

C 24909-1



Rijkswaterstaat/RIZA  
Rijksinstituut voor  
Integraal Zoetwaterbeheer en  
Afvalwaterbehandeling  
Documentatie  
Postbus 17  
8200 AA Leiden

**Einfluss der Landnutzung und der  
Ausbaumaßnahmen auf den  
Hochwasserablauf im Rhein**

**BfG - 1363**



Rijkswaterstaat/RIZA  
Rijksinstituut voor  
Integraal Zoetwaterbeheer en  
Afvalwaterbehandeling  
Documentatie  
Postbus 17  
8200 AA Lelystad

**Einfluss der Landnutzung und der  
Ausbaumaßnahmen auf den  
Hochwasserablauf im Rhein**

Bearbeiter: N. Ritter (BfG)  
Dr. R. Lammersen (RIZA)  
H. Engel (BfG)  
Dr. M. Disse (BfG)  
H. Buiteveld (RIZA)  
M. Hammer (BfG)  
N. Busch (BfG)

Layout J.H. Paul (BfG)  
J. Ilse (BfG)

**BfG - 1363**

Koblenz, den 31. Dezember 2002



Der vorliegende Bericht steht mit dem LAHoR-Bericht „Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet“ der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) unmittelbar im Zusammenhang. Er fasst gleichsam die Wirkungen der maßgebenden Maßnahmen im Rheineinzugsgebiet auf den Hochwasserablauf zusammen und quantifiziert diese. Der Bericht entstand in Zusammenarbeit mit dem niederländischen Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung (RIZA). Zur Unterscheidung von dem KHR-Bericht wird er hier als LAHoR\*-Bericht bezeichnet.



	<b>Seite</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	I
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	III
<b>Tabellenverzeichnis</b>	VI
<b>Anlagenverzeichnis</b>	VIII

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abschnitt</b>		<b>Seite</b>
	<b>Veranlassung</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Modellansatz und Untersuchungsgebiet</b>	<b>6</b>
2.1	Modellansatz	6
2.2	Untersuchungsgebiet	6
<b>3</b>	<b>Niederschlag-Abfluss-Modellierung für die Makroskala</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Wellenablauf im Rhein und in seinen Hauptnebenflüssen</b>	<b>16</b>
4.1	Wellenablaufmodelle SYNHP und SOBEK	16
4.1.1	Das hydrologische Modell SYNHP	17
4.1.2	Das hydrodynamische Modell SOBEK	17
4.2	Datengrundlage	20
4.2.1	Geobasisdaten	20
4.2.2	Wasserspiegelfixierungen und -berechnungen	21
4.2.3	Abfluss- und Wasserstandsganglinien für die Kalibrierung und Validierung des SOBEK-Modells	22
4.2.4	Simulierte Abflussganglinien für die Szenarienberechnung	22
4.3	Erstellung der SOBEK-(Teil)-Modelle	24
4.3.1	Aufbereitung der Topographie und der Gerinnegeometrie für SOBEK	24
4.3.2	Stauwerke	29
4.3.3	Rauheiten	32
4.3.4	Festlegung der Randbedingungen für das SOBEK-Modell	34
4.3.4.1	Festlegung der Randbedingungen für die Kalibrierung und Validierung	35
4.3.4.2	Aufbereitung der Ganglinien für die Kalibrierung und Verifizierung	36
4.3.4.3	Festlegung der Randbedingungen und Aufbereitung der Ganglinien für die Szenarienberechnungen	37
4.3.4.4	Festlegung der unteren Randbedingung für die Validierung des Gesamtmodells und für die Szenarienberechnungen	37
4.3.5	Festlegung der Anfangsbedingungen für SOBEK	38
4.3.6	Festlegung der numerischen Parameter	39
4.4	Kalibrierung und Validierung der (Teil-) Modelle	40
4.4.1	Stationäre Kalibrierung der Teilmodelle	41
4.4.2	Einregeln der Stauwehre	44
4.4.3	Instationäre Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle	45
4.4.3.1	Wasserbilanz	46
4.4.3.2	Untere Randbedingung	47
4.4.3.3	Kalibrierung und Validierung	48
4.4.4	Stationäre Validierung der Teilmodelle	56
4.5	Validierung Gesamtmodell, Bewertung und Ausblick	58



<b>Abschnitt</b>		<b>Seite</b>
<b>5</b>	<b>Berechnungsszenarien</b>	<b>64</b>
5.1	Modellhochwasser	64
5.2	Landnutzungsszenarien	64
5.3	Retentionsszenarien	66
5.3.1	Deichrückverlegungen in SOBEK	68
5.3.2	Retentionspolder in SOBEK	68
5.4	Berechnungsvarianten	69
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>70</b>
6.1	Einfluss der Landnutzung auf die Abflussentstehung und Abflusskonzentration in den Teileinzugsgebieten	72
6.1.1	Landnutzungsszenario LN1	72
6.1.2	Landnutzungsszenario LN2	72
6.1.3	Landnutzungsszenario LN100	72
6.1.4	Landnutzungsszenario LNW	73
6.2	Einfluss der Landnutzung auf den Wellenablauf im Rhein	76
6.2.1	Charakteristika der Modellhochwasser	76
6.2.2	Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserscheitel	77
6.2.3	Einfluss der Landnutzung auf den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle	81
6.2.4	Einfluss der Landnutzung auf die Überschreitungsdauer des Wasserstandes des mittleren Hochwassers $w_{MHQ}$ plus 1 Meter	83
6.3	Einfluss der Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf	84
6.3.1	Einfluss der Retentionsmaßnahmen südlich von Maxau	84
6.3.2	Einfluss der Retentionsmaßnahmen nördlich von Maxau	87
6.3.2.1	Modellhochwasser M95	89
6.3.2.2	Modellhochwasser M95++ - Extremereignis mit Schneerücklage	90
6.3.2.3	Modellhochwasser M95++ - Extremereignis ohne Schneerücklage	94
6.4	Einfluss der Landnutzung und der Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf	96
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>104</b>



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung		Seite
1-1	Entwicklung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Körsch von 1836 bis heute (Bronstert, Fritsch et al., 2001)	2
1-2	Oberrhein bei Straßburg in den Jahren 1872 und 1963 (KHR 1993)	3
1-3	Modelle, zugehörige räumliche Skalen und Prozesse im LAHoR-Projekt	5
2-1	Das Rheineinzugsgebiet, unterteilt in für die N/A-Modellierung verwendete Teileinzugsgebiete Untersuchungsgebiet der Wellenablaufmodellierung	8
2-2	Leistungsfähigkeit der Rheindeiche und höchste bisher gemessene Hochwasser HHQ (Stand: 2001)	9
3-1	Schematische Struktur des HBV-IWS-Modells (Bronstert et al., 2002)	13
3-2	Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für den Pegel Waldenhausen/Tauber (Bronstert et al., 2002)	15
3-3	Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für den Pegel Stein/Kocher (Bronstert et al., 2002)	15
4-1	Rheingebiet und Flussabschnitte mit unterschiedlicher Wellenablaufmodellierung	16
4-2	Einteilung eines SOBEK-Modells in Knoten (schematisch), Abschnitte und Rasterpunkte (Schieder, 2001)	25
4-3	Schematische Darstellung eines Flussquerprofils und seiner Wiedergabe in SOBEK (Barneveld und Meijer, 1997)	26
4-4	Datenaufbereitung mit BASELINE unter ARC/INFO erweitert nach Schieder (2001)	28
4-5	Definition eines Wehres (Weirs) in SOBEK	29
4-6	Definition einer General Structure in SOBEK	30
4-7	Rauheitsverteilung für die Vorländer am Beispiel des Oberrheins zwischen Maxau (km 362.3) und Mainz (km 498.3) (Weiland, 2001)	33
4-8	Rauheitsverteilung für die Vorländer am Beispiel des Mains (Meijer, Weidema et al., 2001)	34
4-9	Integralerhaltende Interpolation von zeitlich gröber als 1 h aufgelösten Ganglinien	36
4-10	Abflusstafel Lobith	38
4-11	Stationäre Wasserbilanz am Beispiel des Neckars (Jablonski, 2001)	42
4-12	Längsschnitt der Modellstrecke Maxau-Mainz mit Wasserspiegelfixierung und simulierten Wasserständen und deren Differenzen nach der stationären Kalibrierung für das Hochwasser 1995 (Weiland, 2001)	43
4-13	Rauheitsbeiwerte im Hauptgerinne für den Oberrhein nach der stationären Kalibrierung	44



Abbildung		Seite
4-14	Dynamisches Einregeln der Moselwehre mit Hilfe einer künstlichen Doppelwelle ( Bemmell und Meijer, 2001)	45
4-15	Vergleich einer simulierten und gemessenen Wasserstandsganglinie für das Unterwasser der Stauhaltung Heidelberg/Neckar (Jablonski, 2001)	48
4-16	Gemessene Wasserstandsganglinien an Ober- und Unterwasserpegeln des Neckars, links Staustufe Hirschhorn, rechts Staustufe Heidelberg (Jablonski, 2001)	49
4-17	Vergleich der Wasserstandsdifferenzen in Abhängigkeit vom Abfluss vor und nach der instationären Kalibrierung am Pegel Maxau, Hochwasserereignis 1995 (Weiland, 2001)	50
4-18	Vergleich der offiziellen Abflusskurve mit der simulierten Wasserstand-Abflussbeziehung am Pegel Worms (Weiland, 2001)	51
4-19	Gemessene und simulierte Abfluss- und Wasserstandsganglinien an vier Abflusspegeln am Rhein zwischen Maxau und Mainz für das Hochwasser 93 (Validierungsereignis) (Weiland, 2001)	52
4-20	Wasserstandsdifferenzen zwischen Messung und Simulation in Abhängigkeit vom Abfluss am Pegel Worms (Weiland, 2001)	53
4-21	Abflussganglinien für die Pegel Maxau, Speyer und Worms und Zuflussganglinie aus dem Neckar für das Hochwasser 93 (Validierungsereignis) (Weiland, 2001)	54
4-22	Ergebnis der Wasserspiegelberechnungen mit SOBEK für den Main vor und nach der instationären Kalibrierung/Validierung (Meijer, Weidema et al., 2001b)	56
4-23	Simulation Hochwasser 1995 mit Teilmodellen und Gesamtmodell	59
4-24	Abflussganglinie am Pegel Mainz, Hochwasser 1995	61
6-1	Vergleich zwischen simulierten Ganglinien mit und ohne intensive Besiedlung (Szenario LN100) bei einem Winter- und Sommerhochwasser am Pegel Menden/Sieg (Bronstert et al., 2002)	73
6-2	Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzenzenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M83)	78
6-3	Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzenzenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M88)	78
6-4	Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzenzenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M93)	79
6-5	Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzenzenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M95)	79
6-6	Veränderungen des Wellenablaufs im Rhein und Wirkung der vorgeschlagenen Retentionsmaßnahmen (schematisch)	84
6-7	Abfluss am Pegel Mainz mit und ohne Retentionsmaßnahmen (nur Deichrückverlegungen)	89

Abbildung	Seite
6-8 Abfluss am Pegel Lobith - mit und ohne Retentionsmaßnahmen	90
6-9 Wirkung der Retentionsmaßnahmen am nördlichen Oberrhein (M 95 ++), Pegel Kaub	91
6-10 Wirkung der Retentionsmaßnahmen (m95 ++), Pegel Lobith	92
6-11 Polderfüllung am Beispiel Rheinschanzinsel (M95++)	93
6-12 Polderfüllung am Beispiel des Polders Bylerward (M95++)	94
6-13 Retentionsmaßnahmen Pegel Lobith (M95+)	95



## TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle</b>		<b>Seite</b>
2-1	Kenndaten der bedeutenden Rhein Nebenflüsse in der Untersuchungsstrecke sowie des Rheins an den Pegeln Maxau, Kaub, Köln und Lobith	7
4-1	In den Teilmodellen verwandte Rauheitsparameter nach Strickler ( $k_s$ ) und Nikuradse ( $k_n$ ) mit und ohne Abhängigkeit von Abfluss Q bzw. Strecke x	29
4-2	Nikuradse-Werte in Abhängigkeit der Landnutzung in den Vorländern im Teilmodell Maxau - Mainz (Weiland, 2001) und Andernach - Lobith (Barneveld und Meijer, 1997; Schieder, 2001)	32
4-3	Überblick über die durchgeführten stationären Kalibrierungen	41
4-4	Überblick über die durchgeführten instationären Kalibrierungen und Validierungen der Teilmodelle	46
4-5	Differenzen der Wasserstände, Abflüsse und Eintrittszeiten zwischen Messung und Modell an einzelnen Pegeln am Rhein - Ergebnisse der instationären Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle	55
4-6	Differenzen der Abflüsse und Wasserstände an einzelnen Pegeln am Rhein - Ergebnisse der Validierung Gesamtmodell	60
5-1	Prozentuale Flächenanteile der Landnutzung und Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen für verschiedene Szenarien	65
5-2	Im Modell berücksichtigte Rückhaltmaßnahmen am Rhein unterhalb des Pegels Maxau	67
5-3	Übersicht über die mit Wellenablaufberechnungen durchgespielten Hochwasserszenarien	69
6-1	Auswahl der zu berechnenden charakteristischen Wellenparameter (Anmerkung: MHQ = Mittleres jährliches Hochwasser; HSW2 = Höchster schiffbarer Wasserstand)	70
6-2	Jährlichkeiten der historischen Hochwasser 1983, 1988, 1993 und 1995 bzw. abgeleitete Jährlichkeiten der Modellhochwasser M95+ und M95++ für ausgesuchte Rheinpegel (Zeitreihe 1901 - 2000), Zustand Ist 92	77
6-3	Überschreitungsdauern (in Tagen) der Modellhochwasser M83, M88, M93, M95, M95+ und M95++, bezogen auf das mittlere jährliche Hochwasser (MHQ)	77
6-4	Wasserstandsänderungen im Hochwasserscheitel gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in cm aufgrund verschiedener Landnutzungen	80
6-5	Abflussänderungen im Hochwasserscheitel gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in m <sup>3</sup> /s aufgrund verschiedener Landnutzungen	81
6-6	Maximale Wasserstandsänderungen gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in cm im ansteigenden Ast der Hochwasserwellen aufgrund verschiedener Landnutzungen	82

<b>Tabelle</b>		<b>Seite</b>
6-7	Maximale Abflussänderungen gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in $\text{m}^3/\text{s}$ im ansteigenden Ast der Hochwasserwellen aufgrund verschiedener Landnutzungen	82
6-8	Änderungen der Überschreitungsdauern für den Wasserstand $W_{\text{MHQ}}$ plus 1 Meter gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in h aufgrund verschiedener Landnutzungen	83
6-9	Rechnerische Scheiteldifferenzen infolge Reduktion durch Rückhaltungen am südlichen Oberrhein, bezogen auf drei extreme historische HW unterschiedlicher Genese	86
6-10	Einfluss der Retentionsmaßnahmen - Übersicht aller Pegel	88
6-11	Wirkung der Retentionsmaßnahmen (M 95++)	91
6-12	Wirkung der Retentionsmaßnahmen, Pegel Lobith (M95+)	94
6-13	Wasserstandsänderungen des Hochwasserscheitels in cm aufgrund des kombinierten Einflusses von verschiedener Landnutzung und Retention für ausgesuchte Rheinpegel	97
6-14	Abflussänderungen des Hochwasserscheitels in $\text{m}^3/\text{s}$ aufgrund des kombinierten Einflusses von verschiedener Landnutzung und Retention für ausgesuchte Rheinpegel	98



## ANLAGENVERZEICHNIS

### Anlage

- 1 Modellgrundlagen Sobek, SYNHP und Grundwassermodell
- 2 Topographische Datengrundlagen für SOBEK
- 3 Retentionsmaßnahmen
- 4 Wasserstands- und Abflussdaten, Randbedingungen, Präprozessor
- 5 Profilaufbereitung mit BASELINE
- 6 Modellaufbau
- 7 Kalibrierung und Validierung
- 8 Dokumentation zum Projekt



## Veranlassung

Das Weihnachtshochwasser 1993/1994 und das Januarhochwasser 1995 am Rhein verursachten hohe Schäden in Deutschland und in den Niederlanden. In der Öffentlichkeit und in Fachkreisen wurden teilweise heftige Diskussionen darüber geführt, inwieweit das gehäufte Auftreten sehr großer Hochwasserereignisse durch Umweltänderungen bedingt ist bzw. verstärkt wird. Dabei wurden u.a. Flussbaumaßnahmen am Rhein und seinen großen Nebenflüssen, die damit verbundenen Verluste von Überflutungsflächen und Retentionsraum, die intensive Landwirtschaft, Landnutzungsänderungen (dabei besonders die stetig zunehmende Urbanisierung) und die anthropogene Klimaänderung für eine Verschärfung der Hochwassersituation verantwortlich gemacht.

Die Umweltminister der Rheinanliegerstaaten griffen das Thema auf ihrer 12. EU-Umweltministerkonferenz am 22. Januar 1998 auf und beschlossen, die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR) damit zu beauftragen, einen „Aktionsplan Hochwasser“ aufzustellen (IKSR, 1998b). Dieser Aktionsplan setzt sich zum Ziel, die Anlieger für die gegebenen Probleme zu sensibilisieren, eine Verbesserung der Hochwasservorhersage zu bewirken und die Extremwasserstände unterhalb des staugeregelten Rheinabschnitts bis zum Jahr 2020 um bis zu 70 cm durch folgende Maßnahmen zu vermindern:

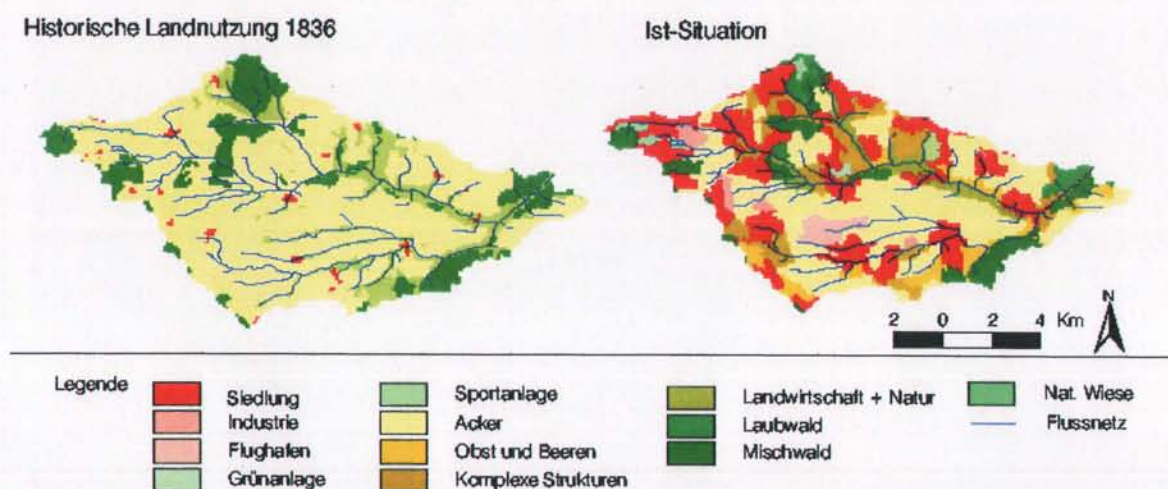
- (1) Wasserrückhalt im Einzugsgebiet
- (2) Wasserrückhalt am Rhein:
  - (a) durch Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten
  - (b) durch technische Hochwasserrückhaltungen

Als Beitrag zu diesem „Aktionsplan Hochwasser“ wurde seitens der EU das IRMA-Programm (Interreg Rhein-Maas Aktivitäten) initiiert. Neben baulichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz und zum Wasserrückhalt sowie einer Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit wurden hiermit auch wissenschaftliche Studien bewilligt, die die Wirkung von Hochwasserschutzmaßnahmen quantifizieren sollen. Das im Folgenden näher beschriebene Projekt „Einfluss der Landnutzung und der Ausbaumaßnahmen auf den Hochwasserablauf im Rhein“ als Teil des Projektes LAHoR (Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet) ist eines dieser wissenschaftlichen Studien.

## 1 Einleitung

Bisher wurde der Einfluss der Umweltveränderungen im Rheineinzugsgebiet in Gestalt der Landnutzung und Ausbaumaßnahmen auf die Abflussbildung bei Hochwasser („Hochwasserentstehung“) und die Wasserstände im Hauptgewässersystem („Wellenablauf“) zumeist nur in qualitativer Hinsicht untersucht.

Als ein Beispiel für die Änderung der Landnutzung wird hier das Einzugsgebiet der Körsch (Nebenfluss des Neckars südlich von Stuttgart) angeführt. Dort stieg der Anteil der urbanen Flächen von 1,3 % im Jahre 1836 auf heute 25 % (Abb. 1-1).



**Abb. 1-1: Entwicklung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Körsch von 1836 bis heute (Bronstert et al., 2001)**



Für den Einfluss wasserbaulicher Maßnahmen auf die Abflussbildung sei beispielhaft der Ausbau des Oberrheins genannt (Abb. 1-2). Hier ist es durch die wasserbaulichen Maßnahmen - zuletzt durch den Staustufenbau - zu einer erheblichen Veränderung des Wellenablaufs gekommen. So hat sich der statistisch einmal in 200 Jahren zu erwartende Hochwasserscheitel am Pegel Maxau von  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  im Jahre 1950 durch den weiteren Ausbau des Oberrheins bis 1977 auf  $5700 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht.



1872



1963

**Abb. 1-2: Oberrhein bei Straßburg in den Jahren 1872 und 1963 (KHR, 1993)**

Das LAHoR-Projekt zielt auf die Beantwortung zweier grundlegender Fragen:

- Wie stark ist der Einfluss von Landnutzungsänderungen und wasserbaulichen Maßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet zwischen den Pegeln Maxau und Lobith (niederländisch-deutsche Grenze)?
- In welchem Maße kann die Hochwassersituation im Rheingebiet zwischen den Pegeln Maxau und Lobith durch gezielte Rückhaltmaßnahmen in der Landschaft und entlang der Flussläufe entschärft werden?

Das Projekt wurde vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Projektleitung), der Universität Potsdam (Institut für Geoökologie), der Universität Stuttgart (Institut für Wasserbau, IWS), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Staatlichen Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung (RIZA, Niederlande) durchgeführt. Die Kommission für die Hydrologie des Rheins (KHR) stellte die Flächendaten des Rheingebietes bereit. Die Projektdauer betrug drei Jahre (November 1998 bis Dezember 2001).



Die Untersuchungen des Einflusses von Gebietseigenschaften und Flussbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet zwischen Maxau und Lobith erforderten eine Durchführung auf verschiedenen Maßstabsebenen (Abb. 1-3):

- (1) Detaillierte hydrologische Modellierung im Maßstabsbereich der unteren Mesoskala (Gebietsfläche ca. 100 bis 500 km<sup>2</sup>) und Erstellung von Szenarien zur zukünftigen Landnutzungsentwicklung. Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche bzw. -bedeckung auf die Abflussbildung während Starkniederschlagsperioden.

Bearbeitung: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Universität Potsdam (Institut für Geoökologie)

- (2) Übertragung der detaillierten Erkenntnisse der Abflussbildung auf größere Einzugsgebiete (Nebenflussgebiete des Rheins bis 2100 km<sup>2</sup>) und Zusammenstellung der Wellen aus den Teilgebieten. Hierbei wurde das detaillierte Modell verallgemeinert und so regionalisiert, dass auf Basis verfügbarer Flächendaten (Topographie, Gewässernetz, Landnutzung, Bodenkarte) die Parametrisierung erfolgen konnte.

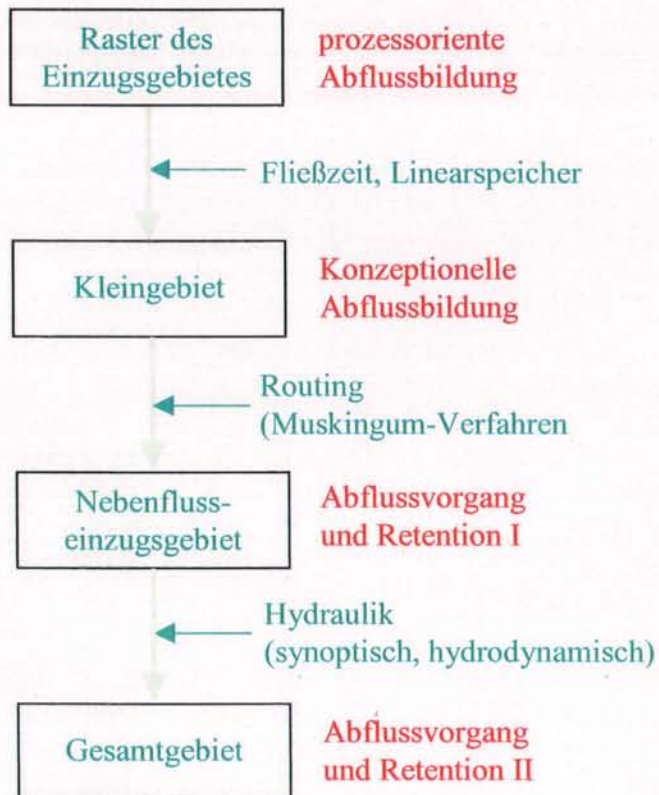
Bearbeitung: Universität Stuttgart (Institut für Wasserbau, IWS)

- (3) Berechnung des Wellenablaufs im Rhein und in seinen großen Nebenflüssen. Damit sollten 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 Hochwasserablauf quantifiziert werden.

