, Stuttgart, 64-66.
- Steinhardt, U. (1999): Die Theorie der geographischen Dimension in der Angewandten Landschaftsökologie. In: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D. & Gerold, G. (Eds.): Angewandte Landschaftsökologie, Berlin.
- Stichmann, W. (2000): Waldvermehrung und Naturschutz. In: Stiftung Wald in Not (Ed.): Wir brauchen mehr Wald- Leitfaden zur Waldvermehrung, Band 10, Bonn, 34-43.
- Storch, v.H., Zorita, E. & Cubasch, U. (1993): Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. Journal of Climate, 6, 1161-1171.
- Succow, M. (1995): Die Krise unserer Landnutzung - Chancen für Neuorientierungen? Berichte zur deutschen Landeskunde, Bd.69, H.1, 87-92.
- Tietje, O. (1993): Räumliche Variabilität bei der Modellierung der Bodenwasserbewegung in der ungesättigten Zone (Landschaftsökologie und Umweltforschung, Technische Universität Braunschweig, Heft 13). Braunschweig.
- Todini, E. (1995): New trends in modelling soil processes from hillslope to GCM scales. In: Oliver, H.R. & Oliver, S.A. (Eds.): The role of water and the hydrological cycle in global change, Berlin, Heidelberg, New York, 317-347.
- Todini, E. (1996): The ARNO rainfall-runoff model. Journal of Hydrology, 175, 339-382.
- Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C. (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. Wasser & Boden, 49(9), 13-22.
- Veeneklaas, F.R., van den Berg, L.M., Slothouwer, D. & Ijkenstam, G.F.P. (1994): Rhine basin study: Land use projections based on biophysical and socio-economic analysis.

- Veldkamp, A. & Fresco, L.O. (1996): CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological Modelling*, 85, 253-270.
- Verband Region Stuttgart (1996): Untersuchung zur ökologischen und landschaftsgestalterischen Qualität der Filder. Erster Teil.
- Verband Region Stuttgart (1998): Regionalplan Region Stuttgart. Stuttgart.
- Verburg, P.H., de Koning, G.H.J., Kok, K., Veldkamp, A. & Bouma, J. (1999): A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land cover. *Ecological Modelling*, Vol. 116, 45-61.
- Verworn, H.-J. & Harms, R.W. (1984): Urbanisierung und Hochwasserabfluß. *Wasser & Boden*, 36, 419-425.
- Vischer, D. (1993): Versiegelung der Landschaft – grössere Hochwasser? *Gas/Wasser/Abwasser*, 73(4), 280-283.
- Volk, M. & Steinhardt, U. (1999): Probleme bei der Ableitung dimensionsspezifischer Parameter. In: Steinhardt, U. & Volk, M. (Eds.): *Regionalisierung in der Landschaftsökologie*, Leipzig, 129 -138.
- Wessels, W. (1997): Sorge um die Eiche. *LÖBF-Mitteilungen*, 4, 80 - 85.
- Wenkel, K.-O. (1999): Dynamische Landschaftsmo-
delle für die Angewandte Landschaftsökologie. In: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D. & Gerold, G. (Eds.): *Angewandte Landschaftsökologie*, Berlin, 107 - 133.
- Wilby, R.L., Hay, L.E., Gutowski, W.J., Leavesley, G.H. & Clark, M.P. (1999): Hydrological response to dynamically and statistically downscaled general circulation model output. submitted to GRL.
- Williams, J., R., (1995): The EPIC Model. In: Singh, V.P. (Ed.): *Computer models of watershed hydrology*, Colorado.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1993): *Welt im Wandel: Grundstruktur Globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen*. Jahresgutachten 1993, 15-40.
- Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion (Ed.) (1990): *Duden Fremdwörterbuch*. Mannheim.
- Wood, E.F., Sivapalan, M. & Beven, K.J. (1990): Similarity and scale in catchment storm response. *Reviews of Geophysics*, 28, 1-18.
- Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K.J. & Band, L. (1988): Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102, 29-47.
- Zander, P. & Kächele, H. (2000): Modellierung der Wechselwirkung ökonomischer und ökologischer Ziele einer nachhaltigen Entwicklung der Landnutzung (MODAM -A Mult-Objective Decision Support Tool for Agrosystem Management). In: Seyfarth, W. (Ed.): *Jahresbericht 98/99 Zalf, Müncheberg*.
- Zuidema, P.K. (1985): *Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen* (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 79). Zürich.

