

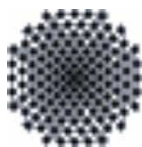
LAHoR
Quantifizierung des Einflusses
der Landoberfläche und
der Ausbaumaßnahmen am Gewässer
auf die Hochwasserbedingungen
im Rheingebiet



Bundesanstalt
für
Gewässerkunde



Kommission
für die
Hydrologie
des
Rheingebietes



Institut für
Wasserbau
der
Universität
Stuttgart



Potsdam-
Institut für
Klimafolgen-
forschung
e.V.



Rijkinstituut
voor
Integraal
Zoetwater-
beheer en
Afvalwater-
behandeling



Universität
Potsdam

LAHoR
Quantifizierung des Einflusses
der Landoberfläche und
der Ausbaumaßnahmen am Gewässer
auf die Hochwasserbedingungen
im Rheingebiet

Projektleitung

Prof. Dr. Axel Bronstert

Projektbearbeitung

Prof. Dr. Dr. András Bárdossy

Dipl. Agrar.-Ing. Christine Bismuth

IRMA-Code3/DU/1/002

Prof. Dr. Axel Bronstert

Dezember 2001

Ir. Hendrik Buiteveld

Dipl.-Met. Norbert Busch

Dr. Markus Disse

Dipl.-Ing. Heinz Engel

Dr. Uta Fritsch

Dipl.-Ing. Yeshewatesfa Hundecha

Dr. Rita Lammersen

Dr. Daniel Niehoff

Dipl.-Ing. Nicole Ritter

Bundesanstalt
für
Gewässerkunde

Institut für
Wasserbau
der
Universität
Stuttgart

Kommission für
die Hydrologie
des
Rheingebietes

Potsdam-
Institut
für
Klimafolgen-
forschung

Rijksinstituut
voor
Integraal
Zoetwater-
beheer en
Afvalwater-
behandeling

Universität
Potsdam

Inhalt

Abbildungen	VI
Tabellen	VIII
Karten	IX
Zusammenfassung	XIII
Einleitung	
1.1 Hintergrund des Projektes	1
1.2 Projektziel	2
1.3 Wissenschaftliche Herangehensweise	3
1.4 Projektpartner und Struktur des Projektes	3
Untersuchungsraum	
2.1 Mesoskalige Gebiete für Grundlagenstudien	5
2.2 Makroskalige Betrachtung des Rheingebietes unterhalb des Pegels Maxau	7
2.3 Das Gewässersystem unterhalb des Pegels Maxau	7
Datengrundlage	
3.1 Untere Mesoskala	11
3.1.1 Räumliche Daten	11
3.1.2 Meteorologische und hydrologische Daten	11
3.2 Obere Mesoskala und Makroskala	13
3.2.1 Geographische Daten	13
3.2.2 Hydrometeorologische Daten	13
3.3 Gewässersystem	13
Untersuchungsverfahren	
4.1 Hydrologische Modellierung in der unteren Mesoskala	15
4.1.1 Modellkonzept	15
4.1.2 Räumliche Diskretisierung	15
4.1.3 Bodenmodell	15
4.1.3.1 Infiltration und Infiltrationsüberschuss	16
4.1.3.2 Unterirdische Fließvorgänge und Sättigungsüberschuss	16
4.1.4 Modellerweiterungen	17
4.1.4.1 Makroporenfluss	17
4.1.4.2 Versiegelung	18
4.2 Hydrologische Modellierung in der Oberen Mesoskala und der Makroskala	20
4.2.1 Struktur des HBV-IWS Modells	21

4.2.1.1	Schneeakkumulation und Schneeschmelze	21
4.2.1.2	Bodenfeuchte	21
4.2.1.3	Evapotranspiration	21
4.2.1.4	Abflusskonzentration	22
4.2.1.5	Wellenablauf	23
4.2.1.6	Zusätzliche Modellkomponenten	23
4.2.2	Flächendifferenzierte Modellierung der Teileinzugsgebiete	23
4.2.3	Meteorologische Modelleingangsdaten und deren räumliche Interpretation	23
4.2.4	Modellkalibrierung und Regionalisierung der Parameter	24
4.2.5	Modellvalidierung	26
4.3	Hydraulische Modellierung des Wellenablaufs	26
4.3.1	Wellenablaufmodelle SYNHP und SOBEK	26
4.3.1.1	Das hydrologische Modell SYNHP	26
4.3.1.2	Das hydrodynamische Modell SOBEK	27
4.3.2	Modelltopographie und -gerinnegeometrie in SOBEK	28
4.3.2.1	Datenaufbereitung in BASELINE	28
4.3.2.2	Erstellung von SOBEK-Profilen mit BASELINE	31

Randbedingungen bezüglich Landnutzungsänderung, Klimaänderung und Retention an den Flüssen

5.1	Untere Mesoskala	33
5.1.1	Landnutzungsänderungen	33
5.1.1.1	Grundlagen	33
5.1.1.2	Modellkonzept	33
5.1.2	Klimaänderungen	35
5.1.2.1	Szenariotechnik für die untere Mesoskala	35
5.1.2.1	Ermittelte Klimaszenarien für die untere Mesoskala	37
5.2	Obere Mesoskala und Makroskala	39
5.2.1	Landnutzungsänderungen	39
5.2.2	Niederschlagsszenarien	39
5.2.2.1	Bezugsszenario	39
5.2.2.2	Zunahme von Siedlungsflächen	40
5.2.2.3	Entsiegelung	41
5.2.2.4	Extremszenarien	42
5.2.3	Retentionsmassnahmen am Gewässernetz	42

Untersuchungsergebnisse

6.1	Übersicht über die zu Grunde gelegten Szenarien	45
6.2	Auswirkungen von Landnutzungsänderungen in der unteren Mesoskala	46
6.2.1	Verdopplung der versiegelten Fläche	46
6.2.2	Zustand im Jahr 2010	48
6.3	Auswirkungen von Klimaänderungen in der unteren Mesoskala	52
6.3.1	Lein	52
6.3.2	Körsch	53
6.3.3	Lenne	53
6.4	Auswirkungen von Landnutzungsänderungen in der oberen Mesoskala und der Makroskala	54
6.4.1	Ergebnisse der Regionalisierung für den Ist-Zustand der Landnutzung	54
6.4.2	Einfluss der Urbanisierung bis zum Jahre 2010	56
6.4.3	Einfluss von Entsiegelungsmaßnahmen	57
6.4.4	Einfluss der Verdoppelung der Siedlungsflächen	58
6.4.5	Einfluss von Aufforstungsmaßnahmen	58
6.4.6	Antwort des Gebietes auf ein meteorologisches Extremereignis	60
6.5	Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und Retentionsmassnahmen auf den Wellenablauf	60
6.5.1	Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Abflüsse im Rhein	62

6.5.2 Einfluss von Retentionsmaßnahmen auf die Abflüsse im Rhein	64
6.5.3 Einfluss der Landnutzung und der Retentionsmaßnahmen auf die Abflüsse im Rhein ..	66

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen für die unterschiedlichen Massstabsbereiche	69
7.1.1 Untere Mesoskala	70
7.1.2 Mittlere bis obere Mesoskala	71
7.1.3 Makroskala	71
7.2 Empfehlungen	72

Dank	73
-------------	-----------

Literatur	75
------------------	-----------

Abbildungen

<i>Abb. 1.1</i>	Oberrhein bei Straßburg in den Jahren 1828, 1872 und 1963	1
<i>Abb. 1.2</i>	Entwicklung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Körsch von 1836 bis heute	2
<i>Abb. 1.3</i>	Modelle, zugehörige räumliche Skalen und skalen-relevante hydrologische und hydraulische Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration im LAHOR-Projekt	4
<i>Abb. 4.1</i>	Für die hydrologische Modellierung in WaSiM-ETH notwendige räumliche Daten	16
<i>Abb. 4.2</i>	Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells	17
<i>Abb. 4.3</i>	Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen	18
<i>Abb. 4.4</i>	Modellkonzept zur expliziten Berücksichtigung versiegelter und an die Kanalisation angeschlossener Bereiche innerhalb einer Gitterzelle	19
<i>Abb. 4.5</i>	Schematische Struktur des HBV-IWS Modells	22
<i>Abb. 4.6</i>	Schematische Darstellung eines Flussquerprofils und seiner Widergabe in SOBEK	29
<i>Abb. 4.7</i>	Erstellung von SOBEK-Profilen mit BASELINE unter ARC/INFO	30
<i>Abb. 4.8</i>	Beispiel einiger Baseline-coverages, Rhein km 807–820, Wesel	31
<i>Abb. 4.9</i>	Umwandlung reeller Geländeinformationen in ein repräsentatives Profil	32
<i>Abb. 5.1</i>	Modellkonzept für Szenarien zur Ausbreitung von Siedlungsfläche im Landnutzungsmodell Luck	34
<i>Abb. 5.2</i>	Monatlicher Niederschlag in den drei Untersuchungsgebieten für das hydrologische Jahr 1994 und eine Projektion dieses hydrologischen Jahres um etwa 100 Jahre in die Zukunft	38
<i>Abb. 5.3</i>	Retentionsmaßnahmen am Oberrhein unterhalb von Maxau	44
<i>Abb. 5.4</i>	Retentionsmaßnahmen am Niederrhein	44
<i>Abb. 6.1</i>	Simulation zweier etwa dreijährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche	46
<i>Abb. 6.2</i>	Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche	47
<i>Abb. 6.3</i>	Simulation eines etwa zweijährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche	48
<i>Abb. 6.4</i>	Simulation zweier etwa dreijährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 13%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010	49
<i>Abb. 6.5</i>	Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 7%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010	50
<i>Abb. 6.6</i>	Simulation eines etwa zweijährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 14%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010	50
<i>Abb. 6.7</i>	Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für 2070 bis 2097	52

<i>Abb. 6.8</i>	Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Körorsch für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für 2070 bis 2097	53
<i>Abb. 6.9</i>	Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für 2070 bis 2097.	54
<i>Abb. 6.10</i>	Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für ausgewählte Pegel .	56
<i>Abb. 6.11</i>	Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss am Pegel Menden/Sieg für ein ausgewähltes Hochwasserereignis.	56
<i>Abb. 6.12</i>	Simulierte Ganglinien für den Ist-Zustand und das Jahr 2010 bei einem Sommer- und einem Winterereignis am Pegel Würzburg/Main.	57
<i>Abb. 6.13</i>	Vergleich zwischen simulierten Ganglinien mit und ohne Entsiegelungsmaßnahmen für ein Winter- und Sommerereignis am Pegel Schermbeck/Lippe	58
<i>Abb. 6.14</i>	Vergleich zwischen simulierten Ganglinien mit und ohne intensive Besiedlung am Pegel Menden/Sieg	59
<i>Abb. 6.15</i>	Einfluss einer vollständigen Bewaldung auf den Abfluss für ein typisches Sommer- und Winterereignis in zwei verschiedenen Einzugsgebieten	59
<i>Abb. 6.16</i>	Auswirkungen des meteorologischen Extremszenarios auf den Hochwasserabfluss . . .	60
<i>Abb. 6.17</i>	Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Ganglinien am Pegel Andernach bzw. Lobith für die Modellhochwasser M 93/94 und M 95	64
<i>Abb. 6.18</i>	Abflussreduktion M95++ an den Pegel Kaub und Lobith	65

Tabellen

<i>Tab. 2.1</i>	Kenndaten der bedeutenden Rhein Nebenflüsse in der Untersuchungsstrecke sowie der Rhein-Pegel Maxau und Lobith	8
<i>Tab. 4.1</i>	Sensitivität der Modellparameter des HBV-IWS Modells und zugehörige Regionalisierungsgrundlage	26
<i>Tab. 5.1</i>	Gebietsniederschlag im hydrologischen Jahr 1994 und für das Klimaszenario X ₁₉₉₄ * . . .	37
<i>Tab. 5.2</i>	Anstieg des Anteils der Siedlungsflächen vom Ist-Zustand zum Jahre 2010	41
<i>Tab. 5.3</i>	Mittlere Flächenanteile der betrachteten Landnutzungsszenarien (Gesamtgebiet)	41
<i>Tab. 5.4</i>	Im Modell berücksichtigte Rückhaltemaßnahmen am Rhein unterhalb des Pegels Maxau	43
<i>Tab. 6.1</i>	Überblick über die verschiedenen Landnutzungsszenarien, welche bei der makroskaligen Modellierung von Hochwasserentstehung und Wellenablauf berücksichtigt werden	45
<i>Tab. 6.2</i>	Prognostizierter Zuwachs an Siedlungsflächen zwischen 1996 und 2010 in den drei mesoskaligen Untersuchungsgebieten	51
<i>Tab. 6.3</i>	Simulierter Abflussverschärfung für den prognostizierten Zuwachs an Siedlungsflächen zwischen 1996 und 2010 in den drei mesoskaligen Untersuchungsgebieten	51
<i>Tab. 6.4</i>	Für das Leingebiet simulierte Abflussänderung infolge von Verstädterung, Entsiegelung bzw. bei Einsatz des Mulchsaatverfahrens auf Flächen mit Blattfruchtanbau	51
<i>Tab. 6.5</i>	Zusammenfassung der Modellgüte für die zur Kalibrierung verwendeten Einzugsgebiete	55
<i>Tab. 6.6</i>	Zusammenfassung der Modellgüteparameter für die Einzugsgebiete, die für die Validierung des Regionalisierungsansatzes verwendet wurden	56
<i>Tab. 6.7</i>	Übersicht über die für das Gesamtgebiet (Makroskala) simulierten Szenarien	61
<i>Tab. 6.8</i>	Scheitelveränderungen aufgrund unterschiedlicher Landnutzung [cm].	63
<i>Tab. 6.9</i>	Scheitelveränderungen (Reduktion in cm) aufgrund der Retentionsmaßnahmen	66
<i>Tab. 6.10</i>	Scheitelveränderungen aufgrund des kombinierten Einflusses von unterschiedlicher Landnutzung und Retention an den großen Flüssen.	67
<i>Tab. 7.1</i>	Prozesse der Hochwasserentstehung, zugehörige Wissenschaftsdisziplinen und charakteristische räumliche Größenbereiche der Prozesse	69

Karten

<i>Karte 2.1</i>	Landnutzung in den drei ausgewählten mesoskaligen Einzugsgebieten	6
<i>Karte 2.2</i>	Das Rheineinzugsgebiet, unterteilt in für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung verwendete Teileinzugsgebiete	7
<i>Karte 2.3</i>	Untersuchungsgebiet der Wellenablaufmodellierung	9
<i>Karte 3.1</i>	Messnetz in den drei ausgewählten mesoskaligen Einzugsgebieten	12
<i>Karte 5.1</i>	Szenario für den Zuwachs an Siedlungs- und Verkehrsfläche im deutschen Teil des Rheingebiets ab Maxau von 1996 bis 2010 und prognostizierter Zustand für das Jahr 2010	40
<i>Karte 6.1</i>	Räumliche Umsetzung des prognostizierten Siedlungszuwachses für das Leingebiet im Zeitraum von 1996 bis 2010	49

Zusammenfassung

Die 1990er Jahre waren von einer Serie bedeutender Hochwasser betroffen, dies gilt weltweit und für Mitteleuropa gleichermaßen. Im Rheingebiet führten sehr extreme Ereignisse zu Weihnachten 1993 und im Januar 1995 zu konkreten Aktionen mit dem Ziel der Verbesserung der Hochwassersituation im Einzugsgebiet und an den Gewässern.

In diesem Kontext wurde das IRMA-Programm (Interreg. Rhein-Maas-Aktivitäten) seitens der EU eingeleitet, zu dem die LAHoR-Untersuchungen einen Beitrag liefern. Dieser hat das Ziel, den Einfluss der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen an Gewässern auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet zu quantifizieren, was in drei Maßstabsebenen angegangen wurde:

- (1) Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche bzw. -bedeckung auf die Abflussbildung bei Starkniederschlägen im Einzugsgebiet bis 500 km² (untere Mesoskala)
- (2) Regionalisierung der Erkenntnisse aus der unteren Mesoskala auf die obere Mesoskala und die Makroskala und Berechnung von Abflusswellen infolge unterschiedlicher Landnutzungsszenarien
- (3) Verknüpfung der Einzelwellen durch Wellenablaufmodelle im Rhein und in seinen bedeutenden Nebenflüssen.

Als Untersuchungsraum für die untere Mesoskala wurden drei Gebiete mit 115, 127 und 455 km² Größe ausgewählt, die jeweils überwiegend landwirtschaftlich (ca. 65%), stark urban (25%) bzw. vor allem durch Wald (65%) geprägt sind.

Das makroskalige Rheingebiet unterhalb von Karlsruhe am Rhein und von Perl an der Mosel umfasst bis zum Pegel Lobith 110 600 km², aufgeteilt in 95 Teilgebiete.

Die Wellenablaufmodellierung umfasst mit Teilen des Rheins sowie der Nebengewässer Neckar, Main, Saar und Mosel eine Gesamtflusslänge von 1143 km, wovon 643 km staugeregelt sind. Deiche gegen Hochwasser schützen hauptsächlich Ober- und Niederrhein mit einer im Modell berücksichtigten Lauflänge von rund 350 km.

Datengrundlage waren digitale Höhenmodelle, Daten zur Bodenbedeckung und digitale Bodenkarten für die Landflächen sowie Daten von Niederschlags- und Klimastationen. Ergänzend lag das Gewässernetz mit den Pegelstationen vor. Für die hydrologischen Kalibrierungen waren außerdem Abflussganglinien an Pegeln erforderlich.

Die Beschreibung der Gewässer für die Wellenablaufmodellierungen nutzt gemessene Querprofile im Abstand von 100 bis 500 m in Verbindung mit Steuerdaten für Bauwerke. Für Kalibrierungen wurden Wasserspiegelfixierungen, Abflusskurven sowie gemessene Wasserstands- und Abfluss-Ganglinien herangezogen.

Für die detaillierte hydrologische Modellierung in der unteren Mesoskala wurde das deterministische flächendifferenzierte Modell WASIM-ETH ausgewählt und für spezifische Fragen der Infiltrationsbedingungen an der Landoberfläche erweitert. Für die Modellierung in der oberen Mesoskala und der Makroskala stand das schwedische HBV-Modell zur Verfügung. Es wurde in einigen Komponenten ebenfalls verändert und er-

gänzt. Die Wellenablaufmodellierung ist für die Saar und Teile der Mosel durch das hydrologische Modell SYNHP und für den Rhein, den Main und Teile von Mosel und Neckar durch das hydraulische Modell SOBEK realisiert worden.

Damit stand ein Instrumentarium zur Verfügung, mit dem die Auswirkungen unterschiedlicher

- (1) Versiegelungsbedingungen und Landwirtschaftsweisen
- (2) Waldbedeckungsanteile
- (3) Ausbau- und Retentionsmaßnahmen am und im Gewässer

auf den Hochwasserablauf darstellbar waren.

Als Szenarien der Landnutzung wurden der Bezugszustand (1992), zwei realistische Zielzustände (2010 und 2020) sowie zwei fiktive Extremzustände (100% Versiegelungszunahme und vollständige Bewaldung des Rheingebiets) simuliert. Bezüglich des Flussausbaus wurden bei den Wellenablaufberechnungen zunächst die Abflusssdynamik ohne Berücksichtigung und danach mit Berücksichtigung von Retentionsmaßnahmen am Rhein bis zum Endpegel Lobith berechnet.

Der meteorologisch Input für das Gesamtgebiet basiert auf Niederschlagsmesswerten von vier historischen Hochwasserperioden sowie – als klimatisches Extremszenario – auf einer prozentualen Erhöhung der Niederschläge mit zusätzlicher Schneerücklage für das größte der vier Hochwasser.

Es folgen einige ausgewählte Ergebnisse:

- (1) Eine Ausweitung von Siedlungsflächen um 50% kann in Gebieten bis zu ca. 1000 km² bei

Jährlichkeiten der Hochwasserereignisse von zwei bis acht Jahren die Scheitelabflüsse

(a) zwischen 0 und 4% bei advektiven und

(b) bis zu 30% bei konvektiven Niederschlagsereignissen ansteigen lassen.

- (2) Aus der dezentralen Versickerung von Niederschlägen ergeben sich Abflussminderungen, welche in ähnlichen Größenordnungen liegen wie die Abflusserhöhungen durch verstärkte Versiegelung.
- (3) In großen Gebieten sind jedoch nur advektive Niederschläge relevant für die Hochwasserentstehung. Die Ergebnisse für Mesoskala und Makroskala liegen für diese advektiven Ereignisse in derselben Größenordnung.
- (4) Aufforstungen wirken in kleinen und großen Gebieten in der Regel scheiteldämpfend.
- (5) Die Hochwasserablaufberechnungen zeigen, dass durch die Überlagerungen von Wellen aus den verschiedenen Teileinzugsgebieten die maximalen Wirkungen aus Landnutzungsänderungen (Vergrößerung/Verkleinerung der Abflüsse) regelmäßig im Wellenanstieg und deutlich vor den Scheiteln eintreten. Die Wirkung auf den Abfluss-Scheitel ist also deutlich geringer.
- (6) In Teilgebieten erzeugte Dämpfungen der Wellenscheitel sind in aller Regel auch in Lobith nachweisbar, in der Größenordnung von 1 cm bis 5 cm bei realistischen Landnutzungsänderungen. Die negativen und positiven Effekte aus Versiegelung bzw. Entsiegelung/Bewaldung verlieren allerdings mit steigenden Niederschlägen an Bedeutung.
- (7) Der Einsatz von Retentionsmaßnahmen entlang der großen Flüsse führt zu Scheitelreduktionen in der Größenordnung von 1 cm bis 16 cm. Durch abgestimmte Steuerungen sind größere Dämpfungseffekte zu erwarten.

Einleitung

1.1 HINTERGRUND DES PROJEKTES

Die beiden Winterhochwasser von 1993/1994 und 1995 am Rhein mit hohen Schäden in Deutschland und in den Niederlanden führten bei der interessierten Öffentlichkeit und in Fachkreisen zu teilweise heftigen Diskussionen darüber, inwieweit das gehäufte Auftreten sehr großer Hochwasserereignisse durch Umweltänderungen hervorgerufen bzw. verstärkt wurde. Dabei sind u.a. Flussbaumaßnahmen am Rhein und seinen großen Nebenflüssen, die damit verbundenen Verluste von Überflutungsflächen, die intensive Landwirtschaft, Landnutzungsänderungen (dabei besonders die stetig zunehmende Urbanisierung) und die anthropogene Klimaänderung für eine Verschärfung der Hochwassersituation oder eine Häufung dieser Ereignisse verantwortlich gemacht worden.

Bei den Diskussionen wurde wiederholt deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen den genannten Umweltänderungen und deren Auswirkungen auf die Abflussbildung bei Hochwasser (*Hochwasserentstehung*) und die Wasserstände im Hauptgewässersystem (*Wellenablauf*) wissenschaftlich begründet bislang nur qualitativ aber nicht quantitativ abgesichert zu belegen war.

Ein prominentes Beispiel für die Baumaßnahmen an Gewässern ist der Ausbau des Oberrheins (siehe z.B. die Veränderung des Rheinlaufs in der Gegend von Straßburg während der letzten 200 Jahre, dargestellt in *Abb. 1.1*). Hier ist es u.a. durch den Staustufenbau zu einer erheblichen Veränderung des Wellenablaufes gekommen. So hat sich der statistisch einmal in 200 Jahren zu erwartende Hochwasserscheitel am Pegel Maxau

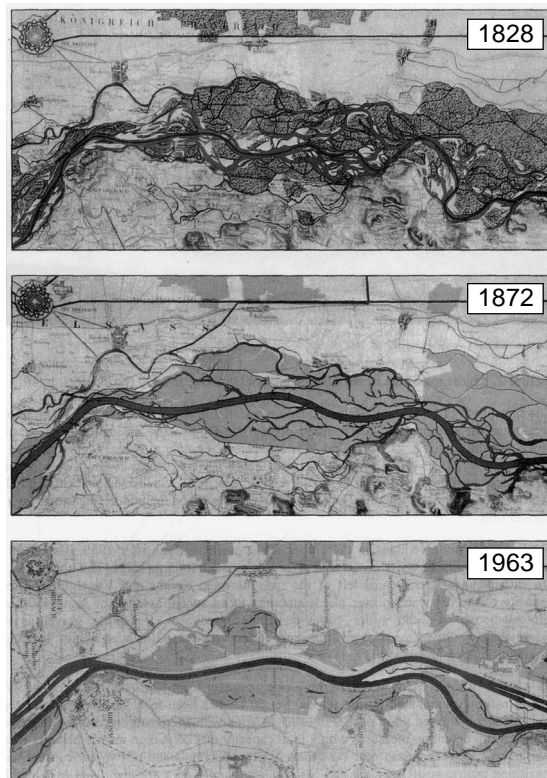


Abb. 1.1 Oberrhein bei Straßburg in den Jahren 1828, 1872 und 1963 (KHR, 1993)

von 5000 m³/s im Jahre 1950 durch den weiteren Ausbau des Oberrheins bis 1977 auf 5700 m³/s erhöht.

Als Beispiel für die Änderung der Landoberfläche sei hier exemplarisch der Zustand im Einzugsgebiet der Körsch (Nebenfluss des Neckars

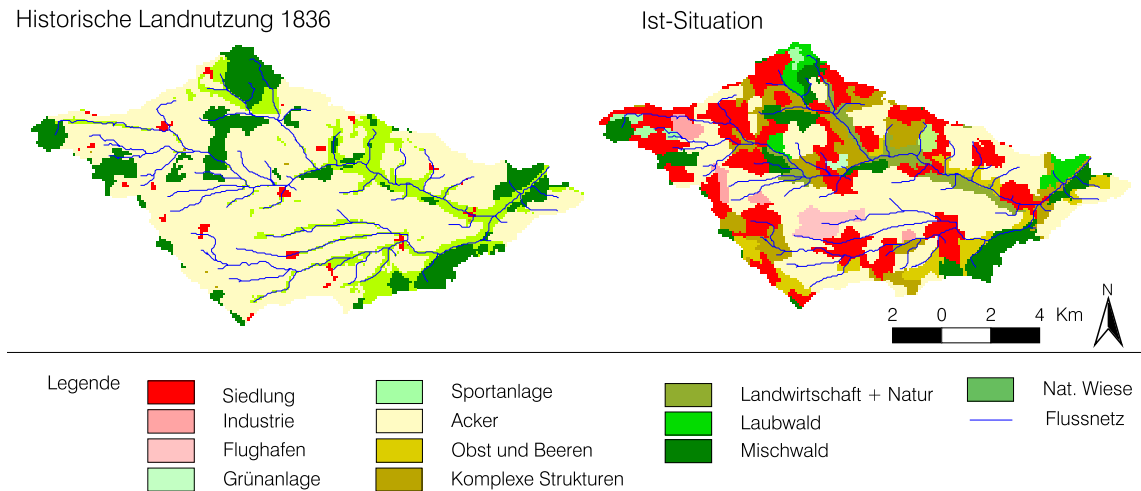


Abb. 1.2 Entwicklung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Korsch von 1836 bis heute

südlich von Stuttgart) genannt. Hier stieg der Anteil der urbanen Flächen von 1,3% im Jahre 1836 auf heute ungefähr 25% (siehe Abb. 1.2).

Der Aktionsplan Hochwasser der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR, 1998) hat sich u.a. zum Ziel gesetzt, Extremwasserstände unterhalb des staugeregelten Rheinabschnitts um bis zu 70 cm bis zum Jahr 2020 zu mindern, insbesondere durch den Bau von Poldern, aber auch durch Maßnahmen im

Einzugsgebiet selbst (wie z.B. die dezentrale Versickerung).

Das IRMA (INTERREG Rhein-Maas Aktivitäten) Programm wurde von der EU auch zur Unterstützung des Aktionsplans Hochwasser initiiert. Wissenschaftliche Studien sollen in diesem Rahmen u.a. die Wirkung bestimmter Maßnahmen quantifizieren und eine Grundlage bezüglich der Speichermöglichkeiten sowohl in der Landschaft als auch am Flusslauf schaffen.

1.2 PROJEKTZIEL

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. Das hier vorgestellte Projekt zielt daher auf die Beantwortung zweier grundlegender Fragen:

(1) Wie stark ist der Einfluss von Umweltveränderungen wie Landnutzungsänderungen oder

wasserbaulichen Maßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet?

(2) In welchem Maße kann die Hochwassersituation im Rheingebiet durch gezielte Rückhaltemaßnahmen in der Landschaft und entlang der Flussläufe entschärft werden?

Diese Fragen wurden im Rahmen des Projektes LAHoR (Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet) bearbeitet, welches unter anderem Bestandteil des o.g. IRMA-Programms der Europäischen Union ist.

1.3 WISSENSCHAFTLICHE HERANGEHENSWEISE

Die Untersuchungen des Einflusses von Gebiets-eigenschaften und Flussbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet von Maxau bis Lobith (niederländisch-deutsche Grenze) erfordern eine Durchführung auf verschiedenen Maßstabsebenen:

- (1) Detaillierte hydrologische Modellierung im Maßstabbereich der unteren Mesoskala (Gebietsfläche ca. 100 bis 500 km²) und Erstellung von geographisch detaillierten Szenarien zur zukünftigen Landnutzungsentwicklung. Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche bzw. -bedeckung auf die Abflussbildung während Starkniederschlagsperioden.
- (2) Übertragung der detaillierten Erkenntnisse der Abflussbildung auf größere Einzugsgebiete (Nebenflussgebiete des Rheins bis ungefähr 2000 km²) und Zusammenstellung der Wellen

aus diesen Teilgebieten. Hierbei wird das detaillierte Modell verallgemeinert und so regionalisiert, dass auf Basis verfügbarer Flächen-daten (Topographie, Gewässernetz, Landnut-zung, Bodenkarte) die Parametrisierung erfolgt.

- (3) Berechnung des Wellenablaufs im Rhein und seinen großen Nebenflüssen. Damit sollen die Einflüsse der Landoberfläche auf den Abfluss im Rhein integriert und zusammen mit den Wirkungen von Ausbau- bzw. Rückhaltemaßnahmen am Rhein und seinen Nebenflüssen auf den Hochwasserabfluss quantifiziert werden.

Die Verbindung bzw. Überlappung der verschiedenen Skalenbereiche verdeutlicht *Abb. 1.3*. Die Grundprinzipien der Modelle werden in *Kap. 4* erläutert.

1.4 PROJEKTPARTNER UND STRUKTUR DES PROJEKTES

Das Projekt wurde durchgeführt vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und der Universität Potsdam (Themenbereiche 1 und 2, s.u.), der Universität Stuttgart (Themenbereich 2 und 3), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA, Niederlande) (beide Themenbereich 4) sowie der Kommission für die Hydrologie des Rheins, KHR, die die Flächendaten des Rheingebietes bereitstellte. Die Projektdauer betrug vier Jahre (September 1997 bis Dezember 2001). Das Projekt gliedert sich in folgende wissenschaftliche Schwerpunkte, die sich aus den zuvor genannten Skalenbereichen ableiten lassen:

- (1) Modellierung der Abflussbildung während Starkniederschlagsperioden (Repräsentanz von Landoberfläche und Vegetation in Hochwassermodellen; Infiltrations- und Speichervorgänge bei extremen Niederschlägen; besondere Bedeutung von Versiegelung und Ma-

kroporen auf die Abflussbildung; Skalenübergänge)

- (2) Szenarienerstellung: Erstellung von Landnutzungsszenarien (Entwicklung realistischer, räumlich definierter Zukunftsbilder der Landnutzung) sowie meteorologische Szenarien mit Relevanz für Hochwasserentstehung; Parameterisierung von Landnutzung und Vegetation
- (3) Regionalisierung der Hochwasserentstehung
- (4) Modellierung des Hochwasserablaufs in den Flüssen (u.a. Frage der Repräsentanz von Flussausbaumaßnahmen und Poldern in hydraulischen Modellen)

Die Koordinierung des Verbundprojekts lag beim Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und ab Beginn des Jahres 2000 auch an der Universität Potsdam. Das Projekt wurde finanziert vom INTERREG-IIc Programm der Europäischen Union und vom Umweltbundesamt. Zudem wurden in erheblichem Umfang von den Projektpart-

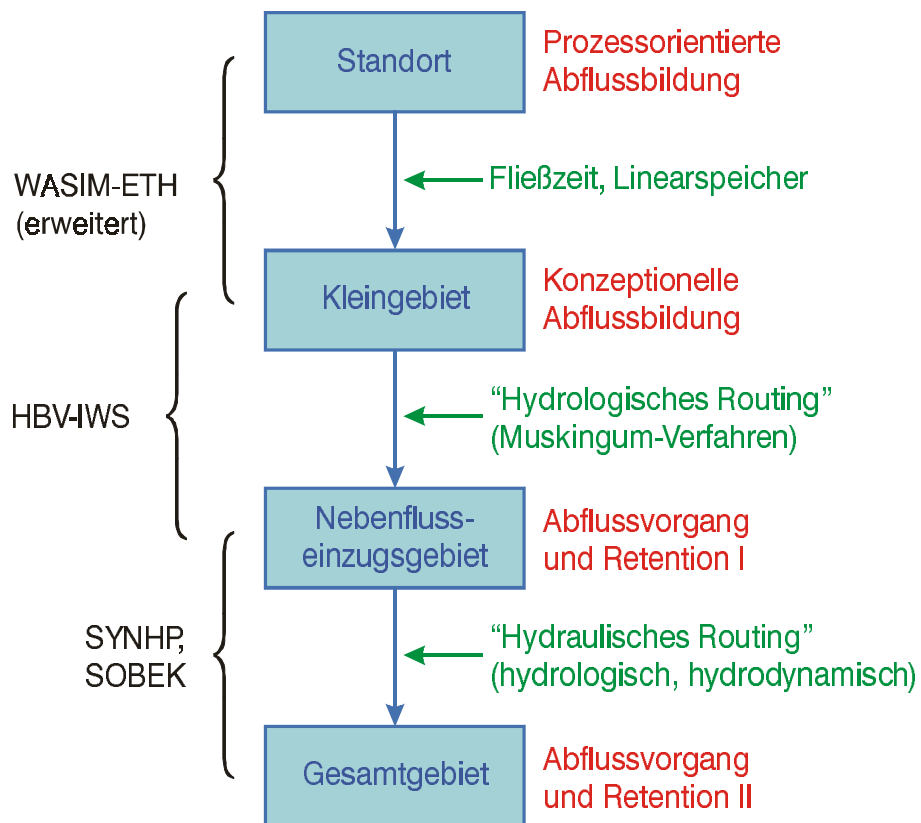


Abb. 1.3 Modelle (schwarz), zugehörige räumliche Skalen (blau), skalen-relevante hydrologische und hydraulische Prozesse der Abflussbildung (rot) sowie Ansätze zur Beschreibung der Abflusskonzentration (grün) im LAHoR-Projekt

nern Eigenmittel zur Verfügung gestellt, ohne die das Projekt nicht durchführbar gewesen wäre.