Bearbeitung: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung (RIZA)

Auf allen drei Maßstabsebenen sind mathematische Modelle das grundlegende Instrumentarium der Untersuchung. Bei den auf der ersten Ebene durchgeführten Untersuchungen handelte es sich um detaillierte hydrologische Modellierungen ausgewählter mesoskaliger Einzugsgebiete. Diese dienten als Referenz für die vereinfachte hydrologische Modellierung größerer Einzugsgebiete, die auf der zweiten Ebene, der Oberen Mesoskala, durchgeführt wurde und das Gesamtgebiet zwischen Maxau und Lobith abdeckte. Der vereinfachten hydrologischen Modellierung schloss sich die hydrodynamische Modellierung des Wellenablaufs an (dritte Ebene Makroskala). Die Verknüpfung der drei Maßstabsebenen ist Abb. 1-3 zu entnehmen.





**Abb. 1-3: Modelle, zugehörige räumliche Skalen und Prozesse im LAHoR-Projekt**

In dem folgenden Bericht werden die Ergebnisse der dritten Maßstabsebene in Kap. 4 bis 6 ausführlich beschrieben. Für ausgesuchte Pegel entlang des freifließenden Rheins werden Aussagen zu Veränderungen des Hochwasserabflusses aufgrund verschiedener Landnutzungsbedingungen im Rheineinzugsgebiet und Retentionsmaßnahmen am Rhein selbst gemacht.

Da die Ergebnisse der dritten Maßstabsebene abhängig sind von denen der zweiten Maßstabsebene, werden das Untersuchungsgebiet, der allgemeine Modellablauf und das auf der zweiten Maßstabsebene (Obere Mesoskala) angewandte Modell in den Kap. 2 und 3 kurz vorgestellt. Die berechneten Ganglinien aus diesem Teilprojekt gehen als Eingangsgrößen in die Wellenablaufmodellierung ein. Die Ergebnisse der großräumigen Niederschlag-Abfluss-Modellierung werden anhand ausgewählter Beispiele in Kap. 6 zusammen mit den Resultaten aus den Wellenablaufberechnungen erläutert.

Detailliertere Ausführungen über Methodik und Ergebnisse der mesoskaligen Modellierung sind Bronstert et al. (2001) sowie Niehoff (2001) und Fritsch (2002) zu entnehmen.

Ein zusammenfassender Bericht über das gesamte LAHoR-Projekt liegt in deutscher Sprache bei Bardossy et al. (2002) und in englischer Sprache bei Bardossy et al. (2001) vor.



## 2 Modellansatz und Untersuchungsgebiet

### 2.1 Modellansatz

Das Hauptziel des LAHoR-Projektes bestand darin, den Einfluss verschiedener Landnutzung und durchgeführter oder geplanter Retentionsmaßnahmen am Rhein auf den Hochwasserablauf im Rheingebiet zu quantifizieren.

Wie in Kap.1 näher erläutert wird, wurde dafür ein Modellsystem in drei unterschiedlichen Skalenbereichen entwickelt. Sie bestehen aus einer detaillierten Niederschlag-Abfluss-Modellierung in mesoskaligen Einzugsgebieten (bis 500 km<sup>2</sup>, erste Maßstabsebene), einem regionalisierten hydrologischen Modell für das Abflussverhalten im Rheingebiet zwischen Maxau und Lobith (zweite Maßstabsebene) und einem Wellenablaufmodell, das die Zuflüsse aus den Teileinzugsgebieten integriert und den Ablauf der Hochwasserwellen für beliebige Stellen im Rhein und seinen Hauptnebenflüssen simuliert (dritte Maßstabsebene).

Für das Wellenablaufmodell wurden als Randbedingungen die vorgegebenen Eingangswellen des außerhalb des Untersuchungsgebietes liegenden Rheineinzugsgebietes (Pegel Maxau/Rhein und Pegel Perl/Mosel) sowie weitere Zuflussganglinien benötigt, die aus der Niederschlag-Abfluss-Modellierung resultierten. So wurden die Abflussbildung und Abflusskonzentration von insgesamt 95 Teileinzugsgebieten hydrologisch modelliert. Die hieraus resultierenden Ganglinien gehen als seitliche Inputs in das Wellenablaufmodell ein.

Mit diesem Modellsystem wurden für vier historisch abgelaufene Hochwasser und zwei simulierte Extremhochwasser vier unterschiedliche Landnutzungsszenarien mit und ohne Retentionsmaßnahmen am Rhein durchgerechnet. Dadurch war es möglich, den Einfluss der Landnutzung und der Rückhaltemaßnahmen auf den Hochwasserablauf jeweils für sich sowie auch in ihrem Zusammenwirken quantitativ zu bestimmen.

### 2.2 Untersuchungsgebiet

Der Rheinlauf ist geographisch in Alpen-, Hoch-, Ober-, Mittel-, Niederrhein und das Rheindelta gegliedert. Der in dieser Untersuchung betrachtete Bereich beginnt am Pegel Maxau und umfasst damit etwa die untere Hälfte des Oberrheins sowie Mittel- und Niederrhein. Mit dem Pegel Lobith liegt der Endpunkt unmittelbar vor Beginn des Rheindeltas. In Maxau erreicht das Einzugsgebiet des Rheins  $AEo = 50.200 \text{ km}^2$ ; in Lobith ist es auf  $AEo = 160.800 \text{ km}^2$  angewachsen (Tab. 2-1). Die dazwischen liegende Landoberfläche von  $AEo = 110.600 \text{ km}^2$  wird zu 55,8 % durch die drei großen Flüsse Neckar, Main und Mosel sowie zu 20,1 % durch eine Reihe mittlerer 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 Rheinnebenflüsse in der Untersuchungsstrecke sowie des Rheins an den Pegeln Maxau, Kaub, Köln und Lobith**

	Einzugsgebiet		Hydrologische Hauptwerte					
Gewässer	Station	A <sub>E0</sub>	Pegel	MQ	MHQ	HQ		Jahresreihe
		[km <sup>2</sup> ]		[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	Datum	
Rhein	Maxau	50.200	Maxau	1260	3100	4540	14.06.99	1931/2000
Neckar	Mündung	14.000	Heidelberg	135	1180	2700	22.12.93	1951/2000
Main	Mündung	19.600	Raunheim	196	932	1980	30.01.95	1966/1989
Nahe	Mündung	4.100	Grolsheim	30,3	418	1150	21.12.93	1946/1989
Rhein	Kaub	103.488	Kaub	1650	4220	7200	29.03.88	1931/2000
Lahn	Mündung	5.900	Kalkofen	46,7	384	840	10.02.46	1936/2000
Mosel	Mündung	28.100	Cochern	315	2090	4170	22.12.93	1931/2000
Sieg	Mündung	2.900	Menden	54,1	552	1050	07.02.84	1965/1989
Rhein	Köln	144.232	Köln	2110	6390	10900	30.01.95	1931/2000
Ruhr	Mündung	4.500	Hattingen	69,7	528	907	01.01.94	1968/1989
Lippe	Mündung	4.900	Schermbeck	46,2	246	370	31.01.95	1965/1995
Rhein	Lobith	160.800	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					

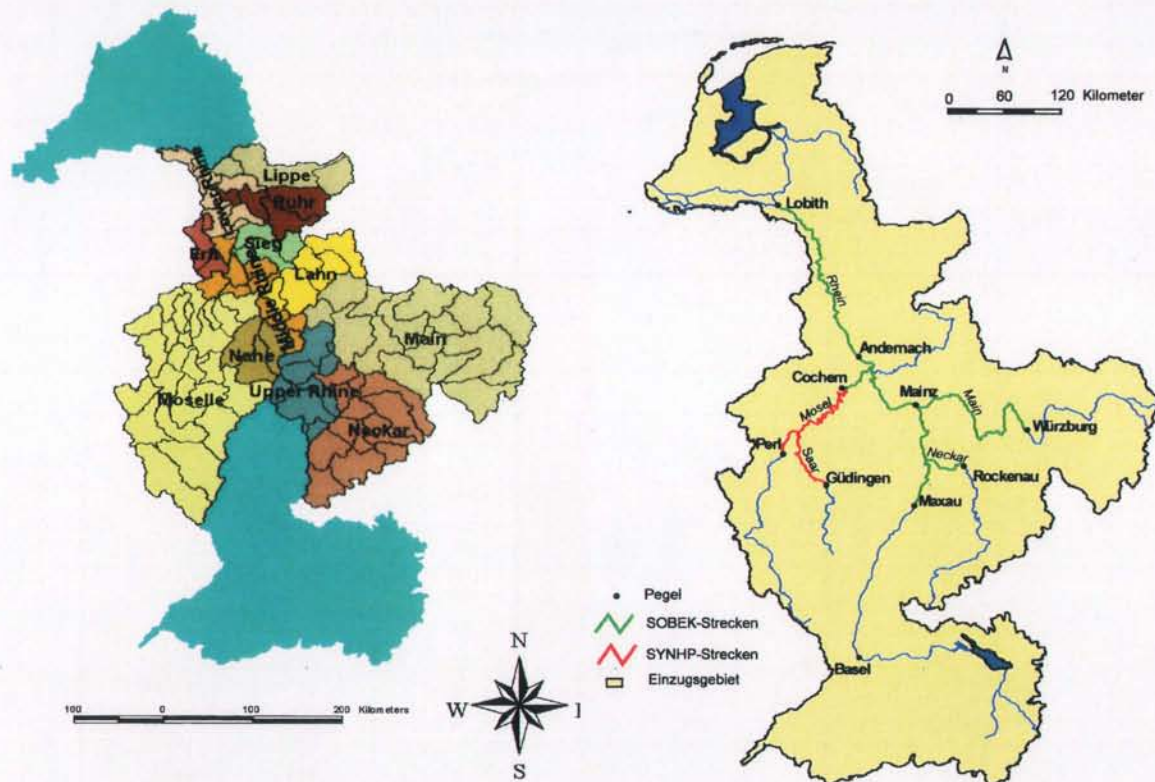
Abb. 2-1 (links) zeigt das von der makroskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung (N/A-Modellierung) abgedeckte Einzugsgebiet des Rheins zwischen Maxau und Lobith mit den verwendeten 95 Teileinzugsgebieten (Größe zwischen 400 km<sup>2</sup> und 2100 km<sup>2</sup>). Wegen nicht ausreichendem Zugang zu den französischen Niederschlagsdaten wurde der Bereich oberhalb des Pegels Perl (Mosel) nicht in die Studie einbezogen.

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

In den Teileinzugsgebieten ist häufig eine 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 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.





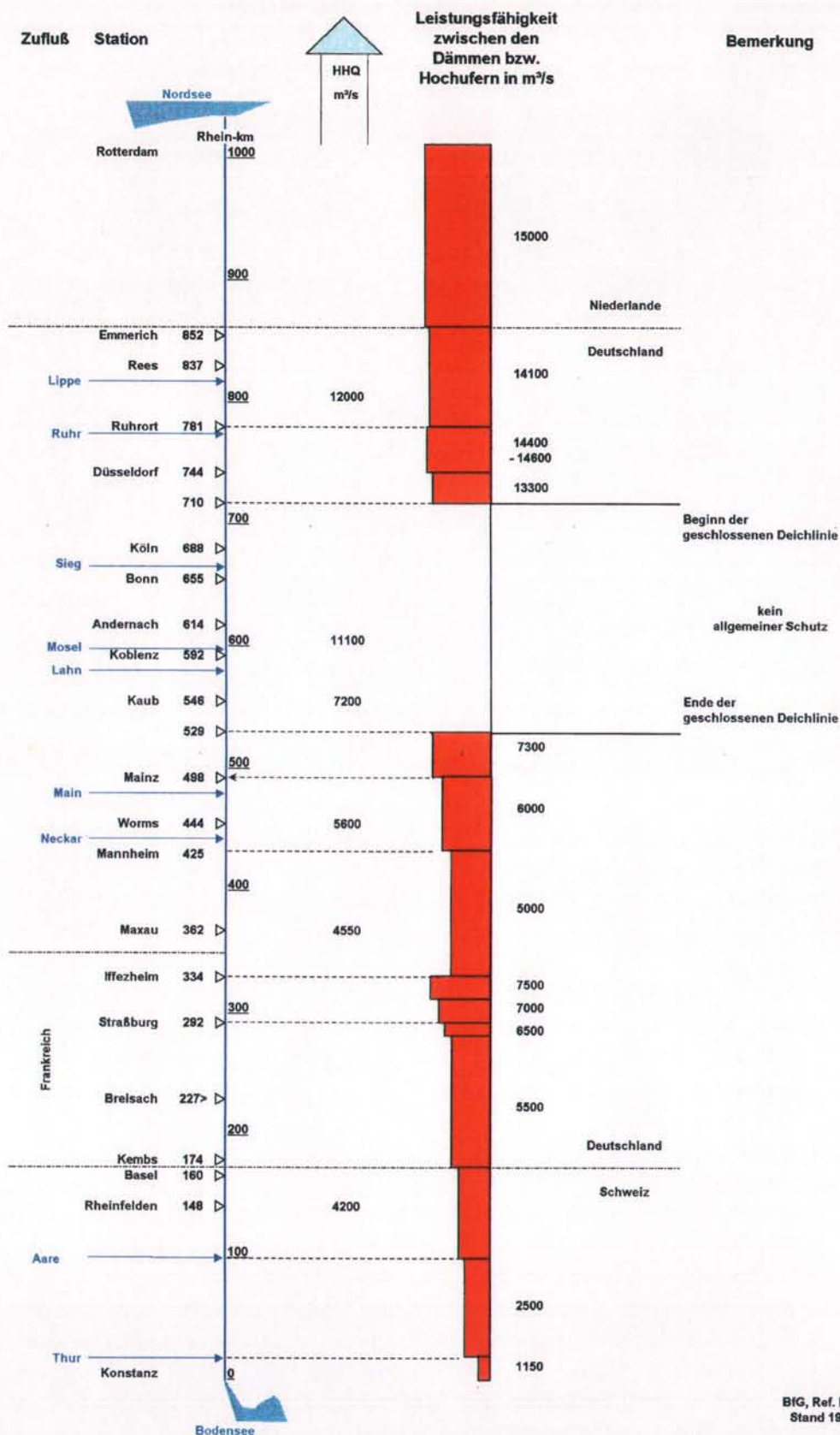
**Abb. 2-1: links: Das Rheineinzugsgebiet, unterteilt in für die N/A-Modellierung verwendete Teileinzugsgebiete;  
rechts: Untersuchungsgebiet der Wellenablaufmodellierung**

Eine Übersicht über die im Rahmen der Wellenablaufberechnung modellierten Gewässer zeigt Abb. 2-1 (rechts). Hieraus wird ersichtlich, dass mit dem hydrologischen Modell SYNHP und dem hydrodynamisch-numerischen Modell SOBEK zwei Wellenablaufmodelle zum Einsatz kommen.

Das Gebiet umfasst sowohl staugeregelte als auch frei fließende Flussstrecken. Die Stauregelungen an Neckar, Main und Mosel beeinflussen lediglich kleinere Hochwasser. Bei höheren Abflüssen werden alle Wehre gezogen bzw. gelegt, so dass die Stauinflüsse entfallen. Im Gegensatz hierzu reichen an der Saar die Stauregelungen über das gesamte Abflussspektrum.

Hinsichtlich der allgemeinen Überflutungsverhältnisse sind die modellierten Gewässer in zwei Kategorien zu unterteilen. Die Täler der Nebenflüsse des Rheins und die Mittelhreinstrecke bieten nur schmale Ausuferungstreifen. Sie erreichen nur gelegentlich größere Breiten von mehr als 100 m. 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 mehrere Kilometer erreichte. In diesen Abschnitten existieren heute Deichsysteme (streckenweise seit Jahrhunderten), die teilweise überströmbare sind (Sommerdeiche) oder als Banndeiche dem Hinterland Schutz gegen Hochwasser mit Jährlichkeiten von 100 bis zu mehr als 500 Jahren bieten. Abb. 2-2 zeigt die Leistungsfähigkeit der Deiche entlang des Rheins vom Bodensee bis zur Nordsee.

Höchste Hochwasserabflüsse und Leistungsvermögen des Rheins zwischen den Dämmen bzw. Hochufern vom Bodensee bis zur Nordsee



BfG, Ref. M1  
Stand 1997

Abb. 2-2: Leistungsfähigkeit der Rheindeiche und höchste bisher gemessene Hochwasser HHQ



Zur Verbesserung des Hochwasserschutzes durch Rückhaltungen sind Deichrückverlegungen, flutbare Polder mit festen Einstömhöhen oder steuerbarer Flutung sowie Stauwehre im Rhein eingerichtet bzw. in Planung.

### 3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung für die obere Mesoskala

Das Niederschlag-Abfluss-Modell (N/A-Modell) für die obere Mesoskala wurde im Rheineinzugsgebiet zwischen den Pegeln Maxau und Lobith angewendet (95 mesoskalige Teileinzugsgebiete zwischen 400 km<sup>2</sup> und 2100 km<sup>2</sup>).

Für die Parametrisierung des N/A-Modells konnten die meisten geographischen Daten von der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) bezogen werden. Als ARC-INFO-Dateien für das gesamte Rheineinzugsgebiet wurden bereitgestellt:

- Teileinzugsgebiete
- digitales Höhenmodell (Auflösung 1 km x 1 km)
- Landnutzungen (Auflösung 1 km x 1 km, 8 verschiedene Landnutzungsklassen) (CORINE land cover, 1997)
- Bodenkarte (Auflösung 1 x 1km)
- Gewässernetz
- Pegelstationen
- meteorologische Stationen (Frankreich und Deutschland)

Niederschlagsdaten sind der wesentliche meteorologische Input für N/A-Modelle und müssen in möglichst hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung vorliegen. Außerdem benötigt das von der Universität Stuttgart verwendete N/A-Modell tägliche Durchschnittstemperaturen.

Vom Deutschen Wetterdienst konnten tägliche Niederschlagsdaten von insgesamt 2396 Stationen für die Zeitreihe von 1960 bis 1998 bezogen werden. Von 509 Stationen wurden zusätzlich die Minima- und Maxima-Temperaturen herangezogen, aus denen die durchschnittlichen Tagestemperaturen berechnet werden konnten.

Als weitere Eingangsdaten für das Modell sind die mittlere monatliche potenzielle Evapotranspiration und Interzeptionswerte für jede Landnutzungsklasse erforderlich. Diese Daten wurden aus der Literatur entnommen. Zusätzlich zu der potenziellen Evapotranspiration werden die korrespondierenden mittleren monatlichen Temperaturen benötigt, die aus den interpolierten Tagestemperaturen berechnet wurden.

Schließlich waren zur Modell-Kalibrierung gemessene Abflussganglinien an den Gebietsauslässen erforderlich. Hierzu wurden für die meisten Teileinzugsgebiete gemessene Tagesabflüsse für die gesamte Simulationsperiode von 1980 bis 1998 aufbereitet. An vielen Pegeln lagen für ausgewählte Hochwasserereignisse zusätzlich Stundenwerte vor.

Um den möglichen Einfluss von verschiedenen Landnutzungsmaßnahmen auf den Abfluss zu quantifizieren, ist es sinnvoll, die Eingangsparameter des Niederschlag-Abfluss-Modells mit Landnutzungsmerkmalen zu verbinden. Für die Modellierung großer Einzugsgebiete sollte dabei die Anzahl von Parametern gering sein und gleichzeitig das Modell eine physikalisch basierte Grundlage besitzen. Ein Modell, das beide Anforderungen erfüllt, 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.

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 generieren. Abb. 3-1 zeigt eine Schemaskizze der HBV-IWS Modellstruktur. Aus ihr sind alle wesentlichen, im Modell berücksichtigten Teilprozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration zu entnehmen.

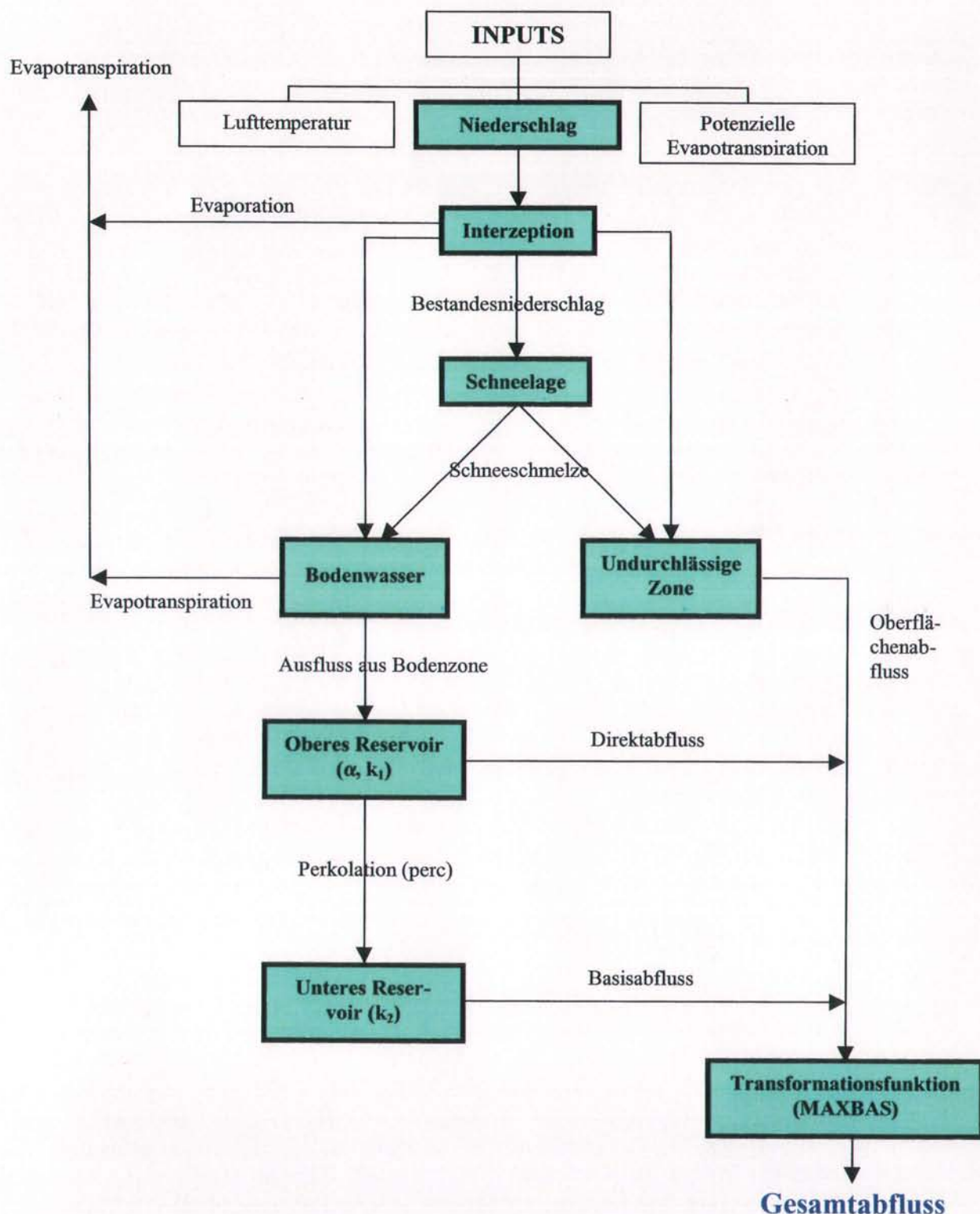


Abb. 3-1: Schematische Struktur des HBV-IWS-Modells (Bardossy et al., 2002)



Das Modell hat insgesamt elf freie Parameter, die durch Modellkalibration identifiziert werden müssen.

Neben dem direkten Abfluss von versiegelten Flächen stellt das Modell für die Abflussbildung aus der Bodenzone zwei Speicher zur Verfügung (oberes nichtlineares Reservoir und unteres lineares Reservoir). 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. Der generierte Abfluss wird schließlich durch eine trianguläre Wichtungsfunktion, die die Zeitverteilung bestimmt, geglättet.

Wenn die Teileinzugsgebiete miteinander verbunden werden, muss 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.

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

Da das Hauptziel dieses Teilprojektes 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.

Da das HBV-Modell ein konzeptionelles Modell ist, mussten die Parameter durch Modellkalibrierung unter Zuhilfenahme der beobachteten Abflüsse bestimmt werden. Um die Parameter mit den Gebietseigenschaften sinnvoll zu verknüpfen, wurde eine lineare Transferfunktion eingeführt, die als unabhängige Variablen die verschiedenen Landnutzungs- und Bodenklassen enthielt. Dadurch war es möglich, die Modellparameter einheitlich als Funktion der Einzugsgebietseigenschaften (Landnutzung, Bodenklasse) abzubilden.

Nach Einführen dieser Beziehung wurde das Modell für die Parameter der Transferfunktion (Steigung, Achsenabschnitt) kalibriert. Zu ihrer Bestimmung wurden 30 Teileinzugsgebiete mit unterschiedlichen Gebietseigenschaften ausgewählt. Das Modell wurde simultan für alle ausgewählten Gebiete für die Zeit von 1983-1988 angewendet. Zusätzlich wurde eine numerische Optimierungstechnik implementiert, um eine effektive Parameterschätzung zu erhalten. Die Zielfunktion für die Optimierung ist die Minimierung der quadratischen Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Abflüssen.