Anhang

A DATENGRUNDLAGE

A.1 Quellen der räumliche Daten

Tab. A.1 Digitale räumliche Gebietsinformation für die Untersuchungsgebiete

	Topographie	Landnutzung	Böden
Körsch	Digitales Höhenmodell, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart (Rasterdaten: 50 × 50 m)	Daten zur Bodenbedeckung, CORINE, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (Vektordaten: 1:100000) Topographischer Atlas über das Großherzogtum Baden (1844), Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart (Karte 1: 50000)	Digitale Bodenübersichtskarte BUK 200, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg, Freiburg (Vektordaten 1:200000)
Lein	s.o.	s.o. Topographische Karte aus dem Königreiche Württemberg (1836), Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart (Karte 1: 50000)	s.o.
Lenne	Digitales Höhenmodell, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn (Rasterdaten: 50 × 50 m)	s.o. Topographische Karte vom Rheinland und Westfalen (1841), Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn (Karte 1:80000)	Digitale Bodenkarte BK 50, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld (Vektordaten 1: 50000)

A.2 Definition der CORINE-Landnutzungsklassen

Nicht durchgängige städtische Prägung – Siedlung (Code = 112)

Diese Flächen weisen einen Mischnutzungscharakter auf, wobei die Wohnfunktion überwiegt. Die Flächen haben einen geringeren Versiegelungsgrad und einen höheren Grünflächenanteil als städtische Siedlungen. Typisch für diese Bodenbedeckungsart sind Einfamilien- und Reihenhausbebauung, sowie Wohnblöcke mit größeren Grünflächen zwischen den Gebäuden. Streusiedlungen mit einem Gebäudeabstand über 100 m werden nicht erfasst.

Industrie- und Gewerbeflächen (Code = 121)

Industrie und Gewerbeflächen unterscheiden sich durch ihre Zweckbestimmung von den übrigen bebauten Flächen. Die Bodenbedeckung in diesen Flächen kann sehr heterogen sein, mit einem hohen Überbauungsgrad oder auch großen versiegelten bzw. wassergebundenen Freiflächen. Sie können aber auch einen höheren Anteil an Grünflächen aufweisen.

Flughäfen (Code = 124)

Die Bodenbedeckungsart Flughäfen wird über ihre Zweckbestimmung definiert. Die zugehörigen Flächen können unterschiedliche Bodenbedeckungen aufweisen, wie z.B. die asphaltierten oder betonierten Rollbahnen, die Abfertigungsgebäude und Flugzeughallen oder die Grünflächen zwischen den Start- und Landebahnen.

Abbauflächen (Code=131)

Unter dieser Position werden Tagebauflächen erfasst.

Städtische Grünflächen (Code=141)

Städtische Grünflächen weisen einen hohen Vegetationsgrad auf und dienen vornehmlich der Erholung. Sie sind gekennzeichnet durch ein Nebeneinander von Rasenflächen, Busch- und Baumgruppen und weisen i.d.R. ein dichtes Wegenetz auf.

Sport- und Freizeitanlagen (Code=142)

Sport- und Freizeitanlagen haben eine gemeinsame Zweckbestimmung. Die Struktur und die Bodenbedeckung der betreffenden Flächen können sehr unterschiedlich sein.

Acker (Code=211)

Die Möglichkeit der Differenzierung des Ackerlandes von Wiesen und Weiden ist abhängig vom Aufnahmezeitpunkt der Landsat-TM Satellitenbilder. Unter diese Klasse fallen alle nicht bewässerten Ackerflächen.

Wein (Code=221)

Weinbauflächen prägen sehr stark den Landschaftscharakter. Deshalb werden Weinbauflächen ausgewiesen, wenn sie mehr als die Hälfte der Gesamtfläche einnehmen.

Obst- und Beeren (Code=222)

Grundsätzlich lassen sich zwei Typen von Obstbeständen unterscheiden. Zum einen sind dies die Obstplantagen mit i.d.R. Zwerg- bis Mittelstammbäumen oder Spalierobst. Kennzeichen des Merkmal ist ihre intensive Nutzung, die regelmäßige Struktur und das Auftreten nur einer Altersklasse von Bäumen. Im Gegensatz hierzu stehen die Streuobstflächen mit hochstämmigen Bäumen und heterogenem Altersaufbau. Die Nutzung der Flächen ist insgesamt extensiver.