Untersuchungsraum

2.1 MESOSKALIGE GEBIETE FÜR GRUNDLAGENSTUDIEN

Die *Mesoskala* umfasst nach BECKER (1992) Gebiete bis zu einer Größe von etwa 1000 km². Dieser Größenmaßstab bietet sich aus zwei Gründen für Grundlagenuntersuchungen des Einflusses der Landnutzung auf die Abflussbildung bei Hochwasser an: Erstens überprägt in größeren Gebieten der Einfluss des *Gewässernetzes* zunehmend den der flächenhaften Gebietseigenschaften auf den Hochwasserverlauf und erschwert damit Aussagen zur Abflussbildung. Zweitens erlaubt die Mesoskala jedoch bereits *Verallgemeinerungen*, wie sie für die *Übertragung von Erkenntnissen* auf große Einzugsgebiete wie das Rheingebiet benötigt werden.

Für diese Untersuchungen wurden drei mesoskalige Einzugsgebiete im deutschen Teil des Rheingebiets ausgewählt, die sich markant in ihrer *Landnutzung* unterscheiden. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, dass eines der Gebiete intensiv landwirtschaftlich genutzt wird, eines dicht besiedelt und eines vorwiegend bewaldet ist:

(1) Das zu etwa zwei Dritteln landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der *Lein* liegt südwestlich von Heilbronn im Naturraum Kraichgau und nimmt eine Fläche von 115 km² ein. Es ist sanft gewellt und fällt von Südwesten nach Nordosten flach ab. Siedlungs- und Industriebereiche bedecken gut 7% des Einzugsgebiets. Die mesozoischen Schichten sind im Leingebiet zu weiten Teilen von einer mächtigen Lössauflage bedeckt, die zur Bildung fruchtbarer Parabraunerden geführt hat.

Auf den an mehreren Stellen angeschnittenen mergeligen bzw. sandigen Keuperschichten haben sich vorwiegend Braunerden gebildet.

(2) Das mit rund 25% Siedlungs- und Industrie-flächenanteil urban geprägte Einzugsgebiet der *Körsch* befindet sich im Südosten von Stuttgart. Es erstreckt sich auf einer 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 Oberfläche des Gebiets wird ebenso wie an der Lein von einer mächtigen Lösslehmdecke bestimmt. Neben den daraus entstandenen Parabraunerden finden sich entlang des Gewässers auf tonigem Lias α auch Pelosole.

(3) Die *Lenne* ist ein Zufluss der Ruhr und entspringt im Rothaargebirge. Das mit ungefähr 65% Flächenanteil überwiegend bewaldete Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den Oberlauf der Lenne bis zum Pegel Bamenohl, der unbeeinflusst von Talsperren ist. Dieses Gebiet ist 455 km² groß und stark reliefiert. Der Anteil der Siedlungsflächen in diesem Gebiet beträgt lediglich 5%. Im Untergrund dominieren Tonschiefer, die in weiten Teilen des Gebiets von periglazialen Hangschutt überdeckt sind. Hieraus sind zumeist geringmächtige Braunerden hervorgegangen. In der Talsohle treten Gleye und Auenböden auf.

Karte 2.1 bietet einen Überblick über die Landnutzungsverteilung in den drei Einzugsgebieten.

Landnutzung

CORINE - Daten
für die ausgewählten Einzugsgebiete

Legende

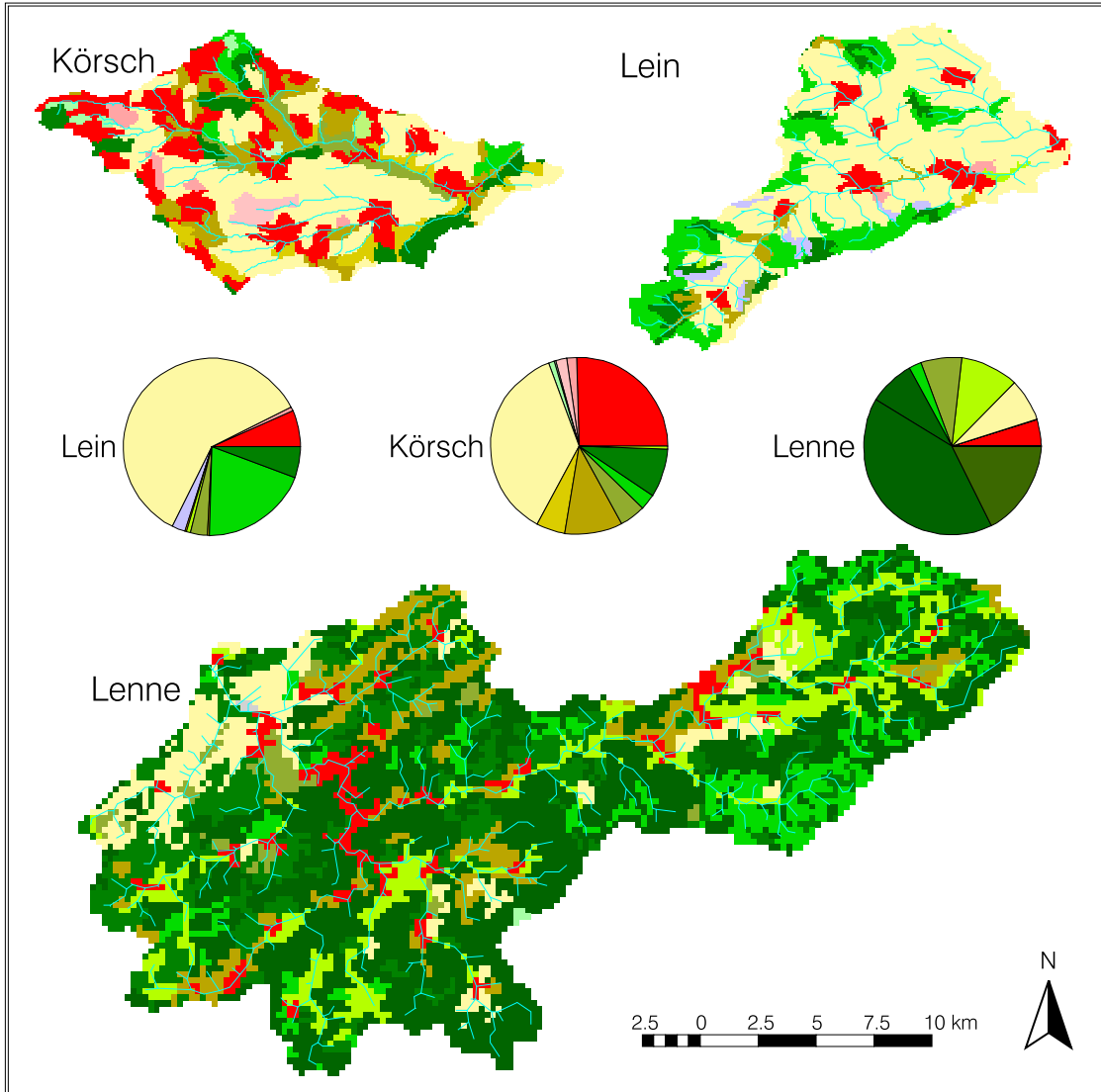
	Siedlung		Flussnetz
	Industrie		
	Flughafen		
	Abbaufäche		
	Städtische Grünfläche		
	Sportanlage		
	Acker		
	Wein		
	Obst		
	Wiese		
	Parzellenstruktur		
	Landwirtschaft + Natur		
	Laubwald		
	Nadelwald		
	Mischwald		
	Natürliches Grünland		
	Wald-Strauch-Übergang		



Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung e.V.

Uta Fritsch & Daniel Katzenmaier, 2001

Datengrundlage:
Statistisches Bundesamt (1997)



Karte 2.1 Landnutzung in den drei ausgewählten mesoskaligen Einzugsgebieten

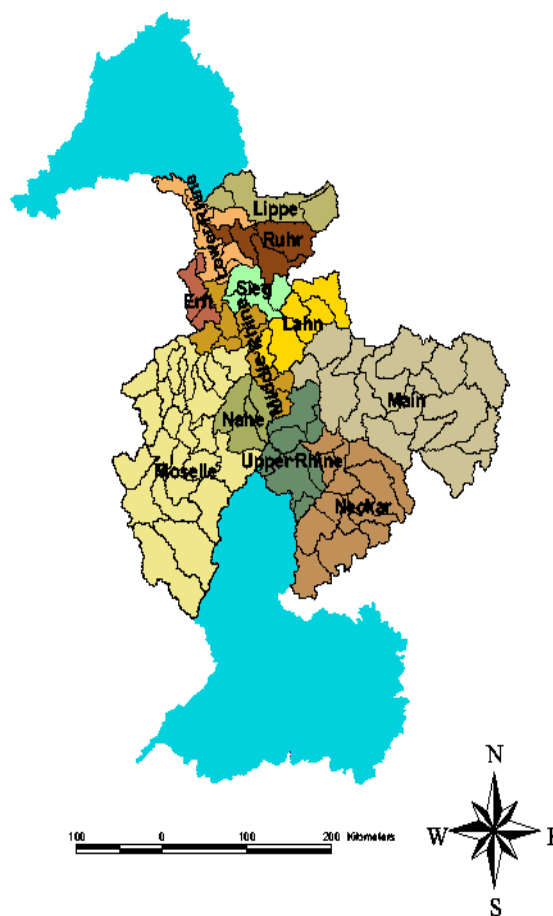
2.2 MAKROSKALIGE BETRACHTUNG DES RHEINGEBIETES UNTERHALB DES PEGELS MAXAU

Das Niederschlag-Abfluss-Modell für die Makroskala erfasst das Rheineinzugsgebiet zwischen den Pegeln Maxau und Lobith. Dieser Teil des Einzugsgebietes hat eine Fläche von 110 600 km². Der größte Teil des Einzugsgebietes liegt in Deutschland. Karte 2.3 zeigt das Untersuchungsgebiet mit den verwendeten Teileinzugsgebieten. Das Untersuchungsgebiet wurde in 101 mesoskalige Teileinzugsgebiete unterteilt mit Größen zwischen 400 km² und 2100 km². Wegen nicht ausreichenden Zugangs zu den französischen Niederschlagsdaten wurde der Bereich oberhalb des Pegels Perl (Mosel) nicht in die Studie einbezogen (sechs Teileinzugsgebiete). Für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung verblieben somit 95 Teileinzugsgebiete.

Das Einzugsgebiet des Rheins ist durch eine heterogene Topographie charakterisiert; seine Erhebungen bewegen sich zwischen 1000 m ü. NN in der Fränkischen Alb (südöstliche Begrenzung des Maingebietes) bzw. dem Nordschwarzwald (südwestliche Begrenzung des Neckargebietes) und 10 m ü. NN am deutschen Niederrhein.

In den Teileinzugsgebieten ist häufig eine bestimmte Landnutzungsart vorherrschend. So ist beispielsweise im Siegeinzugsgebiet die Landnutzung »Wald« mit 63 % Flächenanteil dominant (Siedlungsflächen: 18 %), während am Niederrhein die Siedlungsflächen bis zu 38 % ausmachen (Waldflächen: ca. 25 %).

Die Geologie des Einzugsgebietes ist ebenfalls sehr heterogen. Das Neckargebiet wird von Sedimentgesteinen des Trias und des Jura aufgebaut (Kalksteine, Sandsteine, Tonsteine). Jurakalke, Muschelkalk und Buntsandsteine sind typisch für das Maingebiet, während das Einzugsgebiet der Lahn durch devonische Schiefer und Basaltvulkane charakterisiert ist. Im Südwesten, im Bereich von Mosel und Saar herrschen wiederum



Karte 2.2 Das Rheineinzugsgebiet, unterteilt in für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung verwendete Teileinzugsgebiete

Sedimentgesteine des Trias vor. Ein Teil des Einzugsgebietes besteht aus devonischen Gesteinen. Weiter im Norden stehen im Einzugsgebiet der Sieg devonische Schiefer und Grauwacken an, während im Einzugsgebiet der Lippe pleistozäne Flusssedimente weit verbreitet sind.

2.3 DAS GEWÄSSERSYSTEM UNTERHALB DES PEGELS MAXAU

Der Rheinlauf gliedert sich in Alpen-, Hoch-, Ober-, Mittel- und Niederrhein sowie in das

Rheindelta. Der in dieser Untersuchung betrachtete Bereich beginnt am Pegel Maxau und um-

Untersuchungsraum

liegt der Endpunkt unmittelbar vor Beginn des Rheindeltas. In Maxau erreicht das oberirdische Einzugsgebiet des Rheins 50200 km². In Lobith ist es auf 160800 km² angewachsen. Die dazwischenliegende Landoberfläche von 110600 km²

wird zu 55,8% durch die drei großen Flüsse Neckar, Main und Mosel sowie zu 20,1% durch die Nebenflüsse Nahe, Lahn, Sieg, Ruhr und Lippe entwässert. Die 24,1% Restflächen entfallen auf für den Rhein weniger bedeutsame Gewässer.

Tab. 2.1 Kenndaten der bedeutenden Rhein Nebenflüsse in der Untersuchungsstrecke sowie der Rhein-Pegel Maxau und Lobith (Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch)

Gewässer	Einzugsgebiet		Pegel	Hydrologische Hauptwerte				Jahresreihe
	Station	Fläche [km ²]		MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ		
						[m ³ /s]	Datum	
Rhein	Maxau	50200	Maxau	1260	3100	4540	14.06.99	1931/2000
Neckar	Mündung	14000	Heidelberg	135	1180	2700	22.12.93	1951/2000
Main	Mündung	19600	Raunheim	196	932	1980	30.01.95	1966/1989
Nahe	Mündung	4100	Grolsheim	30,3	418	1150	21.12.93	1946/1989
Lahn	Mündung	5900	Kalkofen	46,7	384	840	10.02.46	1936/2000
Mosel	Mündung	28100	Cochem	315	2090	4170	22.12.93	1931/2000
Sieg	Mündung	2900	Menden	54,1	552	1050	07.02.84	1965/1989
Ruhr	Mündung	4500	Hattingen	69,7	528	907	01.01.94	1968/1989
Lippe	Mündung	4900	Schermbek	46,2	246	370	31.01.95	1965/1995
Rhein	Lobith	160800	Lobith	2280	6610	11900	31.01.95	1931/2000

MQ = Mittlerer Abfluss der Jahresreihe
 MHQ = Mittlerer höchster Abfluss der Jahresreihe
 HQ = Höchster Abfluss der Jahresreihe

Für Wellenablaufberechnungen mit dem hydraulischen Simulationsmodell SOBEK sowie dem hydrologischen Modell SYNHP wurden neben der Rheinstrecke Maxau–Lobith Teile der Nebenflüsse Neckar, Main, Mosel und Saar aufbereitet (siehe Karte 2.2). Das modellierte Gewässersystem umfasst freifließende Abschnitte (ca. 500 km Rheinlauf) und staugeregelte Flüsse (61 km Neckar, und 252 km Main, rund 90 km Saar, ca. 240 km Mosel). Die Stauregelungen an Neckar, Main und Mosel beeinflussen lediglich noch kleinere Hochwasser. Bei sehr hohen Abflüssen werden alle Wehre gezogen bzw. gelegt, so dass jedwede Staueinflüsse entfallen. An der Saar reichen die Stauregelungen über das gesamte Abflussspektrum.

Hinsichtlich der allgemeinen Überflutungsverhältnisse sind die modellierten Gewässer ebenfalls in zwei Kategorien zu unterteilen. Die

Täler der Nebenflüsse des Rheins und die Mittelrheinstrecke bieten nur schmale Ausuferungstreifen. Sie erreichen nur gelegentlich größere Breiten, die sich aber auch dann selten über mehr als 100 m ausdehnen. Hochwasserdeiche sind die Ausnahme und allenfalls auf kurzen Strecken realisiert. An Ober- und Niederrhein bot die Natur dem Fluss früher durchströmbare Auen, deren Breite am Oberrhein durchschnittlich 4 km betrug und am Niederrhein ebenfalls Kilometer-Beträge erreichte. In diesen Abschnitten existieren heute Deichsysteme (streckenweise seit Jahrhunderten), die teilweise überströmbar (Sommerdeiche) sind und ansonsten gegen Hochwasser mit Jährlichkeiten von mehr als 100 bis zu mehr als 500 Jahren Schutz bieten.

Zur Verbesserung des Hochwasserschutzes durch Rückhaltungen sind Deichrückverlegungen, flutbare Polder mit festen Einströmhöhen



Karte 2.2 Untersuchungsgebiet der Wellenablaufmodellierung

oder steuerbarer Flutung sowie Stauwehre im Rhein eingerichtet bzw. in Planung.

Natürliche Gewässer haben Verbindung zum Untergrund und damit zum Grundwasser im Uferbereich. Einschlägige Untersuchungen haben gezeigt, dass der Abfluss in die Grundwasser-

speicher und der Rückfluss vom Grundwasser in den Fluss streckenweise so groß sind, dass bei instationären Verhältnissen die Abflussbilanz und damit der Hochwasserablauf merkbar beeinflusst wird. Dies gilt vor allem für den Rhein im Neuwieder Becken und für den Niederrhein.

Datengrundlage

3.1 UNTERE MESOSKALA

3.1.1 Räumliche Daten

Zur Charakterisierung der *Topographie* sowie daraus abgeleiteter Größen wie Hangneigung, Exposition, Einzugsgebietsgröße oder die Neigung zur Bildung von Sättigungsflächen wurden Digitale Höhenmodelle der Landesvermessungsämter von Baden-Württemberg bzw. Nordrhein-Westfalen verwendet, welche in Form von Rasterdaten mit einer Gitterweite von 50×50 m bereitgestellt werden.

Für die *Landnutzung* stehen bundesweit 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. Diese aus LANDSAT-TM-Satellitenaufnahmen, Luftbildern und topographischen Karten visuell interpretierten Daten aus dem Jahre 1992 enthalten keine linienhaften Strukturen. Da sie eine einheitliche Datengrundlage bilden, wurden sie dennoch für alle drei Einzugsgebiete verwendet.

Als Datengrundlage für die *Böden* im Einzugsgebiet diente für Lein und Körsch die Digitale Bodenübersichtskarte 1:200000 des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Im Bereich des Lenne-Einzugsgebietes wurde auf die Digitale Bodenkarte des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50000 zurückgegriffen. Beide Kartenwerke enthalten Informationen zu vorherrschenden Bodentypen, Bodenarten und verschiedenen hydrologischen Parametern wie

hydraulischer Leitfähigkeit, nutzbarer Feldkapazität, Grobporenvolumen oder Verschlammungsneigung.

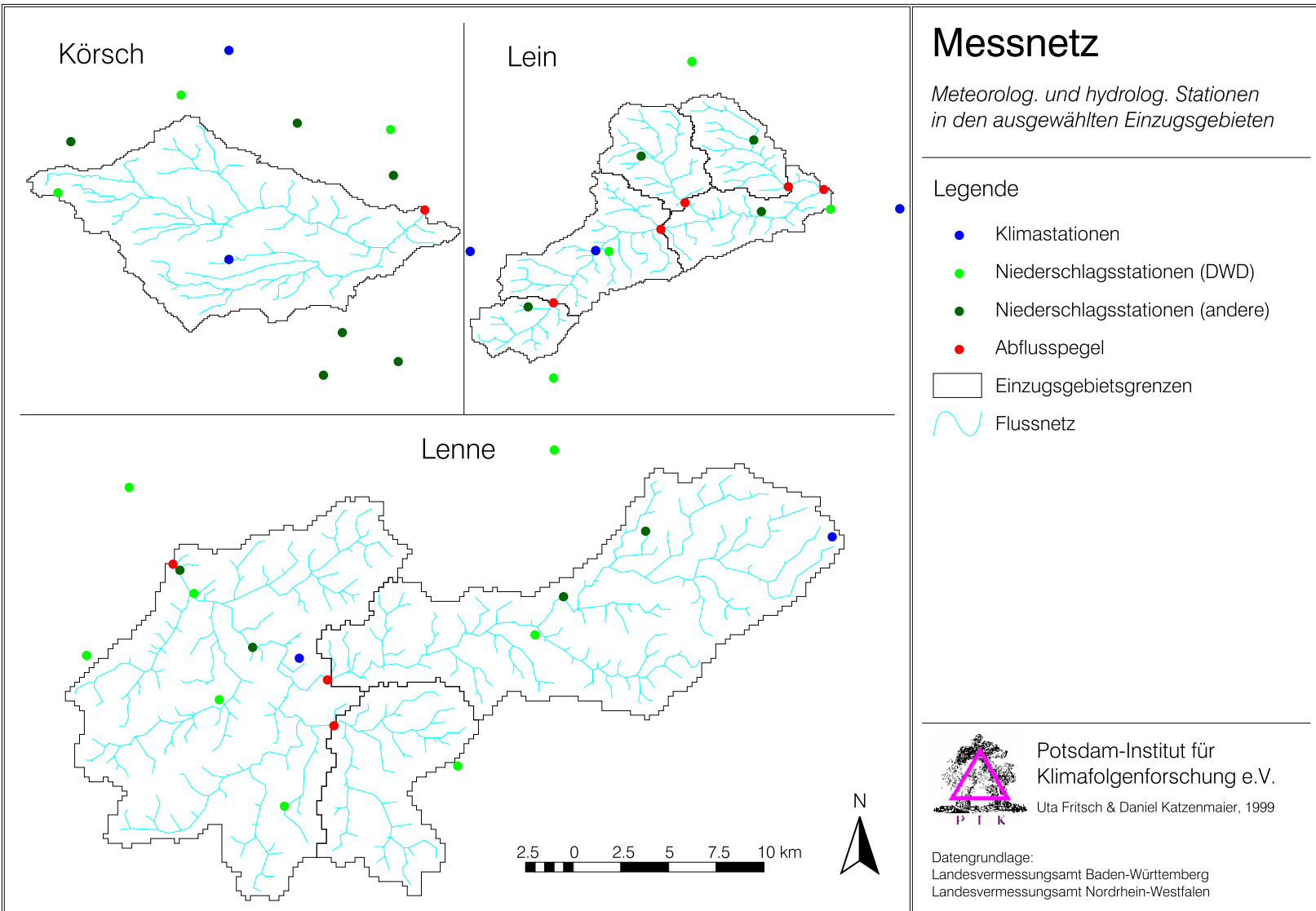
Szenariobildung und Modellierung erfolgten für Lein- und Körschgebiet mit einer Rasterweite aller Informationsschichten von 100×100 m, für das etwas größere Lennegebiet wurde eine Rasterweite von 250×250 m gewählt.

3.1.2 Meteorologische und hydrologische Daten

Um die stark dynamischen und nicht-linearen Fließprozesse, die in der Mesoskala die *Abflussbildung infolge von Starkregen* bestimmen, modellhaft beschreiben zu können, sind zeitlich und räumlich hochaufgelöste Niederschlagsdaten vonnöten. Solche Daten stehen für das Leingebiet an fünf Standorten, im Körschgebiet an vier und im Lennegebiet an einer Station zur Verfügung.

Zusätzlich wurden die täglichen Niederschlagsdaten der Stationen des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Diese Daten wurden für die hydrologische Modellierung anhand der zeitlich hochaufgelösten Stationen zu Stundenwerten disaggregiert.

Eine Übersicht über die räumliche Verteilung von Klima- und Niederschlagsstationen im Bereich der drei Gebiete sowie über die Lage der berücksichtigten Abflusspegel enthält *Karte 3.1*. Wie die Karte illustriert, ist die räumliche Abdeckung der Gebiete mit Niederschlagsstationen im Fall von Lein und Lenne gut, deutlich schlechter jedoch im Körschgebiet.



Karte 3.1 Messnetz in den drei ausgewählten mesoskaligen Einzugsgebieten

3.2 OBERE MESOSKALA UND MAKROSKALA

3.2.1 Geographische Daten

Für die Parametrisierung des N-A-Modells in der oberen Mesoskala und Makroskala werden Informationen über Landoberflächeneigenschaften des Untersuchungsgebietes benötigt. Außerdem ist der Raumbezug der meteorologischen Stationen erforderlich, um die relevanten Eingangsdaten interpolieren zu können. Die meisten geographischen Daten konnten von der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) bezogen werden. Als ARC/INFO Dateien für das gesamte Rheineinzugsgebiet wurden bereitgestellt:

- (1) Teileinzugsgebiete
- (2) Digitales Höhenmodell (Auflösung 1×1 km)
- (3) Landnutzungen (Auflösung 1×1 km, 8 verschiedene Landnutzungen)
- (4) Bodenkarte (Auflösung 1×1 km)
- (5) Gewässernetz

Für die Abgrenzung der Teileinzugsgebiete wurde eine verfeinerte Aufteilung durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde erstellt (siehe Karte 2.2).

3.2.2 Hydrometeorologische Daten

Niederschlagsdaten sind die Basis für Niederschlag-Abfluss-Modelle und müssen in möglichst

hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung vorliegen. Vom Deutschen Wetterdienst konnten tägliche Niederschlagsdaten von insgesamt 2396 Stationen für die Zeitreihe von 1960 bis 1998 bezogen werden. An 509 Stationen wurden zusätzlich die Minima- und Maxima-Temperaturen aufgezeichnet. Das Niederschlag-Abfluss-Modell, das den Abfluss in der Zeitspanne von 1980 bis 1998 kontinuierlich simulieren soll, benötigt tägliche Durchschnittstemperaturen, die mit Hilfe der Daten der Klimastationen berechnet wurden.

Sowohl die Niederschlags- als auch die Temperaturdaten lagen nicht für alle Stationen in lückenloser Form vor. Bei mehr als einem Drittel Fehlwerten wurde die komplette Stationszeitreihe verworfen. Dadurch verringerte sich die Anzahl der Niederschlagstationen auf 1514 und der Klimastationen auf 313. Weitere Datenlücken der verbleibenden Messstationen wurden durch multiple lineare Regression aufgefüllt, indem bis zu 20 Nachbarstationen ohne Fehlwerte in eine Analyse mit einbezogen wurden.

Für die Modell-Kalibrierung wurden an den Gebietsauslässen gemessene mit berechneten Abflussganglinien verglichen. Hierzu wurden für die meisten Teileinzugsgebiete gemessene Tagesabflüsse für die gesamte Simulationsperiode (1980 bis 1998) aufbereitet. An vielen Pegeln lagen für ausgewählte Hochwasserereignisse zusätzlich Stundenwerte vor.

3.3 GEWÄSSERSYSTEM

Die Wellenablaufberechnungen wurden für den Rhein von Maxau bis Lobith (500 km) sowie für Mosel (240 km), Saar (90 km), Main (252 km) und Neckar (61 km) durchgeführt. Die verwendeten Daten bilden zwei Gruppen:

- (1) die hydraulisch-geometrischen Daten und
- (2) die Abfluss- und Wasserstandsdaten.

Die unter (1) genannten Daten beschreiben die Gerinne einschließlich ihrer Vorländer und Re-

tentionsbereiche und bilden in Verbindung mit Steuerdaten für Bauwerke die Grundlage für die Erstellung der Modelle.

Die Informationen nach (2) sind als Messgrößen (Wasserspiegelfixierungen, Abflusskurven, historische Wasserstands- und Abfluss-Ganglinien) erforderlich für die Modellkalibrierung. Bei den Szenarienberechnungen zur Ermittlung der Auswirkungen denkbarer bzw. geplanter und aus Klimaänderungen sich ergebender Veränderungen im Einzugsgebiet des Rheins und an seinen

Gewässern sind diese Ganglinien ersetzt durch Ergebnisse aus N-A-Berechnungen. Nur an den oberen Startpunkten der Modelle werden auch hier gemessene Ganglinien verwendet.

Als wichtigste Datenquelle zur Beschreibung der Geometrie der Gewässer dienten die gemessenen Querprofile der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland. Diese liegen in der Regel im Abstand von 100 m vor und sind zum größten Teil bis über die höchsten bekannten Hochwasserstände bzw. bis auf eventuell vorhandene Dammkronen geführt. Fehlende Bereiche wurden durch digitale Höhenmodelle der Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen ergänzt. Andere Informationen, die die räumliche Struktur der Gewässer charakterisieren, wurden auf der Grundlage topographischer Karten, thematischer Kartenwerke und Atlanten sowie von Bauwerksunterlagen erhoben. Ebenso wurden die Ergebnisse 2-dimensionaler Strömungsberechnungen (LUDWIG, 1996) herangezogen.

Zur Beschreibung der Stauwehre entlang von Mosel, Main und Neckar wurden die Bauwerksdaten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland herangezogen.

Die im Modell berücksichtigten Retentionsmaßnahmen basieren auf den neuesten Planungsunterlagen der Länder Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Bei diesen Planungsunterlagen handelt es sich je nach Planungs- und Ausführungsstand der Maßnahmen zum Teil um detaillierte (Bau-)Pläne und zum Teil um Vorstudien und Karten mit relativ allgemeinen Angaben.

Die stationären Kalibrierungen werden über gemessene Wasserspiegel vorgenommen. Diese Wasserspiegel entstammen Fixierungen verschie-

dener charakteristischer Abflusszustände (Hoch-, Mittel-, Niedrigwasser) und werden für Bundeswasserstraßen turnusmäßig neu erhoben.

Für die instationären Kalibrierungen müssen gemessene Wasserstands- und Abflussganglinien vorliegen, die in dem zu kalibrierenden Gerinnezustand abgelaufen sind. Diese werden als Abflussganglinien als obere und seitliche Randbedingungen in die Modellabschnitte eingeführt oder dienen dem Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen bzw. Abflüssen.

Zur Quantifizierung des Einflusses von Landnutzungsänderungen und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheineinzugsgebiet waren schließlich Abflussganglinien für verschiedene Szenarien der Landnutzung, der gesteuerten Rückhaltung, der Klimabedingungen usw. bereitzustellen. Sie wurden als obere und seitliche Randbedingungen in die Wellenablaufmodelle eingegeben und sind das Ergebnis der makroskaligen Niederschlags-Abflussmodellierung. Dabei wurden Abflusssituationen zugrundegelegt, die sich an historischen Hochwassern orientieren. Diese Modellhochwasser berücksichtigen die bekannten Entstehungsszenarien extremer Rheinhochwasser stromab von Maxau in Anlehnung an die Ereignisse 1983, 1988, 1993 und 1995.

Als obere Randbedingungen für den Rhein und die Mosel wurden gemessene Ganglinien der genannten Hochwasser an den Pegeln Maxau/Rhein und Perl/Mosel bereitgestellt, da für die oberhalb dieser Messstationen gelegenen Einzugsgebiete mit Anteilen in der Schweiz und Frankreich aus N-A-Modellierungen im Rahmen des LAHoR-Projektes keine Abflussganglinien erzeugt werden konnten.

Untersuchungsverfahren

4.1 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG IN DER UNTEREN MESOSKALA

4.1.1 Modellkonzept

Für die detaillierte hydrologische Modellierung in der unteren Mesoskala wurde das deterministische flächendifferenzierte Modell WASIM-ETH ausgewählt, welches eine ausgewogene Mischung aus physikalisch begründeten und konzeptionellen Ansätzen darstellt. Eine ausführliche Beschreibung des an der ETH Zürich entwickelten Modells ist in SCHULLA (1997) und SCHULLA & JASPER (1999) enthalten. Die mathematische Behandlung von *Landnutzung* und *Bodenzone* sowie deren *räumliche Diskretisierung* im Modell werden jedoch aufgrund ihrer Bedeutung für die Fragestellung in *Kap. 4.1.2* und *Kap. 4.1.3* kurz erläutert.

WASIM-ETH wurde ursprünglich dafür konzipiert, den Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten zu simulieren. Um den Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung besser als bisher berücksichtigen zu können, wurde das Bodenmodell von NIEHOFF (2001) um verschiedene Aspekte wie die explizite Berücksichtigung von Makroporenfluss, Verschlammung, Versiegelung mit Anschluss an eine Kanalisation und von dezentralen Rückhalten ergänzt. Diese Modellerweiterungen werden in *Kap. 4.1.4* vorgestellt.

4.1.2 Räumliche Diskretisierung

Alle räumlichen Daten werden für die Modellierung mit WASIM-ETH als Rasterdaten (Grids) in

einheitlicher Größe und Auflösung benötigt. Notwendig sind, wie in *Abb. 4.1* dargestellt, ein digitales Höhenmodell, digitale Landnutzungsdaten sowie digitale Daten zu den Bodenarten im Einzugsgebiet. Aus dem Höhenmodell können weitere für die Modellierung benötigte topographische Informationen abgeleitet werden. Die gerasterten Karten zur Landnutzung und zu den Bodenarten werden zu Beginn eines jeden Modelllaufs mit tabellierten Werten zur jeweiligen Landnutzungs- bzw. Bodenart verknüpft, die deren hydrologisches Verhalten charakterisieren.

4.1.3 Bodenmodell

In WASIM-ETH kann zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Modulen zur Berechnung der Abflussbildung gewählt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde die *"Topmodel-Version"* des Modells verwendet, die die Entwicklung der Bodenfeuchte durch ein System von *Speichern* nachgebildet, welche sich – ihrer jeweiligen Funktion entsprechend – durch eine charakteristische Füllungs- und Entleerungsdynamik auszeichnen. Dem Bodenmodell ist ein Infiltrationsmodell vorgeschaltet.

Der Gebietsabfluss setzt sich im erweiterten WaSiM-ETH aus den folgenden Komponenten zusammen:

- (1) Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss (*Kap. 4.1.3.1* und *Kap. 4.1.4.1*)

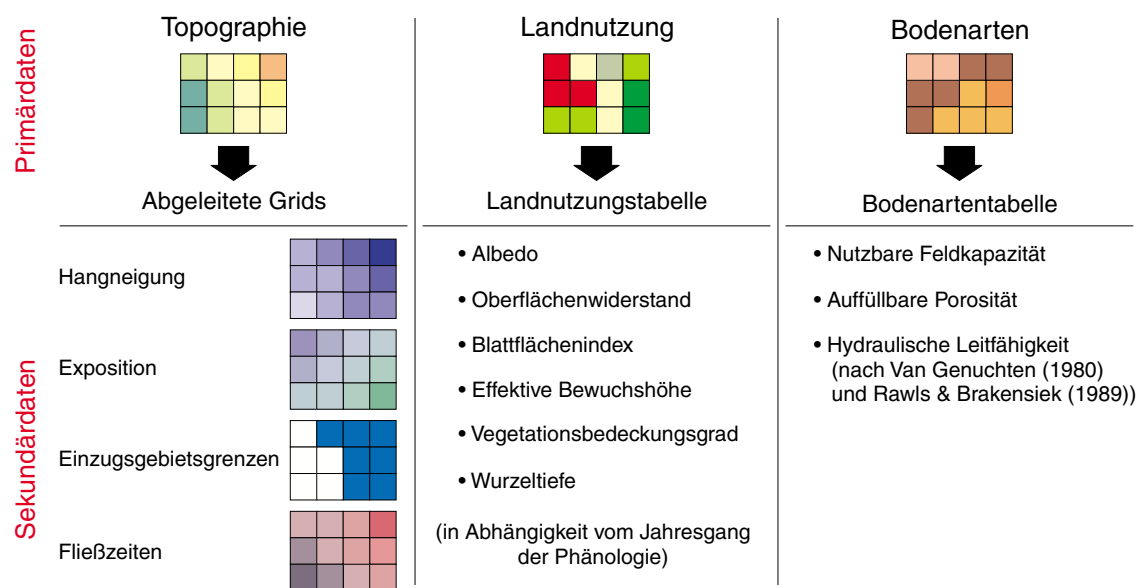


Abb. 4.1 Für die hydrologische Modellierung in WaSiM-ETH notwendige räumliche Daten

- (2) Oberflächenabfluss infolge von Sättigungsüberschuss (Kap. 4.1.3.2)
- (3) Abfluss von versiegelten und an die Kanalisation angeschlossenen Flächen (Kap. 4.1.4.2)
- (4) Rascher unterirdischer Abfluss (Kap. 4.1.3.2)
- (5) Basisabfluss (Kap. 4.1.3.2)

4.1.3.1 Infiltration und Infiltrationsüberschuss

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) eingesetzt.