Einen Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für ausgewählte Pegel zeigen die Abbildungen 3-2 und 3-3. Abb. 3-2 zeigt die simulierte Ganglinie für ein Hochwasserereignis auf Grund eines Starkniederschlages, während in der Abb. 3-3 das Hochwasser hauptsächlich das Ergebnis von Schneeschmelze ist. Die Ergebnisse der verschiedenen Landnutzungsszenarien werden zusammen mit denjenigen der Wellenablaufmodellierung in Kap. 6.1 vorgestellt.



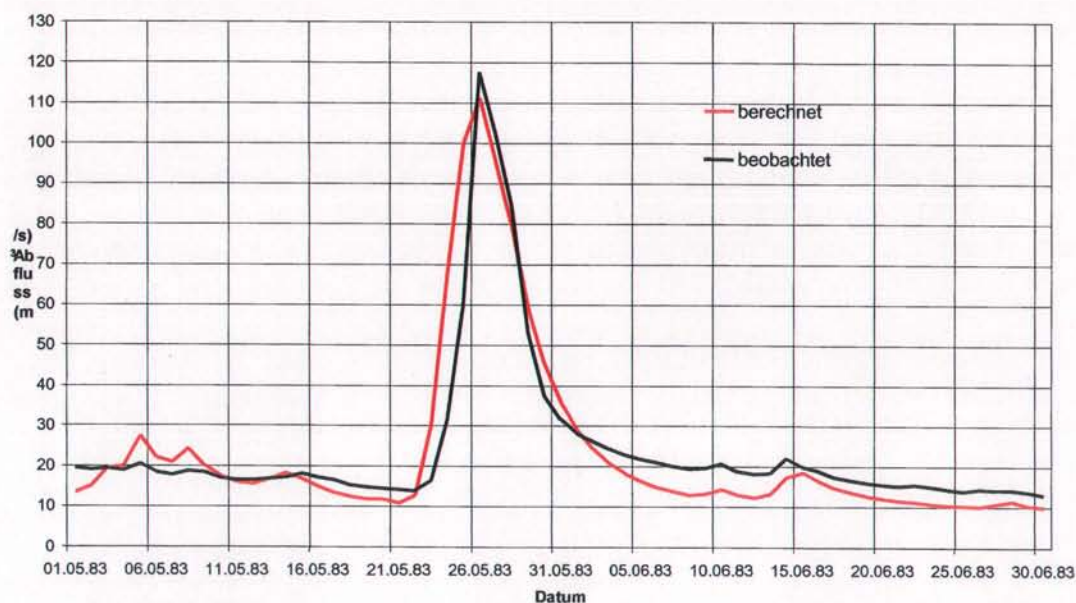


Abb. 3-2: Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für den Pegel Waldenhausen-Tauber (Bardossy et al., 2002)

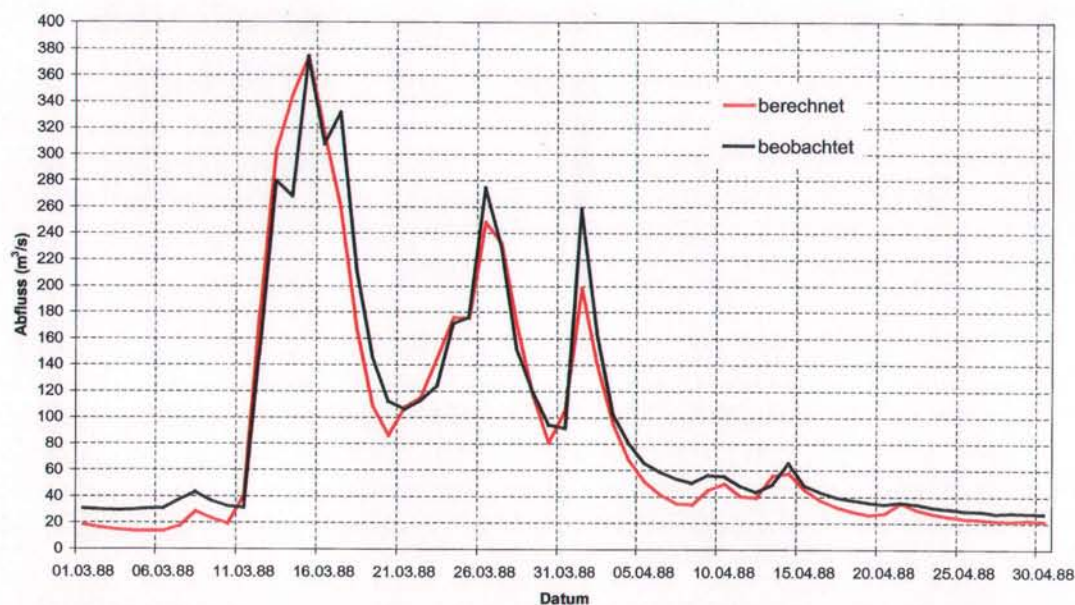


Abb. 3-3: Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien für den Pegel Stein/Kocher (Bardossy et al., 2002)

## 4 Wellenablauf im Rhein und in seinen Hauptnebenflüssen

### 4.1 Wellenablaufmodelle SYNHP und SOBEK

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für den Rhein und seine Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel wurden ein hydrologisches Modell (SYNHP) und ein hydraulisches Modell (SOBEK) eingesetzt (Abb. 4-1).

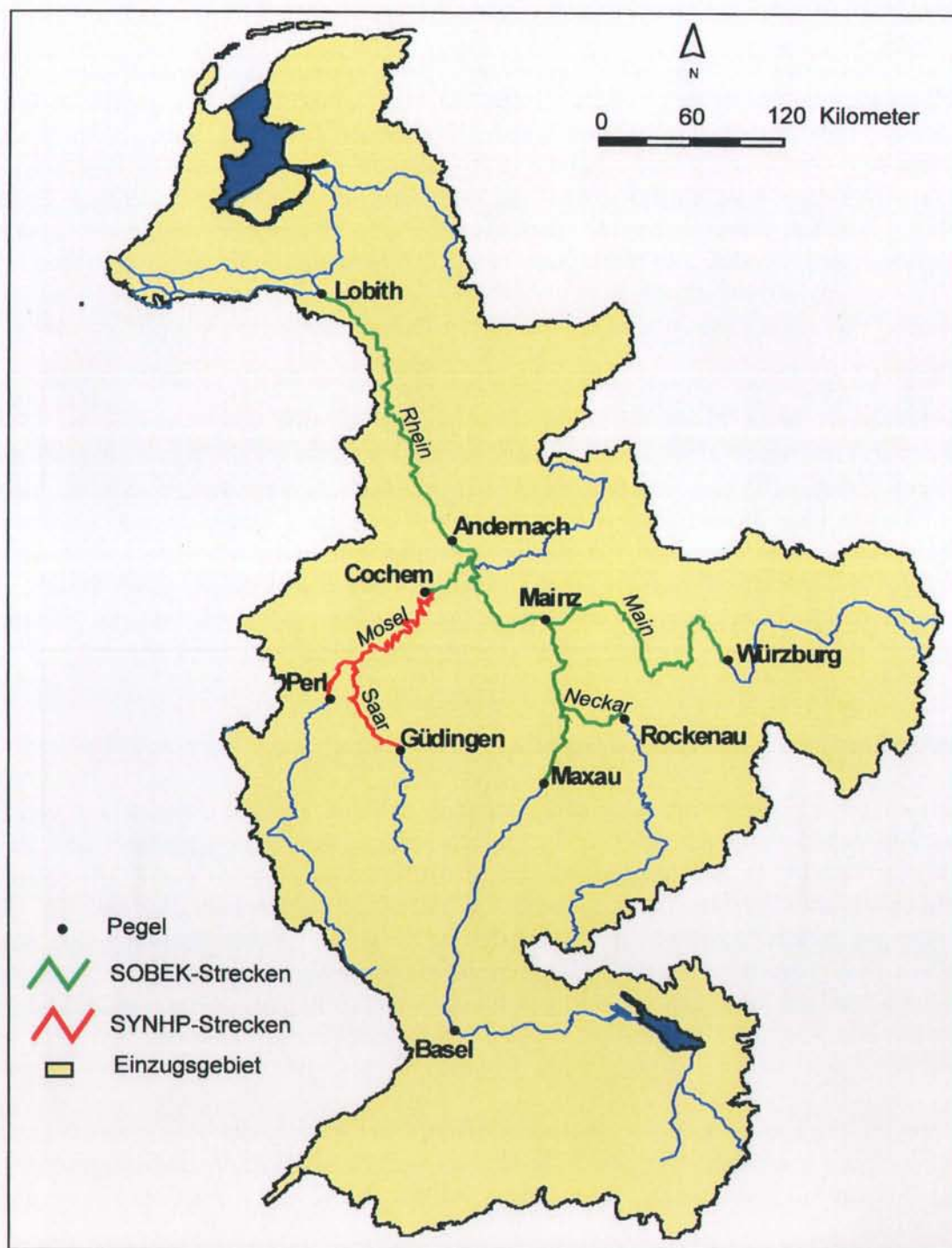


Abb. 4-1: Rheingebiet und Flussabschnitte mit unterschiedlicher Wellenablaufmodellierung



#### 4.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP

Basierend auf einem Modell der BfG 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 Gewässerstrecken. Das Modell SYNHP gehört zur Familie der hydrologischen Modelle, deren Berechnungsverfahren auf der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung basieren, wobei die Bewegungsgleichung durch den Ansatz linearer Einzelspeicher wiedergegeben wird (siehe auch Anl. 1.1).

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 höher gelegenen 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 Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein und gilt für den Zustand des Oberrheins nach Ausbau mit Staustufen. Mit ihm können unterschiedliche Retentionsszenarien berechnet werden. Darüber hinaus wurden auch SYNHP-Modelle für den Oberrhein vor Ausbau mit Staustufen sowie für die Mosel, die Saar und den Main im Laufe der letzten 15 Jahre entwickelt (Busch und Engel, 1990; Busch, 1995; Hoffmann, 1990). Im Rahmen des LAHoR-Projektes wurden das Mosel- und das Saarmodell eingesetzt.

#### 4.1.2 Das hydrodynamische Modell SOBEK

Das eindimensionale hydrodynamische Abflussmodell SOBEK ist eine Entwicklung von Delft Hydraulics und dem Staatlichen Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung (RIZA) in den Niederlanden. Die Abflussberechnungen von SOBEK beruhen auf den Saint-Venant-Gleichungen, bestehend 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 and the Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 1997), (siehe auch Anl. 1.2).

Das Gleichungssystem wird nach dem Preissmann-Box-Verfahren gelöst. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt nach impliziten Verfahren. Zusätzlich enthält SOBEK das Gewässergütemodell DELWAQ, das auf die hydraulische Berechnung aufsetzt. Im Rahmen von LAHoR wird es jedoch nicht benötigt.

Die Geometrie eines Gewässers wird in SOBEK durch eine Serie aufeinander folgender Querprofile definiert, wobei das Gerinne eingeteilt wird in Hauptgerinne, Überflutungsraum 1 und



Überflutungsraum 2, 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 Schaffung von Retentionsraum entlang des Flusses durch Maßnahmen, die Teile des Querprofils verändern (z. B. Deichrückverlegungen), müssen die Querprofile im Modell geändert werden.

Bei der ersten Kalibrierung des SOBEK-Modells für den Rheinabschnitt Andernach-Lobith zeigte sich, dass eine Anpassung der simulierten an die gemessenen Ganglinien entweder nicht oder nur durch die Wahl physikalisch unrealistischer Rauheiten erfolgen kann (Barneveld und Meijer, 1997). Ursache hierfür ist der am Niederrhein sehr ausgeprägte Austausch von Fluss- und Grundwasser, wobei bei ansteigender Welle Wasser vom Fluss in das Grundwasser infiltriert wird, das bei ablaufender Welle wieder in den Fluss zurückfließt.

Deshalb wurde SOBEK zur Modellierung von Hochwasserwellen am Niederrhein mit einem einfachen, auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhenden Grundwassermodell 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 Fluss- 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 (siehe auch Anl. 1.3).

Möglicherweise auftretende Austauschvorgänge zwischen Fluss- und Grundwasser in anderen Gewässerabschnitten wurden über eine Abfluss-/Zuflussganglinie (Neuwieder Becken) oder gar nicht (Oberrhein) berücksichtigt.

Das Modell SOBEK 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 im Rahmen des LAHoR-Projektes mit SOBEK berechneten Gewässerstrecken wurden die Modelle neu erstellt (267 km Ober- und Mittelrhein, 61 km Neckar, 252 km Main, 51 km Mosel) oder völlig neu überarbeitet (229 km Mittel- und Niederrhein).



## 4.2 Datengrundlage

Zur Erstellung und zum Betrieb eines Wellenablaufmodells sind prinzipiell zwei Typen von Daten erforderlich:

- A hydraulisch-geometrische Daten und
- B hydrologische Daten

Die unter A genannten Daten beschreiben die Gerinne einschließlich ihrer Vorländer und Retentionsbereiche und bilden in Verbindung mit Steuerdaten für Bauwerke die Grundlage für die Erstellung der Modelle.

Die Informationen nach B sind als Messgrößen (Wasserspiegelfixierungen, Abflusskurven, historische Wasserstands- und Abfluss-Ganglinien) für die Modellkalibrierung erforderlich. Bei den Szenarienberechnungen zur Ermittlung der Auswirkungen denkbarer bzw. geplanter und aus Klimaänderungen sich ergebender Veränderungen im Einzugsgebiet des Rheins und an seinen Nebengewässern werden diese Ganglinien durch Ergebnisse aus N-A-Berechnungen ersetzt. Nur an den Startpunkten der Modelle an Rhein und Mosel (Maxau und Perl) wurden auch bei den Szenarienberechnungen gemessene Ganglinien eingegeben.

### 4.2.1 Geobasisdaten

Zur Ermittlung der Geometriedaten für das SOBEK-Modell standen zur Verfügung :

- Querprofile der Gerinne
- Höhenmodelle der Ufer und Vorländer (digitale oder digitalisierte Informationen aus topographischen Karten)
- topographische Karten für zusätzliche Höheninformationen sowie für Lageinformationen
- Lage und Höhe von Buhnen
- diverse thematische Kartenwerke
- Bauwerkspläne für die staugeregelten Gewässerstrecken
- Planungsunterlagen für die Retentionsmaßnahmen

Die Querprofile des Gerinnes stammen von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland und wurden von den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern zur Verfügung gestellt. Die Profile liegen in der Regel im Abstand von 100 m vor und sind zum Teil über die höchsten bekannten Hochwasserstände bzw. bis auf eventuell vorhandene Dammkronen geführt. Einen Überblick über die verwendeten Querprofile einschließlich ihrem jeweiligen Peildatum gibt Anl. 2.1.

Bei allen Gewässern mussten für die Vorländer zusätzliche Höheninformationen aus digitalen Höhenmodellen oder aus topographischen Karten gewonnen werden. Eine Zusammenstellung findet sich in Anl. 2.2.

Für alle Gewässerstrecken liegen topographische Karten vor, für den größten Teil des Gebietes im Maßstab 1:5000, für den Niederrhein im Maßstab 1:10000. Die Karten für den bayerischen Main wurden für das Projekt von den Vermessungsämtern Aschaffenburg, Klingenberg, Lohr und Würzburg durch Montage angefertigt.



Wie bereits erwähnt, wurden diesen Karten für Bereiche, in denen keine weiteren Informationen zur Verfügung standen, Höheninformationen entnommen. Sie dienten jedoch in erster Linie als Quelle für Lageinformationen von Punkt-, Linien und Flächendaten wie Flussachse, Flusskilometrierung, Begrenzung von Hauptgerinne, Ufer- und Bühnenbereich sowie der Modellgrenzen, Deichlinien, Abgrenzung durchströmter und nicht durchströmter Vorlandbereiche etc., die für die Erstellung der Querprofile für das SOBEK-Modell nötig sind. Wichtige Informationen hierüber konnten auch dem Rheinatlas der IKS (IKSR, 1998a), den Stromkarten der WSV (Anl. 2.4), den Kartenwerken „Verlauf des Rheins von Basel bis Mainz“ (WWV und WSV, 1994) und „Verlauf des Rheins von Mainz bis Rolandswerth“ (WWV, 1997) entnommen werden. Grundlage für die Einteilung der durchströmten und nicht durchströmten Bereiche lieferte am Oberrhein zwischen Maxau und Mainz die Untersuchung „Wasserspiegellage und Strömungsgeschwindigkeit im Rhein zwischen Iffezheim und Mainz“ (Ludwig, 1996).

Auf der Grundlage der topographischen Karten und unter Zuhilfenahme von Wasserspiegellagenberechnungen wurden die Höhen der Sommerdeiche festgelegt (siehe auch Anl. 2.3).

Als Bühneninformationen standen für den Rhein von Maxau bis zur Mainmündung (km 352 bis km 493.5) sowie von Rolandswerth bis Lobith (km 639 bis km 865) zusätzlich digitale Daten zur Lage (Strom-km) und Höhe zur Verfügung. Für den Mittelrhein (WSA Bingen, km 493,5 bis km 639) wurden die Bühnenhöhen auf der Grundlage der bereits genannten Wasserspiegellagenberechnungen bestimmt, da hier nur die Ausbauhöhe insgesamt und nur in Ausnahmefällen die aktuelle Höhe der Bühnen aus Bauplänen bekannt ist.

Zur Beschreibung der Stauwehre entlang der Mosel, dem Main und dem 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 Baupläne und zum Teil um Vorstudien und Karten mit relativ allgemeinen Angaben. (siehe auch Anl. 3.1).

#### **4.2.2 Wasserspiegelfixierungen und -berechnungen**

Für die stationäre Kalibrierung der Modelle wurden Wasserspiegelfixierungen benötigt. An Rhein, Main und Mosel konnte auf ein großes Datenkollektiv von Fixierungen verschiedener charakteristischer Abflusszustände (Hoch-, Mittel-, Niedrigwasser) zurückgegriffen werden. Die Fixierungen und deren Gültigkeitsbereiche sind Anl. 4.1 zu entnehmen. Zusätzlich konnte an Rhein, Main und Mosel auf Ergebnisse stationärer Wasserspiegellagenberechnungen der BfG zurückgegriffen werden (Busch et al., 1994; Busch et al., 1997; Busch und Rost, 2000). Alle Daten lagen bereits aufbereitet in digitaler Form vor. Lediglich am Neckar waren die Daten nur analog verfügbar. Sie mussten digital erfasst und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden.



#### **4.2.3 Abfluss- und Wasserstandsganglinien für die Kalibrierung und Validierung des SOBEK-Modells**

Grundlage der Kalibrierung und Validierung des Wellenablaufes an Hand historischer Hochwasser des Rheins und seiner Hauptnebenflüsse sind die aus gemessenen Wasserstandsganglinien erzeugten Abflussganglinien im Rhein von Maxau bis Lobith sowie die der Pegel Rockenau (Neckar), Würzburg (Main) und Cochem (Mosel), die den Teilmodellen jeweils als obere Randbedingung eingegeben wurden. Entsprechende Ganglinien weiterer Nebengewässer des Rheins und der Nebengewässer von Neckar, Main und Mosel wurden den Modellen als seitliche Randbedingungen zur Verfügung gestellt. Eine Aufstellung aller Nebenflüsse, die berücksichtigt wurden, ist der Anl. 4.2 zu entnehmen.

Die Zuflussdaten der Nebengewässer wurden von Pegeln herangezogen, die jeweils der Mündung in den nächsten Vorfluter (Rhein, Neckar, Main, Mosel) am nächsten liegen und von denen ausreichend Beobachtungsdaten verfügbar sind. Die berücksichtigten Pegel sowie deren Entfernung zur Mündung des entsprechenden Vorfluters sind ebenfalls in der Anl. 4.2 zusammengefasst.

Bei der Zusammenstellung der Ganglinien konnte auf das Datenkollektiv älterer Untersuchungen (Lammersen et al., 1999) zurückgegriffen werden. Dieses wurde ergänzt um die Nebenflussdaten von Maxau bis Andernach (Rhein), Rockenau bis zur Mündung (Neckar), Würzburg bis zur Mündung (Main), Cochem bis zur Mündung (Mosel). Außerdem kamen die Daten des Hochwassers 1999 hinzu. Das so entstandene Datenkollektiv beinhaltet die 13 wichtigsten Hochwasserereignisse im Rheingebiet seit 1980. Die Abflussganglinien liegen in unterschiedlicher Qualität (digital, analog) und zeitlicher Auflösung (Stundenwerte, Tageswerte, 15-Minutenwerte, diskontinuierliche Werte) vor. Die Zeitschritte variieren zwischen Stunden- und Tageswerten.

Auf Messung im Neuwieder Becken basierende Grundwasserganglinien lagen aus früheren Untersuchungen der BfG vor (Giebel und Hommes, 1994). Diese wurden im Bereich Moselmündung - Andernach zugegeben.

Neben den Zuflusspegeln wurden Daten von weiteren Pegeln zur Kalibrierung und Validierung benötigt. Hierbei handelt es sich um gemessene Wasserstandsganglinien und die zugehörigen Abflussganglinien der modellierten Strecken des Rheins, des Neckars, des Mains und der Mosel. Sie stammen von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland und konnten damit direkt der Datenbank der BfG entnommen werden (HYDABA).

#### **4.2.4 Simulierte Abflussganglinien für die Szenarienberechnung**

Zur Quantifizierung des Einflusses von Landnutzungsänderungen und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheineinzugsgebiet waren schließlich Abflussganglinien für verschiedene Szenarien der Landnutzung und der Klimabedingungen bereitzustellen. Sie wurden als obere und seitliche Randbedingungen in die Wellenablaufmodelle eingegeben und sind das Ergebnis der mesoskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Dabei wurden Abflusssituationen zugrundegelegt, die sich an historischen Hochwassern orientieren. Die 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 keine Abflussganglinien erzeugt werden konnten.



### 4.3 Erstellung der SOBEK-(Teil)-Modelle

Die mit SYNHP zu modellierenden Teilstücke Mosel und Saar waren bereits aus früheren Projekten der BfG vorhanden, die SOBEK-Strecken dagegen mussten erst aufgebaut, kalibriert und verifiziert werden.

Aus Gründen des Projektfortschrittes und der Überschaubarkeit wurde die gesamte zu kalibrierende Modellstrecke (Abb. 4-1) zunächst in die folgenden Teilstrecken unterteilt:

- Rhein von Andernach bis Lobith
- Rhein von Mainz bis Andernach
- Rhein von Maxau bis Mainz
- Main von Würzburg bis zur Mündung
- Neckar von Rockenau bis zur Mündung
- Mosel von Cochem bis zur Mündung

Für jede dieser Teilstrecken wurde ein SOBEK-Modell aufgebaut und für sich kalibriert und validiert. Bei der Teilstrecke Andernach-Lobith handelt es sich dabei um eine zweite Kalibrierung, die aufgrund eines gegenüber der ersten Version aus dem Jahr 1997 (Barneveld und Meijer, 1997) veränderten Höhenmodells nötig geworden war. Für alle anderen Teilstrecken musste das Modell komplett neu aufgebaut werden. Danach wurden die kalibrierten Teilmodelle zusammengesetzt und das Gesamtmodell validiert.

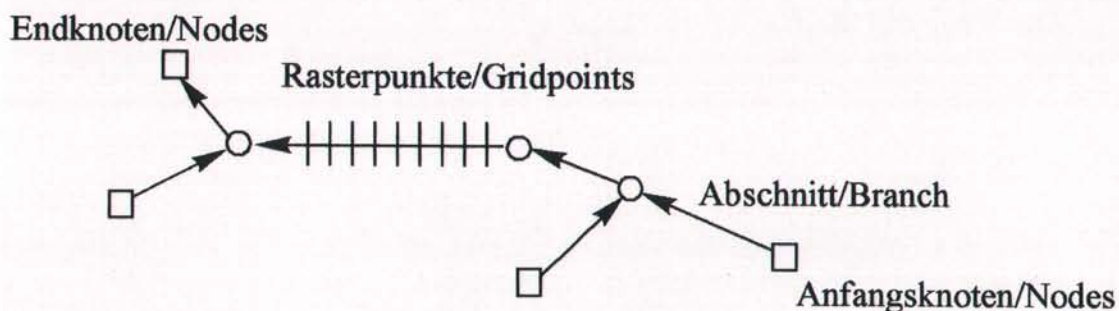
Bei der Erstellung der Teilmodelle wurden im Einzelnen die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen:

- Aufbereitung der Topographie und der Gerinnegeometrie für SOBEK unter Verwendung der ARC-INFO-Anwendung BASELINE und Eingabe in SOBEK
- Aufbereitung der Bauwerksdaten der Stauwehre und Eingabe in SOBEK (nur für die staugeregelten Teilstrecken Main, Mosel und Neckar)
- Festlegung der Rauheiten für das Vorland
- Festlegung der Randbedingungen (obere und untere Randbedingung, seitliche Randbedingungen (Grundwasser, Nebenflüsse) sowie der Startbedingungen und numerischen Parameter

#### 4.3.1 Aufbereitung der Topographie und der Gerinnegeometrie

Die Basis eines SOBEK-Modells bildet die Einteilung des Gewässerlängsschnittes in Flussabschnitte (Branches) (Abb. 4-2). Sie werden miteinander durch Knoten (Nodes) verknüpft. Anzahl und Länge der Branches werden durch wichtige Systemeigenschaften wie Verzweigungen (Flussgabelungen, Zusammenflüsse), wichtige Zuflüsse, Pegel etc. bestimmt. Durch eine Verknüpfung mit der Flussachse und der Flusskilometrierung werden sowohl die Lage eines Branches als auch seine weitere Unterteilung eindeutig festgelegt. Die weitere Unterteilung der Branches erfolgt in regelmäßigen Abständen mit Hilfe der Kompartments. Hierauf können in SOBEK die Rechengitter/ Gridpoints (räumliche Diskretisierung) definiert werden. Die Gridpoints dienen der eindeutigen Zuordnung von Rauheiten, geometrischen Informationen (Querprofile), Bauwerken und Pegeln.