Wiesen und Weiden (Code=231)

Wiesen und Weiden unterliegen keinem Fruchtwechselsystem. Ihre Bodenbedeckung bzw. -nutzung bleibt über einen längeren Zeitraum unverändert.

Komplexe Parzellenstruktur (Code=242)

Probleme bei der Abgrenzung bereitet die Erfassungsuntergrenze von 25 ha, die von einzelnen Parzellen i.d.R. unterschritten wird. Oft sind diese Flächen mit Wiesen und Weiden und Ackerland stark vermischt, so dass eine Komplexe Parzellenstruktur ausgewiesen wird.

Landwirtschaftlich und Natur (Code=243)

Kennzeichen dieser Bodenbedeckungsart ist eine charakteristische Struktur von landwirtschaftlich genutzten und nicht-landwirtschaftlichen Flächen. Diese Flächen können Wälder und naturnahe Flächen, Feuchtf Flächen oder auch Wasserflächen sein. Landwirtschaftliche Flächen, durchsetzt mit einer größeren Anzahl von separaten Waldflächen < 25

ha, bilden den Großteil der in Deutschland ausgewiesenen Flächen dieser Bodenbedeckungsart.

Laubwald (Code=311)

Selbsterklärend.

Nadelwald (Code=312)

Selbsterklärend.

Mischwald (Code=313)

Es treten zwei Typen von Mischwaldflächen auf. Zum einen handelt es sich um eine Vergesellschaftung von Laub- und Nadelbäumen auf einer Parzelle. Zum anderen handelt es sich um ein Konglomerat aus Laub- und Nadelwaldflächen, die jeweils die Erfassungsuntergrenze unterschreiten.

Natürliches Grünland (Code=321)

Die Bodenbedeckungsart Natürliches Grünland besteht aus Grasland, das nicht oder nur extensiv landwirtschaftlich genutzt wird. Um die Verbuschung und spätere Bewaldung der betreffenden Flächen zu verhindern, müssen sie gemäht bzw. beweidet werden.

Wald-Strauch-Übergangsstadien (Code=324)

Diese Bodenbedeckungsart wird hauptsächlich für stark verbuschte Flächen mit einzelnen Bäumen oder Baumgruppen vergeben.

A.3 Meteorologische und hydrologische Zeitreihen

Tab. A.1 Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Lein

ID	Stationsname	Betreiber	RW	HW	Höhe	Jahre	Δt
Abflusspegel							
fr	Frankenbach	LfU 1457	3512773	5446792	158	80-97	h
sa	Schwaigern	LfU 2447	3504186	5444698	181	81-97	h
Niederschlagsstationen							
ep	Eppingen	DWD 71747	3494162	5443532	210	70-97	d
hl	Heilbronn-Böckingen	DWD 71416	3513130	5445768	195	70-97	d
hr	Heilbronn	DWD 71414	3516777	5445777	167	70-97	d
pa	Pfaffenhofen, Kreis Heilbronn	DWD 71405	3498539	5436857	207	70-97	d
rb	Rappenaubach, Bad Bonfeld	DWD 71421	3505827	5453540	198	70-97	d
si	Schwaigern – Stetten a. H.	DWD 71418	3501459	5443529	193	70-97	d
ek	Eppingen-Kleingartach	H 69180006	3497200	5440620	227	80-97	h
hk	Heilbronn – Kirchhausen	H 69200004	3509080	5449400	195	80-97	h
lg	Leingarten – Großgartach	H 69200011	3509490	5445640	174	82-97	h
mb	Massenbach – Bauhof	H 69200007	3503150	5448550	220	80-97	h
sg	Schwaigern – Stetten a. H.	H 69200017	3500770	5443570	193	80-97	h
Klimastationen							
eg	Eppingen ¹	DWD 2691	3494162	5443532	210	70-97	
hi	Heilbronn ¹	DWD 2689	3516777	5445777	167	70-97	
su	Schwaigern – Stetten a. H. ²	DWD 2517	3500770	5443570	193	82-97	