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.

4.1.3.2 Unterirdische Fließvorgänge und Sättigungsüberschuss

Eine Übersicht über das Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells gibt Abb. 4.2. Infiltrierender Niederschlag wird zunächst an die pflanzenverfügbaren *Mittelporen* der Wurzelzone so-

wie 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.

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 & KIRKBY, 1979) beruht. Im Modell TOPMODEL wird das Sättigungsdefizit einer Gitterzelle durch einen sogenannten *topographischen Index* beschrieben (siehe Gl. 4.1), der sich mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells bestimmen lässt. Der topographische Index errechnet sich aus dem lokalen Einzugsge-

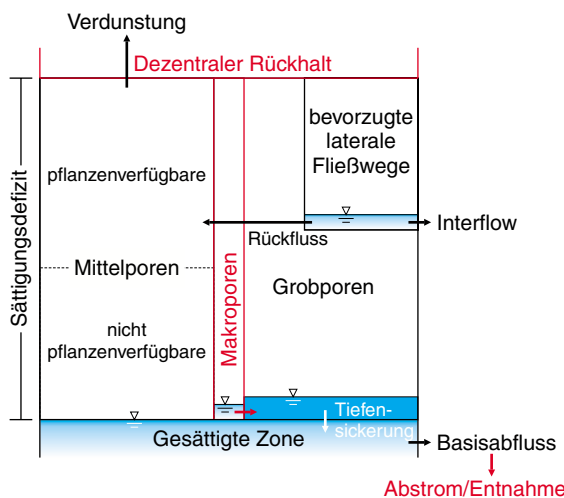
biet einer betrachteten Gitterzelle und deren Hangneigung:

$$c_t = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right) \quad [-] \quad (4.1)$$

c_t	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. Der Index nimmt im Talboden hohe, an steilen Hängen und auf Kuppen hingegen niedrige Werte an. Er basiert auf der Annahme, dass der hydraulische Gradient der gesättigten Zone näherungsweise dem Gefälle der Geländeoberfläche entspricht.

(a) großes Sättigungsdefizit



(b) geringes Sättigungsdefizit

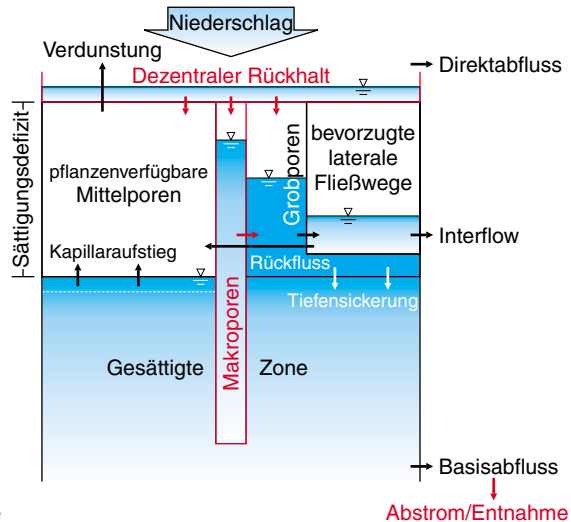


Abb. 4.2 Speicherkonzept des erweiterten Bodenmodells

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 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 TOPMODEL wird jedoch das Sättigungsdefizit zu Beginn des nächsten Zeitschritts entsprechend des jeweiligen topographischen Index wieder auf die einzelnen Gitterzellen verteilt, um eine zellen-

weise Berechnung der Abflussbildung zu ermöglichen.

4.1.4 Modellerweiterungen

4.1.4.1 Makroporenfluss

Bisher wird in WASIM-ETH der Boden als homogenes 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 neuen Berechnungsroutine werden Makroporen entsprechend dem von BRONSTERT (1999) vorgestellten Ansatz 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 erstrecken. Diese beiden Größen sind 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 auch 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 hierfür ist, dass diese zusätzliche Wassermenge innerhalb des Zeitschritts von der Bodenmatrix aufgenommen werden kann, was vom Entleerungsverhalten des Makroporenspeichers abhängt.

Verschlämmung sorgt dafür, dass der Zugang zu den Makroporen von der Bodenoberfläche her teilweise verschlossen wird. Dies hat zur Folge, dass auf der Bodenoberfläche entstehender Infiltrationsüberschuss nur noch bedingt in den Makroporenraum eindringen kann. 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 unter 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 Speicherkonstanten des Makroporenspeichers, die teilgebietsbezogen definiert wird:

$$q_{pot} = SM \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{k_{SM}}} \right) \cdot c_{\Theta} \quad [\text{mm/h}] \quad (4.2)$$

SM	Speicherinhalt 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. 4.3 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.

4.1.4.2 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

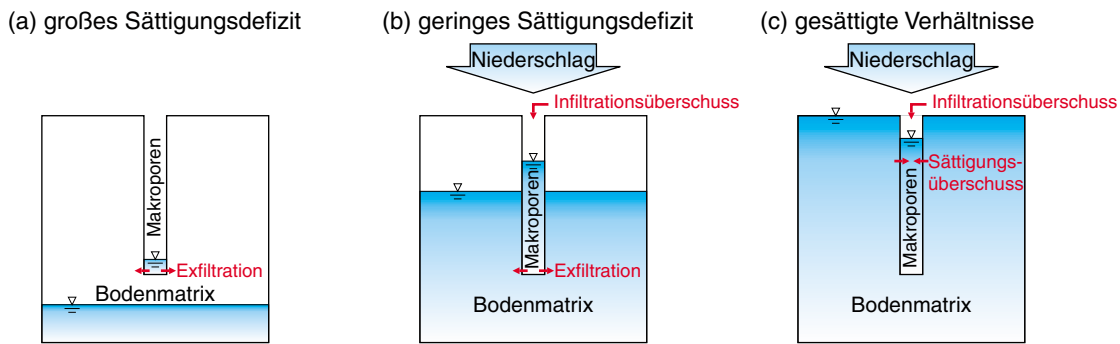


Abb. 4.3 Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen (Niehoff, 2001)

gibt es aber genauso auch Bereiche wie Grünstreifen, Gärten oder Parkanlagen, in denen gute Infiltrationsbedingungen und Bodenspeicherverhältnisse bestehen können. Eine Mittelung der Parameter aus diesen Teilbereichen überschätzt zwangsläufig den Einfluss der versiegelten Flächen auf die Abflussbildung bei Starkniederschlägen und unterschätzt zugleich die ausglei-

chende 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

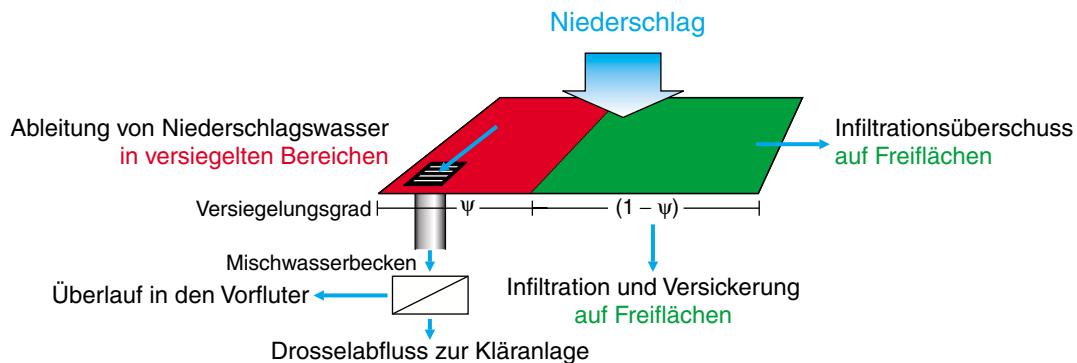


Abb. 4.4 Modellkonzept zur expliziten Berücksichtigung versiegelter und an die Kanalisation angeschlossener Bereiche innerhalb einer Gitterzelle (Niehoff, 2001)

versiegelten und einen unversiegelten Bereich aufgeteilt. Das Modellkonzept 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 erfolgt getrennt für jede Landnutzung. Auf diese

Weise können auch Siedlungsbereiche mit unterschiedlicher Bebauungsdichte voneinander unterschieden werden, insofern Angaben zu deren räumlicher Verteilung vorliegen.

Wie Abb. 4.4 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:

$$P \cdot (1 - \psi) = In_u + Ex_u \quad (4.3)$$

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 Entlastungsbauwerk nahezu ohne Verzögerung zum Gewässernetz (Vorfluter) abgeleitet. Diese Wassermenge trägt in der Folge genauso zum Direktabfluss bei wie Infiltrationsüberschuss auf Freiflächen.

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:

$$\begin{aligned} P \cdot \psi &= \Delta SK + q_{SK} && \text{für } SK < SK_{max} \\ P \cdot \psi &= Ex_s + q_{SK} && \text{für } SK = SK_{max} \end{aligned} \quad (4.4)$$

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 Becken	[mm]
SK_{max}	Speicherkapazität der Becken	[mm]
q_{SK}	Konstanter Drosselabfluss aus den Becken zur Kläranlage	[mm/h]

Richtwerte für die Speicherkapazität SK_{max} und den Drosselabfluss 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 Abwasseraufkommen in einer Größenordnung von 0,3 bis 0,6 mm/h.

4.2 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG IN DER OBEREN MESOSKALA UND DER MAKROSKALA

Um den möglichen Einfluss von verschiedenen Landnutzungsmaßnahmen auf den Abfluss zu

quantifizieren, ist es notwendig, die Eingangsparameter des Niederschlag-Abfluss-Modells mit

Landnutzungsmerkmalen zu verbinden. Für die Modellierung großer Einzugsgebiete sollte die Anzahl von Parametern gering sein. Andererseits ist für die Fragestellung ein möglichst physikalisch basiertes Modell erforderlich. Ein Modell, das beide Anforderungen in einem Kompromiss vereint, ist das HBV-Modell vom Swedish Meteorological and Hydrological Institute (BERGSTRÖM, 1995). Einige Komponenten des Modells wurden am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS) verändert und neue Komponenten hinzugefügt. Das modifizierte Modell wird im Folgenden HBV-IWS genannt.

4.2.1 Struktur des HBV-IWS Modells

Das Modell benutzt Teileinzugsgebiete als primäre hydrologische Einheiten. Die Teileinzugsgebiete können eingeteilt werden in Zonen unterschiedlicher Höhe, Bodenart und Landnutzung. Das Modell basiert auf konzeptionellen Bausteinen, die Schneeakkumulation und -schmelze, Bodenfeuchte und Oberflächenabfluss repräsentieren. Abb. 4.5 zeigt eine Schemaskizze der HBV-IWS-Modellstruktur.

4.2.1.1 Schneeakkumulation und Schneeschmelze

Im Modell HBV wird der Niederschlag als Schnee angenommen, wenn die Lufttemperatur unter einen vorab definierten Grenzwert TT fällt. Schneeschmelze setzt ein, wenn TT überschritten wird; die korrespondierende Schmelzmenge wird mit der Grad-Tag-Methode ermittelt:

$$S_{melt} = CC \cdot (T - TT) \quad (4.5)$$

S_{melt}	Schneeschmelze	[mm/Tag]
CC	Grad-Tag Faktor	[mm/(°C·Tag)]
TT	Grenzwerttemperatur	[°C]
T	Durchschnittliche Tagstemperatur	[°C]

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass bei erhöhter Regenintensität auch eine vermehrte Schneeschmelze stattfindet, wurde die obige Gleichung um einen weiteren Parameter ergänzt:

$$CC = CC_0 + k \cdot P \quad (4.6)$$

k	Kalibrierungsparameter	[-]
P	Tägliche Niederschlagshöhe	[mm]

Die Schneeschmelze bzw. Schneeakkumulation wird somit über drei Parameter kalibriert: CC_0 , TT und k . Da diese Parameter von der Landnutzung abhängig sind, wurden ihnen verschiedene Werte entsprechend der Landnutzung zugewiesen.

4.2.1.2 Bodenfeuchte

Das Bodenfeuchtemodul berechnet den Anteil an Regen oder Schneeschmelze, der bei gegebenem Bodenfeuchtedefizit zum Abfluss gelangt. Im HBV-Modell wird dieser Vorgang durch folgende empirische Gleichung beschrieben:

$$\frac{RF}{P} = \left(\frac{SM}{FC}\right)^\beta \quad (4.7)$$

RF	Abfluss
P	Regen oder Schneeschmelze
SM	Aktuelle Bodenfeuchte
FC	Maximaler Bodenfeuchtespeicher (Feldkapazität)
β	Kalibrierungsparameter

In Gleichung 4.7 wird mit dem Quotienten RF/P (somit der Abflussbeiwert) als eine nichtlineare Funktion von aktueller Bodenfeuchte und Feldkapazität dargestellt. Wenn $SM \geq FC$ wird der gesamte Niederschlag in Abfluss transferiert ($RF/P = 1$).

Die Aufteilung des Wassers in die Erhöhung der Bodenfeuchte und den Abfluss wird also von den Parametern FC und β gesteuert, die hauptsächlich vom Bodentyp abhängen.

4.2.1.3 Evapotranspiration

Zur Berechnung der Verdunstung dient im HBV Modell die mittlere monatliche potentielle Evapotranspiration als Grundlage. Falls die aktuelle Lufttemperatur von der zugehörigen durchschnittlichen Monatstemperatur abweicht, wer-

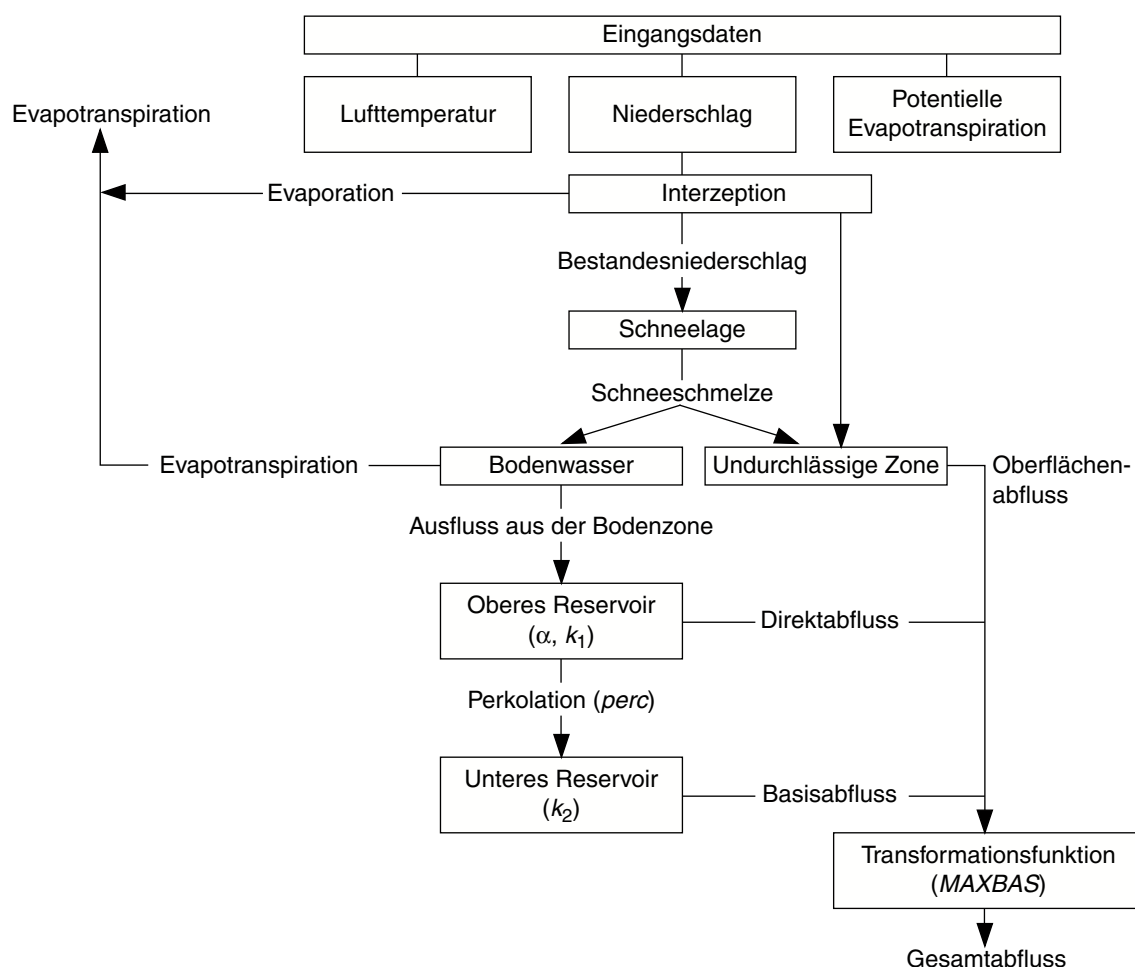


Abb. 4.5 Schematische Struktur des HBV-IWS Modells

den die Standardwerte der potentiellen Evapotranspiration nach Gl. 4.8 modifiziert.

$$PE_A = (1 + C_{ET} \cdot (T - T_M)) \cdot PE_M \quad (4.8)$$

- PE_A korrigierte potentielle Evapotranspiration
- T Tägliche mittlere Lufttemperatur
- T_M Vieljährige mittlere Monatstemperatur der Luft
- C_{ET} Modellparameter
- PE_M Vieljährige mittlere potentielle monatliche Evapotranspiration

Zusätzlich spielt die Bodenfeuchte eine wichtige Rolle zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration. Ein weiterer Modellparameter (LP) definiert denjenigen Bodenfeuchtegehalt, ab dem die potentielle Evapotranspiration gewährleistet ist.

Fällt die Bodenfeuchte unterhalb LP , ist die aktuelle Evapotranspiration kleiner als die potentielle.

4.2.1.4 Abflusskonzentration

Das Abflusskonzentrationsmodul transformiert den Abflussanteil von dem Bodenfeuchtemodul zu Abfluss am Auslass des Teileinzugsgebietes. Die Routine besteht aus einem oberen, nichtlinearen Reservoir mit den Parametern k_1 , α und einem unteren linearen Reservoir mit der Rückgangskonstante k_2 . Der Ausfluss aus dem oberen Reservoir simuliert den Direktabfluss, während der Ausfluss aus dem unteren Reservoir den Basisabfluss repräsentiert. Das untere Reservoir wird durch Perkolation vom oberen Reservoir gespeist und wird von dem Parameter $perc$ gesteuert. Der generierte Abfluss wird schließlich durch eine tri-

anguläre Wichtungsfunktion, die die Zeitverteilung bestimmt, geglättet (Parameter *MAXBAS*).

4.2.1.5 Wellenablauf

Wenn die Teileinzugsgebiete miteinander verbunden werden, muss üblicherweise der Ausfluss von oberhalb liegenden Einzugsgebieten zu unterhalb liegenden Knoten als Wellenablauf gerechnet werden. Im HBV-Modell wird dieses mit Hilfe des Muskingum-Verfahrens durchgeführt (Parameter *xmu* und *kmu*).

4.2.1.6 Zusätzliche Modellkomponenten

Um den Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die hydrologische Antwort eines Einzugsgebietes zu quantifizieren, muss eine Verbindung zwischen Landnutzung und Modellparametern hergestellt werden. Da das HBV-Modell ein konzeptionelles Modell ist, sind seine Parameter nicht physikalisch basiert und es ist schwierig, diese Modellparameter mit den physikalischen Charakteristiken der Landnutzung zu verknüpfen. Daher wurde das Modell dahingehend modifiziert, dass der Einfluss verschiedener Landnutzung auf die Ablusskonzentration des Einzugsgebietes abgebildet werden kann.

Die zusätzlichen Modellkomponenten sind:

- (1) Spezifische Interzeptionsspeicher für verschiedene Landnutzungsklassen. Der Niederschlag wird von den Pflanzenblättern interzeptiert bis die Wasserhaltekapazität erreicht ist. Der Speicher wird durch Evaporation entleert. Daher wird das Wasser im Interzeptions- und Bodenspeicher für die Berechnung der Evapotranspiration zusammen berücksichtigt.
- (2) Eine Komponente für versiegelte Flächen wurde eingeführt. Für versiegelte Flächen in Siedlungsgebieten produziert der Regen direkten Oberflächenabfluss, ohne einen der oben genannten Speicher zu füllen.

Das Modell hat daher insgesamt 11 freie Parameter, die durch die Modellkalibration identifiziert werden müssen. *Abb. 4.5* gibt die Struktur des HBV-Modells schematisch wieder.

4.2.2 Flächendifferenzierte Modellierung der Teileinzugsgebiete

Um die Teileinzugsgebiete flächendifferenziert modellieren zu können, ist eine passende Zonierung der Gebiete erforderlich. Die Teileinzugsgebiete des Untersuchungsgebietes werden in verschiedene Höhenzonen im Abstand von 100 m unterteilt. Innerhalb dieser Höhenzonen wird eine weitere Klassifizierung, basierend auf dem Bodentyp, durchgeführt (sechs vorherrschende Bodentypen).

Da das Hauptziel der Arbeit die Modellierung des Einflusses von Landnutzungsänderungen ist, musste die Verteilung der verschiedenen Landnutzungsklassen in die Höhenzonen eingearbeitet werden. Vier Hauptklassen der Landnutzung wurden eingeführt: Wald, Siedlungs- und Verkehrsflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wasserflächen. Für jede Zone, die durch Höhenklasse und Bodentyp definiert ist, wurde der Anteil dieser vier Landnutzungsklassen ermittelt.

4.2.3 Meteorologische Modelleingangsdaten und deren räumliche Interpretation

Die grundlegenden meteorologischen Eingangsdaten für das HBV-Modell sind Niederschlag und Lufttemperatur. Normalerweise sind tägliche Zeitreihen von Niederschlag und mittlerer Lufttemperatur notwendig, es können jedoch auch Daten mit einer höheren Auflösung eingegeben werden. In dieser Studie wurden Eingangsdaten in Tageszeitschritten genutzt; der stündliche Abfluss konnte durch Disaggregieren der mittleren Tagesniederschläge mit Hilfe einer Dreiecksverteilung innerhalb des Tages simuliert werden. Die tägliche mittlere Lufttemperatur wurde während des Tages konstant gehalten.

Die Daten der meteorologischen Stationen sind Punktdaten, daher müssen diese interpoliert werden, um für die verschiedenen Zonen der Teileinzugsgebiete flächenhafte Werte berechnen zu können. Die Interpolation wurde auf einem regelmäßigen Gitter durchgeführt. Es wurden mehr als 4000 Gitterpunkte mit einem Abstand von 5 km in beide Raumrichtungen generiert. Für jeden

Gitterpunkt wurde der tägliche Wert von Niederschlag und Lufttemperatur als gewichtete Summe von Nachbarstationen geschätzt.

Die Interpolationsmethode berücksichtigt zudem den orographischen Einfluss durch Hinzunahme der Topographie als zusätzliche Variable. Die Gewichte wurden mit dem External Drift Kriging Verfahren bestimmt, wobei der Erwartungswert E des Parameters am Ort u durch eine Linearfunktion der Driftvariablen $Y(u)$ geschätzt wird.

$$E \cdot [Z(u)/Y(u)] = a + b \cdot Y(u) \quad (4.9)$$

Hierbei sind a und b unbekannte Konstanten. Der Schätzwert Z ist:

$$Z(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(u_i) \quad (4.10)$$

Hierbei ist i der Laufindex der Beobachtungspunkte.

Unter der Annahme, dass die Schätzung keinen Bias aufweist und die Schätzvarianz minimiert wird, erhält man folgendes Gleichungssystem:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \gamma(u_i - u_j) + \mu_1 + \mu_2 \cdot Y(u_i) = \gamma(u_i - u)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (4.11)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot Y(u_j) = Y(u)$$

$\gamma(u_i - u)$ ist das Variogramm, welches mit Hilfe der Daten der Beobachtungsstationen berechnet wird.

Für die Schätzung der täglichen Durchschnittstemperatur wurde die topographische Höhe als Driftvariable gewählt. Für die Berechnung der Tagesniederschläge wurde die Quadratwurzel der Höhe als Driftvariable verwendet,

weil der Anstieg des Niederschlages für größere Höhen langsamer wird.

Ein weiterer Input für das Modell sind die mittleren Monatswerte der potentiellen Evapotranspiration und Interzeption für jede Landnutzungs-kategorie. Diese Daten wurden aus der Literatur entnommen. Zusätzlich zu der potentiellen Evapotranspiration wird die korrespondierende mittlere monatliche Temperatur benötigt. Diese Werte wurden aus den interpolierten Tagesreihen für jede Zone berechnet.

4.2.4 Modellkalibrierung und Regionalisierung der Parameter

Da das HBV-Modell ein konzeptionelles Modell ist, müssen die Parameter durch Modellkalibrierung unter Zuhilfenahme der beobachteten Abflüsse bestimmt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Effekt von Landnutzungsänderungen auf den Abfluss zu quantifizieren. Daher wurde die Parameterschätzung methodisch einheitlich für alle Teileinzugsgebiete durchgeführt. Der Modellparameter p wird durch eine Transferfunktion der Einzugsgebietseigenschaften ausgedrückt:

$$p_k = G_{pk}(l_i, s_j; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J) \quad (4.12)$$

l_i Landnutzungs-klassen
 s_j Bodentypen-klassen

Die Transferfunktion G kann auf zwei verschiedene Weisen bestimmt werden. Der erste Ansatz besteht darin, das Modell für jedes Teileinzugsgebiet unabhängig zu kalibrieren und die kalibrierten Modellparameter mit den Einzugsgebietseigenschaften zu verknüpfen (z. B. über eine lineare Regression mit dem Bodentyp und der Landnutzung). Da verschiedene Parametersets zu ähnlicher Modellgüte führen können, wäre es schwer, auf diese Weise eine eindeutige Beziehung zwischen den Parametern und den Gebiets-eigenschaften zu erhalten.

Um dieses Problem zu vermeiden, wurde ein anderer Ansatz gewählt. Zuerst wurden die Parameter den Gebietseigenschaften zugeordnet. Anschließend wurden die aktuellen Werte unter Be-

nutzung der Transferfunktion ermittelt. Die implementierte Transferfunktion in dieser Arbeit hat eine lineare Form:

$$G_{pk}(\dots) = \sum \alpha_{ik} I_i + \sum \beta_{kj} S_j \quad (4.13)$$

Durch das Einführen dieser Beziehung wurde das Modell für die Parameter der Transferfunktion, α und β , anstelle des Modellparameters p kalibriert. Die Parameter der Transferfunktion blieben für das gesamte Modellgebiet unverändert, während die Transferfunktion verschiedene Modellparameter für die unterschiedlichen Teileinzugsgebiete produziert.

Damit die Parameter der Transferfunktion auf sinnvolle Art und Weise bestimmt werden können, wurde eine Anzahl von Teileinzugsgebieten mit unterschiedlichen Gebietseigenschaften ausgewählt und das Modell simultan für alle ausgewählten Gebiete angewendet. Eine numerische Optimierungstechnik wurde zusätzlich implementiert, um eine effektive Parameterschätzung zu erhalten. Als Zielfunktion für die Optimierung wurde die Minimierung der quadratischen Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Abflüssen definiert:

$$O_m = \sum w(t) \cdot (Q_c(t) - Q_o(t))^2 \quad (4.14)$$

- $Q_c(t)$ Berechneter Abfluss
- $Q_o(t)$ Beobachteter Abfluss
- $w(t)$ Gewicht, um Spitzenabflüsse zu betonen

Durch die hohe Anzahl an Zielfunktionen (eine Zielfunktion pro Teileinzugsgebiet) ist es erforderlich, diese zu einer neuen, normalisierten Zielfunktion zusammenzufassen. Dadurch werden die unterschiedlichen Größenordnungen des Abflusses aus den Teileinzugsgebieten gleichwertig behandelt. Ein gewichteter Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizient wurde zu diesem Zweck eingeführt:

$$R_m^2 = 1 - \frac{\sum w(t) \cdot (Q_c(t) - Q_o(t))^2}{\sum w(t) \cdot (Q_c(t) - \bar{Q}_o)^2} \quad (4.15)$$

\bar{Q}_o Mittlerer beobachteter Abfluss

Die aggregierte Zielfunktion für die Modellkalibrierung kann folgendermaßen formuliert werden:

$$O = \sum R_m^2 \rightarrow \max \quad (4.16)$$

Die aggregierte Zielfunktion hat den Nachteil, dass lediglich die durchschnittliche Güte des Modells bestimmt wird, was zu unausgeglichener Kalibrierung führen kann. Eine schlechte Übereinstimmung des Modells in einigen Teileinzugsgebieten könnte durch eine gute Übereinstimmung in anderen Teileinzugsgebieten kompensiert werden. Daher wurde die aggregierte Zielfunktion modifiziert, indem den Teileinzugsgebieten mit den schlechtesten Anpassungen ein großes Gewicht zugeordnet wurde. Hierdurch wird diesen Simulationen erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt:

$$O = \sum R_m^2 + M \min R_m^2 \rightarrow \max \quad (4.17)$$

Zusätzlich zu den beobachteten Abflüssen wurden die simulierten Ganglinien des WaSiM-ETH Modells für die drei mesoskaligen Einzugsgebiete als weitere Bedingungen für die Modellkalibrierung verwendet.

Obwohl nur die oben genannte Zielfunktion zur Optimierung benutzt wurde, wurde zusätzlich der Scheitelfehler (*peak-error*) berechnet. Dadurch konnte das Modell hinsichtlich seiner Fähigkeit, den Scheitelabfluss zu berechnen, beurteilt werden.

$$peak-error = \frac{\bar{Q}_{c(max)} - \bar{Q}_{o(max)}}{\bar{Q}_{o(max)}} \quad (4.18)$$

- $\bar{Q}_{c(max)}$ Mittlerer berechneter Jahreshöchstabfluss
- $\bar{Q}_{o(max)}$ Mittlerer gemessener Jahreshöchstabfluss

Untersuchungsverfahren

Wegen der vielen Parameter im HBV-IWS-Modell sollten nur die sensitiven Parameter für die Optimierungsprozedur ausgewählt werden. Eine vorhergehende manuelle Kalibrierung wurde für ausgewählte Einzugsgebiete in verschiedenen Teilen des Untersuchungsgebietes durchgeführt, so dass die nicht sensitiven Parameter geschätzt

werden konnten. Die Anfangswerte für die Parameter der Transferfunktion wurden ebenfalls aus den Ergebnissen dieser Modellläufe bestimmt. Die Sensitivität der Parameter und die zugehörige Regionalisierungsgrundlage ist in *Tab. 4.1* wiedergegeben.

Tab. 4.1 Sensitivität der Modellparameter des HBV-IWS Modells und zugehörige Regionalisierungsgrundlage

Parameter	Sensitivität	Regionalisierungsgrundlage
Schneeschnmelze		
<i>CC</i>	+	Landnutzung
<i>TT</i>	+	Landnutzung
Bodenfeuchte und Evapotranspiration		
<i>FC</i>	+++	Bodentyp
<i>LP</i>	–	Bodentyp
β	+	Bodentyp
<i>Interzeption</i>	+	Landnutzung
<i>C_{ET}</i>	–	Landnutzung
Abflusskonzentration		
α	+++	Landnutzung
<i>k₁, k₂, PERC</i>	+++	Bodentyp
<i>MAXBAS</i>	–	Topographie, Gebietsgröße

4.2.5 Modellvalidierung

Die Validierung des kalibrierten Modells wurde für den nicht für die Kalibrierung verwendeten

Zeitraum durchgeführt. Die Validierung des Regionalisierungsansatzes wurde für die nicht für die Kalibrierung verwendeten Teileinzugsgebiete durchgeführt.

4.3 HYDRAULISCHE MODELLIERUNG DES WELLENABLAUFS

4.3.1 Wellenablaufmodelle SYNHP und SOBEK

Für die Berechnung des Wellenablaufs im Rhein und in seinen Nebenflüssen Neckar, Main, Saar und Mosel wurde das hydrologische Modell SYNHP und das hydraulische Modell SOBEK eingesetzt (siehe *Karte 2.2*).

4.3.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP

Basierend auf einem Modell der Bundesanstalt für Gewässerkunde wurde das synoptische Hochwasserablaufmodell SYNHP zu Beginn der 80er Jahre in der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg zur Simulation der Hochwasserverhältnisse am Oberrhein entwickelt (HOMAGK, 1985). Es berechnet zeitschrittweise (synoptisch) den Abfluss beliebiger Gewässer-

strecken. Das Modell SYNHP gehört zu den hydrologischen Flood-Routing-Modellen, deren Berechnungsverfahren auf der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung basieren, wobei die Bewegungsgleichung vereinfacht durch den Ansatz linearer Einzelspeicher wiedergegeben wird.

Bei der Kalibrierung des Modells werden die Anzahl der linearen Einzelspeicher sowie die Volumen-Abfluss-Beziehung für jeden Speicher der Flussstrecke ermittelt. Bei gegebenen Zuflüssen kann der Ausfluss am unteren Ende eines jeden Flussabschnittes berechnet werden. Im obersten Flussabschnitt wird eine Zuflussganglinie (z.B. Messdaten) vorgegeben. Die Zuflüsse in den unteren Flussabschnitten ergeben sich jeweils aus dem berechneten Abfluss am unteren Ende des nächst höhergelegenen Flussabschnittes. Zuflüsse aus Nebengewässern werden als Ganglinien (z.B. Messdaten) dem Modell zur Verfügung gestellt. Neben der Translation von Durchflussswellen und deren Verformung durch unterschiedliche Gerinnegeometrien ermöglicht das Modell die Berechnung von gesteuerten und nichtgesteuerten Retentionsvorgängen im Fluss und in Poldern.