**Abb. 4-2: Einteilung eines SOBEK-Modells (schematisch) in Knoten, Abschnitte und Rasterpunkte (Schieder, 2001)**

Die Geometrie eines Gewässers wird in SOBEK durch eine Serie aufeinander folgender Querprofile definiert, deren Lage über die in SOBEK 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 beschrieben. Darin wird für verschiedene Höhen - bezogen auf ein Referenzniveau (z.B. NN) - die Gesamtprofilbreite und die durchströmte Breite dargestellt. 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 Buhnenfelder und Vorländer berücksichtigt werden können. Sommerpolder werden als Deichhöhe mit dahinter liegendem Poldervolumen im Profil wiedergegeben (Abb. 4-3).



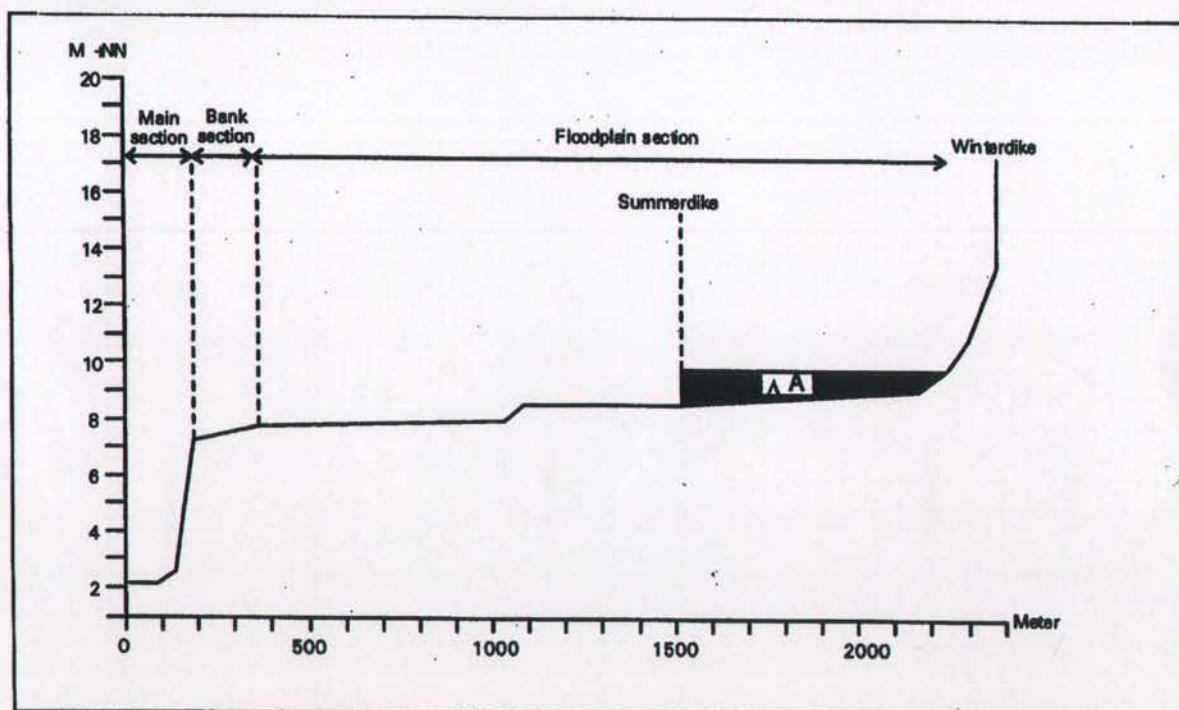
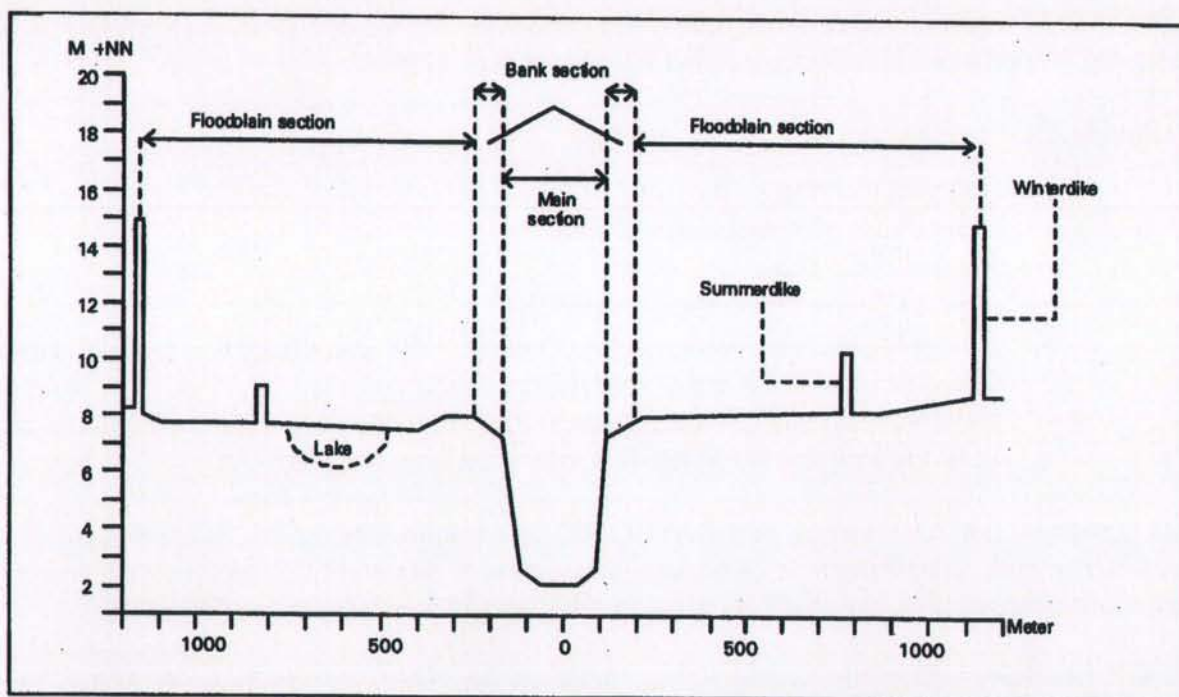


Abb. 4-3: Schematische Darstellung eines Flussquerprofils und seiner Wiedergabe in SOBEK (Barneveld und Meijer, 1997)

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\*. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise findet sich bei Hoefsloot et al. (1999).

Folgende Ziele werden mit BASELINE verfolgt:

- Datenverwaltung
- Darstellung geographischer Daten
- Auswahl von Daten
- Austausch von Daten (Import/Export)
- Aufbereitung von geometrischen Daten für die Erstellung von hydraulischen Modellen (z.B. SOBEK bzw. WAQUA)
- Umwandlung von geometrischen Daten in Eingabedaten für hydraulische Modelle (z.B. Querprofile für SOBEK, Geometriedaten für WAQUA)

Als Hauptziel der Anwendung von BASELINE im Zusammenhang mit SOBEK wird die Standardisierung der Erstellung von Querprofilen angesehen. Manuelle Eingriffe sollen soweit möglich vermieden werden, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Einen Überblick über die wesentlichen Schritte der Datenaufbereitung und der SOBEK-Profilerstellung mit BASELINE gibt Abb. 4-4. Eine nähere Erläuterung erfolgt in Anl. 5.

*\*Anmerkung:*

*Neben der Erstellung von Querprofilen für das eindimensionale SOBEK-Modell kann mit BASELINE auch die Geometrie für das zweidimensionale WAQUA-Modell aufbereitet werden. Bei der Erstellung der SOBEK-Profile können auch Berechnungsergebnisse von WAQUA Verwendung finden. WAQUA-Ergebnisse sind u.a. hilfreich zur Festlegung der durchströmten und der nicht-durchströmten Vorlandbereiche oder bei der Erstellung der Kompartimentgrenzen. Da für den deutschen Rhein jedoch keine WAQUA-Ergebnisse vorliegen, konnte von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht werden (Disse und Hammer, 2000; Disse, 2000; Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee, 1999).*



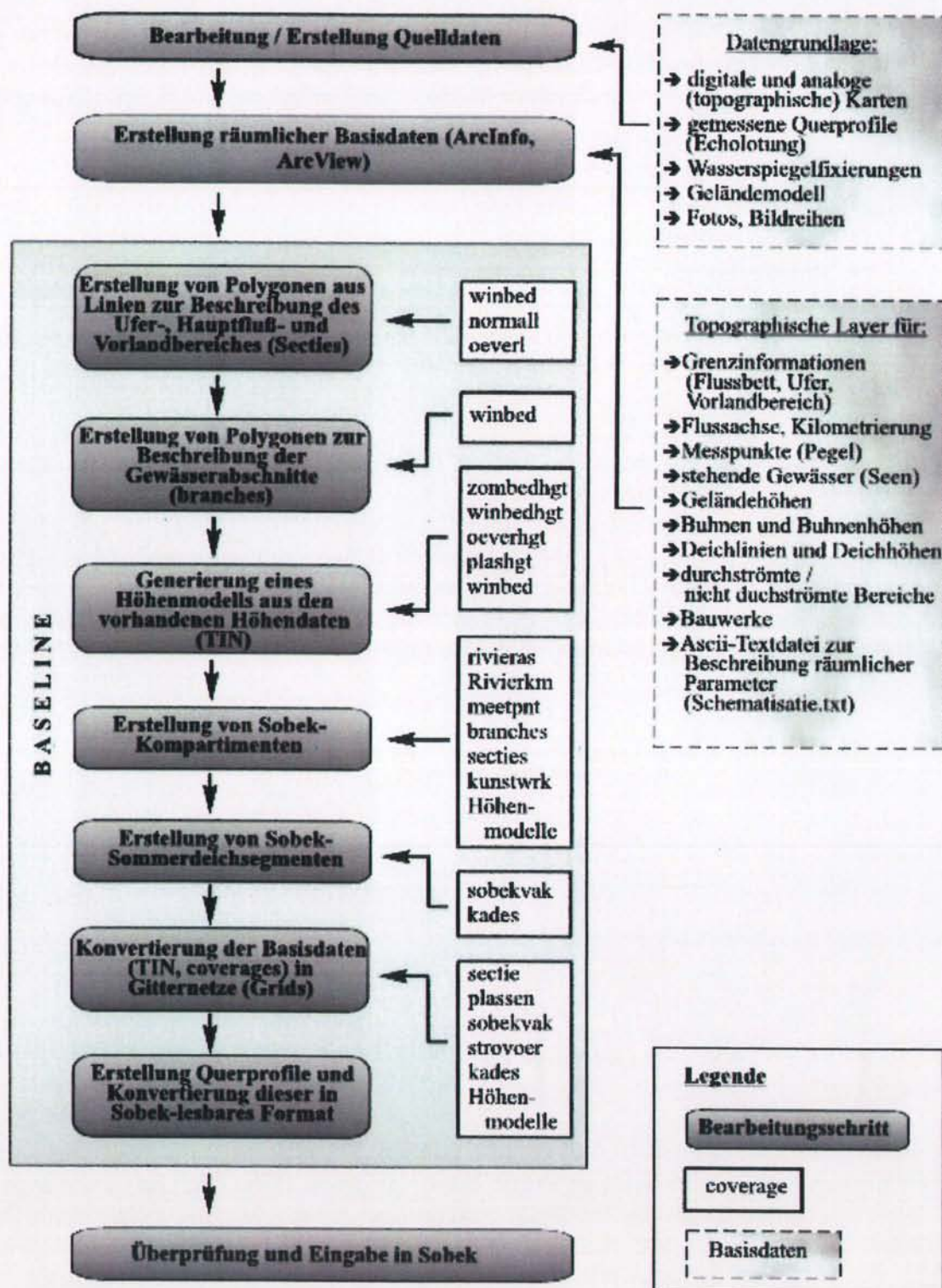


Abb. 4-4: Datenaufbereitung mit BASELINE unter ARC/INFO erweitert nach Schieder (2001) (Erläuterungen siehe Anl. 5)

### 4.3.2 Stauwerke

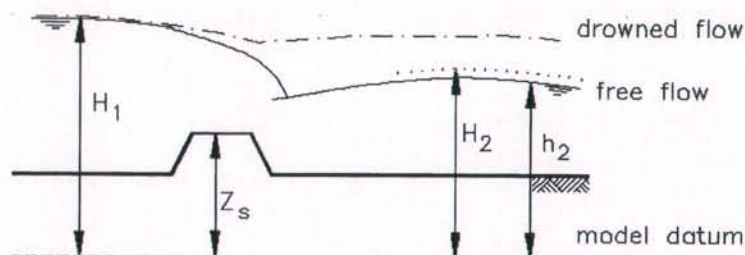
Beim Aufbau der SOBEK-(Teil-)Modelle für die staugeregelten Strecken Neckar, Main und Mosel müssen die Bauwerke der Staustufen sowie deren Steuerung in das Modell eingebaut werden. Hierfür stehen in SOBEK vier verschiedene Module zur Verfügung, mit denen Stauwerke abgebildet werden können:

- Wehr (weir)
- advanced weir
- general structure
- Pumpe (pump)

Mehrere dieser Typen können zu einem sogenannten compound structure zusammengefügt werden (Delft Hydraulics and the Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1997).

Bei der Modellierung der Stauwerke an Neckar, Main und Mosel wurden nur die beiden Typen Wehr (weir) und general structure verwendet.

In SOBEK besteht ein Wehr (weir) (Abb. 4-5) aus einer Schwelle mit definierter Breite und Höhe. Durch Änderung der Schwellenhöhe kann das Wehr gesteuert werden, um z.B. den Wasserstand oberhalb konstant zu halten. Angaben über die Sohlhöhen oder Gerinnebreiten oberhalb und unterhalb des Wehres sind nicht möglich.



**Abb. 4-5: Definition eines Wehres (weirs) in SOBEK**

Auch ein general structure (Abb. 4-6) besteht in SOBEK zunächst einmal aus einer Schwelle. Die Form der Schwelle wird definiert durch Breite ( $W_s$ ) und Höhe ( $Z_{bs}$ ) im Wehrzentrum. Die Verengung des Durchflussprofils am Wehr wird darüber hinaus durch je zwei weitere Angaben zur Sohlhöhe ( $Z_{b1}$ ,  $Z_{bsl}$ ,  $Z_{bsr}$  und  $Z_{b2}$ ) und Bauwerks-/Schwellenbreite ( $W_1$ ,  $W_{sdl}$ ,  $W_{sdr}$  und  $W_2$ ) oberhalb und unterhalb der Schwelle definiert, so dass ein Anschluss an die sonstigen Profilanangaben möglich ist. Darüber hinaus ist die Höhe einer Tor-Öffnung ( $d_g$ ) (gate hight) anzugeben, so dass auch Schütze gerechnet werden können.



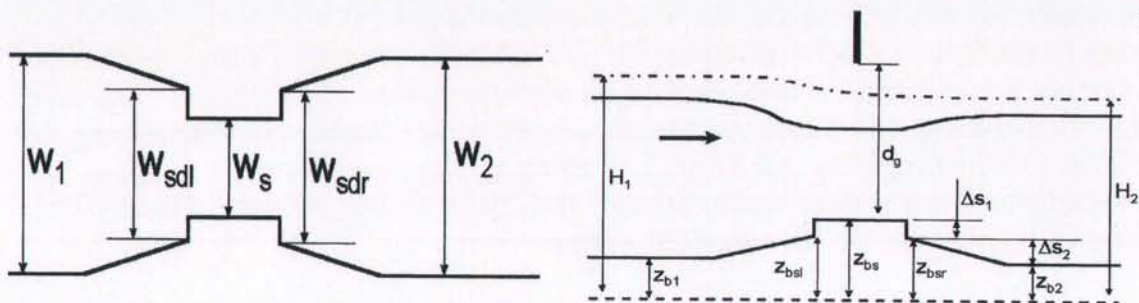


Abb. 4-6: Definition einer General Structure in SOBEK

Für die Mosel gelten folgende modelltechnische Überlegungen:

In dem modellierten Moselabschnitt zwischen Cochem und der Mündung in den Rhein liegen drei Staustufen, die jeweils aus Kraftwerk, Stauwehr und Schleusenanlage bestehen. Die Bauwerke tragen in unterschiedlichem Maße zum Durchfluss bei und werden modelltechnisch in einem Punkt zusammengefasst.

Der wesentliche Durchfluss erfolgt über das Stauwehr. Dieses wird als general structures dargestellt, bei denen die Schütztore immer ganz geöffnet sind, also keine Auswirkungen auf das Eintaugeschehen haben. Statt dessen wird letzteres durch Absenken oder Anheben der Schwellen so gesteuert, dass das jeweilige vorgegebene Stauziel eingehalten wird. Bei Hochwasser ist das Wehr total abgesenkt, so dass freie Abflussverhältnisse herrschen.

Für die Wehre an der Mosel besteht ein umfangreiches Steuerreglement mit bis zu fünf Steuerkriterien pro Staustufe. Dieses Reglement wurde leicht vereinfacht in SOBEK implementiert.

Das Kraftwerk trägt zum Hochwasserabfluss nur geringfügig bei. Im Modell wird der durch diese Anlage geführte Abfluss dem Wehr zugeschlagen. Dies hat keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Die Schleusenanlage wird bei Hochwasser geschlossen, die Hochwassertore werden aber bei entsprechend hohen Wasserständen zusammen mit weiteren Teilen des Schleusenbereiches überströmt. Dieses Phänomen wird in SOBEK als festes, nicht gesteuertes Wehr (weir) dargestellt, dessen Schwellenhöhe der Höhe der Oberkante der jeweiligen Schleusentore entspricht.

Die Bauwerke Schleuse und Stauwehr, dargestellt als weir bzw. general structure, sind in SOBEK miteinander verknüpft als compound structure.

Einzelheiten über Bauwerks- und Steuerdaten für die Staustufen der Mosel sowie deren Umsetzung in SOBEK sind Bommel und Meijer (2001) zu entnehmen.

Für den Main gelten ähnliche modelltechnische Annahmen:

In der mit SOBEK modellierten Strecke des Mains von Würzburg bis zur Mündung liegen insgesamt 20 Staustufen. Auch diese Staustufen bestehen jeweils aus einem Kraftwerk, einem



Stauwehr und einer Schleusenanlage, für die die Ausführungen zur Mosel entsprechend gelten. Die Staustufen werden deshalb wie bei der Mosel als general structure mit vollkommen geöffnetem Schütz (gate) bzw. weir dargestellt und in einem compound structure zusammengefasst, wobei der Kraftwerksdurchfluss modelltechnisch dem Wehr zugeschlagen wird. Auch hier erfolgt die Steuerung der Wehre zur Einhaltung der Stauziele über die Veränderung der Schwellenhöhe. Das im Gegensatz zur Mosel sehr einfache Steuerreglement mit nur zwei Steuerkriterien (Stauhaltung mit vorgegebenem Stauziel und Stauaufhebung) konnte ohne weitere Vereinfachung in das SOBEK-Modell eingebaut werden.

Einzelheiten über Bauwerks- und Steuerdaten für die Staustufen im Main sowie deren Umsetzung in SOBEK sind in Meijer et al. (2001a) und Weidema et al. (2001b) beschrieben.

*Am Neckar wurden folgende modelltechnische Annahmen getroffen:*

Im Bereich des Neckars zwischen Rockenau und Mündung liegen sechs Staustufen mit je einem Stauwehr.

Vier der sechs Stauwehre sind unmittelbar mit je einer Schleusenanlage mit Doppelschleuse verbunden. Die vier Schleusenanlagen werden aber im Gegensatz zu Mosel und Main bei Hochwasser als abflussunwirksam betrachtet und modelltechnisch nicht berücksichtigt.

Bei den beiden anderen Staustufen (Ladenburg und Wieblingen) zweigen kurz oberhalb der Wehre Schifffahrtskanäle ab (Knoten 20/21 bzw. 17/18 in Anl. 6 Neckar), die einige Kilometer unterhalb der Wehre wieder in den Neckar münden (Knoten 22 bzw. 19 in Anl. 6 Neckar). An den Mündungen der Kanäle in den Neckar werden die Schiffe auf das niedrigere Niveau des Neckars geschleust. In beiden Fällen werden Schifffahrtskanal und parallel verlaufender Neckar in SOBEK als parallele Zweige (branches) modelliert, die oberhalb des Wehrs voneinander abzweigen und weiter unterhalb wieder zusammenkommen. Während sich im oberen Teil des „Neckar-Zweiges“ das Wehr befindet, liegt in seinem unteren Teil, der den Schifffahrtskanal darstellt, die Schleuse. In beiden Fällen wird eine Überströmung der Schleusenanlage bei hohen Wasserständen angesetzt. Die Schleusenanlage wird hier deshalb wie an Mosel und Main als festes Wehr (weir) mit einer Schwellenhöhe simuliert, die der Oberkante des niedrigsten Schleusenobertoers bzw. des Hochwasserschutztors entspricht.

Alle sechs Wehre werden in SOBEK als bewegliche, steuerbare Wehre (weirs) modelliert. Wie beim Main kennt das Steuerreglement nur einen Bereich, in dem die Staustufe eingestaut ist und ein vorgegebenes Stauziel eingehalten werden muss, und einen zweiten Bereich, in dem aufgrund hoher Abflüsse der Stau aufgehoben wird und freier Abfluss herrscht. Dieses Reglement mit den entsprechenden Stauzielen wurde in SOBEK realisiert.

Bei den genannten vier Staustufen wird der Abfluss über die Kraftwerke wie bei Mosel und Main dem Stauwehr zugeschlagen. Die beiden anderen Kraftwerke liegen in Verbindungsgerinnen vom Schifffahrtskanal zum Neckar. In diesem Fall werden in SOBEK jeweils oberhalb des Wehres der Leistung des Kraftwerkes entsprechend  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  entnommen und weiter unterhalb dem Fluss wieder zugeleitet.

Einzelheiten über Bauwerks- und Steuerdaten für die Staustufen im Neckar sowie deren Umsetzung in SOBEK sind in (Jablonski, 2001) zu finden.



### 4.3.3 Rauheiten

In SOBEK muss für jeden der drei Profilbereiche Hauptgerinne (main section), Überflutungsraum 1 (floodplain 1) und Überflutungsraum 2 (floodplain 2) die Sohlrauheit festgelegt werden. Dafür können verschiedene Ansätze zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit gewählt werden. Von den insgesamt sechs Möglichkeiten, die SOBEK anbietet, wurden in allen Teilmodellen nur die Ansätze von Strickler und Nicuradse gewählt. Da der SOBEK-Rechenkern nur den Chézy-Ansatz verwendet, werden die Rauheitsbeiwerte  $k_s$  bzw.  $k_n$  intern in Chézy-Beiwerte umgerechnet. Neben der freien Wahl der Berechnungsansätze für die drei Profilbereiche können die Beiwerte darüber hinaus sowohl ortsabhängig entlang des Flusses als auch wasserstands- oder abflussabhängig eingegeben werden. (näheres siehe Delft Hydraulics and the Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1997).

**Tab. 4-1: In den Teilmodellen verwandte Rauheitsparameter nach Strickler ( $k_s$ ) und Nicuradse ( $k_n$ ) mit und ohne Abhängigkeit von Abfluss  $Q$  bzw. Strecke  $x$**

Teilmodell	Hauptgerinne	Überflutungsraum 1	Überflutungsraum 2
<b>Neckar: Rockenau bis Mündung</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s$ = $k_s$ (Hauptgerinne)	$k_n = 0,2 \text{ m}$
<b>Main: Würzburg bis Mündung</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s$ = $k_s$ (Hauptgerinne)	$k_n(x)$ aus CORINE Daten
<b>Mosel: Cochem bis Mündung</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s$ = $k_s$ (Hauptgerinne)	$k_n(x)$ aus CORINE Daten
<b>Rhein: Maxau bis Mainz</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s = 30 \text{ und } 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	$k_n(x)$ aus topographischen Karten
<b>Rhein: Mainz bis Andernach</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	$k_n = 1$
<b>Rhein: Andernach bis Lobith</b>	$k_s(Q,x)$	$k_s = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	$k_n(x)$ aus topographischen Karten

Tab. 4-1 gibt einen Überblick über die in den Teilmodellen gewählten Parameter (Details siehe Bommel und Meijer, 2001; Jablonski, 2001; Meijer et al., 2001a; Meijer et al., 2001b; Schieder, 2001 und Weiland, 2001). Es wird deutlich, dass unterschiedliche Ansätze gewählt wurden, was u.a. in der unterschiedlichen Charakteristik der Gewässerabschnitte begründet liegt.