¹ Temperatur, Relative Feuchte, Windgeschwindigkeit

² Sonnenscheindauer

DWD: Deutscher Wetterdienst, Offenbach

H: Kommunaler Messverband, verwaltet vom Tiefbauamt Heilbronn

LfU: Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe

Tab. A.2 Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Körsch

ID	Stationsname	Betreiber	RW	HW	Höhe	Jahre	Δt
Abflusspegel							
de	Denkendorf	LfU 4414	3526308	5397102	248	83-98	h
Niederschlagsstationen							
es	Esslingen/Neckar	DWD 71167	3524509	5401328	236	69-97	d
se	Stuttgart-Echterdingen	DWD 71171	3516000	5394500	371	69-97	d
sr	Stuttgart-Rohr	DWD 71169	3507000	5398000	500	69-97	d
sw	Stuttgart (WA)	DWD 71175	3513476	5403143	286	69-84	d
ai	Aichwald-Aichschieß-Kl.anl.	L 73220010	3529670	5401960	347	81-91	h
gr	Grötzingen	L 73200098	3520970	5388400	300	78-87	h
nk	Nürtingen-Kläranlage	L 73200099	3524900	5389120	270	78-87	h
ws	Wolfschlugen	L 61336	3521970	5390635	380	70-95 97-98	d h
sv	Stuttgart-Vaihingen-Univ.	L 73200012	3507670	5400700	458	79-97	h
en	Esslingen	UMEG 4446	3524650	5398925	240	90-99	h
pg	Plochingen	UMEG 4448	3530600	5396850	250	94-99	h
bb	Böblingen	UMEG 4450	3501100	5394840	445	93-99	h
sf	Stuttgart Hafen	UMEG 4451	3519600	5401670	235	89-99	h
Synopstationen							
se	Stuttgart-Echterdingen	DWD 10738	3516000	5394500	371	80-87	d
st	Stuttgart-Schnarrenberg	DWD 10739	3514500	5410000	314	80-97	d
Klimastationen							
se	Stuttgart-Echterdingen ¹	DWD 2746	3516000	5394500	371	69-97	d
sn	Stuttgart-Neckartal ¹	DWD 2715	3516000	5405500	223	79-97	d
st	Stuttgart-Schnarrenberg ²	DWD 2743	3514500	5410000	314	80-97	d

¹ Niederschlag, Temperatur, Relative Feuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit

² Globalstrahlung

DWD: Deutscher Wetterdienst, Offenbach

L: Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe

UMEG: Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH

Anhang

Tab. A.3 Meteorologische und hydrologische Daten für das Einzugsgebiet der Lenne

ID	Stationsname	Betreiber	RW	HW	Höhe	Jahre	Δt
Abflusspegel							
ba	Bamenohl	RV 43	3428940	5670230	234	91-96 76-97	h d
he	Herrntrop-Hundem	StUA Siegen	3437400	5661720	307	91-97	h
ki	Kickenbach	StUA Siegen	3437070	5664120	282	91-97 61-96	h d
Niederschlagsstationen							
at	Attendorn	DWD 78796	3424392	5665409	307	62-97	d
fb	Finnentrop-Bamenohl	DWD 78765	3430038	5668667	250	62-97	d
fl	Finnentrop-Lenhausen	DWD 78807	3426620	5674277	230	62-97	d
kk	Kirchhundem-Kohlh.-Wirme	DWD 78739	3434795	5657478	420	62-97	d
kw	Kirchhundem Rh. Weserturm	DWD 78735	3443933	5659596	684	62-97	d
lb	Lennestadt-Bilstein	DWD 78756	3431363	5663086	320	62-97	d
sh	Schmallenberg-Fleckenberg	DWD 78731	3448000	5666500	364	62-94	d
ss	Schmallenberg-Sellinghausen	DWD 78581	3449005	5676231	435	62-97	d
bm	Bamenohl	RV 11	3429290	5669910	235	74-97	d
ho	Holthausen oben	RV 20	3453810	5671960	495	83-97	d
le	Lennestadt-Meggen Kläranl.	RV 39	3433130	5665830	260	91-93 84-97	h d
sc	Schmallenberg Kläranlage	RV	3449500	5668500	370	95-97	d
Synopstationen							
ka	Kahler Asten	DWD 10427	3463643	5671657	839	90-97	d
lu	Lüdenscheid	DWD 10419	3404298	5676870	444	91-93	d
Klimastationen							
ka	Kahler Asten ^{1, 2}	DWD 1594	3463643	5671657	839	62-97	d
la	Lennestadt-Altenhundem ¹	DWD 1597	3435593	5665257	300	62-97	d
lu	Lüdenscheid ^{2, 3}	DWD 1168	3404298	5676870	444	91-97	d