Das Modell SYNHP für die Rheinstrecke Basel bis Worms ist offizielles Werkzeug des »Ständigen Ausschusses« Oberrhein zur Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein und gilt für den Zustand des Oberrheins nach Ausbau mit Staustufen. Mit ihm können unterschiedliche Retentionsszenarien berechnet werden. Darüber hinaus wurden im Laufe der letzten 15 Jahre auch SYNHP-Modelle für den Oberrhein vor Ausbau mit Staustufen sowie für die Mosel, die Saar und den Main aufgestellt und kalibriert (BUSCH & ENGEL, 1990; BUSCH, 1995; HOFFMANN, 1990). Im Rahmen des LA-HoR-Projektes wurden das Mosel- und das Saarmodell eingesetzt.

4.3.1.2 Das hydrodynamische Modell SOBEK

Das eindimensionale, hydrodynamische Abflussmodell SOBEK ist eine Entwicklung von Delft Hydraulics in den Niederlanden. Die Abflussberechnungen von SOBEK beruhen auf dem De Saint Venant'schen Gleichungssystem, beste-

hend aus der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung. Letztere berücksichtigt die lokale und konvektive Beschleunigung, das Wasserspiegelgefälle, Energieverluste durch die Rauheit der Gewässersohle, durch Windeffekte (optional) und durch weitere lokal beschränkte Einflussfaktoren (optional) sowie die Dichte (DELFT HYDRAULICS & THE MINISTRY OF TRANSPORT, PUBLIC WORKS AND WATER MANAGEMENT, 1997).

Das Gleichungssystem wird nach dem Preissmann-box-Verfahren gelöst. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt nach impliziten Verfahren. Neben der Berechnung von Abflüssen, Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten ist es auch möglich, Salzintrusionvorgänge, Sedimenttransport sowie die Gewässergüte zu berechnen.

Die Geometrie eines Gewässers wird in SOBEK durch eine Serie aufeinander folgender Querprofile definiert, wobei das Gerinne eingeteilt wird in Hauptgerinne, Vorland und Überflutungsraum, so dass Bühnenfelder und Vorländer einschließlich Sommerdeiche und Polder berücksichtigt werden können.

Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet oberhalb der Modellstrecke und von Nebengewässern werden als Abflussganglinien am oberen und seitlichen Modellrand zugegeben.

Mit einem umfangreichen Angebot an Modulen zur Berechnung der Wirkung von Stauwehren, Schleusen, Pumpen etc. können gesteuerte und ungesteuerte Stauhaltungen, wie sie sowohl in Deutschland als auch in den Niederlanden vorkommen, simuliert werden.

Mit der neuesten SOBEK-Version stehen Module zur Berechnung gesteuerter und ungesteuerter Retentionsmaßnahmen zur Verfügung. Wichtige Eingabeparameter sind Retentionsvolumen, mittlere Sohlhöhe des Retentionsraums, Größe der Ein- und Auslaufbauwerke (Schwellenhöhe und -länge, Höhe der (Schütz-) Öffnung) sowie die Lage am Fluss. Zur Steuerung der Füllung und Entleerung dieser Retentionsräume können Wasserstände und Abflüsse im Fluss und im Retentionsraum selber angegeben werden, nach denen die Bauwerke zu öffnen bzw. zu schließen sind. Für die Modellierung von Retentionsraum entlang des Flusses durch Maßnahmen, die Teile des Querprofils verändern (z. B. Deichrückverle-

gungen), müssen dem Modell geänderte Querprofile eingegeben werden.

Bei der ersten Kalibrierung des Modells SOBEEK für den Rheinabschnitt Andernach-Lobith zeigte sich, dass eine Anpassung simulierter an gemessene Ganglinien entweder nicht oder nur durch die Wahl physikalisch unrealistischer Rauheiten erfolgen konnte (BARNEVELD & MEIJER, 1997). Ursache hierfür ist der am Niederrhein sehr ausgeprägte Austausch von Fluss- und Grundwasser, wobei bei Wellenanlauf Wasser vom Fluss in das Grundwasser infiltriert und bei ablaufender Welle wieder in den Fluss zurückfließt.

Deshalb wurde SOBEEK zur Modellierung von Hochwasserwellen am Niederrhein mit einem einfachen, auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhenden Grundwassermodell extern gekoppelt, das im Preprocessing die Austauschvorgänge zwischen Grund- und Flusswasser berechnet. Ausgehend von dem Gesetz nach Darcy und unter Einhaltung der Kontinuitätsbedingungen für das im Grundwasser gespeicherte Wasservolumen werden der Austausch zwischen Flusswasser und Grundwasser sowie die Grundwasserstände für jeden Flussabschnitt berechnet. Der Geologie am Niederrhein entsprechend gehen Infiltrationskoeffizienten, effektive Porositäten des Grundwasserleiters sowie die Breite des am Austauschvorgang beteiligten Grundwasserleiters entlang des Gewässers als Modellparameter ein. Für das Neuwieder Becken wurden gemessene Grundwasseranglinien dem Modell zugegeben.

Möglicherweise auftretende Austauschvorgänge zwischen Fluss- und Grundwasser am Oberrhein wurden nicht berücksichtigt.

Das Modell SOBEEK wird (neben dem Modell SYNHP) bei der BfG und beim RIZA zur Untersuchung großräumiger Auswirkungen von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Hochwasserablauf eingesetzt. Für die mit SOBEEK berechneten Gewässerstrecken wurden die betreffenden Datensätze der Gewässergeometrie für die Modelle neu erstellt (267 km Ober- und Mittelrhein (WEIAND, 2001), 61 km Neckar (JABLONSKI, 2001), 252 km Main (VAN BEMMEL et al., 2001), 51 km Mosel (MEIJER et al., 2001)) oder völlig neu überarbeitet (229 km Mittel- und Nie-

derrhein (SCHIEDER, 2001)). Eine Beschreibung des Gesamtmodells (Aufbau, Kalibrierung, Validierung) und detailliertere Untersuchungsergebnisse finden sich in BfG & RIZA (2002).

4.3.2 Modelltopographie und -gerinnegeometrie in SOBEEK

Die Geometrie eines Gewässers wird in SOBEEK durch eine Serie aufeinander folgender Querprofile definiert, deren Lage über die in SOBEEK *Topographie* genannte Grundstruktur aus Knoten (nodes) und Abschnitten (branches) festgelegt wird. Der Abstand der Querprofile untereinander (Kompartimentlänge) bestimmt, über welche Länge (bezogen auf die Flussachse) die Flussgeometrie durch ein Querprofil repräsentiert wird, d.h. vorhandene geometrische Daten in ein Profil integriert werden müssen. Die Querprofile werden in Tabellenform festgelegt, in denen für verschiedene Höhen bezogen auf ein Referenzniveau (z.B. NN) die Gesamtprofilbreite und die durchströmte Breite dargestellt werden. Je Profil müssen dabei sowohl die Höhen- als auch die Breiteninformationen aufsteigende Werte aufweisen. Im Profil wird außerdem unterschieden zwischen Hauptgerinne (main section), Überflutungsraum 1 (Uferbereich, bank section) und Überflutungsraum 2 (floodplain section), so dass Bühnenfelder und Vorländer berücksichtigt werden können. Sommerdeiche werden als Deichhöhe mit dahinterliegendem Poldervolumen im Profil wiedergegeben (siehe *Abb. 4.6*).

4.3.2.1 Datenaufbereitung in BASELINE

Um die räumliche Geometrie des Flusses in ein repräsentatives Querprofil zu übersetzen, wurde eine Reihe von GIS-Applikationen programmiert und genutzt, die im wesentlichen im ARC/INFO-Programmpaket BASELINE zusammengefasst sind (CSO, 1999).

Einen Überblick über die wesentlichen Schritte der Datenaufbereitung und der SOBEEK-Profilerstellung mit BASELINE gibt *Abb. 4.7*. Eine ausführliche Beschreibung findet sich bei HOEFSLOOT et al. (1999).

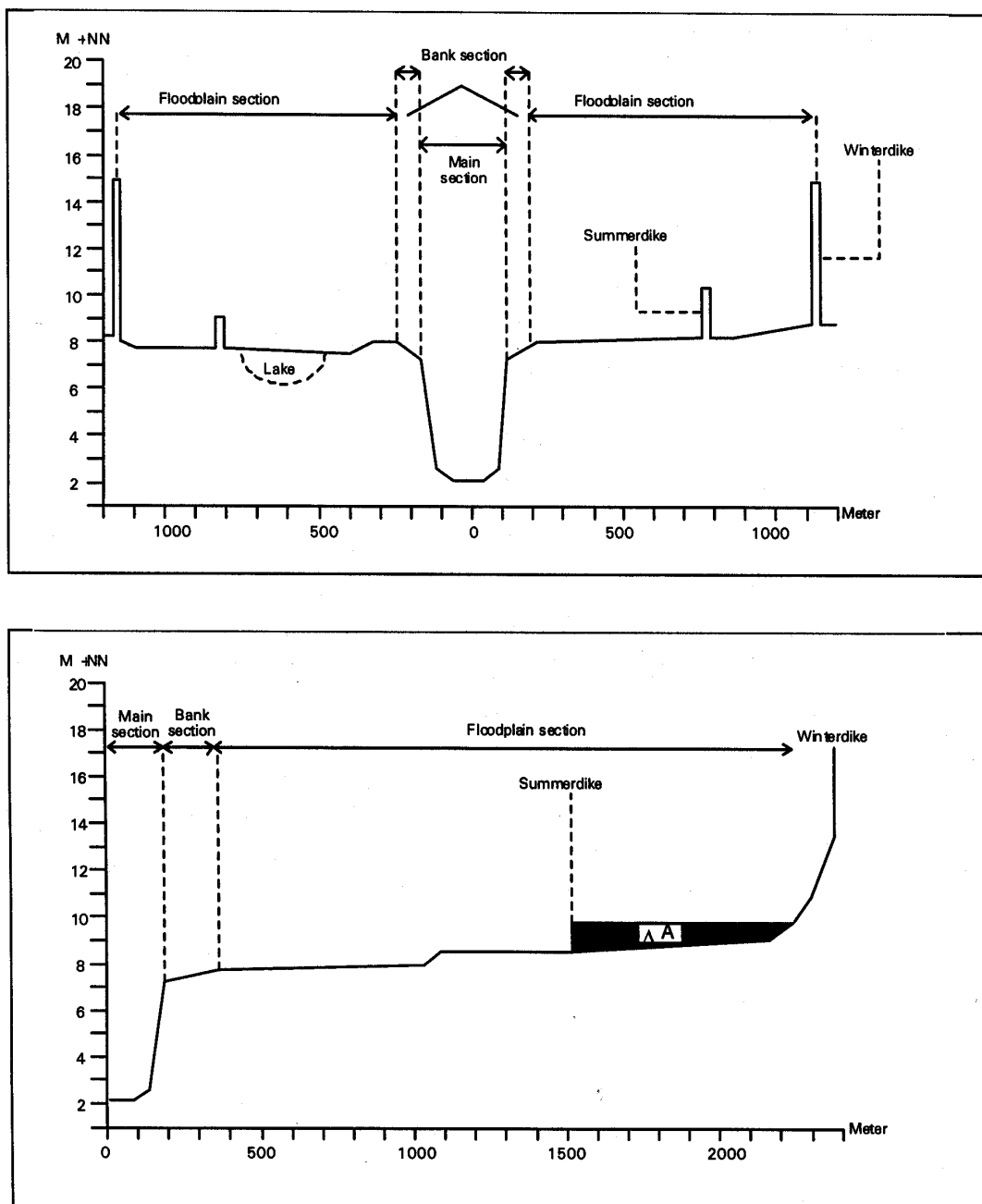


Abb. 4.6 Schematische Darstellung eines Flussquerprofils und seiner Wiedergabe in SOBEK

Als Basisdaten wurden zunächst Punkt-, Linien- und Flächendaten, die die räumliche Struktur der Gewässer charakterisieren (Flussachse, Flusskilometrierung; äußere Grenze des Hauptgerinnes, Uferlinie, Modellgrenze, Grenze zwischen durchströmten und nicht durchströmten Vorlandbereichen, Seen, Lage der Sommerdeiche und als solche wirkende Linienstrukturen, Lage der Buhnen,

Knoten, Lage der Pegel, Wasserbauwerke) gesammelt und in BASELINE eingeführt. Im wesentlichen wurden sie, da sie für die hier zu betrachtenden deutschen Flussabschnitte noch nicht digital vorlagen, von topographischen Karten im Maßstab 1:5000 (in wenigen Ausnahmen 1:2500) digitalisiert. Ebenso wurden Informationen aus thematischen Kartenwerken und Atlanten

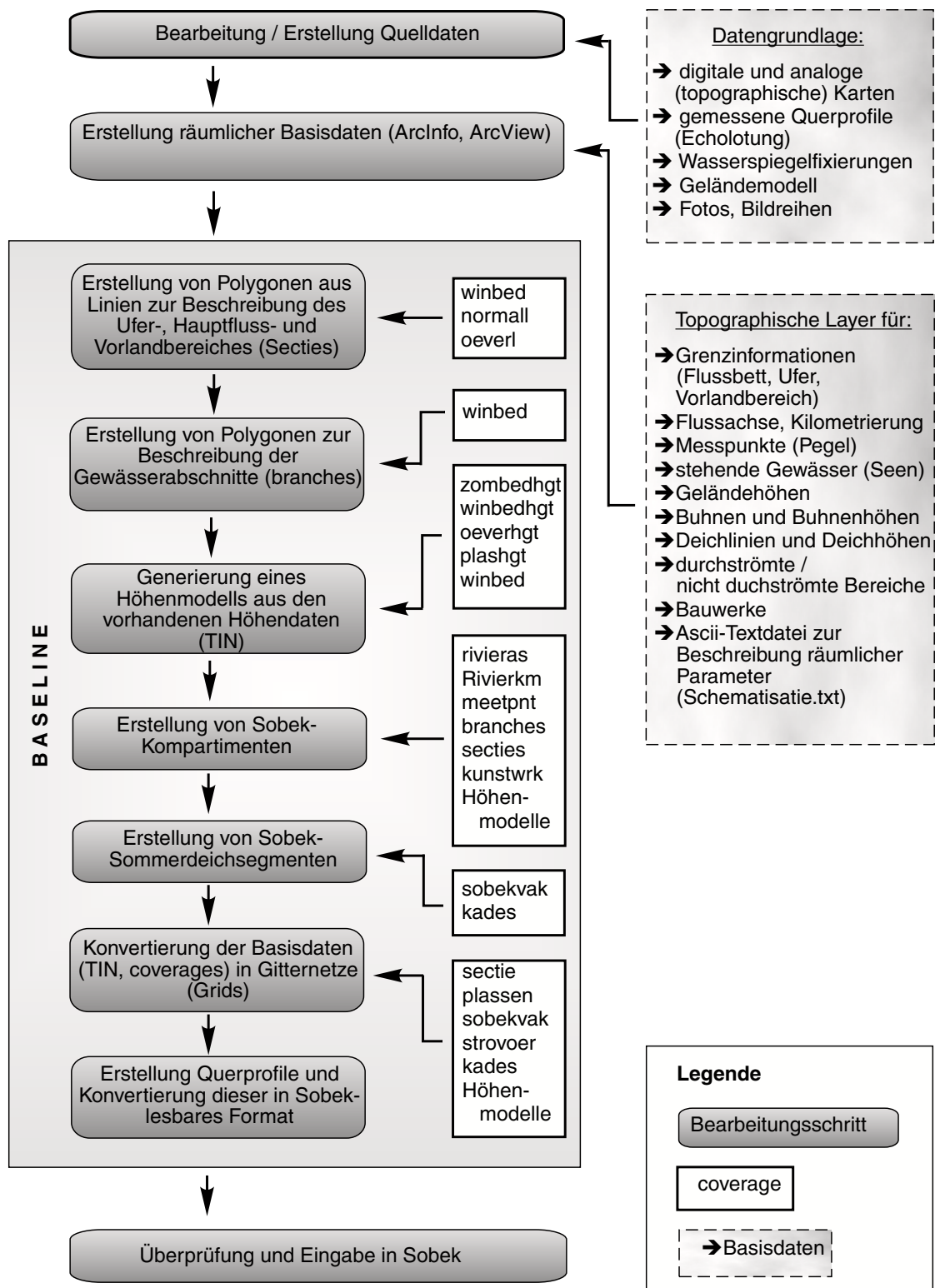


Abb. 4.7 Erstellung von SOBEK-Profilen mit BASELINE unter ARC/INFO (nach Schieder, 2001)

und die Ergebnisse 2-dimensionaler Strömungsberechnungen herangezogen. Die digitalisierten Daten wurden in das entsprechende GIS-Format von BASELINE (Punkt-, Linien- und Polygoncoverages) gebracht und weiter verarbeitet. Dabei entstehen zusätzliche coverages, die die Flussbett-, Ufer-/Buhnen- und Vorlandbereiche (secties) oder die Gewässerabschnitte (branches) festlegen. Darüber hinaus bestimmt BASELINE die SOBEK-Kompartments, d.h. die Bereiche, die jeweils durch ein SOBEK-Querprofil repräsentiert werden sollen, sowie für jedes Kompartment die Bereiche, die hinter einem Sommerdeich liegen.

Neben den genannten Punkt-, Linien- und Flächendaten werden zur Erstellung von SOBEK-Profilen auch Höhendaten benötigt. Diese Querprofildaten von der Wasser- und Schifffahrts-Verwaltung der Bundesrepublik Deutschland stellten die wichtigste Datenquelle zur Erstellung eines Höhenmodells dar. Die Querprofile liegen einer-

seits mit sehr hoher Punktdichte vor, andererseits aber nur in Abständen von 100 bis 500 m. Damit ist die räumliche Verteilung der Höheninformationen ausgesprochen inhomogen und problematisch für die Erstellung von Höhenmodellen (TIN). Deshalb wurde zunächst mit dem Programmpaket SURFIS (FIOOLE, 1999) ein Höhenmodell als 10 m × 10 m Grid für den Flussbett- und Uferbereich sowie als 25 m × 25 m Grid im Vorlandbereich erstellt (IMMERZEEL, 2000). Ergänzt wurden diese Informationen durch Höhendaten aus topographischen Karten sowie aus verschiedenen Höhenmodellen der Länder Hessen, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen und durch Laserscanner-Altmetriedaten. Sie wurden BASELINE als Punktcoverages zur Verfügung gestellt.

Das Beispiel eines so entstandenen Höhenmodells sowie einiger weiterer Datensätze (ARC/INFO-coverages) für BASELINE zeigt *Abb. 4.8*.

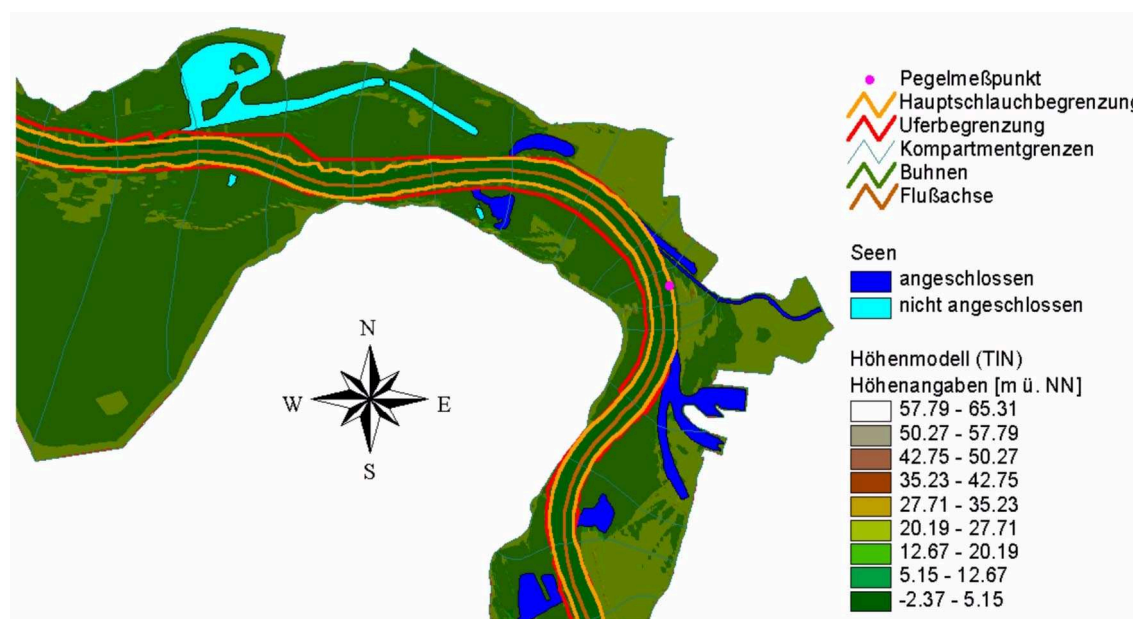


Abb. 4.8 Beispiel einiger Baseline-coverages, Rhein km 807–820, Wesel (aus Schieder, 2001)

4.3.2.2 Erstellung von SOBEK-Profilen mit BASELINE

Nach Bereitstellung aller relevanten Daten können mit Hilfe von BASELINE SOBEK-Querpro-

file erstellt werden. Hierzu werden alle Daten zunächst in Rasterdaten (Grids) umgewandelt. Dies ermöglicht eine rasche Ausführung von komplexen Auswahl- und Verschneidungsoperationen zwischen den verschiedenen Datensätzen. Die

Berechnung der Profile geschieht durch die Auswahl solcher Rasterzellen, die einen Katalog von Bedingungen erfüllen. Danach wird die Flächengröße dieser Zellen bestimmt. Die Flächengröße

dividiert durch die Länge des zugehörigen Kompartments längs der Gewässerachse ergibt die Breite im Querprofil.

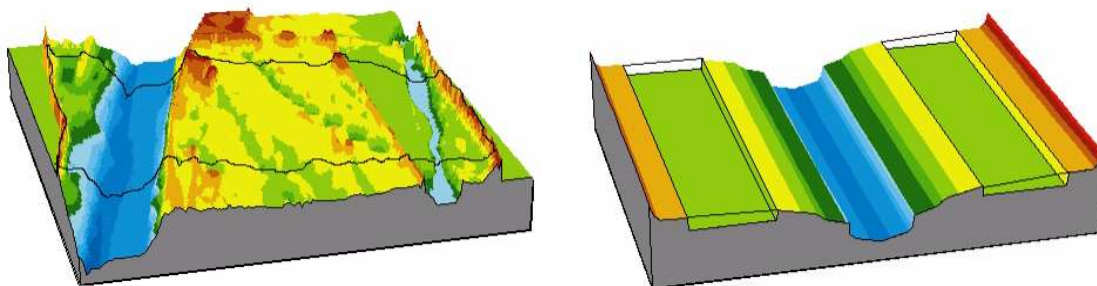


Abb. 4.9 Umwandlung reeller Geländeinformationen in ein repräsentatives Profil (aus Hoefsloot et al., 1999)

Dies soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden: Ausgewählt werden sollen alle Rasterzellen im Kompartiment 28, die im Überflutungsbereich liegen, durchströmt werden, nicht hinter einem Deich und nicht höher als 20 m ü. NN liegen. Die so ermittelte Fläche dividiert durch die Länge des Kompartiments 28 längs der Gewässerachse ergibt die Breite des durchströmten Berei-

ches im Überflutungsbereich bei 20 m ü. NN. Entsprechend können auch weitere Details wie Seen, Bühnenfelder und Deiche berücksichtigt werden. Auf diese Weise wird die komplexe morphologische Struktur im Gelände umgewandelt in ein Profil, das einen festgelegten Flussabschnitt repräsentiert (siehe *Abb. 4.9*).

Randbedingungen bezüglich Landnutzungsänderung, Klimaänderung und Retention an den Flüssen

5.1 UNTERE MESOSKALA

5.1.1 Landnutzungsänderungen

5.1.1.1 Grundlagen

Unter einem Szenario versteht man die »hypothetische Aufeinanderfolge von Ereignissen, die zur Betrachtung kausaler Zusammenhänge konstruiert wird« (WISSENSCHAFTLICHER RAT DER DUDENREDAKTION, 1990). Ein Szenario stellt ein mögliches Zukunftsbild dar, das sich aus den Gesetzmäßigkeiten und Einflussgrößen eines Systems bei bestimmten, ausgewählten Randbedingungen ableiten lässt. Szenarien sind keine Vorhersagen und beinhalten weder Informationen über die Wahrscheinlichkeit der zu Grunde gelegten Randbedingungen noch über die Eintrittswahrscheinlichkeit der Modellergebnisse.

In der vorliegenden Untersuchung werden Szenarien zur Abschätzung des Einflusses der *Landbedeckung* auf die Hochwasserentstehung eingesetzt. Dieser Einfluss lässt sich am besten anhand der Auswirkungen von *Änderungen* der Landnutzung und -bedeckung darstellen.

In der Vergangenheit wurde bei Landnutzungsszenarien für hydrologische Studien meist die *Topologie* der Landschaft vernachlässigt, die sich aus den *Nachbarschaftsbeziehungen* zwischen den verschiedenen Landnutzungen und de-

ren *Lage im Raum* zusammensetzt. Stattdessen wurden im einfachsten Fall Flächenanteile der verschiedenen Landnutzungen gegeneinander verschoben (WITTENBERG, 1974, BULTOT et al., 1990; LIEBSCHER et al., 1995; GRABS, 1997). Da Abflussbildungsprozesse aber nicht homogen im Raum verteilt ablaufen, ist die *räumliche Struktur* einer Landschaft von entscheidender Bedeutung für den Einfluss der Landbedeckung auf die Hochwasserentstehung.

5.1.1.2 Modellkonzept

Für die vorliegende Fragestellung wurde von FRITSCH (2002) das Landnutzungsmodell LUCK (Land Use Change scenario Kit) entwickelt, welches den oben genannten Anforderungen gerecht wird, da es sowohl die *Nachbarschaftsbeziehungen* einer Landnutzung als auch deren *Lage* innerhalb eines Gebietes berücksichtigt. LUCK ist ein sogenanntes Landschaftsmodell, welches – auf deterministischen Prinzipien beruhend – räumlich detaillierte und explizite Szenarien der Landnutzung simuliert. Eine ausführliche Darstellung des Modells findet sich in FRITSCH (2002). Im Folgenden werden die wichtigsten Grundprinzipien des Modells zusammenfassend beschrieben,

soweit es für das Verständnis der verwendeten Szenarien erforderlich ist.

Datengrundlage

Datenbasis für die Erstellung von Landnutzungs-szenarien mit LUCK sind räumliche Daten zu *Topographie, Landnutzung* und *Böden* eines Gebietes. Daneben können je nach Art der betrachteten

Landnutzung weitere räumliche Daten hinzugezogen werden, die der weiteren Eingrenzung der Standorteigenschaften dienen. Hierzu zählen beispielsweise Daten zur Infrastruktur, zum Ertragspotential landwirtschaftlicher Flächen oder zum ökologischen Feuchtegrad. Sämtliche Daten müssen als gerasterte digitale Karten (Grids) vor-

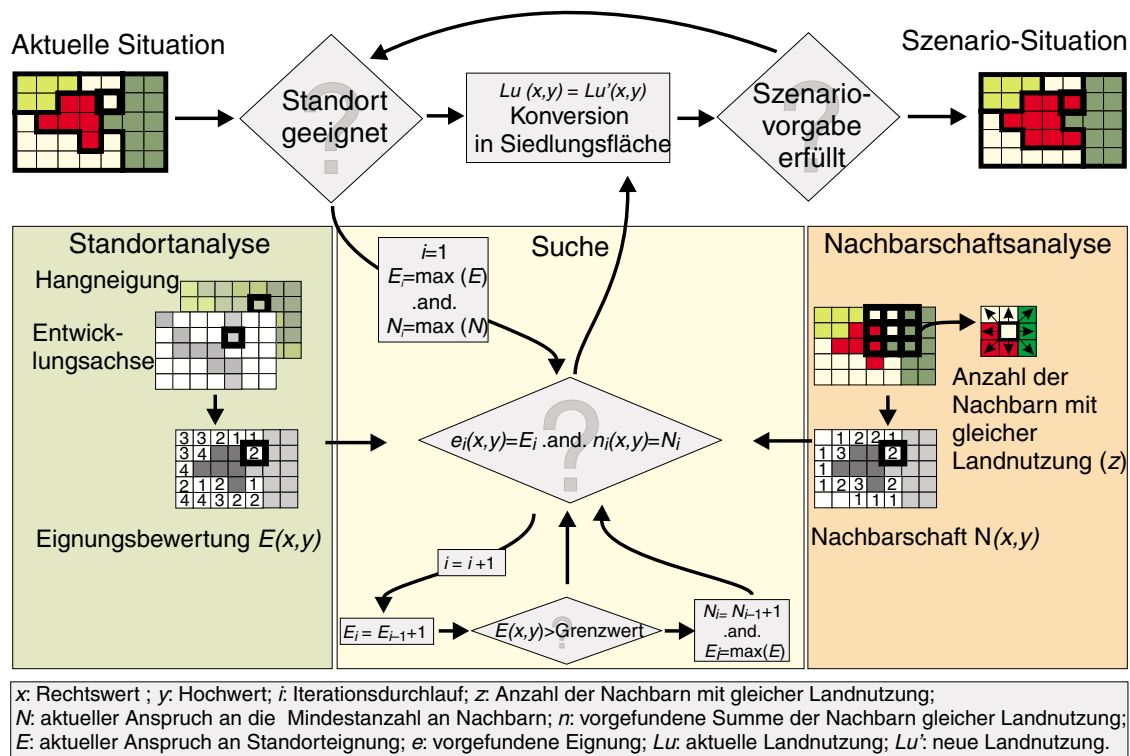


Abb. 5.1 Modellkonzept für Szenarien zur Ausbreitung von Siedlungsflächen im Landnutzungsmodell Luck (Fritsch, 2001)

liegen, wie sie auch für das in der vorliegenden Untersuchung eingesetzte hydrologische Modell WASIM-ETH benötigt werden (Abb. 4.1). Dies hat den Vorteil, dass auch eine veränderte Landnutzung direkt als digitale Karte in die hydrologische Modellierung einfließen kann.

Szenarienerstellung

Die Szenarienerstellung mit LUCK gliedert sich in zwei Teilschritte:

- (1) Ableitung des *Betrages* der Landnutzungsänderung anhand von bereits bestehenden Untersuchungen (Szenarioziel).

- (2) Umsetzung des Szenarioziels auf die Fläche.

Die räumlich explizite Umsetzung des Szenarioziels bewerkstelligt LUCK anhand einer *Analyse der Landnutzung der angrenzenden Nachbarn* rund um eine Rasterzelle sowie einer *Bewertung der relativen Eignung* der Zelle für die betrachtete Landnutzung. Aus diesen beiden Kriterien ergibt sich die Eignung einer Rasterzelle für die bestehende Landnutzung bzw. deren Änderungsneigung. Bei der räumlichen Umsetzung der Änderungen werden in einer iterativen Prozedur jeweils die Zellen mit der höchsten Änderungs-

neigung umgewandelt, bis das Szenarioziel erreicht ist.

Abb. 5.1 illustriert die beschriebene Vorgehensweise für die Erstellung von Szenarien bezüglich der Entwicklung von Siedlungsflächen. Das Modell bietet außerdem die Möglichkeit, potentielle landwirtschaftliche Stilllegungsflächen zu identifizieren und Aufforstung zu simulieren.

5.1.2 Klimaänderungen

Klima ist nach BLÜTHGEN (1980) der für ein bestimmtes Gebiet charakteristische Ablauf der Witterung während eines längeren Zeitraums, welcher sich in einer charakteristischer 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* nachgewiesen werden, unter anderem auch über geänderte Auftretenshäufigkeiten von meteorologischen Extremereignissen. Da aber Extremereignisse definitionsgemäß selten auftreten, sind auch mögliche Aussagen hierüber unsicherer als Aussagen über eine Änderung der *Klimamittelwerte*.

Das selbe Prinzip gilt auch für die Klimasimulationen *globaler Zirkulationsmodelle*. Im folgenden wird vorgestellt, wie die Berechnungen *globaler Zirkulationsmodelle* für die Simulation *lokal auftretender Witterungsereignisse* nutzbar gemacht werden können. In der vorliegenden Studie wird hierfür das *expanded downscaling* von BÜRGER (1996) verwandt, dessen Grundzüge im weiteren erläutert werden.

5.1.2.1 Szenariotechnik für die untere Mesoskala

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:

$$l = f(g) \quad (5.1)$$

- 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. 500-hPa-Höhenkarte des Luftdrucks)

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 Missstand wirkt sich besonders negativ auf die Simulation von Stark-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.

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 *normiert*. Dies ist erforderlich, da Klimavariablen in der Regel *nicht normalver-*

teilt, 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 die zeitliche Variation der Witterung (nicht aber deren absolute Werte) des hydrologischen Jahres 1994 erhalten bleibt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass sie einen direkten und nicht nur statistischen Vergleich der hydrologischen Modellierung des *Ist-Zustandes* mit den Bedingungen des *Klimaszenarios* gestattet.

Eine eingehende Beschreibung dieses Ansatzes ist in BRONSTERT et al. (2001) enthalten. Im folgenden wird dargestellt, wie die von 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 mesoskaligen 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.

Die gemessenen Daten $l(t)$ 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, son-

dern 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.

Normierung der gemessenen Zeitreihen

Wie bereits erwähnt, werden die Zeitreihen der lokalen Messgrößen normiert, um den Voraussetzungen des downscaling-Verfahrens genüge zu tun. Die Normierung der Zeitreihen geschieht anhand einer sogenannten *probability integral transformation* (probit) und funktioniert in beide Richtungen:

$$\begin{aligned} X \rightarrow Y &= \Psi_C(X) \\ Y \rightarrow X &= \Psi_C^{-1}(Y) \end{aligned} \tag{5.2}$$

- X Gemessene Zeitreihe für einen Zeitraum
- Y Normalisierte Zeitreihe für diesen Zeitraum
- Ψ_C Transformationsfunktion/Probit einer Zeitreihe (der Index C bezeichnet die Abhängigkeit der Transformation vom großräumigen Klima)

Ein wichtiges Ergebnis dieser Normierung 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:

$$Y = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{5.3}$$

- μ Mittelwert
- σ Standardabweichung

Für nicht normalverteilte Größen wie tägliche Niederschläge können Mittelwert und Standardabweichung nach BÜRGER (1996) in guter Näherung so berechnet werden:

$$Y = \alpha + \ln(X + e^\beta) \tag{5.4}$$

- α Mittelwert nicht normalverteilter Größen
- β Standardabweichung nicht normalvert. Größen

Transfer gemessener Zeitreihen in die Zukunft

Ausgangspunkt für die Modellierung eines zukünftigen Klimas in den drei mesoskaligen Untersuchungsgebieten ist ein globales 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:

$$\begin{aligned} X_{1994} &\rightarrow Y = \Psi_C(X) \\ Y &\rightarrow X_{1994}^* = \Psi_{C^*}^{-1}(Y) \end{aligned} \quad (5.5)$$

- 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 (Zeitraum 1970 bis 1997)
- C^* Klima des Szenarios (Zeitraum 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 Zeitreihen mit Tageswerten von Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlag mit einer Variation der Witterung wie im hydrologischen Jahr 1994. Diese in das zukünftige Klima "transferierte" Zeitreihe wird abgekürzt als X_{1994}^* bezeichnet.