In den staugeregelten Flüssen Neckar, Main und Mosel gibt es keine abflusswirksamen Buhnen, weshalb dem als Überflutungsraum 1 schematisierten Teil der Querprofile de facto die gleichen Eigenschaften wie dem Hauptgerinne zugesprochen werden. Dagegen musste in den Gewässerabschnitten des Rheins mit seinen Buhnen der Überflutungsbereich 1 anders abgebildet werden. Hier wurden sowohl räumlich als auch bezüglich Abfluss bzw. Wasserstand konstante  $k_s$ -Werte von 30, 35 bzw. 26  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$  angenommen.

Auch die  $k_n$ -Werte für den als Überflutungsraum 2 definierten Teil der Querprofile wurden unterschiedlich gewählt. Für den Neckar wurde ein einheitlicher Rauheitsbeiwert von  $k_n = 0,2 \text{ m}$  angesetzt, für den Mittelrhein  $k_n = 1$ . Die Bau- und Waldgebiete wurden anhand der topographi-



**Tab. 4-2: Nikuradse-Werte in Abhängigkeit von der Landnutzung in den Vorländern im Teilmodell Maxau - Mainz (Weiland, 2001) und Andernach - Lobith (Barneveld und Meijer, 1997; Schieder, 2001)**

Teilmodell Rhein: Maxau bis Mainz		Teilmodell Rhein: Andernach bis Lobith	
Landnutzung	$k_n$ [m]	Landnutzung	$k_n$ [m]
Wiesen	0,2	Wiesen, Ackerflächen	0,25
Ackerflächen	0,5		
Wiesen mit vereinzeltem Baumbestand	1		
Schwach bebaute Flächen	5	Wälder, bebaute Flächen, Strecken mit viel Brücken	5
Wälder und stark bebaute Flächen	10		

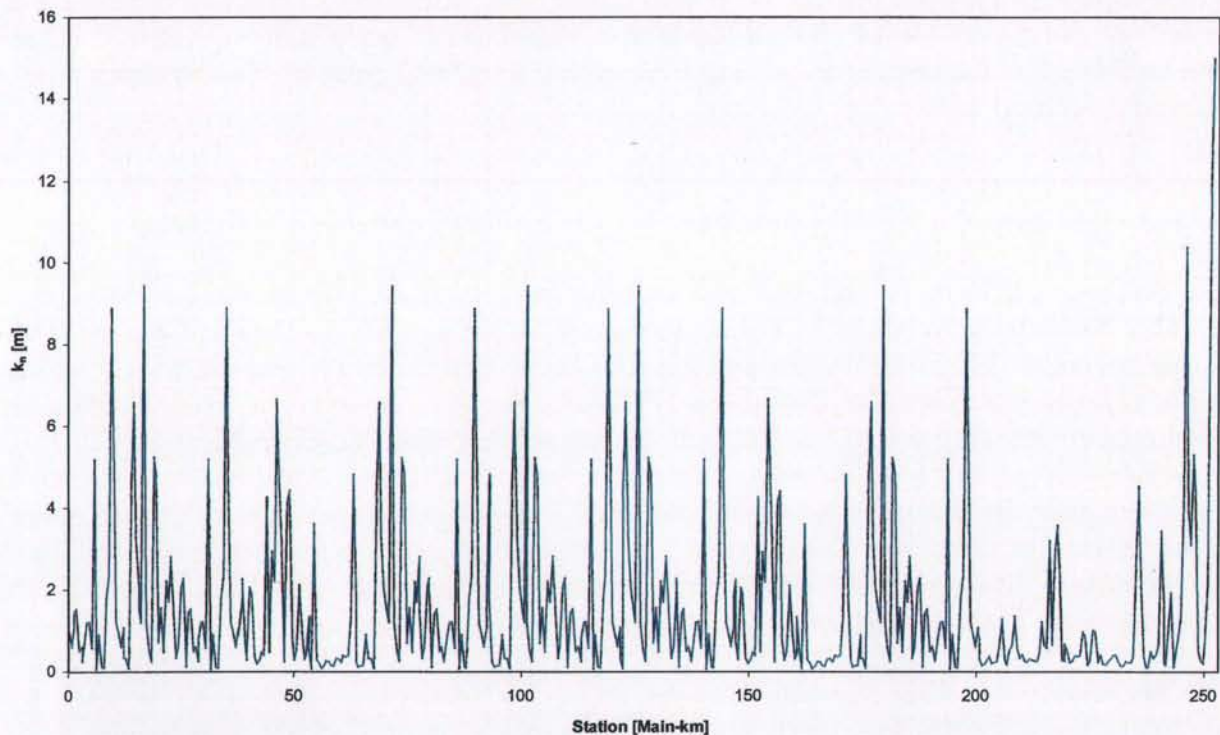
The graph plots the coefficient  $k_{\alpha}$  [m] against the station number [Rhein-km]. The data is represented by a dark blue step function. The function starts at 0 for stations 350 to 360, jumps to 10 at station 360, drops to 1 at station 390, jumps to 5 at station 425, drops to 0 at station 430, jumps to 0.5 at station 435, drops to 0 at station 445, jumps to 1 at station 455, drops to 0 at station 465, jumps to 1 at station 470, and finally jumps to 10 at station 495, where it remains until station 500. Vertical red lines are positioned at stations 360, 430, 445, 495, and 500.

Station [Rhein-km]	$k_{\alpha}$ [m]
350 - 360	0
360 - 390	10
390 - 425	1
425 - 430	5
430 - 435	0
435 - 445	0.5
445 - 455	0
455 - 465	1
465 - 470	0
470 - 495	1
495 - 500	10

**Abb. 4-7: Rauheitsverteilung für die Vorländer am Beispiel des Oberrheins zwischen Maxau (km 362,3) und Mainz (km 498,3) (Weiland, 2001)**



Abb. 4-8 zeigt die Ergebnisse der Berechnung für die Verteilung der Vorlandrauheiten am Main.



**Abb. 4-8: Rauheitsverteilung für die Vorländer am Beispiel des Mains ( Meijer et al., 2001b)**

Für das Hauptgerinne wurde in allen Teilmodellen der Ansatz nach Strickler gewählt, weil mit diesem Ansatz die meisten Erfahrungen und Literaturwerte vorliegen. In allen Teilmodellen wurde die Möglichkeit gewählt, innerhalb eines Modellzweiges (branch) die Rauheitsbeiwerte sowohl räumlich als auch abflussabhängig zu variieren. Die Bestimmung der Beiwerte erfolgte im Rahmen der Kalibrierung der Modelle; sie ist deshalb Gegenstand des Kapitels 4.4.

#### 4.3.4 Festlegung der Randbedingungen für das SOBEK-Modell

Nach Festlegung der sogenannten Topographie in SOBEK und Einlesen der mit BASELINE erzeugten Querprofile müssen in SOBEK die Randbedingungen definiert werden. Dabei unterscheidet man zwischen oberen, unteren und seitlichen Randbedingungen.

Zur Definition der oberen und unteren Randbedingung eines SOBEK-Modells können wahlweise Wasserstände oder Abflüsse eingegeben werden, wobei zuvor im Modell die Wasserstand-Abflussbeziehung in Form einer Abflusstafel abzulegen ist. Im stationären Fall handelt es sich jeweils um einen Eingabewert, im instationären Fall um eine Ganglinie.

Die seitlichen Randbedingungen sind Zu- und Abflüsse, die dem Modell seitlich zu- bzw. abgeführt werden. Dabei handelt es sich um stationäre oder instationäre Zuflüsse aus den Nebenflüssen, um den Zufluss von Oberflächenwasser und um den Wasseraustausch mit dem Grundwasserleiter.



Bei der Verifizierung, Kalibrierung und Validierung des Gesamtmodells und seiner Teilmodelle wurden als obere und seitliche Randbedingungen jeweils gemessene Abflüsse und als untere Randbedingungen jeweils gemessene Wasserstände bzw. Abflusstafeln eingegeben. Bei der Szenarienberechnung am Gesamtmodell handelte es sich dagegen um simulierte Abflüsse als obere und seitliche Randbedingungen, während die untere Randbedingung bei Lobith durch eine Abflusstafel definiert wird.

#### **4.3.4.1 Festlegung der Randbedingungen für die Kalibrierung und Validierung**

Die Festlegung der oberen und unteren Randbedingung ergibt sich direkt aus der Einteilung des SOBEK-Modells in Teilmodelle. Dabei wurden wichtige Pegel und natürliche Grenzen (Nebenflussmündungen) als Schnittstellen gewählt. Die benötigten Daten (Wasserstände und Abflüsse) konnten im wesentlichen der Datenbank HYDABA der BfG entnommen werden oder wurden für dieses Projekt aufbereitet. Die Daten für Lobith wurden vom RIZA bereitgestellt.

Zur Festlegung der seitlichen Randbedingungen, die im Modell die seitlichen Zuflüsse durch die Nebenflüsse repräsentieren, wurden die Gewässerkundlichen Flächenverzeichnisse der Bundesländer Bayern, Hessen, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (Anl. 2.6) sowie die mündungsnächsten Pegel der Nebenflüsse mit geeigneten Abflussdaten herangezogen.

Die Entfernung von dem mündungsnächsten Pegel zur Nebenflussmündung wurde dem Modell als Laufzeit zur Verfügung gestellt. Hierbei wurde eine mittlere Wellenlaufgeschwindigkeit von 1,5 m/s angenommen. Das nicht erfasste Einzugsgebiet bis zur Mündung wurde über einen Vergrößerungsfaktor berücksichtigt. Auf der Modellstrecke Andernach-Lobith wurden für die Nebenflüsse die schon in der vorangegangenen Untersuchung „Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein“ (Lammersen et al., 1999) ermittelten Laufzeiten und Faktoren verwendet, die im Wesentlichen nach der gleichen Methode ermittelt worden sind (Anl. 4.2).

Neben den über Pegel erfassten Zuflüssen sind zusätzliche Zuflüsse aus nicht durch Pegel erfassten - meist kleineren - Flächen zu berücksichtigen. Diese wurden als Zwischeneinzugsgebiete definiert, für die die Abflussganglinien durch Übertragung der Ganglinien eines charakteristischen benachbarten Pegels bestimmt wurden (Anl. 4.3).

Seitliche Zuflüsse erfolgen nicht nur über das oberirdische Einzugsgebiet; es findet auch ein Austausch mit dem Grundwasser statt. Dies wird im Neuwieder Becken (Modellstrecke Mosel-Andernach) und am Niederrhein (Modellstrecke Andernach-Lobith) zusätzlich als Randbedingung berücksichtigt. Dabei wurden in der Rheinstrecke zwischen Mosel und Andernach gemessene Grundwasserstand-Ganglinien als Randbedingungen eingegeben, in der Rheinstrecke Andernach-Lobith dagegen Grundwasser-Abflussganglinien, die mit dem Grundwassermodell für diese Strecke berechnet wurden. In beiden Fällen wurden die Ganglinien als diffuse Quellen eingegeben, d.h. als Abflussspende pro Meter Flussstrecke [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. Diese kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen, je nachdem ob Grundwasser in das Flusswasser oder Flusswasser in das Grundwasser einströmt.

Der Modellaufbau mit den seitlichen Randbedingungen ist in Anl. 6 dargestellt.



#### 4.3.4.2 Aufbereitung der Ganglinien für die Kalibrierung und Verifizierung

Die Abflussganglinien lagen in unterschiedlicher Qualität (digital, analog) und zeitlicher Auflösung (Stundenwerte, Tageswerte, 15-Minutenwerte, diskontinuierliche Werte) vor. Sämtliche Ganglinien mit einer zeitlichen Auflösung von mehr als 1 Stunde wurden mittels Interpolation in Stundenwerte überführt. Hierzu wurden die  $Q(t)$ -Ganglinien zunächst integriert und der  $V(t)$ -Integralverlauf mit einer geglätteten, in Stundenwerte aufgelösten Kurve interpoliert. Die geglättete  $V(t)$ -Kurve darf hierbei keine negativen Gradienten aufweisen, und muss durch alle Stützstellen des zeitlich grob aufgelösten Integrals verlaufen. Aus der Rückdifferenzierung des geglätteten Integrals ergibt sich die integralerhaltend interpolierte Ganglinie. Abb. 4-9 links veranschaulicht das Prinzip der angewendeten Interpolation. Abb. 4-9 rechts zeigt als Beispiel eine Tageswerteganglinie, die in Stundenwerte überführt wurde.

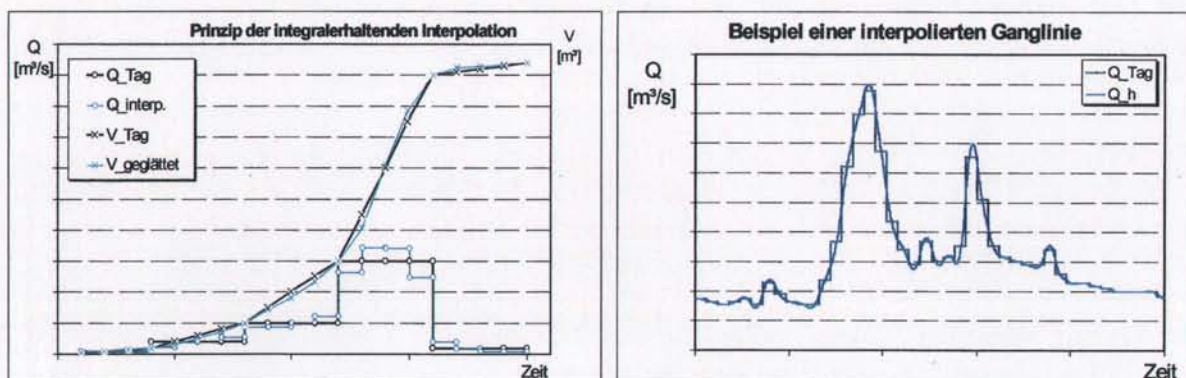


Abb. 4-9. Integralerhaltende Interpolation von zeitlich gröber als 1 h aufgelösten Ganglinien

Die in digitaler Form verfügbaren Ganglinien lagen in unterschiedlichen Dateiformaten vor. Diese wurden mittels entsprechend angepasster Konversionsprogramme zunächst in ein einheitliches Dateiformat gebracht und gleichzeitig auf Plausibilität (Fehlwerte, unplausible Gradienten, zu große oder negative Zeitsprünge) geprüft. Mit Hilfe weiterer Konversionsprogramme wurden diese Ganglinien für die Belange des Wellenablauf-Simulationsprogramms weiterverarbeitet. Hierzu wurden Funktionen implementiert zur Extraktion des interessierenden Zeitausschnittes, zur beliebigen zeitlichen Verschiebung von Ganglinien sowie zur Vergrößerung und Verkleinerung der Ganglinienwerte durch Faktoren. Alle Originalganglinien sowie die daraus abgeleiteten Varianten werden in einer hierzu aufgebauten Datenbank verwaltet. Die Daten stehen auch auf CD-ROM zur Verfügung.

Zu den Ganglinien speichert die Datenbank u.a. die Informationen über Dateinamen, Fluss, Pegel, Zeitbereich und zeitliche Auflösung. Die zeitaufwendige Aufbereitung aller benötigten Ganglinien für die Belange des SOBEK-Modells wird mit Hilfe der Datenbank automatisiert. Mit den Informationen über die interessierenden Pegel, die Zeitbereiche der Hochwasserereignisse, die jeweils notwendigen zeitlichen Verschiebungen sowie die Vergrößerungs- und Verkleinerungsfaktoren werden die entsprechenden Originalganglinien herausgesucht und im Batch-Betrieb mit Hilfe der Konvertierungsprogramme weiterverarbeitet.

Die erzeugten Dateien können vom User-Interface des Simulationsprogramms SOBEK in ein existierendes Modell übernommen werden. Das manuelle Importieren der Ganglinien über das User-Interface von SOBEK wäre jedoch angesichts der Vielzahl der für das Modell benötigten



Gangliniendateien viel zu zeitaufwendig. Daher wurde ein sog. Präprozessor entwickelt, der das Austauschen der Ganglinien für ein bereits existierendes Modell automatisiert. Der Präprozessor durchsucht die Input-Dateien des Modells und tauscht gemäß den Informationen einer bereitzustellenden Steuerdatei die hierin enthaltenen Ganglinien aus. Dazu können die o.g. Originalganglinien sowie deren Abwandlungen verwendet werden. Optional erlaubt der Präprozessor das individuell steuerbare zeitliche Verschieben und/oder Vergrößern bzw. Verkleinern der Ganglinien, so dass diese Prozedur auch erst an dieser Stelle der Ganglinienaufbereitung erfolgen kann. Falls erforderlich können die erzeugten Ganglinien in wählbarer Form rückwärtig verlängert werden, um ggf. Startbedingungen zu schaffen, die das numerische Einschwingen des Simulationsprogramms ermöglichen. Darüber hinaus bietet der Präprozessor die Möglichkeit, eine beliebige Anzahl von Ganglinien nach optionaler zeitlicher Verschiebung und/oder Vergrößerung bzw. Verkleinerung zu addieren.

Der beschriebene Präprozessor für das Simulationsprogramm SOBEK wurde mit gleicher Funktionalität auch in einer auf das hydrologische Simulationsmodell SYNHP zugeschnittenen Variante entwickelt.

Das Präprozessor-Programm ist mit einer detaillierten Anleitung und den entsprechenden Steuerdateien auf CD-ROM verfügbar. Dort sind u.a. die Faktoren und die zeitliche Verschiebung der Ganglinien aufgelistet, die zur Anpassung der Zuflussganglinien benötigt werden. Hierbei wurden die Laufzeit vom entsprechenden Pegel zur Einmündung des Nebengewässers (zeitliche Verschiebung) und die Vergrößerung der Ganglinie durch den Einzugsgebietszuwachs vom Pegel bis zur Mündung (Faktor) berücksichtigt. Die Anlagen 4.2 und 4.3 geben einen Überblick über die verwendeten Größen und Randbedingungen.

#### **4.3.4.3 Festlegung der Randbedingungen und Aufbereitung der Ganglinien für die Szenarienberechnungen**

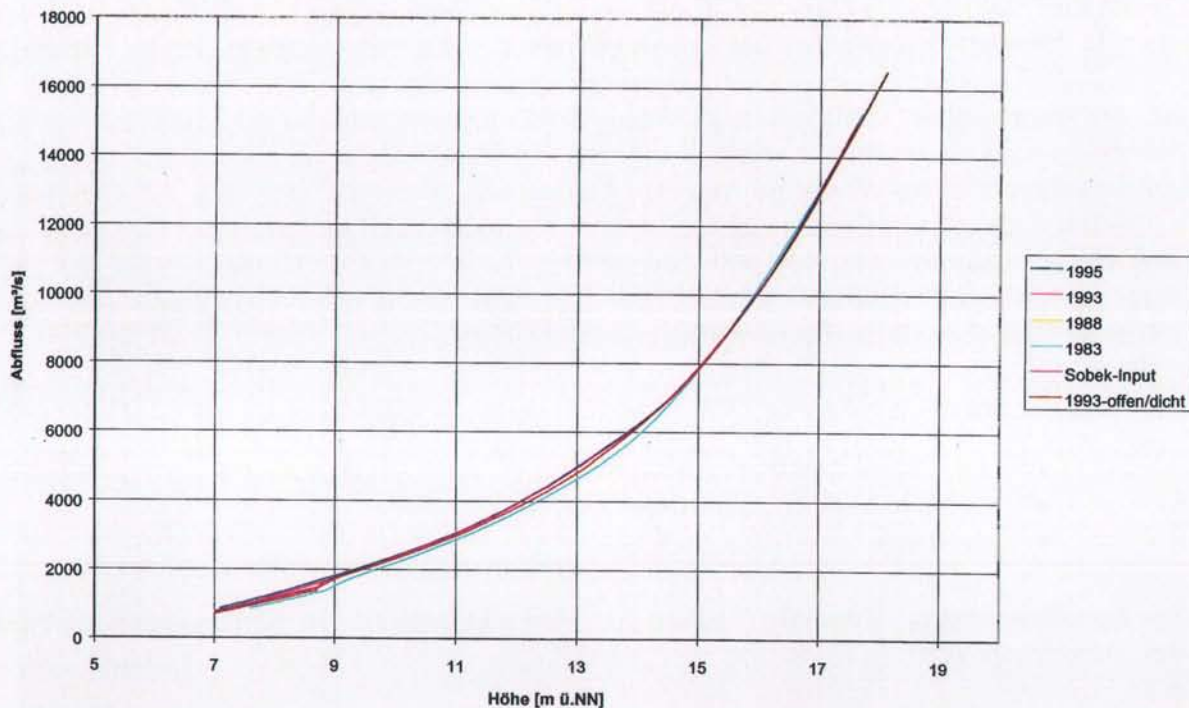
Für die Szenarienberechnungen mussten die vom Modell HBV-IWS errechneten Ganglinien für die Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten so angepasst werden, dass sie in SOBEK bzw. SYNHP als obere bzw. seitliche Randbedingungen eingelesen werden konnten. Hierzu wurde der Präprozessor genutzt, mit dessen Hilfe bereits die gemessenen Ganglinien für die Verifizierung und Kalibrierung in die SOBEK-Modelle eingelesen wurden. Dabei wurde mittels einer Steuerdatei eindeutig festgelegt, welche Ganglinien aus HBV-IWS welche Randbedingungen in SOBEK bzw. SYNHP darstellen. Weil die in SOBEK bzw. SYNHP definierten Randbedingungen für die Nebenflüsse nicht immer identisch mit den Ausgängen der Teileinzugsgebiete in HBV-IWS waren, wurden die Ganglinien aus HBV-IWS über Faktoren, die die Größe der Teileinzugsgebiete berücksichtigen, und Fließfaktoren in die gewünschten Randbedingungen umwandelt. Auch dies geschah mit Hilfe des Präprozessors. Anl. 4.3 gibt einen Überblick über die zur Umwandlung benötigten Parameter.

#### **4.3.4.4 Festlegung der unteren Randbedingung für die Validierung des Gesamtmodells und für die Szenarienberechnungen**

Als untere Randbedingung wurde die Wasserstandsganglinie durch eine Abflusstafel ersetzt, um die untere Randbedingung nicht zu fixieren. Dies wäre bei einer gemessenen Wasserstandsganglinie als Randbedingung der Fall. Bei der Validierung soll aber die Güte des kalibrierten Modells überprüft werden, und bei der Szenarienberechnung sollen Naturzustände simuliert werden, die in der Natur bisher nicht aufgetreten sind. RIZA musste zu diesem Zweck die Abflusstafel für



den Pegel Lobith überarbeiten. Da die Wasserstände in Lobith stark von Art und Umfang der Wehrsteuerung in den niederländischen Rheinarmen abhängen und sich zudem die dortige Flussmorphologie ständig verändert, handelt es sich hierbei nicht um die Daten einer einzelnen Kurve (Wasserstand-Abfluss-Kurve). Statt dessen wurden nach Jahrgängen sowie nach Art und Umfang der Steuermaßnahmen unterschiedene Funktionen vorgegeben. Der Vergleich der Funktionskurven mit der bei früheren SOBEK-Berechnungen benutzten Abflusstafel (Lammersen, 1999) zeigte, dass diese in der Mitte aller Funktionen liegt (Abb. 4-10). Berechnungen mit den unterschiedlichen Abflusstafeln erzeugen im ansteigenden Ast der Welle Differenzen von maximal 25 m<sup>3</sup>/s. Im oberen, für die Berechnung von Hochwassern besonders wichtigen Abflussbereich sind die Abweichungen jedoch sehr gering. Deshalb wurde die bisher benutzte Abflusstafel beibehalten.



**Abb. 4-10: Abflusstafel Lobith**

#### 4.3.5 Festlegung der Anfangsbedingungen für SOBEK

Das SOBEK-Modell benötigt die Angabe von Startwerten (initial conditions) für die Randbedingungen, mit denen die Rechnungen beginnen können (= Startbedingungen). Diese können vom Benutzer selbst definiert werden (user defined) oder vom Modell selbst bestimmt werden (auto-start).

Bei der Autostart-Option nimmt das Modell jeweils den ersten Wert der Randbedingungen und berechnet iterativ Wasserstände, Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten, bis es stabile Verhältnisse erreicht. Erst danach werden die Berechnungen für die anderen Zeitschritte durchgeführt. Wird kein stabiler Systemzustand erreicht, bricht das Modell seine Berechnungen ab.

Ist es nicht möglich, das Modell mit der Autostart-Option zu betreiben, muss die benutzerdefinierte Startoption gewählt werden. Dies ist sehr häufig in Modellen mit Bauwerken der Fall, da



sich die Stauhaltungen erst füllen und die Wehre einen stabilen Anfangswert erhalten müssen. Darüber hinaus ist es häufig sinnvoll, die Anfangsbedingungen selbst zu bestimmen, um zum Beispiel Wehr-Schwingungen abzufangen, auch wenn diese nicht zum Abbruch des Modells führen.

Bei den Teilmodellen für den Rhein von Maxau bis Mainz, Mainz bis Andernach und Andernach bis Lobith konnten die Berechnungen mit der Autostart-Option durchgeführt werden, ebenso an Neckar, Main und Mosel. An Neckar und Main gelang die instationäre Simulation jedoch erst, nachdem zu Beginn der Berechnungen eine „Vorwelle“ mit zunächst hohen und dann allmählich abnehmenden Abflüssen am oberen Modellrand für günstige Startbedingungen sorgte und ein erstes Einregeln und Stabilisieren der Wehre bewirkte. An der Mosel war dagegen ein Rechnen im Autostart-Modus prinzipiell möglich. Hier zeigte sich aber, dass eine „Vorwelle“ die Berechnungsergebnisse der nachfolgenden Abflussereignisse stabilisiert, weil sich die Wehre nach der „Vorwelle“ stabiler verhalten. Am Rhein sind „Vorwellen“ dagegen eher störend bzw. sie müssen sehr klein gehalten werden, um ein Anspringen der Retentionsmaßnahmen zu vermeiden.