¹ Niederschlag, Temperatur, Relative Feuchte, Windgeschwindigkeit

² Sonnenscheindauer

³ Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit

DWD: Deutscher Wetterdienst, Offenbach

RV: Ruhrverband, Essen

StUA Siegen: Staatliches Umweltamt Siegen

B LISTE DER IM PROJEKT ENTSTANDENEN VERÖFFENTLICHUNGEN

- Becker, A., Güntner, A. & Katzenmaier, D. (1999): Required integrated approach to understand runoff generation and flow path dynamics in catchments. In: Leibundgut, Ch., McDonnell, J. & Schultz, G. (Eds.): *Integrated methods in catchment hydrology – tracer, remote sensing and new hydrometric techniques* (IAHS Publication no. 258), Wallingford, 3-9.
- Bronstert, A., Bürger, G., Heidenreich, M., Katzenmaier, D. & Köhler, B. (1999): Effects of climatic change influencing storm runoff generation: basic considerations and a pilot study in Germany. In: Balabanis, P., Bronstert, A., Casale, R. & Samuels, P. (Eds.): *The impact of climate change on flooding and sustainable river management* (Proceedings of the final RIBAMOD Workshop, Wallingford, 26-27 February 1998, European Commission, DG XII, Environment and Climate Programme), Luxembourg, 325-340.
- Bronstert, A., Fritsch, U., Katzenmaier, D. & Bismuth, C. (2000): Quantification of the influence of the land surface and river training on flood discharge in the Rhine basin. In: Toensmann, F. & Koch, M. (Eds.): *River Flood Defence*, Vol. 2, Kassel.
- Fritsch, U., Katzenmaier, D. & Bronstert, A. (2000): Delineation of land-use and land-cover scenarios for river basin research and management. In: *European Geophysical Society* (Ed.).
- Fritsch, U., Katzenmaier, D. & Bronstert, A. (2000): Land-Use and Land-Cover Scenarios for Scenarios for Flood Risk Analysis and River Basin Management. In: Bronstert, A., Bismuth, C. & Menzel, L. (Eds.): *European Conference on advances in flood research*, No. 65, Potsdam, 266- 275.
- Fritsch, U., Katzenmaier, D. & Menzel, L. (1999): Land use scenarios for flood risk assessment studies. In: Musy, A., Pereira, L.-S. & Fritsch, M. (Eds.): *Emerging technologies for sustainable land use and water* (2. Inter-Regional Conference on Environment-Water, Sept. 1-3, 1999 at EPFL, Lausanne, Switzerland), Lausanne.
- Katzenmaier, D., Uhlenbrook, S., Leibundgut, Ch., Bronstert, A. (April 1998) Land use changes influencing storm runoff generation and the potential of decentralized flood retention measures to compensate for such changes – a survey. – Vortrag im Rahmen der jährlichen Konferenz der European Geophysical Society (EGS) in Nizza.
- Katzenmaier, D., Fritsch, U. & Bronstert, A. (2000): Influence of urbanisation and agricultural management on storm runoff generation. In: *European Geophysical Society* (Ed.).
- Katzenmaier, D., Fritsch, U. & Bronstert, A. (2000): Influences of land-use and land-cover changes on storm-runoff generation. In: Bronstert, A., Bismuth, C. & Menzel, L. (Eds.): *European Conference on Advances in Flood Research*, No. 65, Potsdam, 276-285.
- Katzenmaier, D., Fritsch, U. & Bronstert, A. (2000): Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und dezentraler Versickerung auf die Hochwasserentstehung. In: Sieker, F. (Ed.): *Deutsche Bundesstiftung Umwelt*, Osnabrück.
- Katzenmaier, D. & Bronstert, A. (2000): Influences of land-use and land-surface conditions on flood generation: A Simulation Study. In: NATO (Ed.): *On Source Control Measures for Storm Water Runoff*.
- Katzenmaier, D. & Bronstert, A. (2000): The role of infiltration conditions for storm runoff generation at the hillslope and lower mesoscale. In: Leibundgut, C. & Demuth, N. (Eds.): *Runoff Generation and Implications for River Basin Modelling – Freiburger Schriften zur Hydrologie*, in press, Freiburg.
- Menzel, L., Fritsch, U., Katzenmaier, D. (April 1999) Land use scenario for risk analysis evaluation.- Poster für die jährliche Konferenz der European Geophysical Society (EGS) in Den Haag.