5.1.2.2 Ermittelte Klimaszenarien für die untere Mesoskala

Um der Dynamik der Abflussbildung infolge von Starkniederschlägen Rechnung zu tragen, werden die hydrologischen Simulationen für diese Studie im *Stundenzeitschritt* durchgeführt (siehe *Kap. 4.1*). Die nach der zuvor beschriebenen Methode generierten 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 Niederschlagswerte des Klimaszenarios auf Stundenwerte *disaggregiert* werden. Dabei wird implizit davon ausgegangen, dass sich die zeitliche Verteilung der Niederschläge innerhalb des Tages im hydrologischen Jahr X_{1994}^* gegenüber dem Ist-Zustand nicht verändert hat.

Tab. 5.1 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.

Tab. 5.1 Gebietsniederschlag im hydrologischen Jahr 1994 und für das Klimaszenario X_{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

Die prozentuale Abnahme des Niederschlages ist jedoch von dieser Besonderheit des Jahres 1994 weitestgehend unabhängig, spiegelt also vor al-

lem die veränderte Klimatologie wider. Neben einer Niederschlagsabnahme findet in den Untersuchungsgebieten auch eine deutliche *Verschiebung*

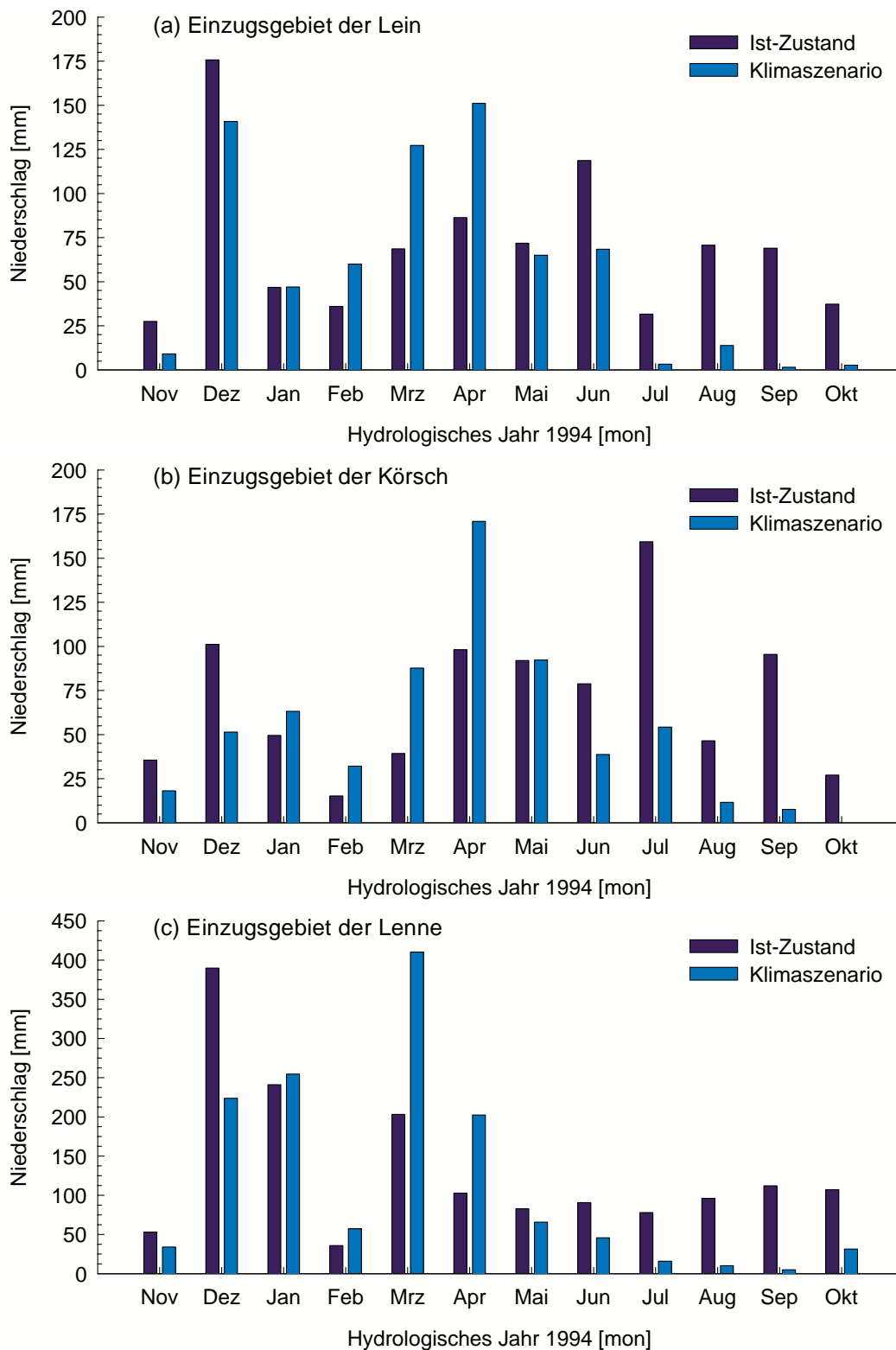


Abb. 5.2 Monatlicher Niederschlag in den drei Untersuchungsgebieten für das hydrologische Jahr 1994 und eine Projektion dieses hydrologischen Jahres um etwa 100 Jahre in die Zukunft (Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097)

der Niederschläge innerhalb des Jahres statt (siehe Abb. 5.2). 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.

5.2 OBERE MESOSKALA UND MAKROSKALA

5.2.1 Landnutzungsänderungen

Für die Modellierung des Niederschlag-Abflussprozesses unter geänderter Landnutzung wurden fünf Landnutzungsszenarien IST92, LN1, LN2, LN100 und LNW entwickelt. Über die Kopplung mit der Wellenablaufmodellierung fanden sie auch Eingang in die Untersuchungen der Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf die Abflüsse im Rhein und seinen Hauptnebenflüssen.

5.2.2 Niederschlagsszenarien

Um den Einfluss unterschiedlicher meteorologischer Situationen im Rheineinzugsgebiet in der oberen Mesoskala und Makroskala zu erfassen, wurden zunächst Modellereignisse abgeleitet. Sie orientieren sich an den historischen Hochwassern 1983, 1988, 1993 und 1995. Die Überregnung ist dabei zunächst als historisch vermutet angenommen. Zusätzlich wurden die meteorologischen Randbedingungen des grössten Ereignisses am Niederrhein (Hochwasser 1995) durch Erhöhung der historischen Niederschläge um 20% (1995+) und darüber hinaus durch Annahme einer flächendeckenden Schneedecke mit einem Wasseräquivalent von 22 mm (1995++) in den Bereich eines mehrhundertjährigen Niederschlags- bzw. Niederschlags-/Schneesmelzereignisses vergrößert.

Die Auswahl der historischen Ereignisse geht davon aus, mit diesen die Bandbreite der im Untersuchungsgebiet charakteristischen Wellenabläufe beschrieben zu haben. So war das Hochwasser 1983 überall im Untersuchungsgebiet ein Ereignis ähnlicher Größe. 1988 ergaben sich aufgrund

extremer Abflüsse von Main und Nahe im Mittelrhein die höchsten bis heute gemessenen Abflüsse. Das Hochwasser 1993/94 war durch außergewöhnliche große Moselabflüsse (die höchsten seit 1784) gekennzeichnet. Unmittelbar unterhalb von Koblenz ergaben sich die höchsten Scheitel des 20. Jahrhunderts. Zudem folgte der Hauptwelle unmittelbar eine zweite Welle nach, so dass die Abflussfülle außerordentlich war. 1995 erreichten die Wellenscheitel in Köln und am nördlichen Niederrhein abschnittsweise die größten Werte des letzten Jahrhunderts mit einer dem Ereignis 1993/94 vergleichbaren Fülle. Im folgenden werden die aus diesen Ereignissen abgeleiteten Hochwasser als Modellwellen M83, M88, M93/94 und M95 bezeichnet. Die Hochwasserereignisse, welche mit den extremen Niederschlagsszenarien 1995+ und 1995++ berechnet wurden, werden als M95+ und M95++ bezeichnet.

Diese Niederschlagsszenarien fanden nicht nur Eingang in die Niederschlag-Abflussmodellierung der oberen Mesoskala und Makroskala. Durch Kopplung der Ergebnisse der N-A-Modellierung mit der Wellenablaufmodellierung waren sie auch Grundlage für die Untersuchung der Auswirkungen auf die Abflüsse im Rhein und seinen Hauptnebenflüssen.

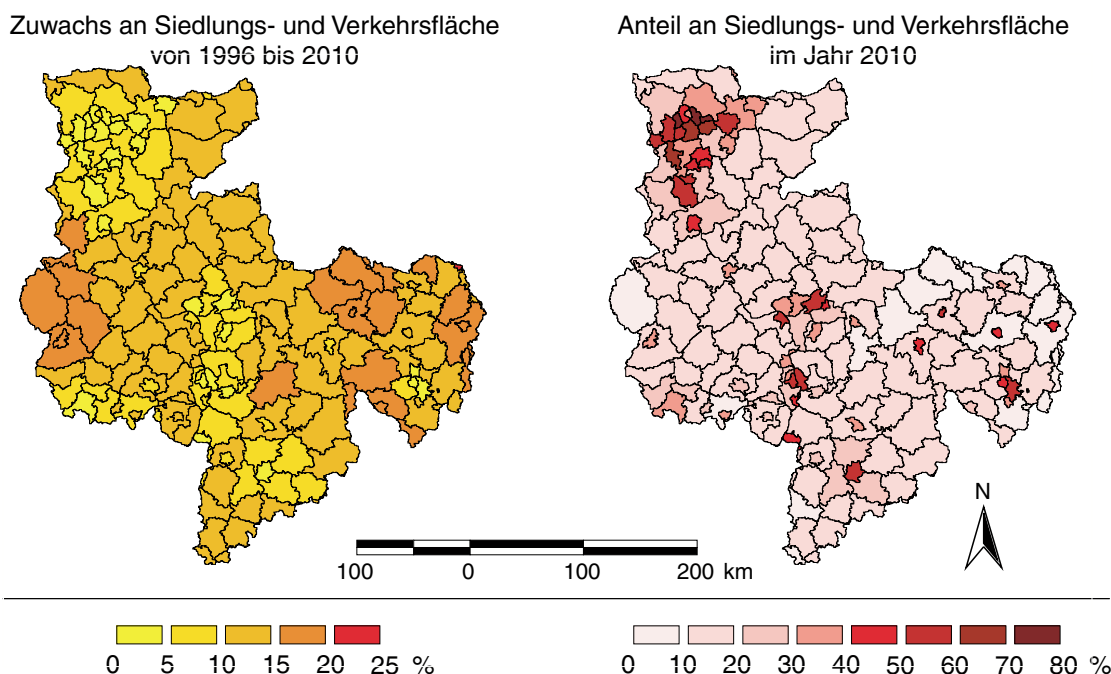
5.2.2.1 Bezugsszenario

Das Bezugsszenario IST92 basiert auf dem Zustand der Landnutzung im Jahr 1992. Diesem Zustand liegt der Datensatz der KHR (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes) zur Beschreibung der Landnutzung im Rheineinzugsgebiet zu Grunde.

5.2.2.2 Zunahme von Siedlungsflächen

Bodenoberfläche verändert. Der Trend einer zunehmenden Flächeninanspruchnahme durch

Die Infiltrationsbedingungen an einem Standort werden am stärksten durch eine Versiegelung der



Karte 5.1 Szenario für den Zuwachs an Siedlungs- und Verkehrsfläche im deutschen Teil des Rheingebiets ab Maxau von 1996 bis 2010 und daraus abgeleitete Besiedlungsdichte für das Jahr 2010 (nach Dosch & Beckmann, 1999)

Wohnen, Industrie und Gewerbe sowie Verkehr hat in den letzten Jahren zu einer enormen Zunahme der Flächenversiegelung geführt. Um die Auswirkungen künftiger Flächenversiegelung auf die Hochwasserentstehung im Rheineinzugsgebiet beurteilen zu können, wurde eine Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche um 2% auf Kosten der landwirtschaftlich genutzten Flächen angenommen. Diese Zahl basiert auf dem Ergebnis einer Untersuchung von DOSCH und BECKMANN (1999), bei der die Siedlungsflächenentwicklung bis zum Jahr 2010 prognostiziert wurde. Diese Trendrechnung basiert auf einer Extrapolation der Flächennutzungsstatistik der Kreise und einer daran angeschlossenen Anpassung an eine Bevölkerungsprognose für das Jahr 2015. Dabei wurden neun Kreistypen hinsichtlich ihrer Siedlungsstruktur definiert und jeder Kreis einem dieser Typen zugeordnet. Für jeden Kreistyp wurden

daraufhin charakteristische Zuwachsraten an Siedlungsfläche bestimmt. Im Mittel zeigt das Szenario eine Zunahme für das Rheingebiet von durchschnittlich ca. 18% Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil im Jahre 1996 auf rund 20% für das Jahr 2010 (siehe Karte 5.1). Starke Zuwächse werden im Rheingebiet für das entfernte Umland der Agglomerationsräume und in den verdichteten und ländlichen Kreisen verstädterter Räume erwartet, weil dort Bauland noch umfangreich verfügbar ist. Ein moderates Wachstum wird in Kernstädten und dem hochverdichten Umland erwartet. Am geringsten sind die Zuwächse innerhalb der Kernstädte in Agglomerationsräumen, bedingt durch die hohen Baulandpreise. Die Entwicklung der Siedlungsflächen vom Ist-Zustand zum Jahr 2010 wurde für jedes Teileinzugsgebiet erhalten. Die Waldfläche wurde nicht

verändert, während die Ackerfläche entsprechend dem Zuwachs der Siedlungsflächen reduziert wurde. Tab. 5.2 zeigt zusammenfassend den pro-

zentualen Zuwachs der Siedlungsflächen für die Haupteinzugsgebiete des Rheins.

Tab. 5.2 Anstieg des Anteils der Siedlungsflächen vom Ist-Zustand zum Jahre 2010

Gewässer	% der Siedlungsfläche im Ist-Zustand	% der Siedlungsfläche im Jahr 2010	Relativer Zuwachs [%]
Erft	17,83	20,15	12,95
Lahn	14,0	16,10	15,00
Lippe	18,08	20,48	13,26
Main	11,74	13,77	17,21
Mosel und Saar	11,95	13,30	11,28
Nahe	11,61	13,48	16,03
Neckar	14,89	16,81	12,88
Ruhr	19,03	21,00	10,34
Sieg	18,44	20,68	12,17

Bezogen auf das gesamte Einzugsgebiet ergeben sich die in Tab. 5.3 genannten Flächenanteile.

Tab. 5.3 Mittlere Flächenanteile der betrachteten Landnutzungsszenarien (Gesamtgebiet)

Szenario	Wald	Siedlungs- und Verkehrsflächen	Landwirtschaftl. Flächen	Wasser	Versiegelte Fläche	Versiegelungsgrad
	[% der Gesamtl.]	[% der Gesamtl.]	[% der Gesamtl.]	[% der Gesamtl.]	[% der Gesamtl.]	[% der Siedlungsfl.]
IST92	40,38	15,28	43,77	0,57	5,35	35,0
LN1	40,29	17,24	41,90	0,57	6,03	35,0
LN2	40,29	17,24	41,90	0,57	4,66	27,0
LN100	38,80	30,29	30,34	0,57	10,61	35,0
LNW	100	0	0	0	0	0

5.2.2.3 Entsiegelung

Nach dem Aktionsplan Hochwasser der INTERNATIONALEN KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1998) sollen im Zeitraum von 1998 bis 2020 etwa 2500 km² oder 1,3% der Einzugsgebietsfläche des Rheins von rund 190000 km² durch dezentrale Versickerungsmaßnahmen entsiegelt werden. Ausgehend von einem durchschnittlichen Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen von etwa 0,35 und bezogen auf den

für 2010 prognostizierten Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil von rund 20% (entsprechend Landnutzungsszenario LN1) wären dann circa 6% der Einzugsgebietsfläche versiegelt und an die Kanalisation angeschlossen. Von dieser Fläche müsste demzufolge gut ein Fünftel entsiegelt werden, um das gesteckte Ziel einer Entsiegelung von 1,3% der Gebietsfläche zu erreichen. Aus dieser Rechnung und nach Übertragung auf die dem Szenario LN1 zugrunde liegenden Größen

ergeben sich für das Szenario LN2 die in Tabelle 5.3 zusammengefassten Zahlen.

5.2.2.4 Extremszenarien

Zur Überprüfung der *Sensitivität* der hydrologischen Modelle für veränderte Landnutzung wurden außerdem zwei Extremszenarien entworfen:

- (1) Verdopplung des Siedlungsflächenanteils im gesamten Gebiet (LN100).
- (2) Vollständige Bewaldung des Untersuchungsgebietes (LNW).

Beide Szenarien gehen vom Bezugsszenario LN92 aus. Die sich auf das gesamte Einzugsgebiet beziehenden Landnutzungsanteile sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

5.2.3 Retentionsmassnahmen am Gewässernetz

In die Oberrheinebene zwischen Basel und Bingen hat der Rhein in Jahrtausenden ein bis zu 4 km breites Überflutungsgebiet eingegraben, in dem das Wasser im Süden in einem Netzwerk von Stromarmen und im nördlichen Bereich in weiten Mäandern abgeführt wurde.

Nördlich des Rheinischen Schiefergebirges, etwa von Bonn ab seewärts existierte ebenfalls eine ausgedehnte Flusslandschaft, in der allein bis zur deutsch-niederländischen Grenze ca. 1800 km² Überflutungsgebiet zur Verfügung stand. Beginnend im Mittelalter und verstärkt ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurden geschlossene Deichlinien errichtet. Hinter diesen Deichlinien gibt es sowohl flutbare Sommerpolder (die nur in den Sommermonaten trocken gehalten werden) als auch ständig geschützte Polder. Hier sind gesteuerte wie ungesteuerte Rückhaltungen zur Minderung der Hochwassergefahren möglich.

Im Zuge der Maßnahmen zur Rücknahme der durch den Staustufenbau vergrößerten Hochwassergefahr sind am Oberrhein derzeit Retentionsmaßnahmen mit einem Gesamtvolumen von 288 Mio m³ vorgesehen (IKSR, 1997). Davon sind 207,6 Mio m³ oberhalb von Maxau gelegen und 79 Mio m³ (oder 28%) unterhalb dieses Pegels. Da die Modellierung des Wellenablaufs nur

den Bereich unterhalb von Maxau umfasst, werden nur diese 79 Mio m³ in den Wellenablaufmodellen berücksichtigt. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Hochwassersituation folgen ab Köln am Niederrhein. Die in der Bestandsaufnahme Hochwasserschutz am Rhein der IKSR (1997) genannten möglichen Rückhalteräume am Niederrhein weisen ein Gesamtvolumen von ca. 174 Mio m³ auf. Basierend auf den neusten Planungsunterlagen von Nordrhein-Westfalen sind hiervon 65 Mio m³ im Modell verwirklicht.

Bei den für das LAHoR-Projekt zu simulierenden Rückhaltungen handelt es sich um steuerbare und nicht steuerbare Becken neben dem Rhein und um mittels Deichrückverlegungen zu reaktivierende ehemalige Überflutungsflächen. Sie liegen ausnahmslos an Flussstrecken, die mit dem SOBEK-Modell gerechnet werden. Deichrückverlegungen haben im Modell SOBEK Auswirkungen auf das Querprofil an der betreffenden Flussstrecke, so dass mit Hilfe von BASELINE neue SOBEK-Profile generiert wurden. Zur Modellierung von steuerbaren und nicht steuerbaren Rückhaltebecken wurden die von SOBEK vorgehaltenen Module verwendet. In Tab. 5.4 sind die berücksichtigten Maßnahmen nach Lage, Größe und Betriebsart zusammengestellt.

Bei den Retentionspoldern bestehen grundsätzlich Unterschiede zwischen Ober- und Niederrhein. Am Oberrhein werden die Polder erst ab einem bestimmten Abfluss im Rhein durch betätigen einer Klappe oder eines Schützes geöffnet. Durch den vor den Verschlüssen aufgebauten Wasserdruck (Klappenhöhen/Schützöffnung 3 m) ist eine schnelle Füllung der Retentionspolder zu erreichen. Nur der Retentionspolder Ingelheim bildet hier eine Ausnahme.

Die Steuerkriterien 4500 m³/s am Ort der Maßnahme und 5200 m³/s im Rhein unmittelbar unterhalb der Neckarmündung gelten für Elisabethenwört, Flotzgrün, Kollerinsel, Rheinschanzinsel, Wörth/Jockgrim/Neupotz und Waldsee/Altrip/Neuhofen. Mechtersheim wird ab einem Abfluss von 5300 m³/s am Pegel Worms und 5200 m³/s an der Neckarmündung eingesetzt. Der Polder Bodenheim/Laubenheim wird ab 4700 m³/s vor Ort aktiviert. Die Entleerung ist bei den Retentionspoldern Elisabethenwört und Rheinschanzinsel auf 3900 m³/s vor Ort und 5 2 0 0 m³/s

an der Neckarmündung gesteuert. Bei den restlichen Retentionspoldern sind die Entleerungsbauwerke geöffnet, so dass eine Entleerung parallel zum Wasserspiegel des Rheins stattfindet.

Tab. 5.4 Im Modell berücksichtigte Rückhaltemaßnahmen am Rhein unterhalb des Pegels Maxau

Name des Rückhalteriums	Lage [Rhein-km]	Betriebsart (*gesteuert)	Volumen [Mio. m ³]
Elisabethenwört	381,3 – 383,0	Retentionspolder*	11,9
Rheinschanzinsel	390,4	Retentionspolder*	6,2
Wörth/Jockgrim/Neupotz	368	Deichrückverlegung & Retentionspolder*	16,2 (12 + 4,2)
Mechtersheim	388,4	Retentionspolder*	7,4
Flotzgrün	392,6	Retentionspolder*	5,0
Kollerinsel	409,9	Retentionspolder*	6,1
Waldsee/Altrip/Neuhofen	411,5	Deichrückverlegung & Retentionspolder*	9,1 (7,9 + 1,2)
Petersau/Bannen	436	Deichrückverlegung	1,4
Mittlerer Busch	440	Deichrückverlegung	2,3
Worms Bürgerweide	438	Deichrückverlegung	3,4
Bodenheim/Laubenheim	490	Retentionspolder*	6,4
Ingelheim	517	Retentionspolder	3,8
<i>Summe Oberrhein unterhalb Pegel Maxau</i>			79,2
Köln-Langel	668,5 – 673,5	Retentionspolder	4,5
Worringer Bruch	705,5 – 708,5	Retentionspolder	8
Monheim	707,5 – 713,5	Deichrückverlegung	6,9
Itter-Himmelgeist	723,5 – 727,5	Deichrückverlegung	2
Ilvericher Bruch	750,5 – 754,5	Retentionspolder	8,1
Mündelheim	760,5 – 769,5	Deichrückverlegung	3
Orsoy Land	797,5 – 803,5	Deichrückverlegung	10
Bislicher Insel	818,5 – 823,5	Deicherhöhung	—
Lohrwardt	832,5 – 833,5	Deichrückverlegung & Retentionspolder	12,9 (10,3 + 1,6)
Grietherbusch	837,5 – 847,5	Deichanpassung	—
Bylerward	845,5 – 854,5	Retentionspolder*	10
<i>Summe Niederrhein</i>			65,4
Gesamtsumme der im Modell berücksichtigten Maßnahmen			rd. 145
Gesamtvolumen der Retentionspolder			rd. 108

Am Niederrhein werden die Maßnahmen meist mit Hilfe von Überlaufschwelen befüllt (Köln-Langel, Worringen, Lohrwardt, Ilverich). Es wird kein Wasserdruck vor dem Bauwerk aufgebaut, der die Befüllung beschleunigt. Lediglich Bylerward wird über den Abfluss am Ort der Maßnah-

me von 11 880 m³/s gesteuert. Die Befüllung wird bei den Maßnahmen Lohrwardt (19,5 m ü. NN), Ilverich (32 m ü. NN) und Bylerward (15,5 m ü. NN) bei einem bestimmten Füllstand im Becken eingestellt. Die Lage der Retentionsmaßnahmen am nördlichen Oberrhein ist der *Abb. 5.3*, die



Abb. 5.3 Retentionsmaßnahmen (grün) am Oberrhein unterhalb von Maxau

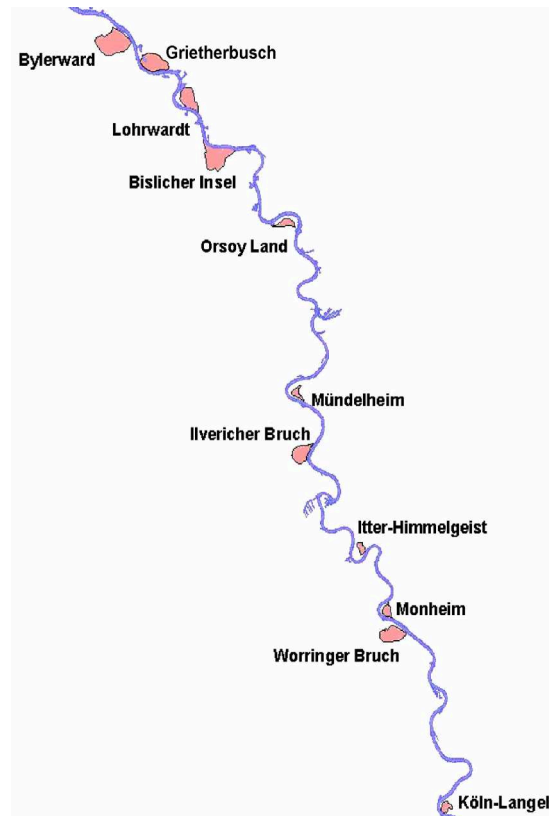


Abb. 5.4 Retentionsmaßnahmen (pink) am Niederrhein (Schieder, 2001)

Lage derjenigen am Niederrhein der Abb. 5.4 zu entnehmen.

Untersuchungsergebnisse

6.1 ÜBERSICHT ÜBER DIE ZU GRUNDE GELEGTEN SZENARIEN

Wie bereits eingangs erläutert, werden die Auswirkungen anthropogener Veränderungen auf die Hochwassersituation im Rheingebiet im LAHoR-Projekt auf drei Ebenen untersucht:

Die detaillierte *hydrologische Modellierung ausgewählter mesoskaliger Einzugsgebiete* (Kap. 6.2) dient dabei als Referenz für die vereinfachte *hydrologische Modellierung des Gesamtgebietes* (Kap. 6.4), der sich die in Kap. 6.5 beschriebene *hydrodynamische Modellierung des Wellenablaufs* anschließt.

Mittels dieser drei Untersuchungsmethoden werden die in Kap. 5 beschriebenen Begleiterscheinungen menschlicher Aktivitäten einerseits bzw. gezielte Maßnahmen zur Hochwasserminderung und -dämpfung andererseits simuliert und deren Auswirkungen anhand verschiedener Kombinationen von Gebietszuständen quantifiziert. Tab. 6.1 zeigt die *Landnutzungsszenarien*, welche bei der makroskaligen Modellierung von Hochwasserentstehung und Wellenablauf berücksichtigt werden, noch einmal im Überblick.

Tab. 6.1 Überblick über die verschiedenen Landnutzungsszenarien, welche bei der makroskaligen Modellierung von Hochwasserentstehung und Wellenablauf berücksichtigt werden

Landnutzungsszenarien	Kürzel	Quelle
Ist-Zustand im Jahr 1992	IST92	Statistisches Bundesamt, 1997
Siedlungsentwicklung bis zum Jahr 2010	LN1	Dosch & Beckmann, 1999
Siedlungsentwicklung bis zum Jahr 2010 in Kombination mit Entsiegelungsmaßnahmen bis zum Jahr 2020	LN2	Dosch & Beckmann, 1999 IKSR, 1998
Verdopplung der Siedlungsflächen (bezogen auf 1992)	LN100	<i>hypothetisch</i>
Vollständige Bewaldung	LNW	<i>hypothetisch</i>

Die Landnutzungsszenarien werden jeweils in Verbindung mit den bis 2020 vorgesehenen *Retentionsmaßnahmen* im und am Rhein sowie ohne solche Maßnahmen simuliert.

Die Auswirkungen dieser Szenarien werden anhand *ausgewählter Hochwasserereignisse* illustriert. Für die makroskalige hydrologische Modellierung sind dies die Entstehungsszenarien der Rheinhochwasser 1983, 1988, 1993 und

1995. Diesen Ereignissen gingen jeweils ergiebige grossräumige advektive Niederschläge voraus, teilweise von Schneeschmelze begleitet. Zusätzlich zu diesen historischen Ereignissen wird die Reaktion des Rheingebiets auf zwei hypothetische meteorologische Extremereignisse mit erhöhtem Niederschlag sowie einer zusätzlichen Schneedecke simuliert.

Insofern diese Ereignisse in den mesoskaligen Beispielsgebieten als Hochwasser erkennbar waren, wurden ebenfalls diese Zeiträume simuliert. Daneben führen in der Mesoskala aber auch konvektive Starkregenereignisse zu Hochwassern. Auf die grundsätzlichen Unterschiede zwischen langanhaltenden zyklonalen Regenfällen und intensiven Gewitterniederschlägen für die Abfluss-

bildung macht *Kap. 6.2* aufmerksam. Für die Mesoskala werden außerdem die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen zum Ende dieses Jahrhunderts dargestellt (*Kap. 6.3*). Die für das Gesamtgebiet (Makroskala) zusammengestellten und simulierten Szenarien werden in *Kap. 6.5* erläutert.

6.2 AUSWIRKUNGEN VON LANDNUTZUNGSÄNDERUNGEN IN DER UNTEREN MESOSKALA

Eine ausführliche Darstellung von Modellierungsergebnissen für die drei mesoskaligen Gebiete findet sich in BRONSTERT et al. (2001). An dieser Stelle werden nur die Ergebnisse zweier Szenarien vorgestellt, die als Referenz für die *makroskalige hydrologische Modellierung* dienen: die Verdopplung der Siedlungsflächen sowie die Prognose der Siedlungsflächen für das Jahr 2010. Es sei darauf hingewiesen, dass die dieser Analyse zu Grunde gelegten Hochwasserereignisse eine Jährlichkeit zwischen 2 und 8 Jahren aufweisen.

6.2.1 Verdopplung der versiegelten Fläche

Das Einzugsgebiet der *Lein* ist in seiner Reaktion auf Niederschläge geprägt von einer mächtigen Lössauflage, deren hervorragende Speichereigenschaften sich in sehr geringen *Abflussbeiwerten* äußern. Diese liegen für die betrachteten konvek-

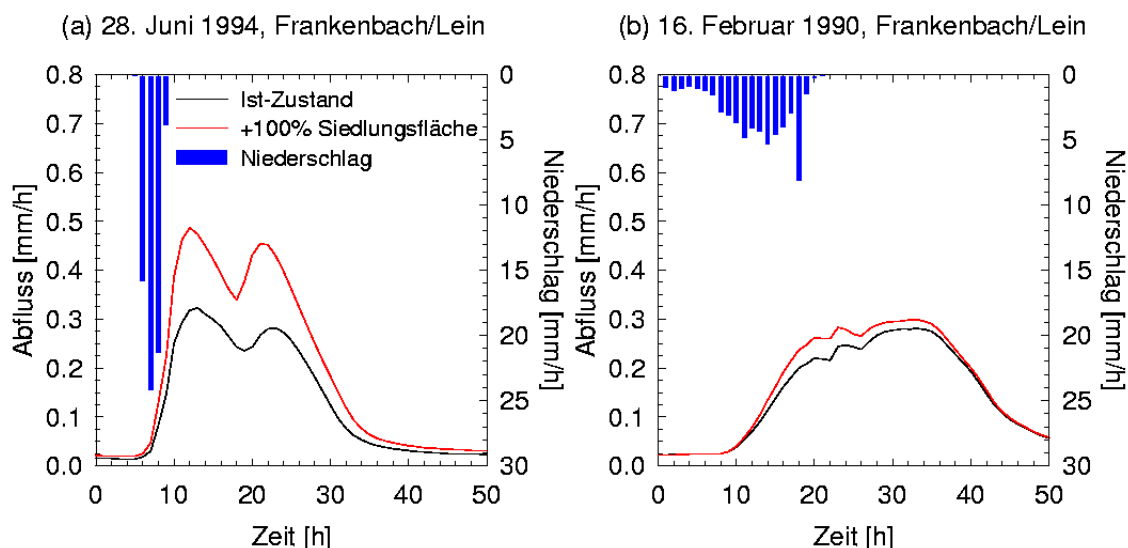


Abb. 6.1 Simulation zweier etwa dreijährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche

tiven sommerlichen Niederschlagsereignisse mit geringer Vorfeuchte zwischen 4 und 8% und bei ergiebigen zyklonalen Niederschlägen zwischen 15 und 20% des gefallenen Niederschlages.

Abb. 6.1 und Abb. 6.2 verdeutlichen den Unterschied zwischen konvektiven Ereignissen mit geringer Vorfeuchte und hoher Niederschlagsin-

tensität und advektiven Niederschlägen mit meist geringeren Niederschlagsintensitäten und höherer Vorfeuchte.