Bei der Kopplung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell kann für alle Teile nur ein Typ von Startbedingung eingegeben werden. Aufgrund der Erfahrungen mit den Startbedingungen bei den Simulationsläufen wurde die Autostart-Option mit „Vorwelle“ gewählt. Als „Vorwelle“ eignet sich die jeweils gemessene Ganglinie, die - entsprechend dem jeweiligen Gewässer - mit ihrem maximalen, mittleren oder minimalen Abfluss beginnt und sich kontinuierlich auf ihren Anfangswert einregelt. Alternativ können aber auch feste Werte in  $\text{m}^3/\text{s}$  als Startbedingung eingegeben werden, die sich an diesen Abflussgrößen orientieren.

Für das Gesamtmodell haben sich folgende Startwerte als geeignet erwiesen:

- am Neckar maximaler Abfluss
- an Main und Mosel mittlerer Abfluss
- am Rhein minimaler Abfluss

Die Erstellung dieser „Vorwellen“ sowie ihre Verknüpfung mit den gemessenen Ganglinien und ihre Bereitstellung für SOBEK übernimmt der Präprozessor mit Hilfe der Steuerdatei (siehe Anl. 4.3).

#### 4.3.6 Festlegung der numerischen Parameter

SOBEK benötigt darüber hinaus eine Reihe numerischer Parameter, die in einer Tabelle festgelegt werden. Bei der Kopplung der Modelle zeigte es sich, dass sich die numerischen Parameter der Teilmodelle voneinander unterschieden. Es musste ein Parametersatz gefunden werden, mit dem jedes Teilmodell rechnen kann und dabei zu den gleichen Ergebnissen kommt wie mit dem ursprünglichen Parametersatz. Außerdem sollte auch eine Kopplung mit dem SOBEK-Modell für die niederländischen Rheinarme möglich sein. Anl. 4.4 gibt einen Überblick über die numerischen Parameter aller Teilmodelle und des Gesamtmodells.



#### 4.4 Kalibrierung und Validierung der (Teil-) Modelle

Bei der Kalibrierung eines numerischen Modells werden Modellparameter innerhalb einer tolerierbaren Variationsbreite so weit variiert, bis die Berechnungsergebnisse des Modells mit entsprechenden Messwerten möglichst übereinstimmen. Bei der Validierung werden die Ergebnisse weiterer Simulationen mit Naturmessungen verglichen, die unabhängig von den Daten der Kalibrierung sind.

Im Rahmen des LAHoR-Projektes wurde zunächst jedes der sechs Teilmodelle (Neckar, Main, Mosel, Rhein von Maxau bis Mainz, Rhein von Mainz bis Andernach und Rhein von Andernach bis Lobith) kalibriert und validiert. Dabei wurden im Wesentlichen die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen:

- stationäre Kalibrierung anhand einer Reihe von Wasserspiegelfixierungen
- Einregeln der Stauwehre (soweit vorhanden)
- instationäre Kalibrierung anhand von Hochwasserereignissen
- instationäre Validierung anhand von Hochwasserereignissen
- stationäre Validierung anhand von Wasserspiegelfixierungen

Lediglich bei dem Modell für die Mosel konnten nur eine stationäre Kalibrierung sowie ein Einregeln der Stauwehre durchgeführt werden, da keine gemessenen Ganglinien für den Moselabschnitt unterhalb von Cochem verfügbar waren.

Die Kalibrierung erfolgte durch Anpassung der Berechnungsergebnisse an gemessene Wasserstandsdaten und Abflussganglinien. Hierzu wurden die Rauheiten der Gewässersohle im Hauptgerinne (main channel) und - bei den Teilmodellen Neckar, Main und Mosel - auch im Überflutungsraum 1 (floodplain 1) als einziger Parameter verändert. Die Sohlrauheiten im Überflutungsraum 2 - für den Rhein auch die im Überflutungsraum 1 - sowie alle anderen veränderbaren Terme des Gleichungssystems, wie z.B. Windeffekte und Dichte des Wassers, wurden als konstant angenommen und vorab festgelegt (vgl. Kap. 4.3). Die bei der Kalibrierung gefundenen Rauheitsbeiwerte lagen für den Niederrhein zwischen 34 und 43  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ , für den Mittel- und Oberrhein zwischen 30 und 53  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ , für den Main und die Mosel bei 32 bis 46  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$  sowie für den Neckar zwischen 22 und 48  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ .

Für alle Teilmodelle liegen Berichte über die Modellerstellung, Kalibrierung und Validierung vor:

Rhein von Maxau bis Mainz:	Weiland (2001)
Rhein von Mainz bis Andernach:	Ilse (2001)
Rhein von Andernach bis Lobith:	Schieder (2001), Barneveld und Meijer (1997)
Neckar:	Jablonski (2001)
Main:	Meijer et al. (2000a); Meijer et al. (2000b); Meijer et al. (2001a); Meijer et al. (2001b)
Mosel:	Bemmel und Meijer (2001)

Nachfolgend soll nur exemplarisch auf einzelne Arbeitsschritte eingegangen werden, um diese zu erläutern und Unterschiede zwischen den Teilmodellen bzw. deren Kalibrierung/Validierung herauszuarbeiten sowie Ergebnisse darzustellen.



#### 4.4.1 Stationäre Kalibrierung der Teilmodelle

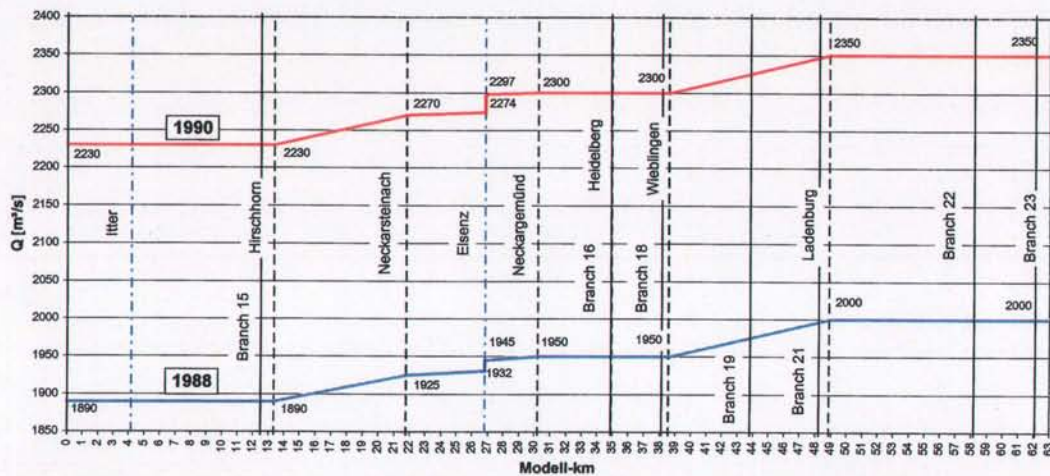
Die Modelle wurden zunächst anhand von Wasserspiegelfixierungen stationär kalibriert (keine Veränderung der Abflüsse über die Zeit). Tab. 4-3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Kalibrierungen. Ihre Anzahl wurde durch die Verfügbarkeit von Daten aus Wasserspiegelfixierungen bestimmt. Zum Teil wurden auch Ergebnisse von Wasserspiegellagenberechnungen der BfG genutzt. Details über die Datengrundlage sind Anl. 4.1 sowie den genannten Berichten zu den Teilmodellen zu entnehmen.

**Tab. 4-3: Überblick über die durchgeführten stationären Kalibrierungen**

			Anzahl der Kalibrierungen	
Teilmodell		km	Anzahl	Datengrundlage
Neckar		0,0-61,7	2	Fixierungen im Hochwasserbereich
Main		0,0-64,1	3	Berechnungen im Mittel- bis Hochwasserbereich
		64,1-186,6	3	Berechnungen im Mittel- bis Hochwasserbereich
			1	Fixierung im Hochwasserbereich
			3	Fixierungen im Hochwasserbereich
		186,6-252,0	3	Berechnungen im Mittel- bis Hochwasserbereich
Mosel		2-52	7	Fixierungen im Niedrig- bis Hochwasserbereich
			1	Berechnung im Hochwasserbereich
Rhein	Maxau-Mainz	362-493,6	5	Fixierungen im Niedrig- und Hochwasserbereich
	Mainz-Andernach	493,3-528,9	2	Fixierungen im Niedrig- und Hochwasserbereich
		528,9-613,8	2	Fixierungen im Niedrig- und Hochwasserbereich
	Andernach-Lobith	613,8-639	3	Fixierungen im Niedrig- und Hochwasserbereich
		639-865,5	5	Fixierungen im Niedrig- und Hochwasserbereich
			1	Berechnung im Niedrigwasserbereich

Zur Vorbereitung der Kalibrierung mussten für jeden der vorliegenden Datensätze die Randbedingungen (Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet oberhalb der Modellstrecke und aus den Nebengewässern) bestimmt werden. Wegen der Kontinuitätsbedingung muss gelten:  $\Sigma_{\text{Zuflüsse}} = \Sigma_{\text{Abflüsse}}$ . Auf der Grundlage der in den Datensätzen angegebenen Abflüsse für verschiedene Gewässerabschnitte wurden deshalb zunächst Abflussbilanzen aufgestellt. Als Beispiel zeigt Abb. 4-11 eine derartige stationäre Abflussbilanz. Dabei wurden die zwischen den Abschnitten auftretenden Abflussdifferenzen den seitlichen Zuflüssen zugeordnet und soweit möglich anhand der Daten des Gewässerkundlichen Jahrbuches überprüft. Meistens konnten diese Differenzen eindeutig größeren Nebenflüssen zugeordnet werden. In einem solchen Fall steigt der Abfluss entlang der Gewässerstrecke treppenförmig an. Dies tritt zum Beispiel am Neckar durch den Zufluss der Elsenz bei Modell-km 26,8 auf. Häufig handelt es sich jedoch um eine Vielzahl kleinerer Zuflüsse. In diesem Fall wurde der sich aus der Bilanz ergebende seitliche Zufluss dem Modell als diffuser Zufluss über die entsprechende Modellstrecke verteilt zugeordnet. Der Abfluss steigt hier mit der Modellstreckenlänge stetig an, am Neckar beispielsweise zwischen Modell-km 13,20 und 21,90 (siehe Abb. 4-11).



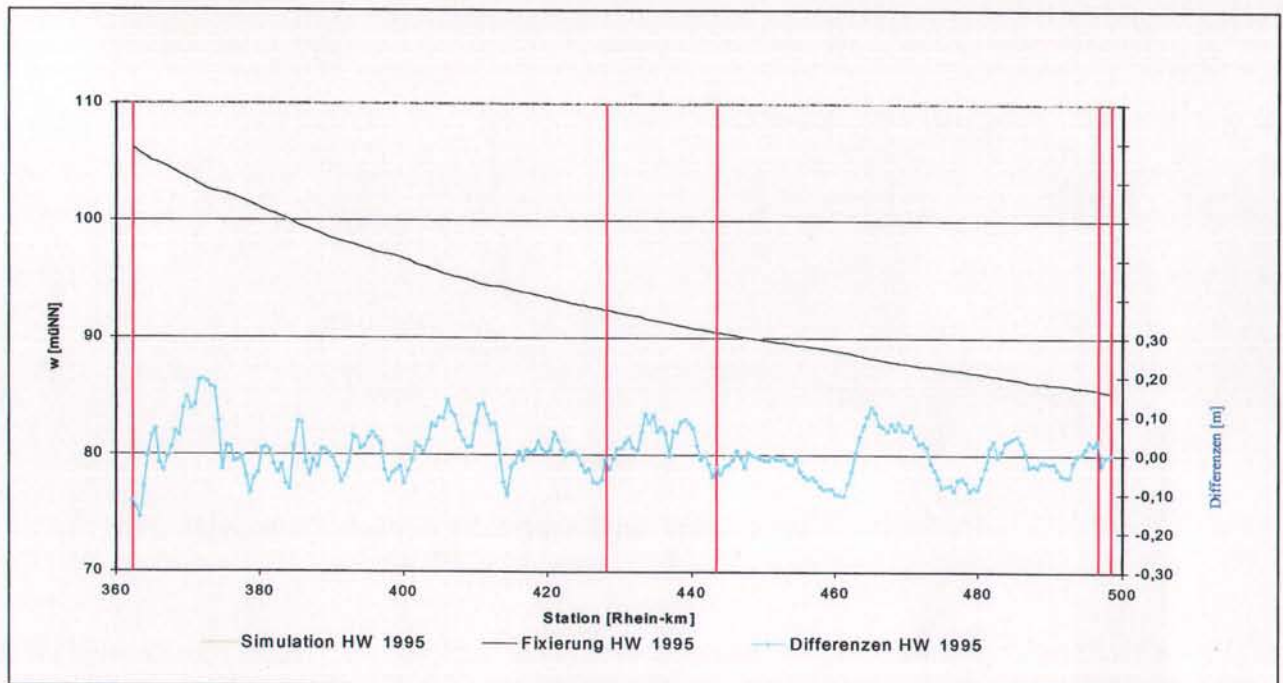


**Abb. 4-11: Stationäre Wasserbilanz am Beispiel des Neckars (Jablonski, 2001)**

Bei der Kalibrierung werden die Rauheitsbeiwerte (siehe Tab. 4-1) im Hauptgerinne sowie - bei Neckar, Main und Mosel - im Überflutungsraum 2 so lange verändert, bis die in der Wasserspiegelfixierung ermittelten Werte mit denen der Wasserspiegellagenberechnung annähernd übereinstimmen. Hierbei soll die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen an den Pegeln  $\leq 10$  cm und in der Strecke zwischen den Pegeln  $\leq 20$  cm betragen.

Abb. 4-12 zeigt für das Hochwasserereignis 1995 das Ergebnis der stationären Kalibrierung am Beispiel der Oberrheins im Teilmodell Maxau-Mainz.





**Abb. 4-12: Längsschnitt der Modellstrecke Maxau-Mainz mit Wasserspiegelfixierung und simulierten Wasserständen und deren Differenzen nach der stationären Kalibrierung für das Hochwasser 1995 (Weiland, 2001)**

Untersuchungen von Jablonski (2001) am Neckar und Schieder (2001) am Niederrhein ergaben, dass die Anpassung der berechneten Wasserstände an die gemessenen Wasserstände einer Wasserspiegelfixierung durch eine sehr feine Differenzierung der Rauheitsbeiwerte in Gewässerslängsrichtung zwar noch weiter verbessert werden kann, dass dies aber aus mehreren Gründen nicht sinnvoll ist:

1. Die Wasserspiegelfixierungen beruhen oft auf relativ wenigen und noch dazu unsicheren Messwerten. Aus diesem Grund dürfen an die Übereinstimmung von Modell- und Naturwerten keine übertriebenen Anforderungen gestellt werden. Eine Genauigkeit von  $\pm 20$  cm ist als ausreichend anzusehen.
2. Bei der Wasserspiegelfixierung wird von stationären Verhältnissen ausgegangen. Auch dies birgt Unsicherheiten in sich.
3. Es treten im Modell schnell wechselnde Rauheitsbeiwerte auf, die teilweise eine Größenordnung erreichen, die nicht mehr plausibel ist.
4. Dieselben Rauheitsbeiwerte können bei einem Datensatz einer Wasserspiegelfixierung eine sehr gute Überstimmung der Natur- und Modelldaten ergeben, bei einem anderen aber extreme Abweichungen.
5. Die Ergebnisse der Rauheitstabellen sind insbesondere bei der instationären Kalibrierung nicht mehr zu überblicken. Wegen fehlender Daten ist eine Kontrolle der instationären Berechnungsergebnisse zwischen den Pegeln nicht möglich.



Aus den vorgenannten Gründen wurde die räumliche Differenzierung der Rauheitswerte entlang der Flussachse nur relativ grob vorgenommen. Abb. 4-13 zeigt die aus der stationären Kalibrierung folgenden Rauheitsbeiwerte im Hauptgerinne für den Oberrhein.

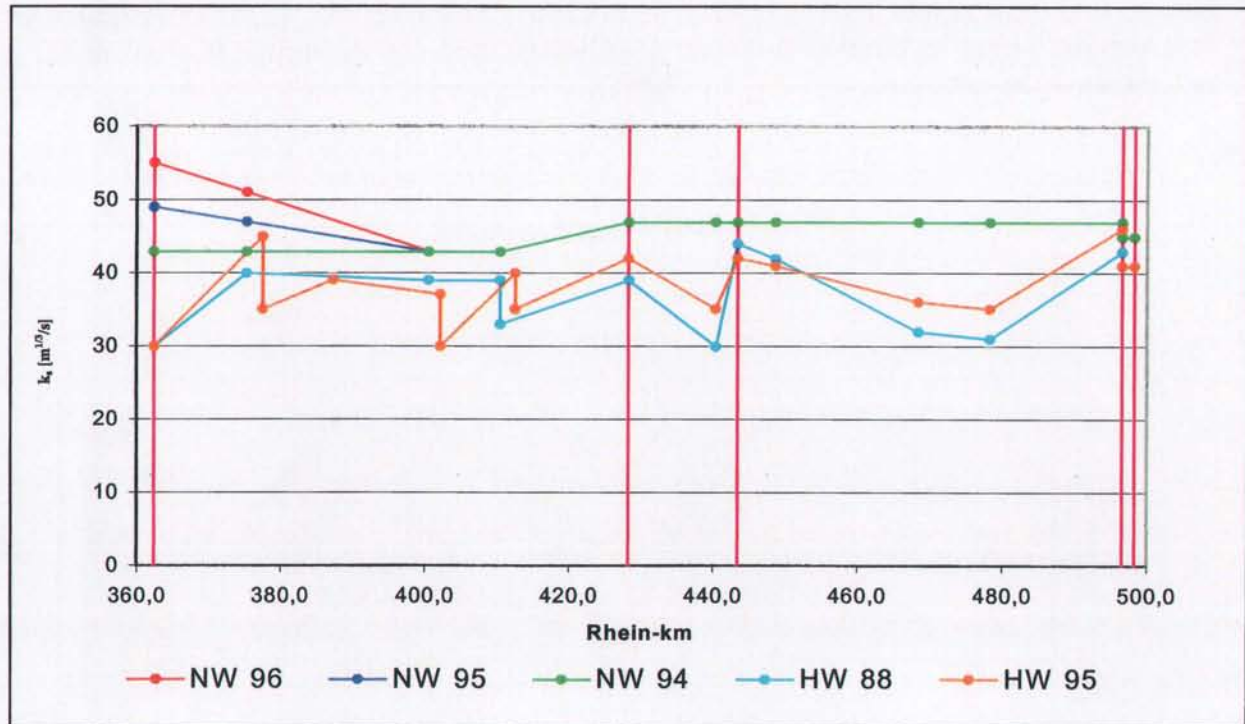


Abb. 4-13: Rauheitsbeiwerte (Strickler) im Hauptgerinne für den Oberrhein nach der stationären Kalibrierung

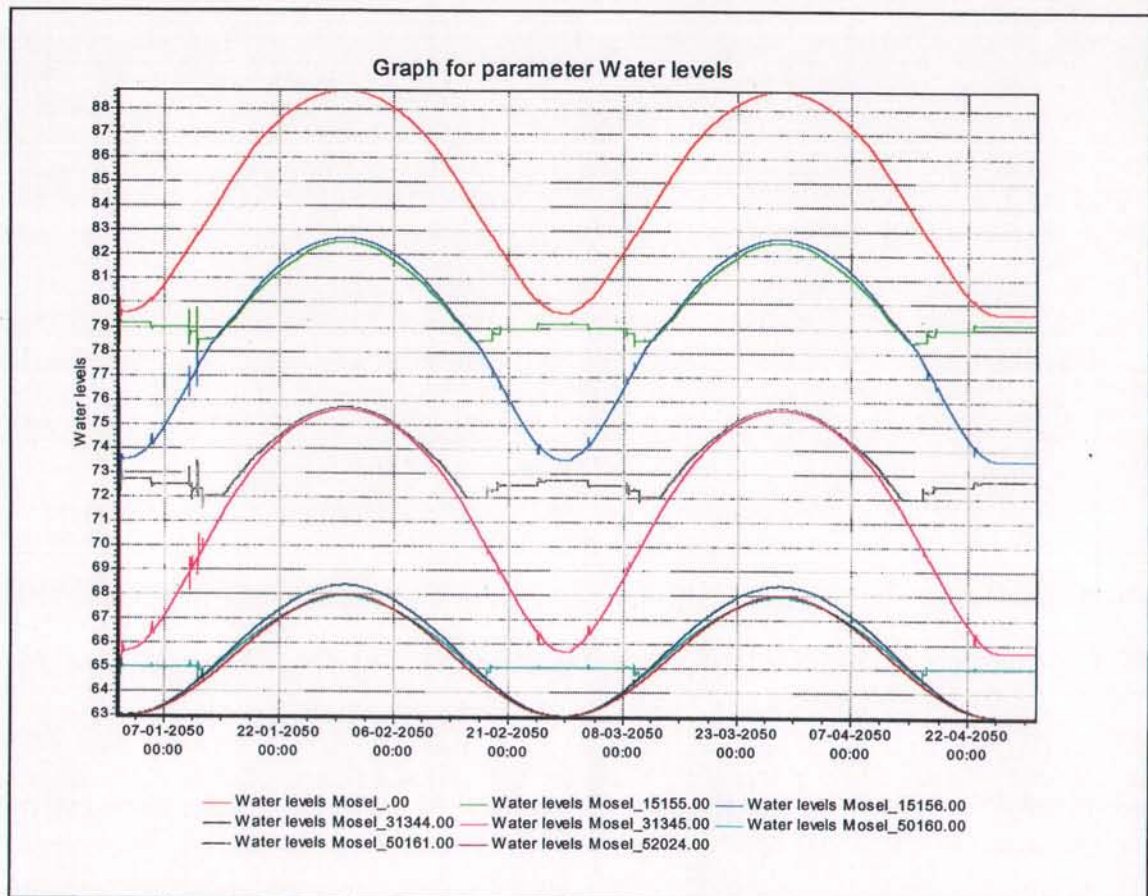
Als Ergebnis der Modell-Kalibrierung an Wasserspiegelfixierungen und Ergebnissen von Wasserspiegellagenberechnungen konnten für SOBEK schließlich Tabellen mit Rauheitsbeiwerten bereitgestellt werden, die sowohl abflussabhängig sind als auch entlang der Flussachse variieren.

#### 4.4.2 Einregeln der Stauwehre

Für die staugeregelten Gewässerabschnitte erfolgte anschließend das Einregeln der Bauwerke. Ziel ist es, das Reglement der Wehrsteuerung so anzupassen, dass die vorgegebenen Abflussverteilungen und Stauziele erreicht werden. Prinzipiell kann dies nur anhand von instationären Abflussverhältnissen erfolgen. Dabei können künstlich erzeugte oder gemessene Abflussganglinien verwandt werden. Der Vorteil natürlicher Ganglinien ist, dass sie die Wirklichkeit wiedergeben, wie sie im Gewässer vorgefunden wird. Künstliche Abflussganglinien dagegen haben den Vorteil, dass bei ihrer Erstellung alle möglichen Bedingungen (Abdeckung des gesamten überhaupt möglichen Abflussspektrums, Steilheit der Ganglinie etc.) berücksichtigt werden können. Im Rahmen des LAHoR-Projektes hat sich auch der Einsatz von Doppelwellen oder „Vorwellen“ zum Testen der Funktionsweise der in SOBEK eingebauten Wehre und der entsprechenden Steuerregeln als sinnvoll erwiesen.



Abb. 4-14 zeigt die für das Einregeln der Moselwehre genutzte künstliche Doppelwelle. Diese Abflusswelle deckt den gesamten für das Staureglement relevanten Abflussbereich bis zum 200-jährlichen Abfluss ab. Deutlich ist am Anfang das Einschwingen des Systems der Wehre zu sehen. Auch zu Beginn der ersten Hochwasserwellen sind Schwingungen im Wasserstand zu erkennen, die durch den ersten Einsatz der Steuerung (controller) verursacht werden. Beim zweiten Einsatz sind diese deutlich geringer bzw. nicht mehr vorhanden, was darauf zurückzuführen ist, dass sich die controller eingespielt haben. Deutlich ist auch das vierstufige Reglement der Stauzieleinhaltung zu erkennen.



**Abb. 4-14: Dynamisches Einregeln der Moselwehre mit Hilfe einer künstlichen Doppelwelle (Bemmel und Meijer, 2001)**

Beim Neckar und beim Main erfolgte die Wehreinregelung mit Hilfe einer künstlichen, mit einem hohen Wert beginnenden und langsam abnehmenden Abflussganglinie. Dies wurde mit Hilfe einer „Vorwelle“ realisiert. Aufgrund des einfacheren Wehrreglements war ein so kompliziertes Verfahren wie bei der Mosel nicht nötig.

#### 4.4.3 Instationäre Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle

Auf der Grundlage der bei der stationären Kalibrierung der (Teil-) Modelle ermittelten Rauheiten erfolgte für alle Modelle - mit Ausnahme des Moselmodells - eine instationäre Kalibrierung, bei der durch weitere Anpassung der Rauheitsparameter eine verfeinerte Anpassung des Modells an



Wasserstands- und Abflussganglinien erfolgte. Bei der anschließenden Validierung wurden die Berechnungsergebnisse teilweise an mehreren Hochwasserereignissen überprüft.

Zur Kalibrierung des Modells wurden an Ober- und Mittelrhein die Hochwasserereignisse 1988 und 1995 und am Niederrhein die Hochwasserereignisse 1993 und 1995 verwendet. Für den Main diente das Hochwasserereignis von 1995 der Kalibrierung. Der Neckar wurde mittels der Hochwasserereignisse 1988 und 1990 kalibriert.

Zur Validierung wurden an Ober- und Mittelrhein die Messungen des Hochwassers 1993 und am Niederrhein die des Hochwassers 1988 mit den Modellergebnissen verglichen. Die Simulationen wurden am Main mit den Messungen des Hochwassers 1993 und 1998 überprüft. Zum Zeitpunkt der Modellkalibrierung lagen für den Main die Abflussganglinien des Hochwassers 1988 nicht an allen für die Kalibrierung benötigten Pegeln vor. Sie konnten jedoch im Rahmen der Validierung des Gesamtmodells für die Zuflusspegel bereitgestellt werden. Die Validierung wurde am Neckar mit dem Hochwasserereignis 1995 durchgeführt. Für das Ereignis 1993 lagen am Neckar keine Daten an den zum Vergleich benötigten Ober- und Unterwasserpegeln vor.

Einen Überblick gibt Tab. 4-4.

**Tab. 4-4: Überblick über die durchgeführten instationären Kalibrierungen und Validierungen der Teilmodelle**

Teilmodell	Hochwasserdaten genutzt zur	
	Kalibrierung	Validierung
Neckar	HW 88, HW 90	HW 95
Main	HW 95	HW 93, HW 98
Mosel	-	-
Rhein Maxau-Mainz	HW 88, HW 95	HW 93
Rhein Mainz-Andernach	HW 88, HW 95	HW 93
Rhein Andernach-Lobith	HW 93, HW 95	HW 88

#### 4.4.3.1 Wasserbilanz

Die Erstellung einer Wasserbilanz (Kontinuitätsbedingung!) ist ein wichtiger Bearbeitungsschritt. Im Rahmen der instationären Kalibrierung und Verifizierung dient dieser zugleich der Überprüfung der oberen und seitlichen Randbedingungen, d.h. der dem Modell zur Verfügung gestellten Abflüsse sowohl aus dem Einzugsgebiet oberhalb der modellierten Gewässerstrecke als auch aus den Einzugsgebieten der Nebenflüsse.

An Ober-, Mittel- und Niederrhein wurden Wasserbilanzen aufgestellt. Dazu wurde an ausgewählten Rheinpegeln für jedes Hochwasserereignis das Integral der jeweils gemessenen Abflussganglinie über den gesamten zeitlichen Verlauf des Hochwassers berechnet. Die Differenz der Integrale zweier benachbarter Pegel ergibt die Wassermenge, die dem Hauptgewässer durch die Nebengewässer zugeflossen ist. Der Vergleich dieser Wassermenge mit der Abflussfülle der Nebengewässer im gleichen Zeitraum ist ein Maß für die Vollständigkeit der Daten. Am Oberrhein lag die Abweichung zwischen 1,65 % und -2,95 %, am Mittelrhein bei 2 % und am Niederrhein zwischen 2,5 % und -4,4 %. Das ist ein Hinweis darauf, dass die W-Q-Kurven an den Pegeln in sich und untereinander stimmig sind und dass wahrscheinlich (gerade im HW-Bereich) keine systematischen Fehler vorliegen. Im Mittel liegen sie sogar innerhalb der durch die Pegelvorschrift zugestandenen Messgenauigkeiten von  $\pm 5$  %.



Auch am Main wurden die Abflussfüllen von Hochwasserereignissen ermittelt. Dies geschah jedoch erst nach Kalibrierung/Validierung des Modells und diente der Bewertung der Ergebnisse und dem Aufspüren möglicher Fehlerquellen. Dabei wurde in der vorgenannten Weise die Abflussfülle der einzelnen Hochwasser anhand der an ausgewählten Pegeln gemessenen Ganglinie berechnet und mit derjenigen der simulierten Ganglinie verglichen. Die Abflussfüllen der simulierten Ganglinien waren in der Tendenz etwas höher als die gemessenen, was auf eine Überschätzung der Zuflüsse hinweist. Eine echte Bilanzierung dieser Abflussfüllen im Gewässer mit denen der Zuflüsse wurde nicht durchgeführt, dürfte aber ebenso wie die Erstellung von Wasserbilanzen für den Neckar weitere Aufschlüsse über mögliche Fehler geben.

Für den unteren Teil von Neckar und Main sowie für die Mosel ab Cochem können prinzipiell keine Wasserbilanzen aufgestellt werden, weil an den Mündungen keine Messwerte vorliegen. Eine Wasserbilanzierung kann sich vielmehr nur über einen Bereich erstrecken, der alle Mündungsbereiche der Nebenflüsse sowie das Hauptgewässer Rhein mit einschließt. Eine solche Wasserbilanzierung wird als wichtiger Schritt einer zukünftigen Modellverbesserung angesehen.

#### **4.4.3.2 Untere Randbedingung**

Bei der Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle wurden gemessene Wasserstandsganglinien von Pegeln genutzt, die jeweils am unteren Ende der Modellstrecke liegen. An Neckar und Main war dies allerdings nicht möglich, da in deren unmittelbaren Mündungsbereichen kein Pegel steht.

Beim Neckar liegt der dem Rhein nächstgelegene Neckarpegel, von dem es Wasserstandsaufzeichnungen gibt, drei Kilometer flussaufwärts. Rhein und Neckar können einen wechselseitigen Rückstau erzeugen, der bei Rheinhochwasser im Neckar u.U. bis Ladenburg (Neckar-km 14,00) reicht. Dieser Rückstauereffekt wird beim Simulationsmodell SOBEK dadurch berücksichtigt, dass als untere Randbedingung der Verlauf einer Wasserstandsganglinie eingegeben wird, die sich aus den Wasserstandsmessungen des Rheinpegels Mannheim (Rhein-km 424,90) berechnet. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe des stationären, eindimensionalen Programmes „K-Wert“, das von der BfG zur stationären Kalibrierung verschiedener Rheinabschnitte auf unterschiedliche Abflüsse entwickelt wurde. Das Programm berechnet das Wasserspiegelgefälle in Abhängigkeit vom Abfluss und daraus den Wasserstand an der Neckarmündung (Rhein-km 428,20), der - als Plausibilitätskriterium - nicht höher als der Wasserstand am Neckarpegel Mannheim (Neckar-km 3,05) sein soll.

Beim Main wurde in gleicher Weise verfahren, wobei unter Anwendung des Programmes „K-Wert“ die Wasserspiegellagen an der Mainmündung (Rhein-km 496,60) aus den Wasserstandsmessungen des Rheinpegels Mainz (Rhein-km 498,30) berechnet werden.



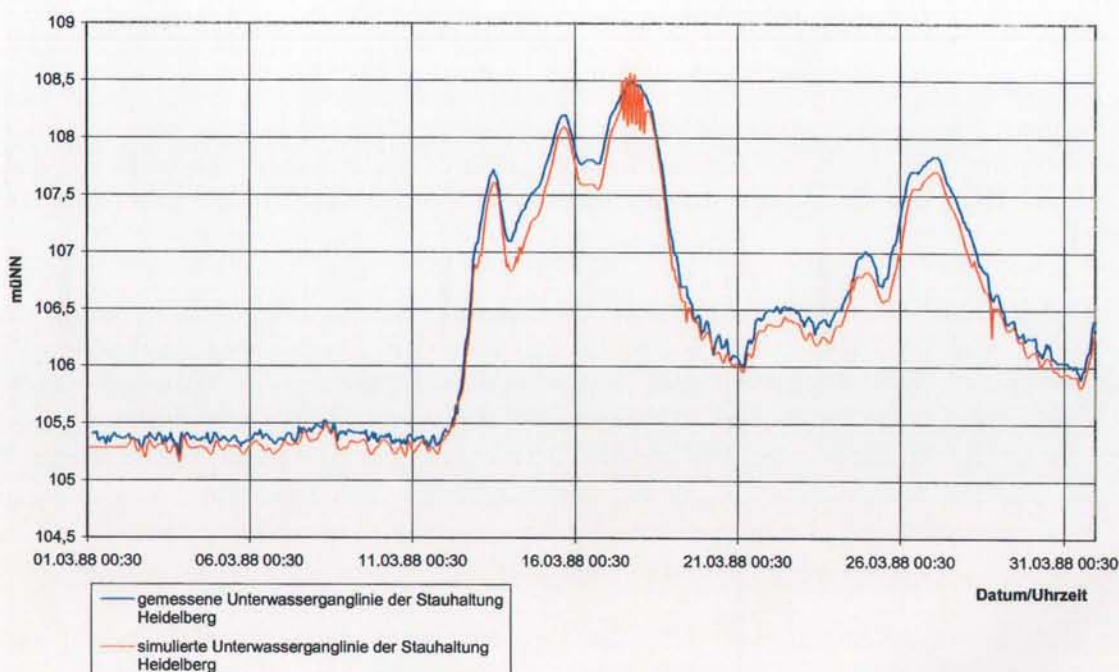
#### 4.4.3.3 Kalibrierung und Validierung

Die bei der stationären Kalibrierung ermittelten Rauheiten dienten der instationären Kalibrierung als Startwerte. Die Rauheiten und die Rauheitstabellen wurden im Verlauf der instationären Kalibrierung so lange verändert bzw. erweitert, bis bei der Simulation zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden konnten. Eine Variation der Rauheitsbeiwerte wurde nur für das Hauptgerinne (main channel), für Neckar, Main und Mosel zusätzlich für den Überflutungsraum 1 (floodplain 1) vorgenommen. Alle anderen Rauheitswerte wurden als konstant angenommen. Sensitivitätsanalysen in Schieder (2001) und Weiland (2001) hatten nachgewiesen, dass dieses Vorgehen berechtigt ist.

Bei der Bewertung, wie gut ein Berechnungsergebnis den gemessenen Daten angepasst ist, sind mehrere Bedingungen zu überprüfen: Übereinstimmung von Form und Verlauf der Ganglinien, Übereinstimmung der Laufzeiten, korrekte Wiedergabe der Wasserstand-Abfluss-Beziehungen im Modell, Übereinstimmung der Volumina (Abflussfüllen) aller Hochwasserganglinien (soweit dies nicht bereits bei der Wasserbilanz überprüft wurde), Übereinstimmung der Scheitelwerte von Wasserstand und Abfluss hinsichtlich ihrer Absolutbeträge und ihrer zeitlichen Einordnung.

Zunächst einmal muss die Ganglinienform als solche gut wiedergegeben werden. Zur Überprüfung bietet sich die grafische Darstellung der gemessenen und der berechneten Ganglinien an. Dabei lassen sich grundsätzliche Probleme im System wie allgemeine Form- und Volumenfehler, Zeitverschiebungen sowie Schwingungen relativ einfach entdecken.

Abb. 4-15 zeigt einen Ganglinienvergleich für den Neckar, aus dem deutlich wird, dass zwar die allgemeine Form und der zeitliche Verlauf gut getroffen sind, dass aber im Scheiteltbereich noch störende Schwingungen im System auftreten.



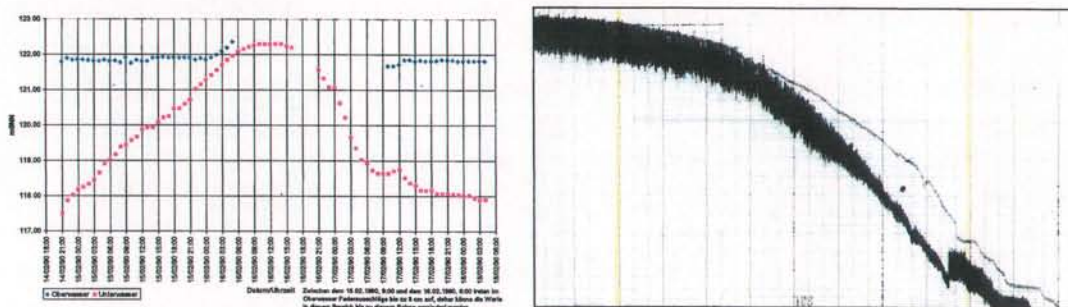
**Abb. 4-15: Vergleich einer simulierten und gemessenen Wasserstandsganglinie für das Unterwasser der Stauhaltung Heidelberg/Neckar (Jablonski, 2001)**



Die visuelle Kontrolle wurde für alle Teilmodelle durchgeführt und zeigte, dass spätestens nach der instationären Kalibrierung die Form in allen Fällen sehr gut wiedergegeben wird und dass auftretende Probleme wie Schwingungen weitestgehend eliminiert oder auf ein für das Gesamtsystem vertretbares Maß eingedämmt werden konnten.

Unterstützt werden kann dieses Verfahren des direkten Ganglinienvergleichs, indem nicht die Ganglinien selbst, sondern die Differenzen der Ganglinien dargestellt werden.

Dass der direkte Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Daten u.U. auch zu Fehleinschätzungen führen kann, weil die Übereinstimmung der Daten auch von der Qualität der Messdaten (Messaufzeichnung) abhängt, verdeutlicht Abb. 4-16. In dem einen Fall fehlen im Oberwasser der Staustufe Hirschhorn während des Hochwassers Messdaten, in dem anderen liefert der Analogschrieb des Pegels an der Staustufe Heidelberg keine eindeutigen Wasserstandswerte. In solchen Fällen ist einzig die visuelle Bewertung der Simulationsergebnisse möglich.



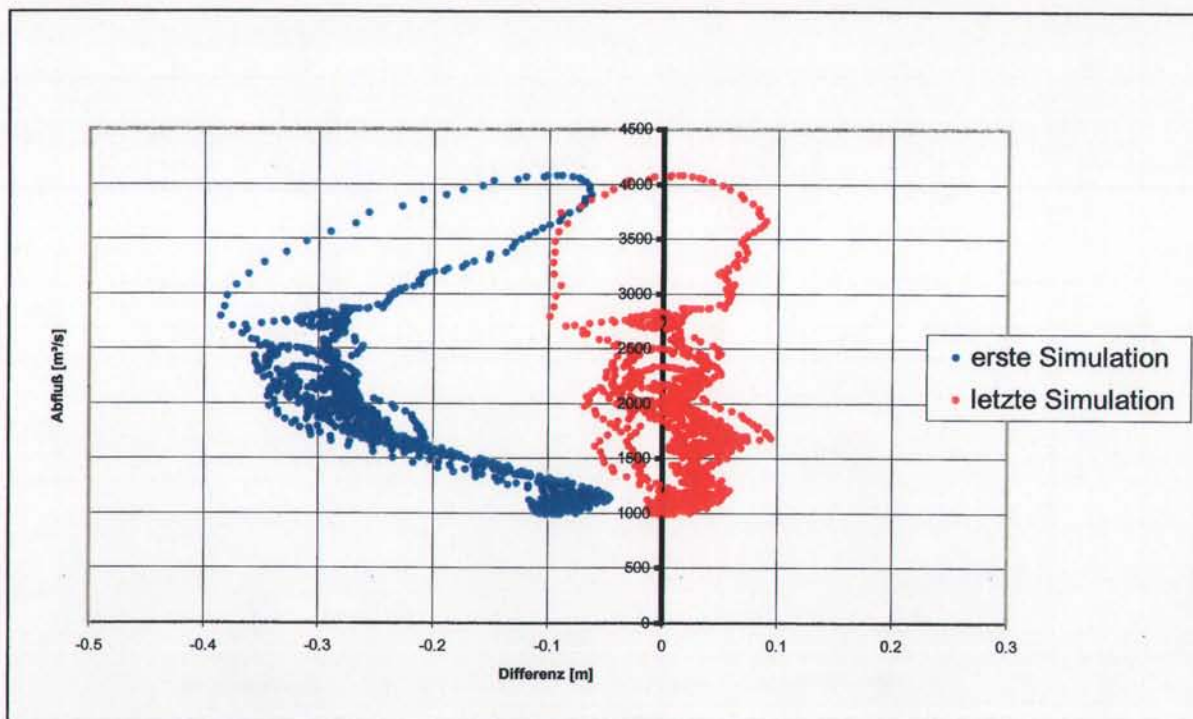
**Abb. 4-16: Gemessene Wasserstandsganglinien an Ober- und Unterwasserpegel des Neckars, links Staustufe Hirschhorn, rechts Staustufe Heidelberg (Jablonski, 2001)**

Das Problem einer nicht ausreichenden Qualität der Messdaten trat jedoch kaum auf und war vor allem dann gegeben, wenn auf Daten zurückgegriffen werden musste, die nicht aus den Datenbanken der BfG, des RIZA, der Bundesländer oder der Wasserverbände übernommen werden konnten.

Zur instationären Kalibrierung der Modelle hat sich das Auftragen der Differenzen zwischen den gemessenen und den berechneten Wasserständen über dem zugehörigen Abfluss am Pegel besonders bewährt. Das Verfahren stellt eine wichtige Ergänzung zur visuellen Kontrolle der Ganglinien dar. Da die möglichen Abweichungen der Werte hierbei sehr gut zu erkennen sind, bietet das Verfahren die Möglichkeit, gezielt Verbesserungen am Modell vorzunehmen. So können z.B. die Rauheiten im SOBEK-Modell abflussabhängig eingegeben und damit derjenige Teil der Ganglinie verbessert werden, in dem die Abweichungen am größten sind. In dieser Weise wurde an Ober-, Mittel- und Niederrhein vorgegangen.

Abb. 4-17 zeigt eine derartige Grafik. Aus den hier dargestellten Ergebnissen der ersten (zunächst stationären) Simulation wird deutlich, dass die Abweichungen von den gemessenen Werten vor allem im mittleren Abflussbereich der Ganglinien besonders groß waren. In diesem Fall lagen für den mittleren Abflussbereich keine Wasserspiegelfixierungen vor. Die Ergebnisse der letzten Simulation im Verlauf der Kalibrierung zeigen, dass die Ergebnisse durch die instationäre Kalibrierung deutlich verbessert werden konnten.





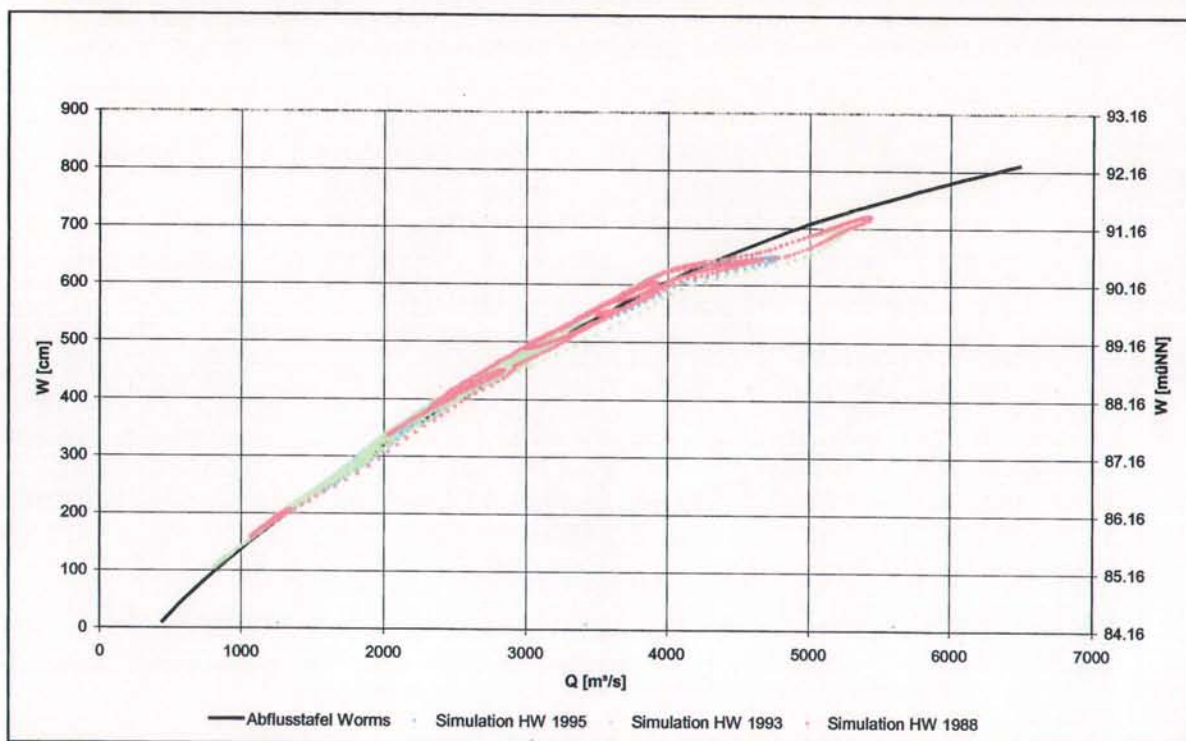
**Abb. 4-17: Vergleich der Wasserstandsdifferenzen in Abhängigkeit vom Abfluss vor und nach der instationären Kalibrierung am Pegel Maxau, Hochwasserereignis 1995 (Weiland, 2001)**

Darüber hinaus sind in der Grafik Hysteresis-artige Erscheinungen erkennbar. Diese können auf einen Hysteresis-förmigen Verlauf der Abflusskurve zurückgehen. Ein solcher Verlauf ist zwar im Modell nachzubilden, lässt sich jedoch bei der Ermittlung der Abflussganglinien aus gemessenen Wasserstandsganglinien unter Anwendung von Abflusstafeln nicht erfassen. Der Hysteresis-förmige Verlauf kann aber auch die Folge einer reinen Laufzeitverschiebung sein.

Zur Überprüfung des Hystere-förmigen Verlaufs bietet sich der direkte Vergleich der durch das Modell berechneten Wasserstand-Abfluss-Beziehung mit der Abflusskurve des entsprechenden Pegels an. Von dieser Möglichkeit wurde sowohl am Main als auch an Ober-, Mittel- und Niederrhein Gebrauch gemacht. Laufzeitverschiebungen lassen sich dagegen am leichtesten durch die bereits erwähnten visuellen Ganglinienuntersuchungen feststellen.

In den meisten Fällen konnte eine gute Übereinstimmung in den Wasserstand-Abflussbeziehungen von Modell und Natur erreicht werden. In einigen Fällen traten jedoch auch Abweichungen im oberen Bereich auf. Abb. 4-18 zeigt einen solchen Fall.



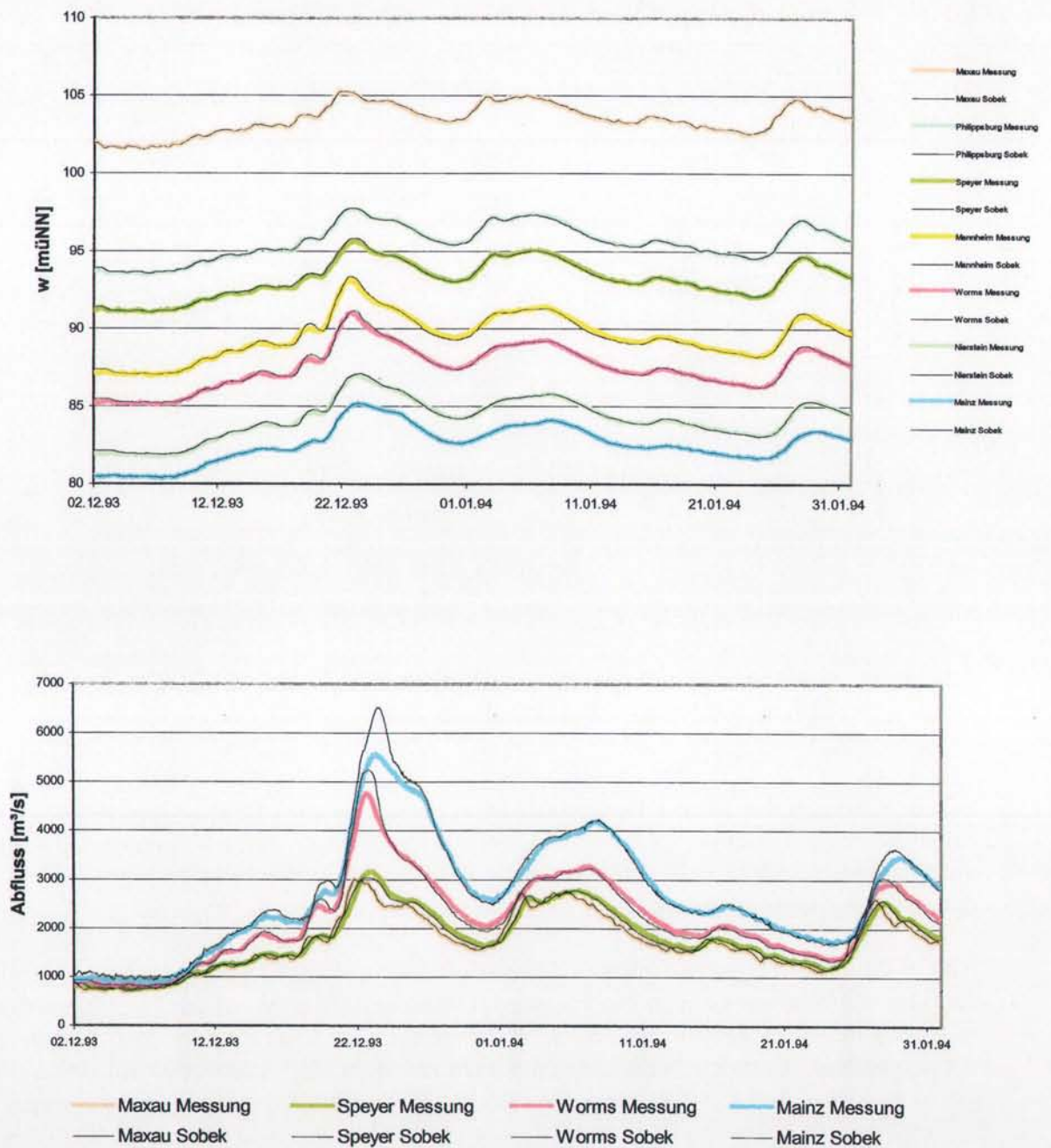


**Abb. 4-18: Vergleich der amtlich eingeführten Abflussskurve mit der simulierten Wasserstand-Abflussbeziehung am Pegel Worms (Weiland, 2001)**

Die Möglichkeit, dass die Abflusstafeln auch Fehler enthalten, konnte im Rahmen des LAHoR-Projektes nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die im Projekt verwendeten Hochwasserabflüsse noch innerhalb des Bereiches der Abflusstafeln liegen, für die gemessene Abflüsse vorliegen. Der zur Berechnung der Abflüsse aus gemessenen Wasserständen benutzte Teil der Abflusstafeln liegt damit noch nicht in dem Bereich, der durch Extrapolation bestimmt wurde. Fehlerhafte Abflusstafeln können also nicht Hauptursache für ungenaue Modellergebnisse sein.