Die hohe Niederschlagsintensität *konvektiver* Starkregen bedingt, dass sich Verschlechterungen der Infiltrationsbedingungen – wie hier durch die

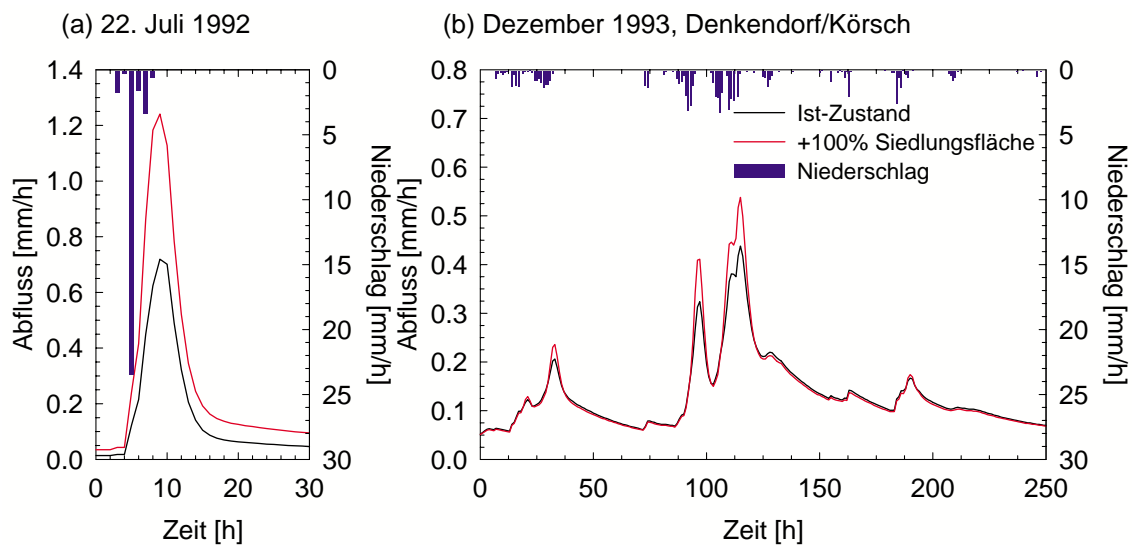


Abb. 6.2 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche

drastische Zunahme von versiegelter Fläche um 100% – während sommerlicher Gewitter besonders gravierend auswirken (jeweils Diagramm a). Diese Abflussverschärfung fällt für das bereits im Ist-Zustand mit rund 25% Siedlungsflächenanteil sehr dicht besiedelte Gebiet der *Körsch* noch stärker aus als an der *Lein* mit etwa 7,5% Siedlungsflächenanteil. Für die fünf untersuchten konvektiven Ereignisse mit Jährlichkeiten zwischen einem und drei Jahren bewegt sich die *Zunahme des Abflussmaximums* bei einer Verdopplung der Siedlungsfläche im Leingebiet zwischen 40 und 50%. Im Körschgebiet erhöhen sich die entsprechenden Abflussspitzen den Simulationen zufolge sogar um 50 bis 70%. Die *Abflussbeiwerte* liegen im Körschgebiet aufgrund des hohen Anteils an Siedlungsflächen mit 10 bis 20% des gefallenen Niederschlages während konvektiver bzw. 20 bis

45% während advektiver Ereignisse ebenfalls höher als an der *Lein*.

Für *advektive* Ereignisse sind die Infiltrationseigenschaften aufgrund geringerer Niederschlagsintensitäten und höherer Vorfeuchte von geringerer Bedeutung für die Hochwasserentstehung. Dennoch beträgt die modellierte Abflussverschärfung bezogen auf den Spitzenabfluss infolge eines fiktiven 100%-igen Siedlungsflächenzuwachses für advektive Ereignisse immer noch bis zu 5% im Leingebiet und bis zu 30% im Körschgebiet.

Im Einzugsgebiet der *Lenne* haben im betrachteten Zeitraum von 1980 bis 1997 nur ergiebigezyklonale *Niederschläge* (teilweise verbunden mit Schneeschmelze) zu Hochwassern mit einer Jährlichkeit von mehr als einem Jahr geführt.

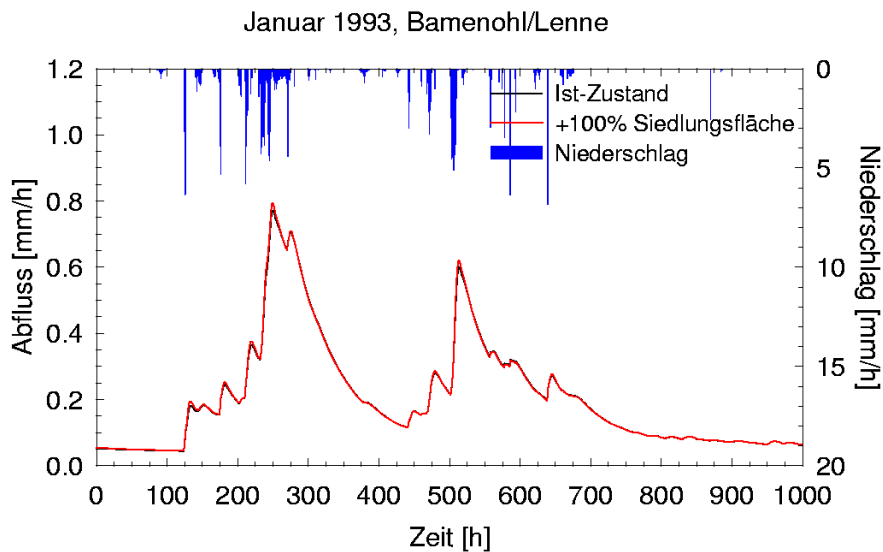


Abb. 6.3 Simulation eines etwa zweijährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und eine hypothetische Verdopplung der Siedlungsfläche

Wie Abb. 6.3 zeigt, ist der simulierte Einfluss einer Verdopplung des Siedlungsflächenanteils auf die Hochwasserentstehung dort sehr gering. Dies liegt einerseits daran, dass im Ist-Zustand nur 5% der Einzugsgebietsfläche von Siedlungen eingenommen werden. Andererseits sorgen die geologischen und morphologischen Verhältnisse dafür, dass die Hochwasserentstehung an der Lenne von *rascher unterirdischer Abflussbildung* geprägt ist. Hierfür sind geringmächtige Böden über wenig durchlässigem Tongestein verantwortlich, was bevorzugtes laterales Fließen im Untergrund begünstigt. Die *Abflussbeiwerte* sind unter solchen Verhältnissen sehr hoch. Für die sechs untersuchten Ereignisse mit Jährlichkeiten zwischen zwei und acht Jahren betragen sie zwischen 40 und mehr als 70%.

6.2.2 Zustand im Jahr 2010

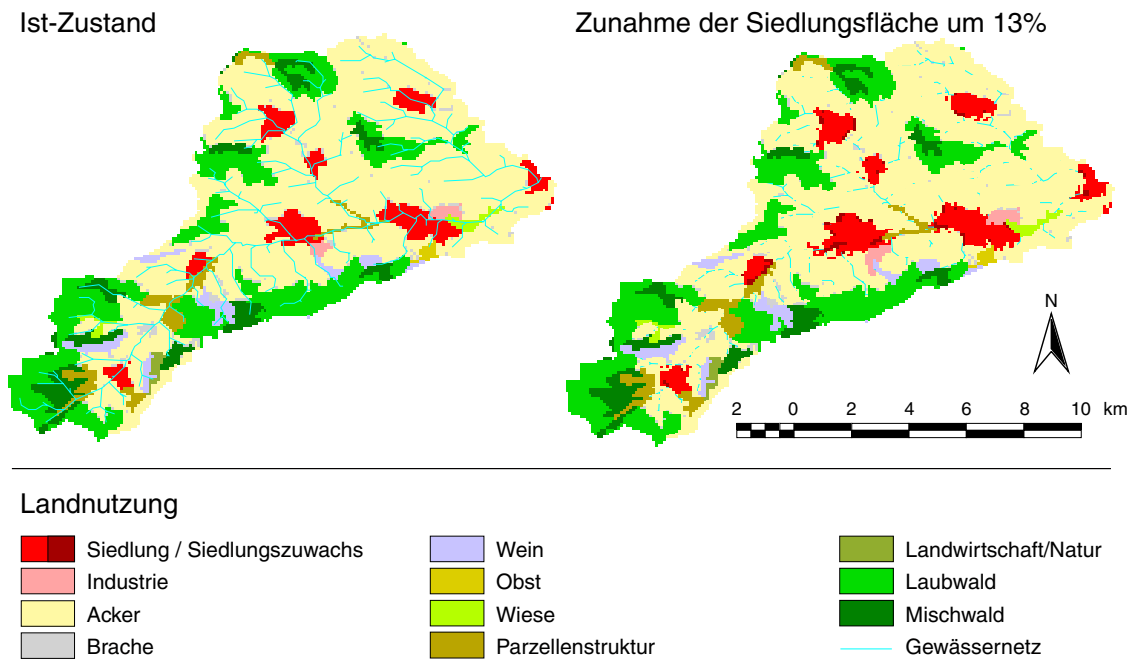
Den hydrologischen Simulationen für den Zustand der Landnutzung im Jahr 2010 liegt das in Kap. 5.2.2.2 für das gesamte deutsche Rheingebiet vorgestellte Szenario von DOSCH & BECKMANN (1999) zugrunde. Danach wird der Anteil an *Siedlungsfläche* im Zeitraum von 1996 bis

2010 im Leingebiet um 13%, im Körschgebiet um 7% und im Lennegebiet um 14% wachsen.

Karte 6.1 zeigt die mit LUCK (siehe Kap. 5.1.1) modellierte räumliche Umsetzung dieses Szenarios beispielhaft für das Einzugsgebiet der Lein. Der Realität entsprechend erfolgt der Zuwachs an Siedlungsfläche ausschließlich in der Nachbarschaft bestehender Siedlungen.

Der bereits in Kap. 6.2.1 erläuterte prinzipielle Unterschied zwischen der Hochwasserentstehung infolge intensiver sommerlicher Starkregen und langanhaltender zyklonaler Regenfälle geht für *Lein* und *Körsch* aus Abb. 6.4 bzw. Abb. 6.5 hervor. Die simulierte Abflussverschärfung ist jedoch für den bis 2010 prognostizierten Siedlungszuwachs entsprechend geringer als für das Extremszenario aus Kap. 6.2.1. Der Einfluss des für die *Lenne* prognostizierten 14%-igen Siedlungszuwachses auf die Hochwasserentstehung ist aufgrund der schon in Kap. 6.2.1 beschriebenen Gebietseigenschaften erwartungsgemäß sehr gering, wie Abb. 6.6 zeigt.

Aus diesen Simulationen kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass die *Flächenversiegelung* in den Siedlungsbereichen insgesamt einen nur



Karte 6.1 Räumliche Umsetzung des prognostizierten Siedlungszuwachses für das Leingebiet im Zeitraum von 1996 bis 2010

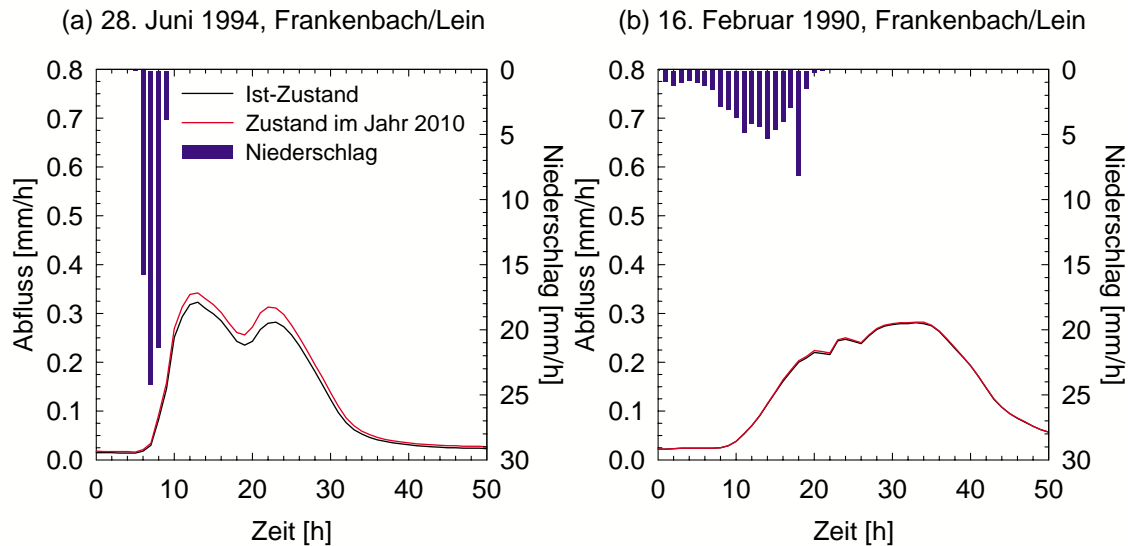


Abb. 6.4 Simulation zweier etwa dreijährlicher Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 13%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010

geringen hochwasserverschärfenden Einfluss auf die Hochwasserentstehung hat, da die Abfluss-

ganglinien ja nur die Auswirkungen der *zusätzlichen Siedlungsflächen* illustrieren. Dies unter-

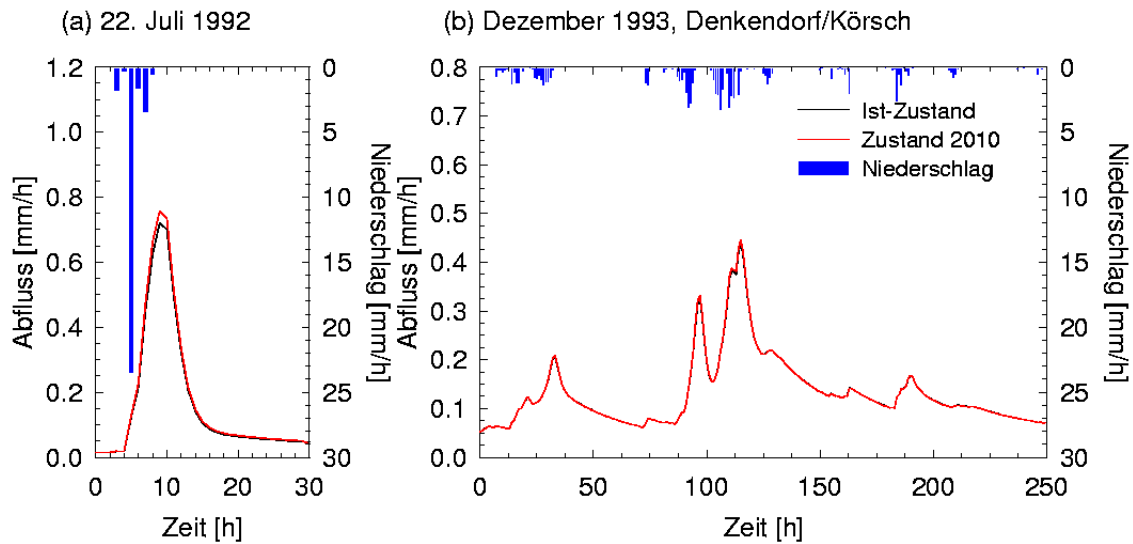


Abb. 6.5 Simulation zweier etwa einjähriger Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Körch für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 7%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010

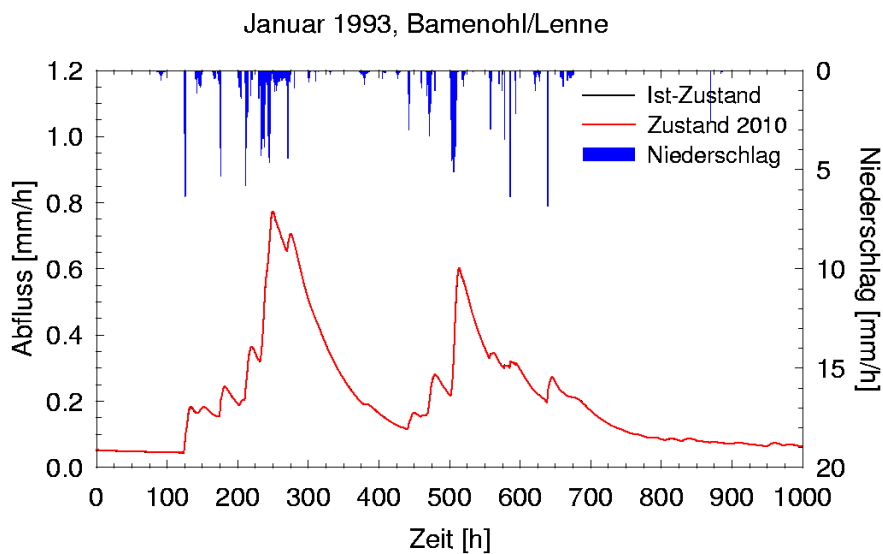


Abb. 6.6 Simulation eines etwa zweijährlichen Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und einen prognostizierten 14%-igen Zuwachs an Siedlungsfläche bis zum Jahr 2010

streicht Tab. 6.2. Bezogen auf die *Einzugsgebietsfläche* werden an Lein, Körch und Lenne bis 2010 demnach lediglich 1, 1,8 bzw. 0,7% der Fläche in Siedlungsfläche umgewandelt. Nähe-

rungsweise kann außerdem davon ausgegangen werden, dass nur rund ein Drittel der Siedlungsflächen *versiegelt* und *an die Kanalisation angeschlossen* ist – was für die zusätzlichen Sied-

Tab. 6.2 Prognostizierter Zuwachs an Siedlungsflächen zwischen 1996 und 2010 in den drei mesoskaligen Untersuchungsgebieten

	Anteil der Siedlungen an der Gebietsfläche [%]		Zuwachs an Siedlungsfläche [%]	
	Ist-Zustand	Szenario für 2010	relativ	absolut
Lein	7,5	8,5	13	1
Körsch	25	26,8	7	1,8
Lenne	5	5,7	14	0,7

Tab. 6.3 Simulierter Abflussverschärfung für den prognostizierten Zuwachs an Siedlungsflächen zwischen 1996 und 2010 in den drei mesoskaligen Untersuchungsgebieten

	Erhöhung des Abflussmaximums [%]		Erhöhung des Abflussvolumens [%]	
	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse
Lein	5–8	< 1	5–11	< 1
Körsch	3–5	1–3	3–5	< 1
Lenne	—	< 1	14	< 1

Tab. 6.4 Für das Leingebiet simulierte Abflussänderung infolge von Verstädterung, Entsiegelung bzw. bei Einsatz des Mulchsaatsverfahrens auf Flächen mit Blattfruchtanbau

	Änderung des Abflussmaximums [%]		Änderung des Abflussvolumens [%]	
	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse
+ 50% Siedlung	+ 20 bis +30	0 bis +6	+19 bis + 23	< +1
Entsiegelung	–15 bis –20	0 bis –8	–12 bis –17	0 bis –5
Mulchsaat	–1 bis –2	0 bis –2	1 bis –2	< –1

lungsflächen einen versiegelten Anteil von 0,23 bis 0,6% der Einzugsgebietsfläche bedeuten würde. Die simulierte Zunahme der Abflussspitzen liegt jedoch zumindest bei den untersuchten konvektiven Ereignissen deutlich höher, wie Tab. 6.3 zusammenfassend für die simulierten Hochwasserereignisse mit Jährlichkeiten zwischen zwei und acht Jahren zeigt.

Tab. 6.4 zeigt zusätzlich für das Einzugsgebiet der Lein die Auswirkungen dreier weiterer Szenarien, die in BRONSTERT et al. (2001) ausführlich beschrieben sind: ein *Verstädterungsszenario*, ein *Entsiegelungsszenario* sowie ein

Mulchsaatszenario. Für das Verstädterungsszenario wurde ein Wachstum der Siedlungsflächen um 50% gegenüber dem für das Jahr 1992 angesetzten Ist-Zustand angenommen. Entsiegelung wird dabei, dem *Aktionsplan Hochwasser* (INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS, 1998) entsprechend, für 54% der versiegelten und an die Kanalisation angeschlossenen Einzugsgebietsfläche angenommen. Der Einsatz des Mulchsaatsverfahrens bezieht sich auf ca. 23% der Fläche des Lein-Einzugsgebiets, auf denen im Durchschnitt Blattfruchtanbau betrieben wird.

6.3 AUSWIRKUNGEN VON KLIMAÄNDERUNGEN IN DER UNTEREN MESOSKALA

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 downsampling* hier an eine Grenze. Deshalb beschränkt sich die Modellierung auf das hydrologische Winterhalbjahr von November 1993 bis Mai 1994 mit ergebnissen *advectiven* Niederschlägen.

6.3.1 Lein

Wie *Abb. 6.7* illustriert, entsteht durch die in *Kap. 5.1.2.2* beschriebene zeitliche Verschiebung

des Niederschlagsregimes im Szenario-Zustand eine neue Hochwassersituation an der Lein. Um zu verdeutlichen, in welcher Weise sich die Niederschläge im Szenario-Zustand ändern, ist in *Abb. 6.7* neben den simulierten Abflussganglinien für den Pegel Frankenbach auch die Differenz zwischen dem Gebietsniederschlag für das Szenariojahr X_{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 downsampling*

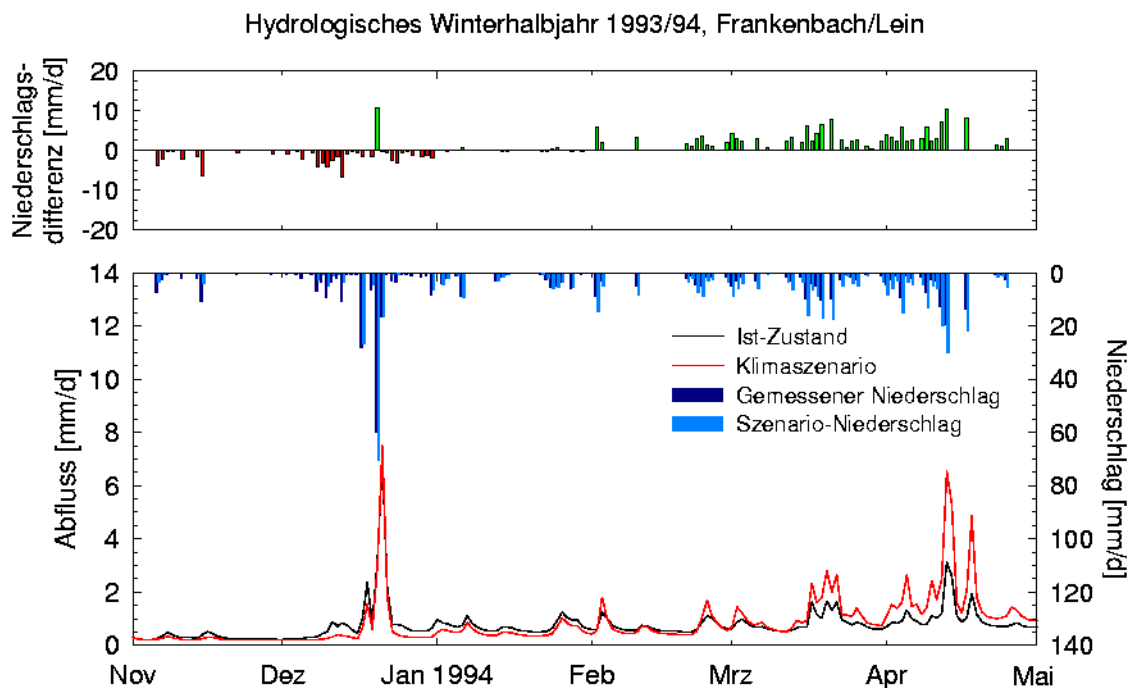


Abb. 6.7 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lein für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

ling für das zukünftige Klima berechnet wurde. Dies erklärt auch, warum das Weihnachtshochwasser im Szenario-Zustand bei geringerer Vorfeuchte nahezu dasselbe *Abflussmaximum* erreicht wie im Ist-Zustand.

6.3.2 Körsch

Die Szenarioprecipitationen für das Körschgebiet bestätigen die Tendenz (Abb. 6.8), 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. 6.8 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 Jah-

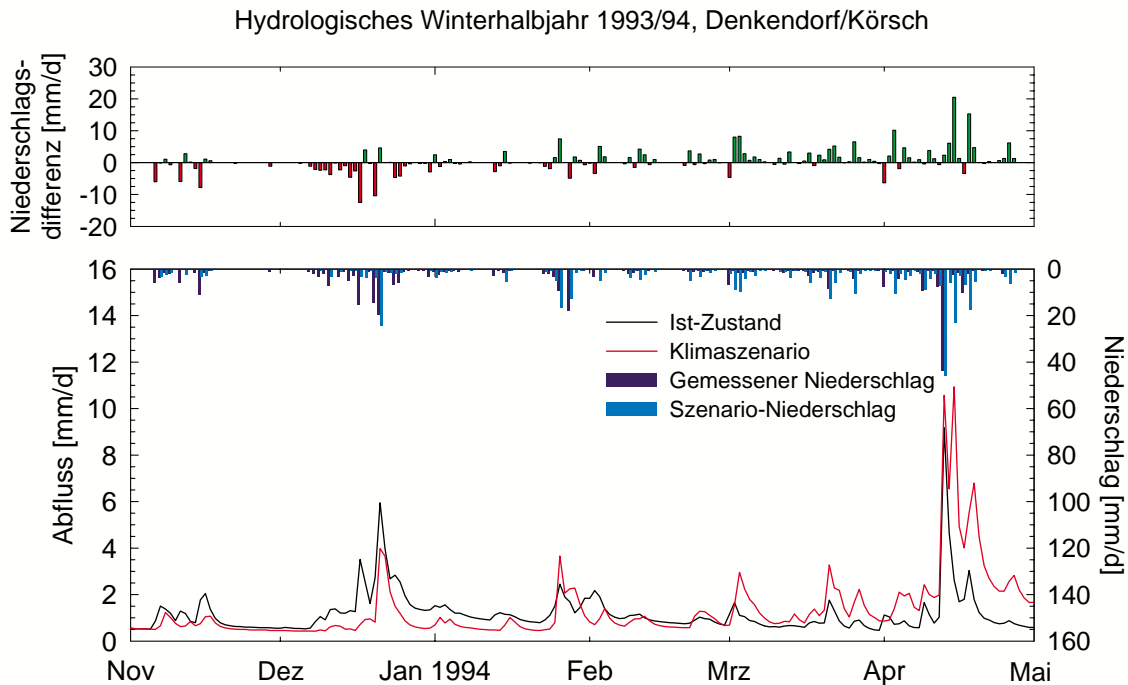


Abb. 6.8 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Körsch für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

res 1994.

6.3.3 Lenne

Am deutlichsten zeigt sich die Verschiebung des Niederschlagsregimes unter den Bedingungen des Klimaszenarios im Lennegebiet (siehe Abb. 6.9), das aufgrund seiner Topographie einen wesentlich höheren Jahresniederschlag aufweist als die anderen beiden Untersuchungsgebiete.

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 *Frühjahrshochwassern* infolge *ergiebiger advektiver Niederschläge* hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Hochwassersituation im *gesamten*

Rhein-Einzugsgebiet. Damit stieg die Wahrscheinlichkeit, dass derartige niederschlagsbedingte Hochwasser im deutschen Teil des Rhein-

gebietes mit Schneeschmelzabflüssen aus den Alpen zusammentreffen.

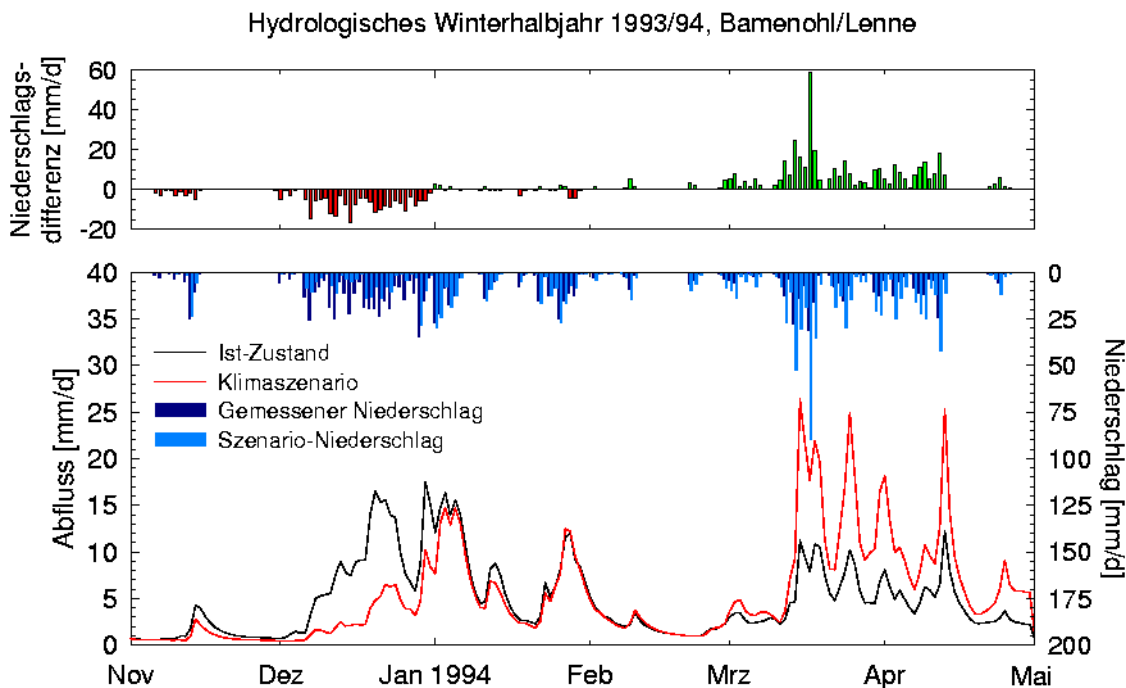


Abb. 6.9 Simulation des hydrologischen Winterhalbjahres 1993/94 im Einzugsgebiet der Lenne für den Ist-Zustand und ein Klimaszenario für den Zeitraum von 2070 bis 2097

6.4 AUSWIRKUNGEN VON LANDNUTZUNGSÄNDERUNGEN IN DER OBEREN MESOSKALA UND DER MAKROSKALA

6.4.1 Ergebnisse der Regionalisierung für den Ist-Zustand der Landnutzung

Um eine gute Beziehung zwischen den Parameterwerten und den Gebietseigenschaften zu erhalten, wurden 30 Teileinzugsgebiete mit unterschiedlicher Landnutzung und Bodentypverteilung ausgewählt und das Modell auf diese angewandt. Die nicht sensitiven Parameter wurden aus den vorhergehenden Modellläufen bestimmt und unverändert übernommen. Die sensitivsten Parameterwerte α , k_1 , k_2 , $perc$, CC , FC , und β wurden durch die Optimierungsroutine

identifiziert, wobei FC , β , k_1 , k_2 und $perc$ in Abhängigkeit vom Bodentyp und CC und α in Abhängigkeit von der Landnutzung bestimmt wurden. Für die Parameterschätzung der Transferfunktion wurden sinnvolle Grenzwerte für den Optimierungsalgorithmus eingeführt. Ein kontinuierlicher Modelllauf wurde simuliert und das Modell für die Zeit von 1983–1988 kalibriert.

Nach dem ersten Optimierungslauf wurden einige interessante Modellergebnisse festgestellt. Obwohl die Niedrigwasserabflüsse und kleine Scheitelabflüsse sehr gut abgebildet wurden, wurden viele hohe Scheitelabflüsse unterschätzt. Dieses Verhalten trat gewöhnlich im Winter auf

und daher wurde der Schneeakkumulation und der Schneeschmelzroutine eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet. Eine Erhöhung des Grad-Tag-Faktors führte nicht zu einer gleichmäßigen Verbesserung der Modellgüte. Statt dessen wurde eine schnellere Schneeschmelze in manchen Fällen registriert. Das war vor allem der Fall, wenn wenig oder kein Niederschlag vorhanden war. Dieses Verhalten deutete darauf hin, dass eine Beziehung zwischen der Höhe des Niederschlages und der Menge der Schneeschmelze existieren muss. Da der Grad-Tag-Faktor für eine gegebene

Landnutzung konstant ist, wird der Effekt eines höheren Niederschlages auf die Schneeschmelzmenge nicht berücksichtigt. Dieser Faktor wurde mit Hilfe einer Linearfunktion der Niederschlagsmenge modifiziert, um die erhöhte Schneeschmelzmenge modellieren zu können (siehe Kap. 4.2.1.1).

Die Modifikation führte zu einer spürbaren Verbesserung der Simulation der Scheitelabflüsse im Spätwinter. Nach der Modifikation und einer erneuten Parameteroptimierung wurde die Gesamtmodellgüte als annehmbar bewertet. Tab. 6.5

Tab. 6.5 Zusammenfassung der Modellgüte für die zur Kalibrierung verwendeten Einzugsgebiete

Gewässer	Pegel	Nash-Sutcliffe-Wert	Scheitelfehler [–]
Lahn	Marburg	0,8723	0,0172
Lahn	Kalkofen	0,9260	0,0502
Main	Würzburg	0,8858	–0,0398
Main	Wolfsmünster (Fränkische Saale)	0,9095	0,0012
Main	Waldenhausen (Tauber)	0,8668	–0,1124
Lippe	Schermbeck	0,9433	–0,0429
Neckar	Plochingen	0,9106	–0,1671
Neckar	Stein (Kocher)	0,9143	0,0045
Neckar	Rockenau	0,9257	0,0314

fasst die Werte des Nash-Sutcliffe-Gütekoeffizienten (siehe Gleichung 4.15) und die Scheitelfehler (siehe Gleichung 4.18) an den Pegeln, die für die Kalibrierung genutzt wurden, zusammen.

Einen Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für ausgewählte Pegel ermöglicht Abb. 6.10.

Abb. 6.10 a zeigt eine simulierte Ganglinie für ein Hochwasserereignis auf Grund eines Starkniederschlages, während in der Abb. 6.10 b das Hochwasser hauptsächlich das Ergebnis von Schneeschmelze ist.

Um den Regionalisierungsansatz und die Gesamtmodellgüte des kalibrierten Modells zu validieren, wurde das Modell auf das gesamte Untersuchungsgebiet mit den Parametern der Transferfunktion aus der Kalibrierung angewendet.

Dieser Modelllauf wurde für eine erweiterte Zeitreihe durchgeführt, damit mehr Hochwasserereignisse für die Validierung des Modells berücksichtigt werden konnten. Als Beispiel zeigt Abb. 6.11 die Modellanpassung für ein Hochwasserereignis an der Sieg. Zusammenfassend wird in Tab. 6.6 die Güte der Modellanpassung über das Nash-Sutcliffe-Kriterium für ausgewählte Pegel aufgelistet.

Wie man aus der Tab. 6.6 erkennt, werden die Scheitelabflüsse ausschließlich unterschätzt. Das geschieht gewöhnlich für größere Scheitelabflüsse. Verschiedene Alternativmaßnahmen wurden versucht, um die Schätzung der Spitzen zu verbessern. Eine dieser Maßnahmen war die Erhöhung des Niederschlages um einen gewissen Prozentsatz, um den möglichen Messfehler der Nie-

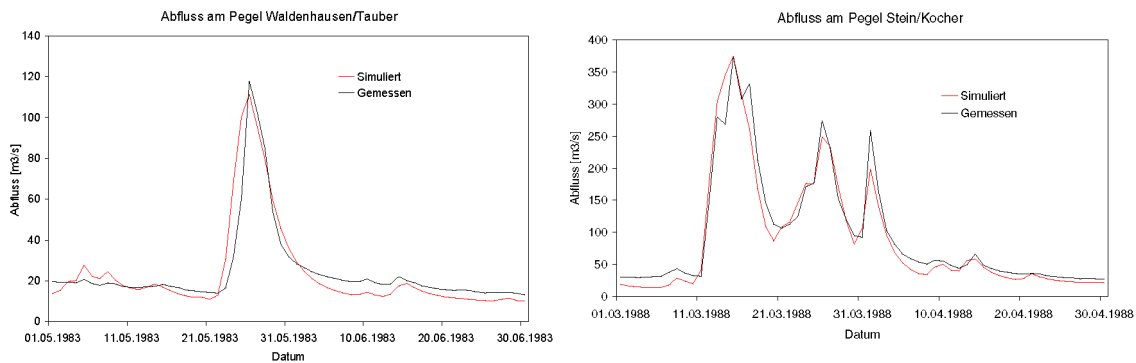


Abb. 6.10 Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für ausgewählte Pegel (Kalibrierung)

Tab. 6.6 Zusammenfassung der Modellgüteparameter für die Einzugsgebiete, die für die Validierung des Regionalisierungsansatzes verwendet wurden

Gewässer	Pegel	Nash-Sutcliffe-Wert	Scheitelfehler [–]
Nahe	Grolsheim	0,8710	–0,1930
Ruhr	Hattingen	0,8589	–0,0686
Sieg	Menden	0,9185	–0,1537
Mosel	Kordel (Kyll)	0,8672	–0,0932
Mosel	Platten (Lieser)	0,8841	–0,1439

derschlagsschreiber zu kompensieren. Da die Unterschätzung des Scheitelabflusses nicht für alle Ereignisse erfolgte, führte dieses zu einer Überschätzung einiger wichtiger Hochwasserscheitel, die zuvor gut geschätzt worden waren. Ein Doppellauf des Modells mit zwei verschiedenen Sets von regionalen Parametern für Niedrigwasser- und Hochwasserabflüsse wurde ebenfalls versucht, um einen schnellen Ausfluss während des Hochwasserereignisses zu ermöglichen. Das Ergebnis war, dass das verfügbare Wasser nicht ausreichte, um den Spitzenabfluss zu treffen. Die erforderliche Verbesserung konnte daher nicht in allen Fällen erreicht werden.

6.4.2 Einfluss der Urbanisierung bis zum Jahre 2010

Aufgrund des Zuwachses der Siedlungsflächen (siehe Tab. 5.2) wurde kein nennenswerter

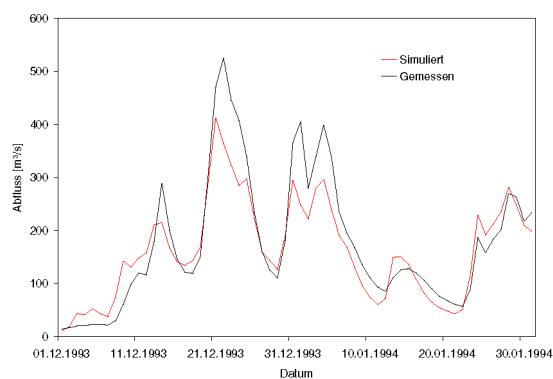


Abb. 6.11 Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss am Pegel Menden (Sieg) für ein ausgewähltes Hochwasserereignis

Anstieg im Scheitelabfluss simuliert. Besonders die Winterereignisse wurden nicht beeinflusst. Es wurde allerdings ein geringer Anstieg in den

Sommerscheiteln modelliert. Das kann zum Teil darauf zurückgeführt werden, dass im Sommer die potentielle Evapotranspiration auf landwirtschaftlichen Flächen etwas höher als auf Siedlungsflächen ist und daher die Änderung von Land- in Stadtflächen zu einer leichten Erhöhung des Abflusses führt. Außerdem werden Hochwasserereignisse im Sommer gewöhnlich von trockenen Bodenbedingungen begleitet und daher ist im Sommer ein höheres Potential für die Infiltration

als im Winter gegeben. Das trifft vor allem auf die frühe Phase des Hochwasserereignisses zu. Der Zuwachs von Siedlungsflächen auf Kosten der landwirtschaftlichen Flächen führt zu geringeren Infiltrationsmöglichkeiten und daher zu einem Anstieg des Abflusses. Die Abb. 6.12 a und b zeigen den Vergleich der simulierten Abflüsse für den Ist-Zustand und das Jahr 2010 bei einem Sommer- und einem Winterereignis.

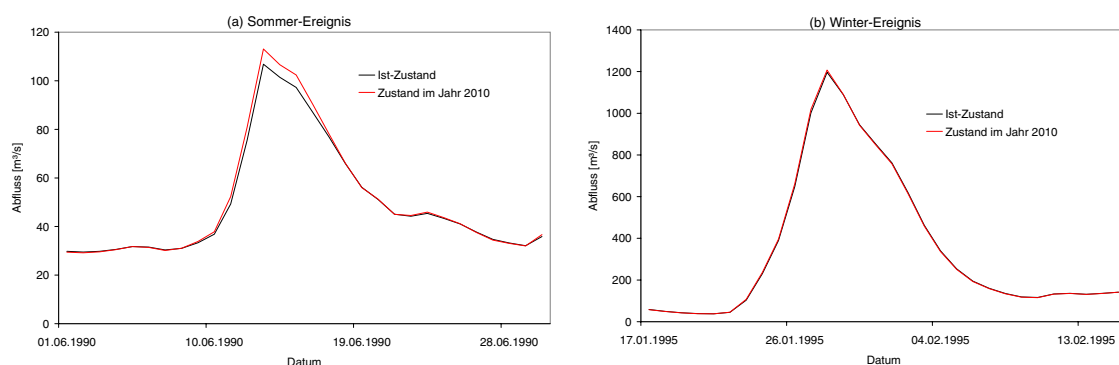


Abb. 6.12 Simulierte Ganglinien für den Ist-Zustand und das Jahr 2010 bei einem Sommer- und einem Winterereignis (Pegel Würzburg/Main)

6.4.3 Einfluss von Entsiegelungsmaßnahmen

Gemäß dem Aktionsplan Hochwasser soll eine Gesamtfläche von 2500 km² im gesamten Rheingebiet zwischen den Jahren 1998 und 2020 entsiegelt werden. Um den Einfluss dieser Strategie zu modellieren, wurden die Entsiegelungsflächen gleichmäßig verteilt über das Rheineinzugsgebiet angenommen. Die Entsiegelungsmaßnahmen betreffen 1,32% des Gesamtgebietes. Für jedes Teileinzugsgebiet wurde das Landnutzungsszenario für das Jahr 2010 benutzt und der Prozentsatz der versiegelten Flächen um jeweils 1,32% vermindert.

Die Entsiegelung resultierte in einer Abnahme der kleineren Sommerscheitel. Die Winterscheitel, die gewöhnlich hoch sind, blieben mehr oder weniger unbeeinflusst von dieser Maßnahme.

Eine ähnliche Erklärung wie in Kap. 6.4.2 trifft hier ebenfalls zu. Da die Bodenvorfeuchte für ein Winterereignis in der Regel hoch ist, ist der Einfluss der Bodenversiegelung gering, solange die Versiegelung keine Extremwerte annimmt. Auf der anderen Seite treffen die Sommerereignisse normalerweise auf trockene Bodenfeuchtebedingungen und die Infiltration spielt dann eine wichtige Rolle bei der Abflussbildung. Daher würde die Bodenversiegelung zu einer spürbaren Verminderung der Infiltrationsmenge führen und den Direktabfluss erhöhen. Abb. 6.13 zeigt den Vergleich von simulierten Ganglinien vor und nach den Entsiegelungsmaßnahmen für ein typisches Sommer- und Winterereignis im Lippeeinzugsgebiet. Beide Modellrechnungen wurden für das Landnutzungsszenario des Jahres 2010 durchgeführt. Vor der Entsiegelung betrug die versiegelte

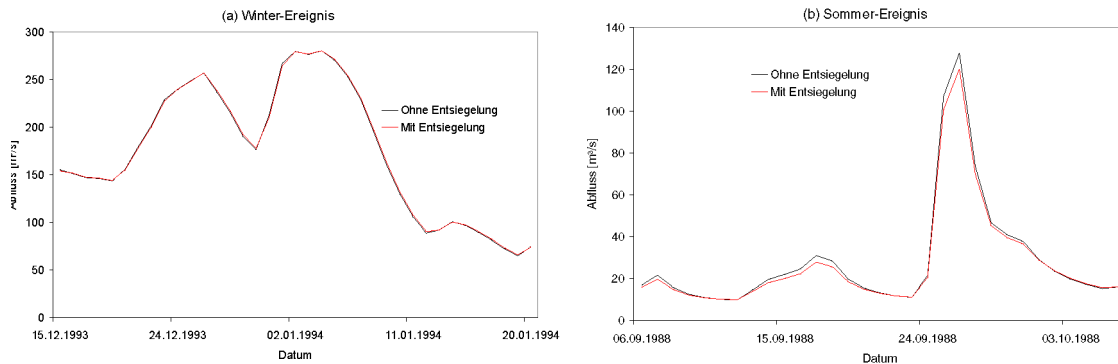


Abb. 6.13 Vergleich zwischen simulierten Ganglinien mit und ohne Entsigelungsmaßnahmen für ein Winter- und Sommerereignis am Pegel Schermbeck (Lippe)

Fläche 7,2% des Einzugsgebietes; nach der Entsigelung reduzierte sie sich auf 5,9%.

6.4.4 Einfluss der Verdoppelung der Siedlungsflächen

Um die Sensitivität des Modells auf die Siedlungsflächen abzuschätzen, wurde das Modell auf ein Landnutzungsszenario angewendet, das durch eine starke Besiedlung charakterisiert ist. Das Szenario wurde als Verdoppelung der Siedlungsflächen im Vergleich zum Ist-Zustand definiert. Für jeden Bereich der Teileinzugsgebiete wurde der Anteil der Waldflächen beibehalten, und die Zunahme der Siedlungsflächen erfolgte auf Kosten der landwirtschaftlichen Flächen.

Das Simulationsergebnis zeigte deutlich, dass ein solch starker Zuwachs der Besiedlung einen merklichen Effekt auf die Zunahme des Scheitelabflusses hat. Obwohl der Scheitelabfluss für alle Niederschlagsereignisse ansteigt, ist das Ausmaß der Steigerung im Sommer höher als im Winter. Die gleichen Gründe wie im Kap. 6.4.3 und Kap. 6.4.4 erklären auch hier den Unterschied. Da jedoch die zu Grunde gelegte Vergrößerung der Siedlungsflächen sehr bedeutend ist, erhöht sich sogar im Winter der Anstieg des Scheitels deutlich. Abb. 6.14 zeigt die Scheitelerhöhung aufgrund des Szenarios für das Siegeinzugsgebiet, in dem die Siedlungsflächen von 18,5% auf 37% angehoben wurden.

6.4.5 Einfluss von Aufforstungsmaßnahmen

Um die Sensitivität des Modells auf Aufforstungsmaßnahmen abzuschätzen, wurde ein Szenario angenommen, in dem das gesamte Einzugsgebiet von Wald bedeckt ist.

Dieses Szenario führt zu einer starken Reduktion des Scheitelabflusses während aller Jahreszeiten. Zusätzlich ist das Wasservolumen, das zum Abfluss gelangt, bis zu 7% kleiner als für den Ist-Zustand. Eine Reihe von Gründen erklären dieses Phänomen:

- (1) Versiegelte Flächen, von denen schneller Oberflächenabfluss generiert wird, sind nicht vorhanden. Das trägt deutlich zu einer Verminderung der Scheitelabflüsse aus einem Starkregenereignis oder Schneeschmelze bei. Konsequenterweise wird die Tiefenversickerung zunehmen und daher ein Anstieg im Basisabfluss nach dem Niederschlagsereignis auftreten.
- (2) Der Interzeptionsspeicher in Waldflächen ist viel größer als bei anderen Landnutzungen. Er variiert von 2,7 mm im Winter bis zu 4,1 mm im Sommer, während für landwirtschaftliche Flächen die Interzeption zwischen 0,5 mm und 1,6 mm schwankt. Das von den Blättern eingeschlossene Wasser wird durch Evaporation entleert und erreicht daher nicht den Bo-

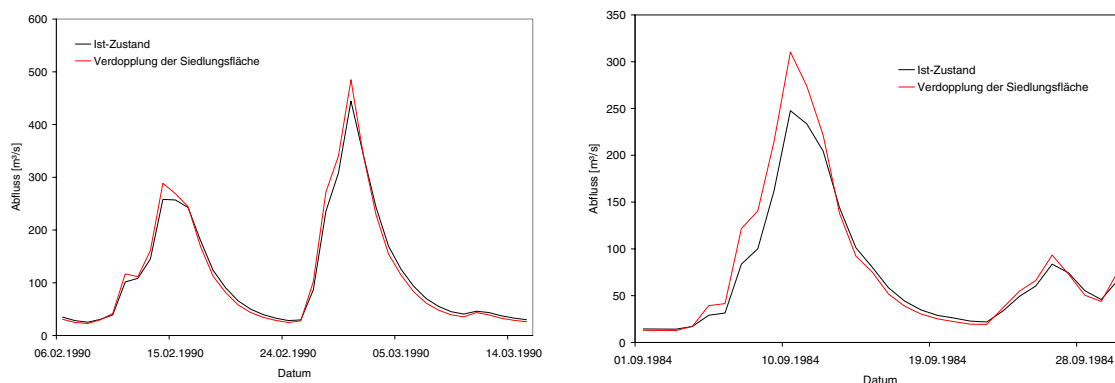


Abb. 6.14 Vergleich zwischen simulierten Ganglinien mit und ohne intensive Besiedlung am Pegel Menden (Sieg)

den. Das vermindert das für den Abfluss zur Verfügung stehende Wasservolumen.

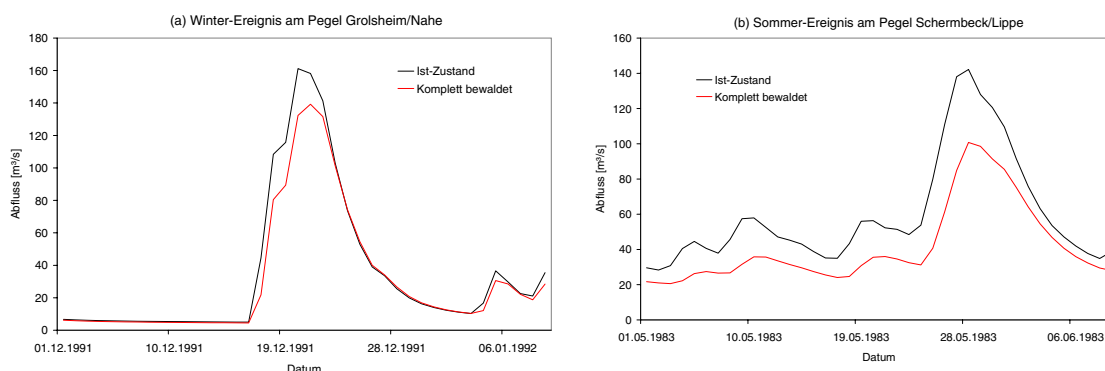


Abb. 6.15 Einfluss einer vollständigen Bewaldung auf den Abfluss für ein typisches Sommer- und Winterereignis in zwei verschiedenen Einzugsgebieten

(3) Die höhere potenzielle Evapotranspiration in Wäldern führt ebenfalls zu einer Reduktion des Abflussvolumens. Diese tritt vor allem im Sommer auf.

Abb. 6.15 zeigt den Einfluss einer vollständigen Bewaldung für ein typisches Sommer- und Winterereignis in zwei Einzugsgebieten, die durch verschiedene Landnutzungen charakterisiert sind.

Das Nahegebiet ist gekennzeichnet durch eine vorherrschende Waldnutzung mit einer Waldfläche von 48% des Einzugsgebietes. Die Siedlungsflächen machen 11,6% des Einzugsgebietes aus. Obwohl der Einfluss der Verdunstung für ein Winterereignis vernachlässigbar ist, hat die Ab-

wesenheit des schnellen Oberflächenabflusses der Siedlungsflächen zusammen mit einem höheren Interzeptionsspeicher zu einer Abminderung des Scheitels geführt. Im Gegensatz hierzu ist das Lippeeinzugsgebiet vorwiegend landwirtschaftlich geprägt. Wald und Siedlungsflächen bedecken 21,5% bzw. 18% des Einzugsgebietes. Weil in diesem Fall die Aufforstung einen hohen Prozentsatz ausmacht, ist der Einfluss des Waldes wesentlich höher. Die Auswirkung des Fehlens des Oberflächenabflusses aus den versiegelten Flächen, des höheren Interzeptionsspeichers und der Evapotranspiration im Sommer manifestiert sich in Abb. 6.15 b, in welcher die Ganglinie für

das Waldszenario immer unter der des Ist-Zustandes liegt.

6.4.6 Antwort des Gebietes auf ein meteorologisches Extremereignis

Um den Einfluss einer Klimaänderung auf den Abfluss zu bestimmen, wurde ein Szenario generiert, in dem die Höhe des Niederschlages für ein ausgewähltes Ereignis um 20% angehoben und zusätzlich eine Schneedecke mit 20 mm Wasseräquivalent unmittelbar vor dem Niederschlagsereignis aufgebracht wurde.

Abb. 6.16 zeigt die Ganglinien, die von dem Modell für dieses Extremereignis unter Annahme verschiedener Landnutzungen (Ist-Zustand und völlige Bewaldung) in zwei Einzugsgebieten mit

unterschiedlichen Landnutzungsstrukturen simuliert wurden. Die Abminderung des Scheitelabflusses variiert aufgrund der Landnutzungsänderung in Abhängigkeit des ursprünglichen Waldanteils in den Einzugsgebieten deutlich. Eine vollständige Bewaldung verursacht dabei im Vergleich zum Ist-Zustand der Landnutzung deutlich geringere Hochwasserabflüsse. Eine klare Struktur im Anstieg des Scheitelabflusses infolge des zusätzlichen Niederschlages und der Schneeschmelze kann man allerdings nicht erkennen. Das liegt darin begründet, dass die Abflussbildung von der Bodenvorfeuchte, der aktuellen Höhe des Niederschlages und der durchschnittlichen Lufttemperatur, die die Menge der Schneeschmelze beeinflusst, abhängt. Diese Faktoren können von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet variieren.

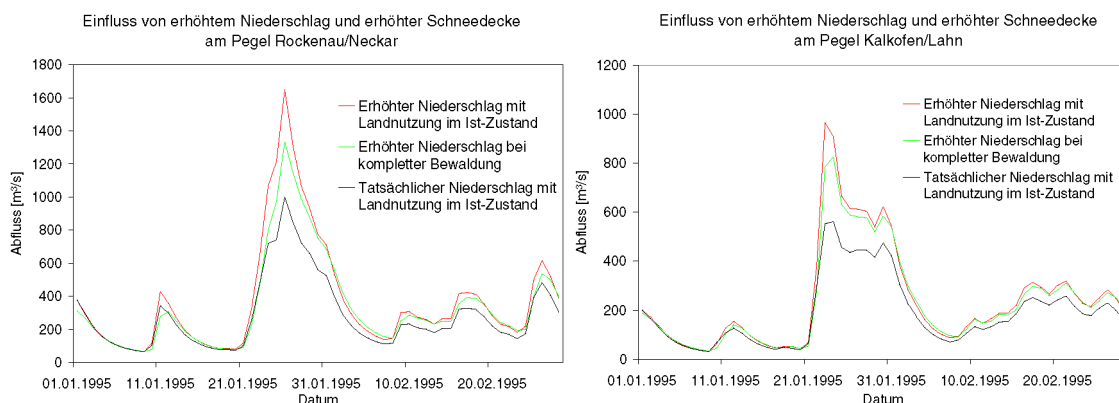


Abb. 6.16 Auswirkungen des meteorologischen Extremszenarios auf den Hochwasserabfluss

6.5 AUSWIRKUNGEN VON LANDNUTZUNGSÄNDERUNGEN UND RETENTIONSMASSNAHMEN AUF DEN WELLENABLAUF

Wirkungsanalysen von Maßnahmen zur Minderung von Hochwassern erfordern unterschiedliche Werkzeuge. Untersuchungen von Einflüssen, die von Änderungen in den Einzugsgebieten ausgehen, sind nicht ohne Niederschlag-Abfluss-Modellierungen möglich.

Auswirkungen von Maßnahmen an und in den Gewässern selbst können nur aus dem Einsatz

von Wellenablaufmodellen quantifiziert werden. Ebenso lässt sich das Zusammenspiel einzelner Teileinzugsgebiete und darin wirkender Einflüsse nur durch Wellenablaufmodelle in Einzelheiten sichtbar machen.

Im Rahmen des hier diskutierten Projektes soll der Einsatz von Wellenablaufmodellen (siehe Kap. 4.3) in Neckar, Main, Saar, Mosel und

Rhein sowohl Aussagen zur Auswirkung flächenhafter wie auch gewässerbezogener Veränderungen liefern. Zur Erreichung dieses Ziels wurden Modellereignisse mit unterschiedlichen Bedingungen im Einzugsgebiet modifiziert und mit Retentionsmaßnahmen am Rhein kombiniert. Durch die Betrachtung der Rheinstrecke erst ab Maxau reduzieren sich allerdings die zu berücksichtigenden Retentionsmaßnahmen auf 79 Mio. m³ am nördlichen Oberrhein und auf 65 Mio. m³ am deutschen Niederrhein (Tab. 5.4). Circa 210 Mio.

m³ Volumen, die südlich von Maxau liegen bzw. vorgesehen sind, bleiben bei den Szenarien-Rechnungen unberücksichtigt. Umfangreiches Material aus den Untersuchungen der deutsch-französischen *Arbeitsgruppe Manöver der Ständigen Kommission Oberrhein* sowie spezieller Berechnungen der BfG lässt allerdings Abschätzungen der Fernwirkungen auch dieser Maßnahmen zu.

Als Ist- bzw. Bezugszustand für die Bewertung der Auswirkungen von Einflüssen auf die

Tab. 6.7 Übersicht über die für das Gesamtgebiet (Makroskala) simulierten Szenarien

Meteorologische Randbedingungen	Landnutzungsszenarien									
	IST92		LN1		LN2		LN100		LNW	
	oR	mR	oR	mR	oR	mR	oR	mR	oR	mR
1983	x	–	x	–	x	–	x	–	x	–
1988	x	–	x	–	x	–	x	–	x	–
1993	x	–	x	–	x	–	x	–	x	–
1995	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–
1995+	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–
1995++	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

oR: ohne Retention / mR: mit Retention im und am Rhein
x: berechnet / –: nicht berechnet

IST92: Ist-Zustand im Jahr 1992 gemäß der KHR-Daten
LN1: Urbanisierung nach BBR (bezogen auf das Jahr 2010)
LN2: wie LN1 und Entsiegelung gemäß Aktionsplan der IKSR (bez. auf 2020)
LN100: IST92 + 100 % zusätzlicher Versiegelung (bez. auf 1992)
LNW: Alle Landflächen werden als bewaldet angenommen

Für die Ereignisse ohne Pluszeichen wurden die historischen Niederschläge (Menge und räumliche Verteilung) angenommen
Für + wurden die historischen Niederschläge um 20% erhöht
Für ++ wurde zusätzlich zu + noch ein flächendeckendes Schneeequivalent von 20 mm angesetzt

Einzugsgebiete und die Gewässer wurde einvernehmlich das Jahr 1992 (IST 92) festgelegt. Den Ergebnissen der Wellenablaufberechnungen im IST 92 wurden die Ergebnisse zweier möglicher Landnutzungszustände (LN1, LN2) und von zwei fiktiven Extremzuständen (LN100, LNW) gegenübergestellt und ergänzend die vorhandenen und geplanten Retentionsmaßnahmen einbezogen. Die verwendeten Modellereignisse M83, M88,

M93, M95 orientieren sich an historischen Hochwassern (1983/1988/1993/1995). Dabei wird die räumliche Verteilung der Überregnung zunächst entsprechend der historischen Bedingungen angenommen. Zusätzlich wurde das größte der vier Ereignisse (Hochwasser 1995) durch Erhöhung der historischen Niederschläge (M95+) und darüber hinaus durch Annahme einer flächendeckenden Schneedecke (M95++) in den Bereich einer

mehrhundertjährigen Hochwasserwelle vergrößert. In *Tab. 6.7* sind die untersuchten Szenarien zusammengestellt und erläutert. In *Tab. 5.3* sind die mittleren Flächenanteile der Landnutzung für die verschiedenen Szenarien zusammengestellt.

6.5.1 Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Abflüsse im Rhein

Bei den vergleichenden Betrachtungen der Ganglinien der verschiedenen Szenarien ergibt sich als Regelfall, dass sich sowohl die Abflussvergrößerungen bei Versiegelungszunahme wie auch die Abflussverringerungen bei Entsiegelung/Bewaldung im ansteigenden Ast der Hochwasserereignisse vollziehen und die Maximalwirkungen deutlich vor den Wellenscheiteln eintreten. Da die zur Diskussion gestellten Maßnahmen hauptsächlich Abflussumverteilungen zur Folge haben, kann dies gelegentlich auch zur Effekturnkehr hinsichtlich der Scheitel führen. In den ablaufenden Wellenästen ist diese Umkehr zwangsläufig. Für die hier gewählten Modellhochwasser ergeben sich maximale Erhöhungen bei LN100 zwischen 200 und 300 m³/s in Worms bzw. 500 und 1000 m³/s in Lobith. Die Erhöhungen im Scheitel betragen dagegen nur 10 bis 20% dieser Werte. Lediglich M93/94 wird in Scheitelnähe betroffen, was in Worms dazu führt, dass im Scheitel Abflusssdifferenzen erreicht werden, die 50% des Maximaleffekts betragen. Die Beeinflussung durch Bewaldung hat eine Scheitelwirksamkeit zwischen 30 und 60% des Maximaleffekts, wiederum mit der Ausnahme des M93 mit 90% in Worms.

Die Scheitelerhöhungen an den ausgewählten Stationen infolge des Urbanisierungsszenarios gemäß BBR für 2010 (LN1) liegen zwischen 0 und 2 cm (bzw. 0–46 m³/s). Lediglich für M93/94 ergeben sich in Worms bzw. Kaub 5 bzw. 4 cm Erhöhung für LN1.

Mit den Maßnahmen nach IKSR bis 2020 (LN2) ergeben sich für M83 keine und für die 3 übrigen Modellereignisse nur teilweise Verbesserungen

(niedrigere Scheitelwerte) um 1 cm bis maximal 3 cm.

Das Szenario LN100 (die Verdoppelung der 1992 erfassten Versiegelung) zeigt für die Modellhochwasser M83, M88 und M95 Scheitelerhöhungen um ca. 5 cm (bzw. 100 m³/s). Für M93/94 ergeben sich dagegen drastische Vergrößerungen, die mit 32 cm (278 m³/s) in Worms das Maximum zeigen (23 cm (281 m³/s) in Kaub, 17 cm (290 m³/s) in Andernach, 15 cm (290 m³/s) in Köln und 8 cm (244 m³/s) in Lobith). Die 1993 extreme meteorologische Situation am Neckar und dessen Nebengewässern (HQ50 und größer) schlägt in Worms voll auf den Scheitel durch.

Die Annahme vollständig bewaldeter Landflächen (LNW) führt an allen Pegeln und für alle Modellereignisse zu deutlichen Scheitelsenkungen (größeres Volumen des Bodenspeichers zur Wasseraufnahme verfügbar; keine versiegelten Flächen vorhanden). Sie schwanken zwischen 40 und 60 cm (bzw. 400 und 1000 m³/s) für M83 und M88; zwischen 25 und 90 cm (bzw. 300 und 1800 m³/s) bei M95 und zwischen 50 und 145 cm (bzw. 900 und 2300 m³/s) bei M93/94. Dabei treten die Höchstwerte im Mittelrhein auf, während am Niederrhein (Lobith) eine erhebliche Verflachung eintritt.

Mit den extremen Modellereignissen M95+ und M95++ wurden Hochwasser erzeugt, deren Scheitelabflüsse ab dem Mittelrhein 300- bis 500 Jährlichkeiten erreichen. Hinsichtlich der Auswirkungen der Szenarien LN1, LN2 und LN100 liegen die Ergebnisse bei minimalen Werten (< 10 cm). Lediglich die Bewaldung zeigt deutliche Effekte. Insoweit entsprechen die Ergebnisse dieses hypothetischen meteorologischen Extremereignisses in der Tendenz denen für die Hochwasser geringerer Größenordnung. Beim Vergleich der Einzelergebnisse werden allerdings sehr interessante Unterschiede deutlich:

- (1) Die Zunahme der Niederschläge um 20 % (M95+) zeigt für den Prognosezustand 2010 (LN1) keine Änderungen in den Scheiteldifferenzen gegenüber M95; für 2020 mit geringe-

- ren Urbanisierungsanteilen nach IKSR (LN2) gilt das ebenfalls.
- (2) Die Verdoppelung der Versiegelung gegenüber dem Bezugsjahr 1992 (LN100) verliert bei höherer Überregnung an Bedeutung hinsichtlich der Scheitelerhöhung.
 - (3) Der Reduktionseffekt aus der Bewaldung (LNW) wird bei extremer Überregnung verringert, hier in etwa halbiert.
 - (4) Wird die erhöhte Überregnung noch durch Schneerücklagen verstärkt (M95++), so verstärken sich auch die Scheitelwirkungen.

Tab. 6.8 fasst die Scheitelveränderungen aufgrund der unterschiedlichen Landnutzung für alle Modellhochwasser zusammen.

Die Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf die Scheitelreduktionen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit Form und Fülle der Hochwasserwelle. Besitzt die Welle einen steilen Anstieg und ein relativ kleines Abflussvolumen, so wirken sich Landnutzungsszenarien wesentlich stärker aus als bei Wellen mit großer Fülle und geringem Gradienten im ansteigenden Ast. Diese Tatsache wird beim Vergleich der Hochwasser M93/94 und M95 für die Pegel Andernach und Lobith deutlich (siehe Abb. 6.17). Obwohl die Scheitel für den Zustand IST92 für beide Ereignisse annähernd gleich sind, sind die Scheitelreduktionen für das Szenario LNW bei M93/94 für Andernach um das 1,6fache und für Lobith um das 1,4fache höher als bei dem Ereignis M95 (Scheitelreduktion für Andernach 145 cm bzw 89 cm, für Lobith 84 cm bzw. 61 cm). Die sehr große Fülle der Moselwelle bei M95 trägt im wesentlichen dazu bei, dass die Retentionswirkung des Waldes schon vor Erreichen des Scheitels teilweise aufgebraucht ist.

Die beschriebenen Ergebnisse sind zu ergänzen um Erkenntnisse über die Veränderungen der Überschreitungsdauern bestimmter Schwellenwerte. Ein sinnvoller Schwellenwert ist der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ). Die in diesem Abflussbereich stattfindenden massiven Änderungen sind auch als Wellenvor- oder rückverlegungen bzw. Beschleunigungen oder Verlangsa-

mungen der aufsteigenden Welle deutbar. Dem stehen zwar in der ablaufenden Welle umgekehrte Wirkungen gegenüber, allerdings in der Regel in geringeren Größen.

Tab. 6.8 Scheitelveränderungen aufgrund unterschiedlicher Landnutzung [cm]

	M83	M88	M93	M95	M95 +	M95 ++
Worms						
D1	0	-1	-5	0	0	0
D2	0	0	-2	-1	0	-1
D3	-2	-3	-32	1	-1	-1
D4	38	38	51	23	14	23
Kaub						
D1	-1	-1	-4	-1	-1	-2
D2	-1	0	-2	-1	-1	-1
D3	-7	-3	-23	-7	-6	-9
D4	54	50	116	77	41	54
Andernach						
D1	-1	-1	-2	-1	-1	-1
D2	-1	0	-2	0	-1	-1
D3	-6	-4	-17	-7	-5	-6
D4	54	57	145	89	37	47
Köln						
D1	-1	-1	-1	-2	-1	-2
D2	-1	0	1	0	-1	-1
D3	-7	-4	-15	-9	-7	-9
D4	60	57	138	88	37	45
Lobith						
D1	-1	0	-1	-1	-1	-1
D2	-1	0	-1	-1	-1	-1
D3	-3	-2	-8	-5	-6	-8
D4	41	41	84	61	26	32

Negative Differenzen bedeuten eine Erhöhung, positive eine Erniedrigung gegenüber dem Ist-Zustand
D1 = IST92 - LN1
D2 = IST92 - LN2
D3 = IST92 - LN100
D4 = IST92 - LNW

Die Auswertungen zeigen, dass die Dauern der Überschreitung des Wasserstandes bei MHQ oder von MHQ + 1 m zwischen dem Grundzustand (Ist 92) und LN1 sowie LN2 nur um 10 Minuten bis zu einer Stunde variieren. Die Szenarien LN100 und LNW ergeben dagegen Unterschiede, die mehrere Stunden (LN100) bis zu einigen Ta-

gen (LNW) betragen können. Dies kann wirtschaftlich von hoher Bedeutung sein, wenn dadurch die Dauer von Pumpeinsätzen für Polderentwässerungen verkürzt/verlängert wird. Zudem hat es Einfluss auf die Durchfeuchtung, das heißt die Standfestigkeit der Deiche.

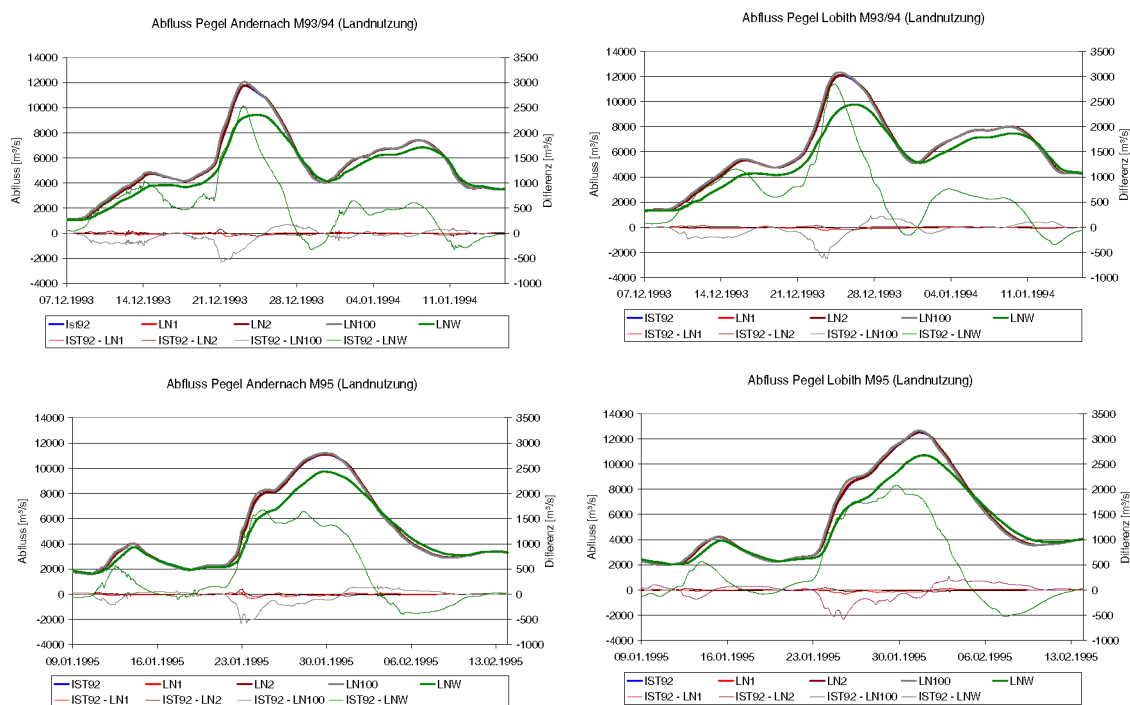


Abb. 6.17 Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Ganglinien am Pegel Andernach (links) bzw. Lobith (rechts) für die Modellhochwasser M93/94 und M95

6.5.2 Einfluss von Retentionsmaßnahmen auf die Abflüsse im Rhein

Die schon am Rhein vorhandenen bzw. noch geplanten Retentionsmaßnahmen haben das Ziel, sehr große Hochwasser (z.B. > 100–200jährlich am Oberrhein) in ihren Scheiteln zu beeinflussen. Gewählt für den Nachweis solcher Beeinflussungen wurden die drei Modellereignisse M95, M95+ und M95++ (mit maximalen Scheiteljährlichkeiten von HQ50, HQ400 und HQ500). Es hat

sich gezeigt, dass alle 3 Modellhochwasser zu wenig extreme Scheitelhöhen am Oberrhein aufweisen, um alle für sehr hohe Jährlichkeiten bemessenen Polder anspringen (M95) bzw. vollständig füllen (M95+, M 95++) zu lassen.

Modellhochwasser M95

Am Oberrhein reduzieren lediglich die Deichrückverlegungen die Hochwasserwelle im ansteigenden Ast um bis zu 15 m³/s (1 cm) am Pegel Mainz. Der Scheitel der Welle trifft am Pegel Mainz ca. eine 1/2 h später ein.

Am Niederrhein zeigen neben den Deichrückverlegungen alle Polder Wirkungen. Insgesamt wird in den Poldern zwischen Maxau und Lobith ein Volumen von 35 Mio m³ (32% des verfügbaren Retentionsvolumens) zurückgehalten. Die maximale Reduktion erreicht am Pegel Lobith 277 m³/s (10 cm), im Scheitel sind es 95 m³/s (3 cm). Der Scheitel trifft 5 Stunden später in Lobith ein.

In Rees kann durch den Einsatz der Retentionsmaßnahmen das Wasservolumen über MHQ um 12 Mio m³ reduziert werden, wobei sich die Überschreitungsdauer von MHQ durch den abfallenden Ast der Hochwasserwelle um eine Stunde verlängert.

Modellhochwasser M95+

Beim Modellhochwasser M95+ werden alle Polder am Niederrhein voll gefüllt, während das am Oberrhein nur teilweise erreicht wird.

Beim Vergleich der Scheiteldifferenzen (9 cm) und der maximalen Differenzen (10 cm) am Pegel Kaub wird deutlich, dass die Wirkungen sehr genau den Scheitel der Hochwasserwelle treffen. Dies lässt erkennen, dass alle Maßnahmen untereinander sehr gut abgestimmt sind, was in den ausgefeilten Einsatzkriterien für die Oberrheinmaßnahmen begründet ist. Alle Regelungsorgane werden erst ab einem festgelegten Abfluss akti-

viert. Bedingt durch die Konstruktion und späte Öffnung der Einlaufbauwerke ist durch den hohen Wasserstand im Rhein eine Druckhöhe vorhanden, die ein rasches Einströmen des Wassers ermöglicht. Des weiteren wirken die Maßnahmen so zusammen, dass sich ihre Wirkung aufsummiert und bei dem hier betrachteten Ereignis die Welle im Scheitel trifft. Die erreichte Reduzierung schlägt durch bis zum Pegel Lobith. Dort ist die Wirkung der Maßnahmen jedoch nicht auf den Wellenscheitel beschränkt. Sie setzt früher ein und hält über den Scheitel hinaus an.

Am Pegel Lobith beträgt die maximale Abflussreduzierung 300 m³/s (10 cm), die Scheitelreduzierung 101 m³/s (3 cm). Der Scheitel trifft ca. 1 h später ein. Insgesamt werden 83 Mio. m³ der Welle zurückgehalten.

Modellhochwasser M95++

Die maximale Abflussreduzierung am Pegel Lobith steigt auf 428 m³/s (15 cm). Die Scheiteldifferenz wird jedoch kleiner (93 m³/s bzw. 3 cm). Dies ist begründet durch das zu frühe Anspringen der Polder, die zur Scheitelzeit nur noch geringe Reserven haben. Der Scheitel trifft 2 h später ein. Es werden 88 Mio. m³ in den Poldern zurückgehalten. Die unterschiedlichen Wirkungen der Maßnahmen am Ober- und Niederrhein zeigen sich in den Ganglinien der *Abb. 6.18*.

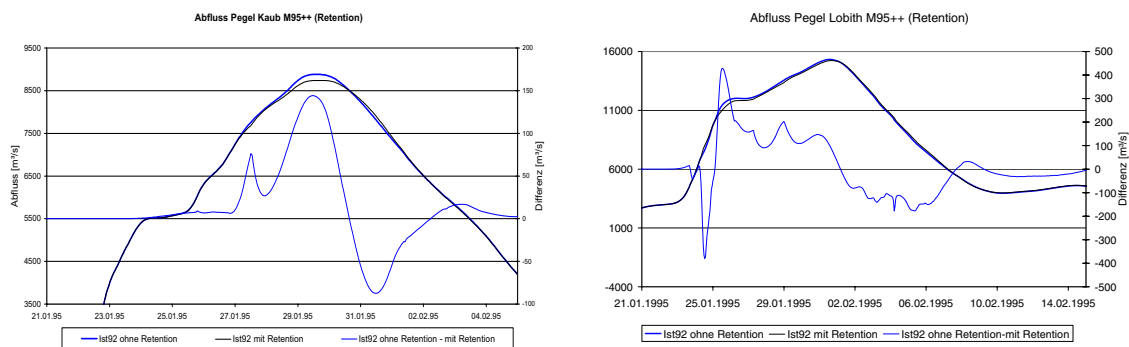


Abb. 6.18 Abflussreduktion M95++ an den Pegeln Kaub und Lobith

Tab. 6.9 fasst die Scheitelveränderungen infolge der Retentionsmaßnahmen am Rhein für die Mo-

dellhochwasser M95, M95+ und M95++ zusammen.

Das Untersuchungsgebiet für das LAHoR-Projekt beinhaltet nicht den Bereich oberhalb des Pegels Maxau. Dadurch sind auch alle Retentionsmaßnahmen am südlichen Oberrhein im Rahmen dieses Projektes nicht eingesetzt worden. Es

gibt jedoch Erkenntnisse aus anderen Untersuchungen, die eine Abschätzung der Wirkungen aus den weiteren Maßnahmen ermöglichen. Insgesamt handelt es sich um ein Volumen von 210

Tab. 6.9 Scheitelveränderungen (Reduktion in cm) aufgrund der Retentionsmaßnahmen

Pegel	Worms	Kaub	Andernach	Köln	Lobith
M95	0	2	1	1	3
M95+	10	9	6	6	3
M95++	16	11	8	6	3

Mio m³, verteilt auf Polder, Retentionswehre und den Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke.

Alle diese Maßnahmen dienen der Rücknahme der Hochwasserverschärfung aus dem Oberreinausbau mit Staustufen und werden dementsprechend in ihrem Einsatz gesteuert.

Randbedingungen und Technik der Retentionssteuerungen führen dazu, dass die ersten Maßnahmen etwa bei HQ10 vor Ort eingeleitet werden. Damit kann M95 keine Retention am südlichen Oberrhein auslösen. Bei größeren Hochwassern wie etwa M95+ und M95++ wären auch hier die Wellenscheitel gedämpft worden, wenn man den südlichen Oberrhein in die N-A-Modellierung einbezogen hätte.

Die erreichbaren Retentionseffekte für Rheinhochwasser sind direkt abhängig von der Genese der Ereignisse. Am größten sind die Wirkungen auf Hochwasser, die am Oberrhein entstehen. Werden Wellenscheitel am Oberrhein reduziert, so sind positive Wirkungen auch am Niederrhein nachweisbar. Durch die hydraulischen Vorgänge beim Wellenablauf werden die Wirkungen flacher aber auch über längere Zeit verteilt, so dass auch in Lobith noch die Wellenscheitel beeinflusst werden. Die Reduktionen können bei Extremhochwassern Werte von bis zu 400 bis 900 m³/s erreichen (LAMMERSEN et al. 1999). Diese Ergebnisse sind jedoch nicht durch eine besonders auf den Niederrhein ausgerichtete Steuerung der Retention am Oberrhein beeinflusst. Steuerungen

speziell im Hinblick auf den Niederrhein sind weder möglich (zu kurze Vorhersagezeiten) noch erlaubt (Volumen ist für den Schutz der Oberrheinebene vorzuhalten).

6.5.3 Einfluss der Landnutzung und der Retentionsmaßnahmen auf die Abflüsse im Rhein

Um die kombinierte Wirkung der unterschiedlichen Landnutzungen und Retentionsszenarien zu quantifizieren und mit den Einzelwirkungen vergleichen zu können, wurden die Retentionsmaßnahmen unter Verwendung der Modellhochwasser M95, M95+ und M95++ in Verbindung mit allen Landnutzungsszenarien eingesetzt.

In allen Fällen konnten die kombinierten Auswirkungen auf die Hochwasserscheitel durch einfache Addition der Differenzen, die jeweils einzeln durch die Landnutzungsänderungen und durch die Retentionsmaßnahmen hervorgerufen wurden, ermittelt werden. Diese Summenbildung ist allerdings nur möglich, weil die Landnutzungsänderungen LN1, LN2 und LN100 keine sehr großen Veränderungen von Form und Volumen der Hochwasserwellen bewirken, so dass die Retentionsmaßnahmen praktisch identisch reagieren. Die Abflussvergrößerungen durch LN100 werden weitgehend durch den Retentionseinsatz kompensiert.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und Retentionsmassnahmen auf den

Tab. 6.10 Scheitelveränderungen aufgrund des kombinierten Einflusses von unterschiedlicher Landnutzung und Retention [cm] an den großen Flüssen. Die Werte in Klammern beziehen sich auf die Einzelwirkungen Landnutzung (1. Zahl) und Retention (2. Zahl)

	M95	M95+	M95 ++
Worms			
D1	0 (0/0)	10 (0/10)	16 (0/16)
D2	0 (1/0)	9 (0/10)	16 (-1/17)
D3	0 (-1/1)	-10 (-1/-9)	15 (-1/16)
D4	23 (23/1)	-16 (-14/-1)	34 (23/11)
Kaub			
D1	1 (-1/2)	8 (-1/9)	9 (-2/11)
D2	1 (-1/2)	8 (-1/9)	9 (-1/11)
D3	-5 (-7/3)	3 (-6/8)	3 (-9/11)
D4	77 (77/0)	42 (41/1)	63 (54/10)
Andernach			
D1	0 (-1/1)	5 (-1/6)	6 (-1/8)
D2	1 (0/1)	6 (-1/6)	7 (-1/8)
D3	-5 (-7/2)	1 (-5/6)	2 (-6/8)
D4	89 (89/0)	38 (37/1)	54 (47/7)
Köln			
D1	0 (-2/1)	5 (-1/6)	4 (-2/6)
D2	1 (0/1)	5 (-1/6)	5 (-1/6)
D3	-8 (-9/2)	-1 (-7/6)	-3 (-9/7)
D4	88 (88/0)	38 (37/1)	51 (45/6)
Lobith			
D1	2 (-1/3)	2 (-1/3)	2 (-1/3)
D2	2 (-1/3)	3 (-1/3)	2 (-1/3)
D3	-1 (-5/3)	-2 (-6/3)	-5 (-8/3)
D4	62 (61/1)	27 (26/1)	35 (32/3)

Negative Differenzen bedeuten eine Erhöhung, positive eine Erniedrigung gegenüber dem Ist-Zustand
D1 = IST92 - LN1
D2 = IST92 - LN2
D3 = IST92 - LN100
D4 = IST92 - LNW

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE UNTERSCHIEDLICHEN MASSSTABSBEREICHE

Hochwasser und Überschwemmungen sind Naturereignisse, die sich aus meteorologischen, hydrologischen und gewässerhydraulischen Prozessen zusammensetzen. Die wichtigsten dieser Prozesse sind: Zuführung von Luftmassen mit hohem Wassergehalt, sehr starke Niederschläge, Abflussentstehung im Einzugsgebiet, Wellenablauf im Fluss und – gegebenenfalls – Überschwemmung der Vorländer und flussnahen Bereiche. Jedem dieser Prozesse lassen sich sowohl typische Wissenschaftsdisziplinen als auch typische räumliche Größenordnungen zuordnen, bei-

spielsweise nach dem in *Tab. 7.1* dargestellten Schema.

Es wird deutlich, dass es sich bei der Analyse der Hochwasserentstehung einerseits um eine interdisziplinäre und andererseits um eine skalen-spezifische und skalenübergreifende Aufgabe handelt. Auch Fragestellungen zum Einfluss von Umweltänderungen (z.B. Änderung der Landnutzung in einem Einzugsgebiet; Ausbaumaßnahmen an den Flüssen; Klimaänderungen) sind entsprechend interdisziplinär und skalen-spezifisch zu behandeln. Eine solche Untersuchung erfordert den Einsatz von geeigneten Modellen, wel-

Tab. 7.1 Prozesse der Hochwasserentstehung, zugehörige Wissenschaftsdisziplinen und charakteristische räumliche Größenbereiche der Prozesse

Prozess der Hochwassergenese	Zugehörige Wissenschaftsdisziplin	Charakteristischer räumlicher Größenbereich
Zuführung von Luftmassen mit hohem Wassergehalt	Klimatologie und Meteorologie	100 000 bis mehrere Mio. km ² (für zonale Wetterlagen) 100 bis mehrere 10 000 km ² (für konvektiv geprägte Strömungen)
Starke Niederschläge	(Hydro-)Meteorologie	100 km ² bis zu ca. 100 000 km ² (= untere Mesoskala bis Makroskala)
Abflussentstehung und -konzentration im Einzugsgebiet	Hydrologie	Feldskala bis Mesoskala
Wellenablauf im Fluss	Gewässerhydraulik	Mesoskala bis Makroskala
Überschwemmung der Vorländer und flussnahen Bereiche	Gewässerhydraulik	Gebiete entlang des Flusses (entspricht in etwa der Mesoskala)

che auf den jeweiligen Prozess und die spezifische Skala zugeschnitten sein müssen.

In der hier vorgelegten Untersuchung wurde der Einfluss von Landnutzungsänderungen und Ausbaumaßnahmen am Gewässer für das Rheingebiet nach dem zuvor genannten Ansatz untersucht, einschließlich des möglichen Einflusses von Klimaänderungen auf die Abflussentstehung in der Mesoskala, ohne allerdings deren Auswirkungen für das Gesamtgebiet zu extrapolieren. Somit lag der Schwerpunkt des Projektziels auf einer wissenschaftlich fundierten Abschätzung des Einflusses von Landnutzungsänderungen und von Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Einzugsgebiet des Rheins.

Die Studie beinhaltet die Maßstabsbereiche:

- (1) Untere Mesoskala:
Detaillierte Modellierung der Prozesse der Abflussentstehung bei Starkniederschlagsperioden: Wie viel Wasser erreicht das Flusssystem in ausgesuchten Einzugsgebieten?
- (2) Untere bis obere Mesoskala:
Vereinfachte Modellierung der Abflussentstehung und der Abflusskonzentration: Wie viel Wasser und mit welchem Konzentrationsverhalten fließt dieses dem Flusssystem in allen betrachteten Teileinzugsgebieten des Rheins zu?
- (3) Makroskala (Gesamtgebiet des Rheins zwischen Maxau und Lobith):
Verknüpfen der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten und Modellierung des Wellenablaufs: Wie ist das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen im Rhein und seinen großen Nebenflüssen und welchen Einfluss darauf haben Ausbaumaßnahmen im und am Fluss?

Aus der o.g. Auflistung der Fragestellungen und Maßstabsbereiche der Studie geht hervor, dass diese Untersuchung weder spezifische meteorologische oder klimatologische Schwerpunkte noch detaillierte Untersuchungen zu Überschwemmungen enthält.

Die Schlussfolgerungen für die einzelnen Prozesse bzw. Teilaspekte der Hochwassergenese werden nachfolgend zusammengefasst.

7.1.1 Untere Mesoskala

Es hat sich gezeigt, dass die Mesoskala (Einzugsgebietsfläche ca. 100 km² bis 1000 km²) der geeignete Größenbereich zur Modellierung des Landnutzungseinflusses auf die Abflussentstehung bei Hochwasser darstellt. Voraussetzung ist, dass ein geeignetes prozess-orientiertes hydrologisches Modell eingesetzt wird, d.h. das Modell muss die wesentlichen Abflussbildungsprozesse differenzieren und der Einfluss der Landnutzung muss parametrisierbar sein.

Aus den Ergebnissen dieses Teils lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- (1) Der Einfluss der Landoberfläche ist für konvektive Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten größer als für zyklonale Niederschlagsereignisse mit meist deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten. Je größer das Niederschlagsvolumen, desto geringer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung. In großen Gebieten sind jedoch nur zyklonale Niederschläge relevant für die Hochwasserentstehung.
- (2) Eine Ausweitung von Siedlungsflächen um 50% kann in kleinen Gebieten (bis zu ca. 1000 km²) bei Jährlichkeiten der Hochwasserereignisse von zwei bis acht Jahren die Scheitelabflüsse
 - (a) zwischen 0 und 4% bei zyklonalen und
 - (b) bis zu 30% bei konvektiven Niederschlagsereignissen ansteigen lassen.
- (3) Für die dezentrale Versickerung ergeben sich Abflussminderungen, welche in ähnlichen Größenordnungen liegen wie die Abflusserhöhungen durch verstärkte Versiegelung. Bei einer Entsiegelung von 50% der momentan versiegelten Fläche schwankt die Abflussscheitelminderung für die betrachteten Ereignisse zwischen 15–20% für konvektive und 0–8% für zyklonale Niederschläge.
- (4) Je trockener das Gebiet zu Beginn des Ereignisses, desto größer ist der Einfluss der Infiltrationsbedingungen (und damit der Landober-

fläche) auf die Hochwasserentstehung. Da dann das potentielle Speichervermögen des Bodens für Niederschlag besonders groß ist, spielt die Verdunstung über einen längeren Zeitraum vor dem eigentlichen Hochwasserereignis eine Rolle. Vegetationsarten mit hohen Verdunstungsraten (z.B. Wald) fördern eine Trocknung des Bodens.

- (5) Liegt die Infiltrationskapazität in der Größenordnung der Niederschlagsintensität, so ist der Einfluss der Landoberfläche für die Hochwasserentstehung am größten, da dann kleine Änderungen der Infiltrationskapazität zu relativ großen Änderungen des Infiltrationsüberschusses führen.
- (6) Stellt die Durchlässigkeit der Bodenoberfläche keine Begrenzung für die Infiltration dar, so ist der Gesteinsuntergrund der entscheidende Faktor für die Hochwasserentstehung. Mögliche Landnutzungsänderungen haben dann nur einen sehr geringen Einfluss auf die Abflussbildung.

7.1.2 Mittlere bis obere Mesoskala

Die Untersuchungen zur mittleren bis oberen Mesoskala (von ca. 500 bis 5000 km²) ergeben:

- (1) Entsiegelung wirkt auf kleine Scheitel von Sommerhochwassern deutlich dämpfend. Das liegt vor allem an den trockenen und daher wasseraufnehmenden Böden. Scheitel von Winterhochwassern werden wegen der zu Beginn der Niederschläge in der Regel gegebenen hohen Bodenfeuchte durch Entsiegelungen kaum bis nicht beeinflusst.
- (2) Versiegelungseffekte sind im Umkehrschluss bei Sommerhochwassern klar in Scheitelerhöhungen erkennbar, bei Winterhochwassern dagegen nur marginal wirksam. Dies zeigen auch die Modellierungen mit Verdopplung der derzeitigen Versiegelung.
- (3) Szenarien extremer Aufforstungen (100 % Wald) verursachen Abflussverringerungen bei allen Hochwassern. Dies ist durch die Tatsache begründet, dass für diese Szenarien keine versiegelten Flächen existieren und durch Bewaldung die Infiltration verstärkt wird. Es führt zu erhöhten Basisabflüssen und durch

verstärkte Interzeption und Evapotranspiration zu einer Verminderung der den Boden erreichenden Niederschläge. Die Effekte sind im Sommer stärker als im Winter.

- (4) Deutliche Erhöhungen der aktuellen Niederschläge und zusätzliche Schneeschmelze führen zu Hochwasserscheitelerhöhungen, die allerdings nicht systematisierbar sind. Dies liegt an den vermischten Einflüssen der Bodenfeuchte, den für die Schmelzvorgänge verantwortlichen Temperaturen und den aktuellen Niederschlägen, die je nach Einzugsgebiet variieren.

7.1.3 Makroskala

Die Verknüpfung der Gebietsabflüsse über Wellenablaufmodelle der wesentlichen Gewässer des Rheingebiets nördlich von Maxau zeigt:

- (1) Im Regelfall vollziehen sich sowohl die Abflussvergrößerungen bei Versiegelungszunahme wie auch die Abflussverringerungen bei Entsiegelung/Bewaldung im Anstieg der Rheinhochwasser und die Maximalwirkungen treten deutlich vor den Wellenscheiteln ein.
- (2) Bei den realistischen Landnutzungsänderungen sind geringe Effekte auf den Hochwasserscheitel in der Größenordnung von 1 cm bis 5 cm nachweisbar.
- (3) Aus dem Extremszenario mit Annahme völliger Bewaldung des Rheingebiets (Steigerung von derzeit 30% auf 100%) ergibt sich für die eingesetzten Modellereignisse im Hochwasseranstieg eine maximale Wellenreduktion in Lobith um 1 m. Der Scheitel wird im Mittel um ca. ½ m reduziert. Dieser starke Einfluss ist etwa jeweils zur Hälfte auf die erhöhte Verdunstungsleistung des Waldes (Austrocknung des Bodenspeichers) und auf die Nichtexistenz von Urbanflächen zurückzuführen. Daraus lässt sich für eine realistische Bewaldungszunahme (z.B. 30% auf 40%) allerdings keine Aussage abschätzen
- (4) Der Reduktionseffekt aus der Bewaldung wird bei extremen Niederschlägen verringert.
- (5) Die Versiegelung verliert für die Abflussbildung bei höheren Niederschlägen an Bedeutung.

- (6) Werden Retentionsmaßnahmen am Ober- und Niederrhein eingesetzt, so ergeben sich unter den gegebenen Randbedingungen positive Wirkungen (auch Scheitelminderungen) längs des Rheins bis nach Lobith. Diese Scheitelminderungen liegen für die simulierten Ereignisse und Gebietszustände am Oberrhein bei Worms zwischen 0 und 16 cm, für den Mittelrhein bei bis zu 11 cm und im Niederrhein noch bei zwischen 1 und 6cm.
- (7) Die Untersuchungen hinsichtlich der Retentionsmaßnahmen haben gezeigt, dass abgestimmte Steuerungen von Rückhaltungen (z.B. am Oberrhein) Dämpfungseffekte auf die Hochwasserscheitel erheblich steigern können.

7.2 EMPFEHLUNGEN

Auf Basis der Ergebnisse des LAHoR-Projekts ist im Sinne von Empfehlungen festzustellen:

- (1) Das hier vorgestellte und in dieser Form erstmals eingesetzte Modellsystem ist mit seinem interdisziplinären und skalen-spezifischen Ansatz gut geeignet zur Durchführung von Untersuchungen bezüglich der Wirkungen von Landnutzungsänderungen und Ausbaumaßnahmen auf die Hochwassersituation im Rheingebiet.
- (2) Landnutzungsänderungen haben vor allem Auswirkungen auf die Entstehung kleinräumiger Hochwasser. Änderungen denkbarer Größenordnungen im gesamten Rheingebiet zeigen großräumig kaum Effekte. Von infiltrationsfördernden Maßnahmen der Landnutzung dürfen daher keine bedeutenden Minderungen des Hochwasserrisikos am Rhein und seinen großen Nebenflüssen erwartet werden. Diese sollten aber begleitend zum lokalen Hochwasserschutz, insbesondere zur Minderung der Auswirkungen sommerlicher Gewitter eingesetzt werden. Der Einfluss weiter zunehmender Urbanisierung, der sich vor allem bei konvektiven, räumlich begrenzten Ereignissen hochwasserverschärfend zeigt, kann durch umfassende dezentrale Niederschlagsversicherung teilweise kompensiert werden
- (3) Es wäre von großem Vorteil, für alle vorhandenen und geplanten Retentionsvolumina abgestimmte Einsatzvorschriften zu erarbeiten und diese auch fortlaufend zu aktualisieren.
- (4) Im Sinne eines Nachweisinstrumentariums für jedwede hochwasserbeeinflussende Maßnahme ist es wichtig, die Methoden zur Generie-

rung typischer Modellhochwasser weiterzuentwickeln.

Weiterer Forschungsbedarf

Weitere Forschungen sollten folgende Themen aufgreifen:

- (1) Die Parametrisierung der Landnutzung in der oberen Mesoskala und Makroskala bzw. die Regionalisierung von experimentellen Erkenntnissen und von Modellansätzen aus der unteren Mesoskala.
- (2) Die Bedeutung der langfristigen Verdunstung für die Vorfeuchtebedingungen von Hochwasserereignissen, auch unter Einbeziehung der Transpirationseigenschaften der Pflanzendecke.
- (3) Quantifizierung der mit diesem interdisziplinären und skalenbezogenen Modellierungsansatz verbundenen Unsicherheiten.
- (4) Optimierung der Wellenablaufmodelle im Hinblick auf Grundwassereinflüsse.

Es hat sich einmal mehr die hohe Bedeutung von Messdaten und deren Zuverlässigkeit gezeigt. Es wird daher eindringlich auf den Bedarf und die Verfügbarkeit

- (1) räumlich hochaufgelöster physiographischer Gebietsdaten von großräumigen Szenarien der Landnutzungsentwicklung und von raum-zeitlich hochaufgelösten meteorologischen Daten sowie
- (2) von Abflussdaten hingewiesen.
- (3) Die bestehenden Messnetze müssen unbedingt erhalten (z. T. auch ausgebaut) werden.

Dank

Das Projekt wurde finanziert vom INTERREG-IIc-Programm der Europäischen Union und vom Umweltbundesamt. Außerdem haben die beteiligten Institute (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Universität Potsdam und Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Niederlande) in erheblichem Umfang Mittel zur Verfügung gestellt, ohne die das Projekt nicht durchführbar gewesen wäre.

Für die kostenlose bzw. gegen eine geringe Bearbeitungsgebühr erfolgte Bereitstellung von Daten möchten wir uns bei folgenden Institutionen bedanken:

Beim Deutschen Wetterdienst für umfangreiche meteorologische Daten.

Bei der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes für verschiedene räumliche Daten.

Beim Ruhrverband Essen für Niederschlags-, Abfluss und Höhendaten zum Lennegebiet.

Beim Tiefbauamt Heilbronn für Niederschlagsdaten zum Leingebiet.

Bei der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Querprofil- und Pegeldata.

Bei den Wasserwirtschaftsverwaltungen und Vermessungsämtern der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordrhein-Westfalen für Bauwerks-, Höhen- und Pegeldata.

Literatur

- Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Ed.) (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen (ATV Arbeitsblatt A 128), St. Augustin.
- Barneveld, H. J. und Meijer, D. G. (1997): SOBEK-Model Andernach-Lobith, Model construction, calibration and verification, Final report of a cooperative project RIZA-BfG; 46S., Anlagen.
- Becker, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): Regionalisierung in der Hydrologie, Weinheim, 16-32
- Bergström, S. (1995) The HBV model. In: Computer Models of Watershed Hydrology (ed. by V.P. Singh), 443-476. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69.
- BfG und RIZA (2002): Wellenablauf in den bedeutenden Nebengewässern des Rheins und im Rhein zwischen Maxau und Lobith. Aufgabe 3 des LAHoR-Projektes. *In Vorbereitung*.
- Bischof, W. (1993): Abwassertechnik. Teubner, Stuttgart.
- Blüthgen, J. (1980): Allgemeine Klimageographie, Weischet, W. (Ed.) Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Berlin, de Gruyter.
- Bork, H.-R., Dalchow, C., Kächele, H., Piorr, H.-P. & Wenkel, K.-O. (1995): Agrarlandschaftswandel in Nordostdeutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen. Berlin.
- Bronstert, A. (1994): Modellierung der Abflubildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 46), Karlsruhe.
- Bronstert, A. (1999): Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 13, 21-48.
- Bronstert, A., Fritsch, U. & Katzenmaier, D. (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenbearbeitung, des Zustandes der Vegetationsdecke und möglicher Klimaänderungen (Abschlussbericht eines Projektes im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 297 24 508), Potsdam.
- Bürger, G. (1996): Expanded downscaling for generating local weather scenarios. *Climate Research*, 7, 111-128.
- 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.
- Busch, N. (1995): Auswirkungen des Mainausbaus zwischen Würzburg und Bamberg auf den Hochwasserablauf im Main. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-1073.
- Busch, N. und Engel, H. (1990): Erstellung eines Mathematischen Modells zur Simulation von Hochwasserabläufen in der Mosel für die Zustände vor und nach Ausbau der Mosel zur Großschiffahrtsstraße. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde M1a/434.4/
- CSO (1999): Baseline 3.1 Gebruikershandleiding rapportnummer 99.341. CSO Adviesbureau voor Milieuonderzoek, Bunnik.
- Delft Hydraulics and the Ministry of Transport, Public Works and Water Management (1997): SOBEK, Technical Reference Manual.
- Dosch, F. & Beckmann, G. (1999): Trends und Szenarien der Siedlungsflächenentwicklung bis 2010. In: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Ed.): Perspektiven der zukünftigen Raum- und Siedlungsentwicklung, 11, Berlin, 827–842.
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, Berlin.
- Fioole, A. (1999): De Achtergronden van het computerprogramma SURFIS. Deel d: SURFIS 40. RIZA werkdocument 98.123x (d) concept rapport.
- Fritsch, U. (2002): Entwicklung von Landnutzungsszenarien für die ökologische Modellierung (Dissertation an der Universität Potsdam), Brandenburgische Umweltberichte Heft 12, 150 S., Potsdam.
- Grabs, W. (Ed.) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the rhine basin, Lelystad.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911): Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4, 1–24.
- Hoefsloot F., Immerzeel W.W., Pakes U. en Veen R.v.d. (1999): GIS and SOBEK modelling. A manual for constructing schematisations. RIZA, GEODAN, RIZA werkdocument 99.121X, 75 S., Lelystad.
- Hoffmann, F. (1990): Aufstellung eines Hochwasserablaufmodells für den deutschen Flussabschnitt der Saar im Zustand vor und nach Ausbau zur Schifffahrtsstrasse, interner Bericht der BfG, 1990.
- Homagk, P. (1985): Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein mit Hilfe von mathematischen Modellen. In: 1. Wissenschaftliche Tagung "Hydrologie und Wasserwirtschaft, Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Maßnahmen", 18. - 20. März 1985. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) Universität Karlsruhe. S. H6-1 - H6-10.
- Immerzeel W. (2000a):, Creation of a GIS database for SOBEK models for the rivers Main and Rhine. Geodan Geodesie G9034 (Auftrag RIZA RI-2772)
- Immerzeel, W. (2000b): Interpolation of Cross-section elevation data Main, Rhine and Neckar. Projekt report GEODAN GEODESIE bv, Amsterdam, project-no. G0053, Auftraggeber RIZA.
- IKSR (1997): Hochwasserschutz am Rhein, Bestandsaufnahme; Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Koblenz 1997.
- IKSR (1998): Rhein-Atlas, Ökologie und Hochwasserschutz, Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Koblenz.
- IKSR (Ed.) (1998): Aktionsplan Hochwasser, Koblenz.

- IPCC (1995): Second Assessment Report 1995, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Jablonski, A. (2001): Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Wellenablaufmodells beispielhaft für den Neckar, Diplomarbeit, Fachhochschule Koblenz.
- KHR (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes) (Ed.) (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft; Bericht Nr. I-11 der KHR, Lelystad.
- Lammersen, R., Busch, N. & Engel, H. (1999): Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein; BfG-Bericht-1221, 36 S.; Anlagen.
- Liebscher, H.-J., Wilke, K., Krahe, P., Schultz, G., Schumann, A., Su, Z., Hamme, B., Funke, R., Hornbogen, M., Ott, M., Bardossy, A. & Plate, E. (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), Berlin.
- Ludwig (1996): Wasserspiegellage und Strömungsgeschwindigkeit im Rhein zwischen Iffezheim und Mainz, Dr.-Ing. Karl-Ludwig - Beratende Ingenieure Wasserwirtschaft-Wasserbau; Herausgeber: Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz.
- Meijer, D.G., Overmars, K.P, Rabbers, H.H. and Weidema, P. (2001): Sobek Model of the river Main, from Würzburg to the river Rhine. Model construction, calibration and validation. report 10011.2 - RI-3140 Meander, Maarsse.
- Niehoff, D. (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala (Dissertation an der Universität Potsdam), Brandenburgische Umweltberichte Heft 11, 144 S., Potsdam.
- Schieder, T. (2001): Auswirkungen der Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Niederrhein auf den Wellenablauf im Rhein zwischen Andernach und Lobith - Kalibrierung und Anwendung eines hydrodynamischen Modells-; Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen (Zürcher Geographische Schriften, Heft 69), Zürich.
- Statistisches Bundesamt (1997): Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden.
- Schulla, J. & Jasper, K. (1999): Modellbeschreibung WaSiM-ETH, Zürich.
- Stehlik, J. and Bárdossy, A. (2001) Multivariate stochastic downscaling model for generating daily precipitation series based on atmospheric circulation, Journal of Hydrology, accepted for publication.
- Van Bommel, M.S., Meijer, D.G. and Weidema, P. (2001): SOBEK model of the River Mosel From Cochem to the River Rhine. Model construction and calibration. Report 10036.1 - 99 15 183 01/3/NL/1/164 , Meander, Maarsse.
- Weidand, M. (2001): Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Wellenablaufmodells beispielhaft für den Rhein zwischen Maxau und Mainz, Diplomarbeit, Fachhochschule Koblenz.
- Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion (Ed.) (1990): Duden Fremdwörterbuch. Mannheim.
- Wittenberg, H. (1974): Der Einfluß zunehmender Bebauung auf den Hochwasserabfluß (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 4), Karlsruhe.