In der Modellstrecke Maxau bis Mainz mit den Mündungsbereichen von Neckar und Main treten bei der Kalibrierung und Validierung besondere Probleme auf. Hier können die gemessenen Wasserstände sehr gut durch das Modell wiedergegeben werden, wohingegen der Vergleich der Abflussganglinien zum Teil deutliche Abweichungen zeigt (Abb. 4-19).

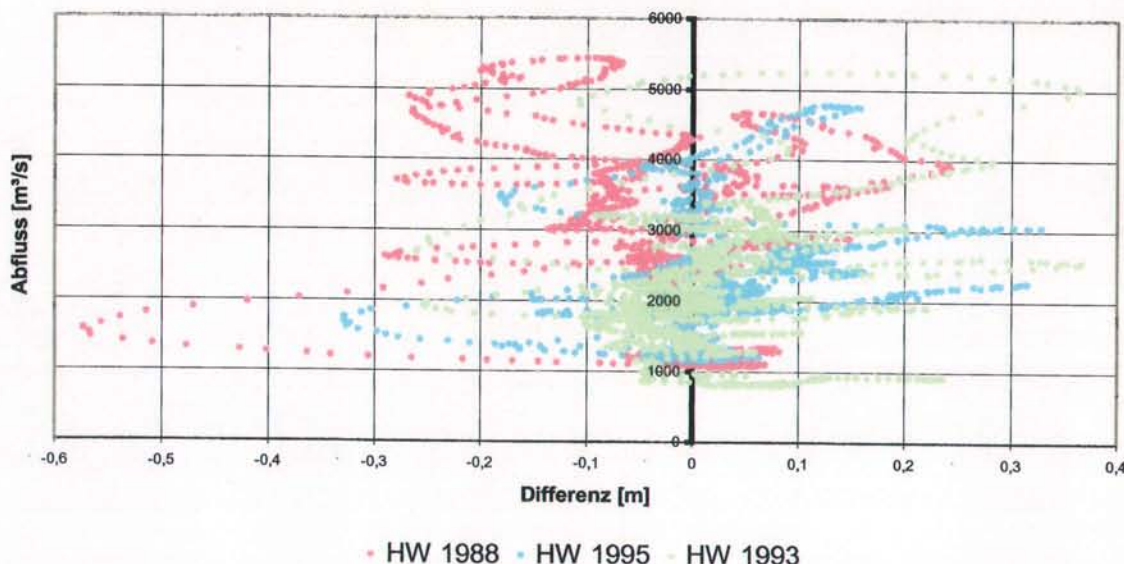




**Abb. 4-19: Gemessene und simulierte Wasserstands- und Abflussganglinien an vier Abflusspegeln am Rhein zwischen Maxau und Mainz für das Hochwasser 93 (Validierungsergebnis) (Weiland, 2001)**



Diese Feststellung kommt - allerdings in undeutlicherer Form - auch in Abb. 4-20 zum Ausdruck, in der die Differenzen zwischen den gemessenen und den berechneten Wasserständen gegen die Abflüsse aufgetragen wurden.

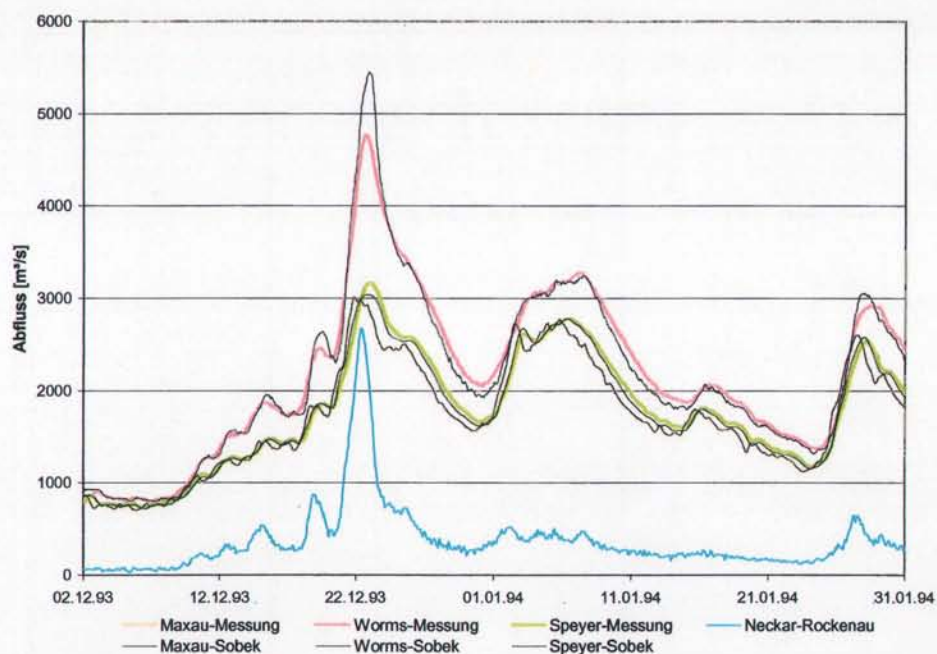


**Abb. 4-20: Wasserstandsdifferenzen zwischen Messung und Simulation in Abhängigkeit vom Abfluss am Pegel Worms (Weiland, 2001)**

Die Betrachtung der für die Berechnungen verwendeten drei Hochwasserereignisse lässt bisher keine Systematik erkennen. Um die möglichen Ursachen für die aufgetretenen Abweichungen zu untersuchen, wurde deshalb das Modell Maxau-Mainz in die zwei Teilmodelle Maxau-Worms und Worms-Mainz aufgeteilt.

Abb. 4-21 zeigt Ergebnisse für das Teilmodell Maxau-Worms (Weiland, 2001). Deutlich ist der Einfluss des Neckars auf den Hochwasser-Hauptscheitel sowie auf die zwei kleineren Vorscheitel zu erkennen. In diesen drei Fällen ist der Abfluss zu hoch eingeschätzt. Bei der dem Hochwasserscheitel folgenden Nachwelle, die nicht aus dem Neckar kommt, tritt dieses Problem dagegen nicht auf. Das Gleiche konnte Weiland (2001) auch für den Main und für andere Hochwasserereignisse nachweisen. Es liegt nahe, dass es sich hierbei nicht um ein Problem der im Modell falsch dargestellten Hydraulik des Teilmodells Maxau-Mainz handelt, sondern um das Problem fehlerhafter Eingabedaten. Darüber hinaus ist es mit dem Teilmodell Maxau-Mainz nicht möglich, die Rückstaueffekte im Neckar als Folge erhöhter Wasserstände im Rhein zu berücksichtigen und damit die Abflusswelle im Neckar gegebenenfalls abzuflachen. Eine Untersuchung der Ganglinien für das gekoppelte Modell sowie die Aufstellung einer detaillierten Wasserbilanz könnte in diesem Fall Aufschluss über mögliche Fehlerquellen geben. Mit Hilfe der Wasserbilanz könnte auch geklärt werden, inwieweit die Infiltration von Flusswasser in das Grundwasser eine Rolle spielt. Hier sind weitere Untersuchungen durchzuführen.





**Abb. 4-21: Abflussganglinien für die Pegel Maxau, Speyer und Worms und Zuflussganglinie aus dem Neckar für das Hochwasser 93 (Validierungsergebnis) (Weiland, 2001)**

Bei dem künftigen Einsatz des SOBEK-Modells wird es vor allem darum gehen, die Hochwasserscheitelwerte in ihrer Höhe (Wasserstand oder Abfluss) und in ihrem zeitlichen Eintreffen noch genauer als bisher zu erfassen.

In Tab. 4-5 sind alle wichtigen Differenzen zwischen Messung und Simulation für den Rhein zusammengestellt.



**Tab. 4-5: Differenzen der Wasserstände, Abflüsse und Eintrittszeiten zwischen Messung und Modell an einzelnen Pegeln am Rhein - Ergebnisse der instationären Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle**

Jahr	Teilmodelstrecke	Oberrhein (Maxau-Mainz)			Mittelrhein (Mainz-Andernach)			Niederrhein (Andernach-Lobith)			
		Worms	Mainz	Kaub	Andernach	Köln	Rees	Lobith			
1988	Max. W Mess. [m]	91,44	86,13	75,84	61,12	44,92	18,73	16,08			
	Max. W Sim [m]	91,34	86,10	75,89	61,13	44,94	18,70	16,07			
	Differenz W [m]	0,10	0,03	-0,05	-0,01	-0,02	0,03	0,01			
	Max. Q Mess. [m³/s]	5268	6950	7140	9351	9579	10197	10364			
	Max. Q Sim [m³/s]	5417	6889	7065	9776	9691	10588	10569			
	Differenz Q [m³/s]	-149	61	75	-425	-112	-391	-204			
1993	Differenz Q [%]	-2,82	0,87	1,06	-4,55	-1,17	-3,84	-1,97			
	Max. Zeitpkt. Q Mess.	27.03.88 23:00	29.03.88 04:00	29.03.88 06:30	29.03.88 02:00	29.03.88 09:00	30.03.88 12:00	30.03.88 11:30			
	Max. Zeitpkt. Q Sim.	28.03.88 00:00	29.03.88 14:00	29.03.88 11:00	29.03.88 00:00	29.03.88 08:00	30.03.88 04:00	30.03.88 10:00			
	Differenz Zeit [h]	-1,00	-10,00	-4,50	2,00	1,00	8,00	1,50			
	Max. W Mess. [m]	91,02	85,20	75,32	61,98	45,60	19,03	16,39			
	Max. W Sim [m]	91,12	85,20	75,09	61,81	45,62	18,96	16,37			
1995	Differenz W [m]	-0,10	0,00	0,23	17	-0,02	0,07	0,02			
	Max. Q Mess. [m³/s]	4765	5567	6495	10602	10836	11116	11031			
	Max. Q Sim [m³/s]	5247	6503	5998	10744	10827	11257	11089			
	Differenz Q [m³/s]	-482	-936	497	-142	9	-141	-58			
	Differenz Q [%]	-10,11	-16,82	7,64	-1,34	0,09	-1,27	-0,53			
	Max. Zeitpkt. Q Mess.	22.12.95 17:00	23.12.93 8:30	23.12.93 16:00	23.12.93 21:30	24.12.93 03:00	25.12.93 09:30	25.12.93 12:00			
1995	Max. Zeitpkt. Q Sim.	22.12.95 20:00	23.12.93 14:00	23.12.93 17:00	23.12.93 11:00	24.12.93 05:00	25.12.93 01:00	25.12.93 08:00			
	Differenz Zeit [h]	-3,00	-5,50	-1,00	10,50	-2,00	8,50	4,00			
	Max. W Mess. [m]	90,55	85,46	75,46	61,75	45,66	19,29	16,66			
	Max. W Sim [m]	90,66	85,40	75,41	61,79	45,67	19,32	16,65			
	Differenz W [m]	-0,11	0,06	0,05	-0,04	-0,01	-0,03	0,01			
	Max. Q Mess. [m³/s]	4293	5935	6672	10257	10939	11763	11759			
1995	Max. Q Sim [m³/s]	4770	6415	6413	10587	10883	12050	11978			
	Differenz [m³/s]	-477	-480	259	-330	56	-287	-219			
	Differenz [%]	-11,11	-8,08	3,98	-3,22	0,52	-2,44	-1,87			
	Max. Zeitpkt. Q Mess.	28.01.95 2:00	29.01.95 15:00	30.01.95 15:00	30.01.95 4:30	30.01.95 22:30	31.01.95 17:30	31.01.95 16:00			
	Max. Zeitpkt. Q Sim.	27.01.95 23:00	28.01.95 10:00	29.01.95 18:00	30.01.95 5:00	30.01.95 18:00	31.01.95 12:00	31.01.95 15:00			
	Differenz Zeit [h]	3,00	29,00	21,00	-0,50	4,50	5,50	1,00			



#### 4.4.4 Stationäre Validierung der Teilmodelle

Bei der instationären Kalibrierung waren die mittels der stationären Kalibrierung gewonnenen Rauheitstabellen geändert worden. Deshalb wurde abschließend noch einmal anhand einer stationären Validierung überprüft, ob die Wasserspiegellagen weiterhin gut getroffen wurden. Am Neckar erfolgte dies anhand eines neuen Datensatzes (Hochwasser 93). Am Main sowie an Ober- und Niederrhein wurden die gleichen Wasserspiegelfixierungen bzw. Ergebnisse von Wasserspiegellagenberechnungen genutzt wie bei der stationären Kalibrierung. Für die Mosel war keine stationäre Validierung erforderlich, weil hier keine instationäre Kalibrierung erfolgte.

Erwartungsgemäß verschlechterten sich die Ergebnisse der stationären Validierung tendenziell gegenüber den Ergebnissen der stationären Kalibrierung. Bei zu großen Abweichungen musste deshalb wieder zur instationären Kalibrierung zurückgegangen werden, um anschließend die stationäre Validierung erneut durchzuführen. Dieser Vorgang musste so lange wiederholt werden, bis für sowohl den stationären wie auch den instationären Fall akzeptable Ergebnisse vorlagen. Hierbei wurde jedoch grundsätzlich der instationären Kalibrierung der Vorrang gegenüber der stationären Kalibrierung gegeben, da die Modelle zur instationären Berechnung von Wellenabläufen eingesetzt werden sollen.

Durch dieses iterativen Vorgehen konnten schließlich Rauheitswerte gefunden werden, die zu 90 % eine Genauigkeit von mindestens  $\pm 20$  cm zwischen den Pegeln und mindestens  $\pm 10$  cm am Pegel erreichen. Abb. 4-22 zeigt die Ergebnisse stationärer Berechnungen vor und nach der instationären Kalibrierung/Validierung.

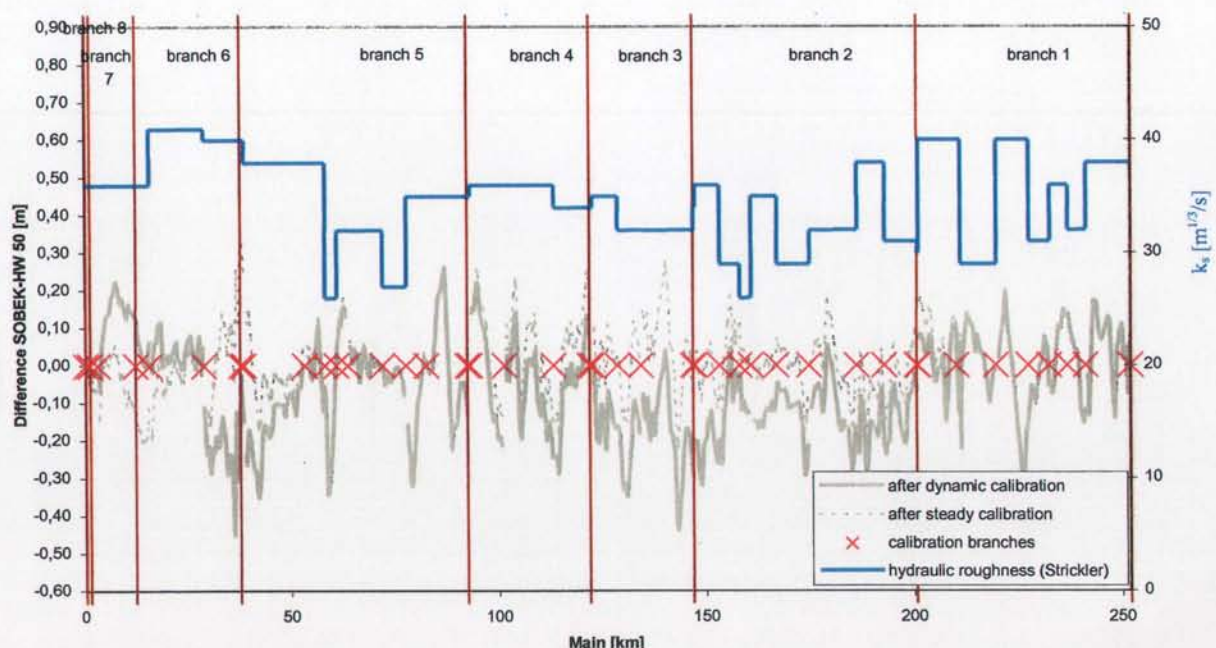


Abb. 4-22: Ergebnis der Wasserspiegelberechnungen mit SOBEK für den Main vor und nach der instationären Kalibrierung/Validierung (Meijer, Weidema et al., 2001b)



Die Erfahrung bei diesem iterativen Vorgehen zeigt, dass sich die stationäre Kalibrierung gut dazu eignet, die Anfangsbedingungen für die Rauheitswerte entlang eines Flusses schnell zu finden. Hierbei sollte aber kein zu hoher Detaillierungsgrad gewählt werden, weil die instationäre Validierung nur an Pegeln möglich ist.

An dieser Stelle sei abschließend betont, dass mit Ausnahme der Abb. 4-15 - Vergleich einer simulierten und gemessenen Wasserstandsganglinie für das Unterwasser der Stauhaltung Heidelberg/Neckar - alle in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse durch die iterative Annäherung über stationäre und instationäre Kalibrierung/Validierung erzielt wurden.



#### 4.5 Validierung Gesamtmodell, Bewertung und Ausblick

Nach der Kopplung der Teilmodelle Rhein (Maxau-Lobith), Main (Würzburg-Mündung), Neckar (Rockenau-Mündung) und Mosel (Cochem-Mündung) zu einem Gesamtmodell wurden die folgenden Hochwasserereignisse nachgerechnet:

- Mai-Juni 1983
- Januar-April 1988
- Dezember 1993 - Januar 1994
- Dezember 1994 - Februar 1995

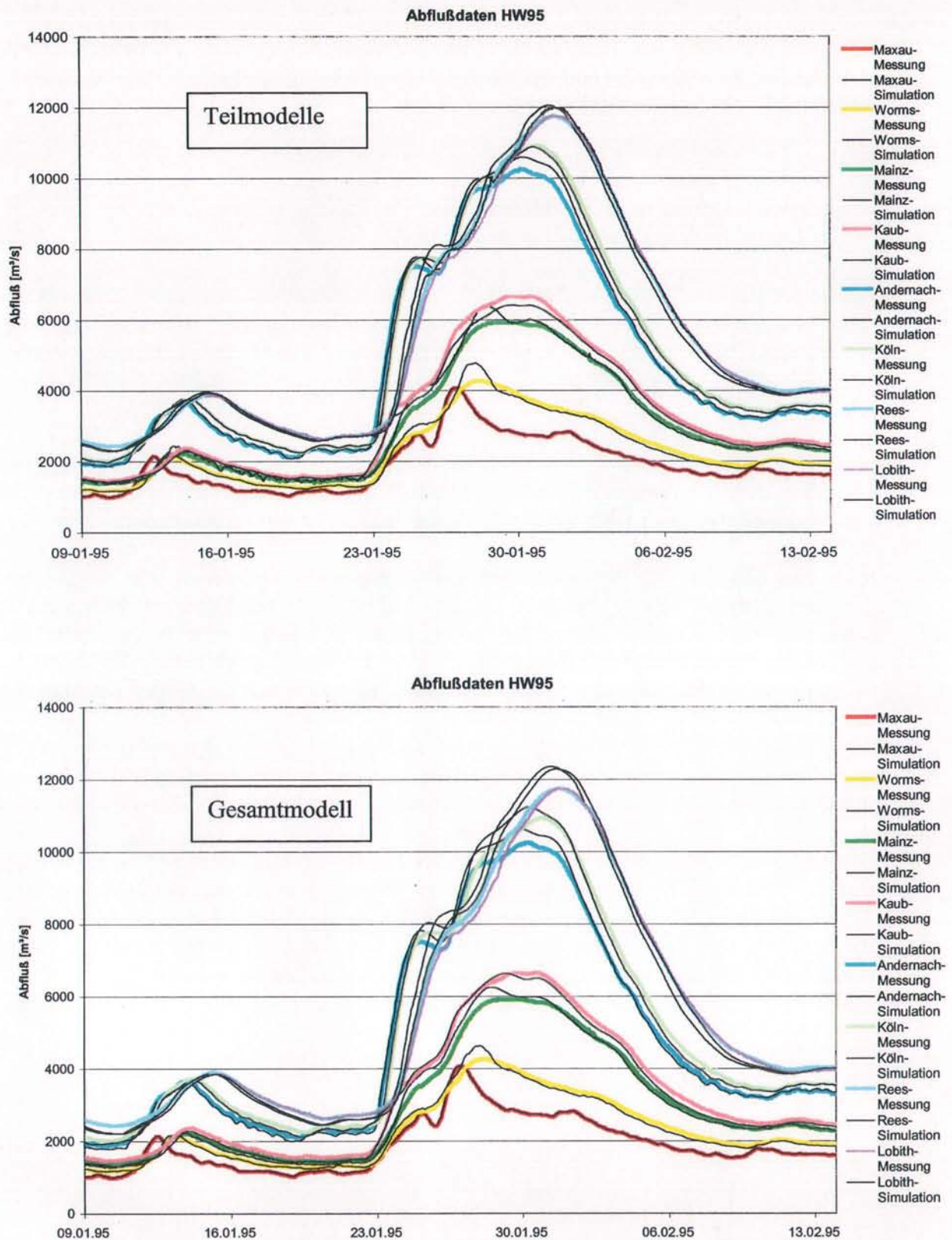
Als untere Randbedingung wurde in Lobith eine Abflusstafel eingegeben. Die oberen (Maxau, Rockenau, Würzburg, Cochem) und seitlichen Randbedingungen wurden als Abflussganglinien vorgegeben. Dabei wurden bei gleichen Hochwassern die gleichen Ganglinien verwendet wie bei der Kalibrierung und Validierung der Teilmodelle. Schließlich wurden die eingegebenen numerischen Parameter vereinheitlicht (Anl. 4.4) und die Startbedingungen festgelegt.

Durch den Anschluss der SOBEK-Modelle Main und Neckar konnte das Gesamtmodell am Oberrhein deutlich verbessert werden. Abb. 4-23 und 4-24 zeigen die Ergebnisse der Simulationen für das Hochwasser 1995 mit den Teilmodellen und dem Gesamtmodell.

Insgesamt fällt auf, dass die Ganglinien von Messung und Simulation sehr gut übereinander liegen. Lediglich im Scheitel weichen diese z.T. deutlich voneinander ab, wobei die Simulation durch eine extreme Spitze ausgeprägt ist. Der gemessene Scheitel ist dagegen wesentlich flacher und länger. Dieses Phänomen führt dazu, dass die zeitliche Verschiebung des Scheitels zwischen Messung und Simulation beim Hochwasser 1995 zum Beispiel 27 Stunden beträgt (siehe Tab. 4-6). Ohne diese ausgeprägte Spitze wäre die zeitliche Scheitelverschiebung bei der Simulation kaum feststellbar. Die Ursache für die Ausprägung des Scheitels wird weniger in der Hydraulik zu suchen sein als vielmehr in den Eingabeganglinien für Neckar, Main und die anderen Nebenflüsse sowie in der Vernachlässigung des Wasseraustausches mit dem Grundwasserleiter.

Die Teilmodelle ebenso wie das Gesamtmodell tendieren insgesamt zur Überschätzung der Abflüsse, wobei diese Tendenz im Gesamtmodell stärker ist als in den Teilmodellen. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass der Fehler beim Gesamtmodell über die gesamte Strecke anwächst, während jedes Teilmodell mit einer gemessenen Ganglinie am oberen Rand neu beginnt. Ähnliches ist auch für die anderen Hochwasser zu beobachten (siehe auch Anl. 7).





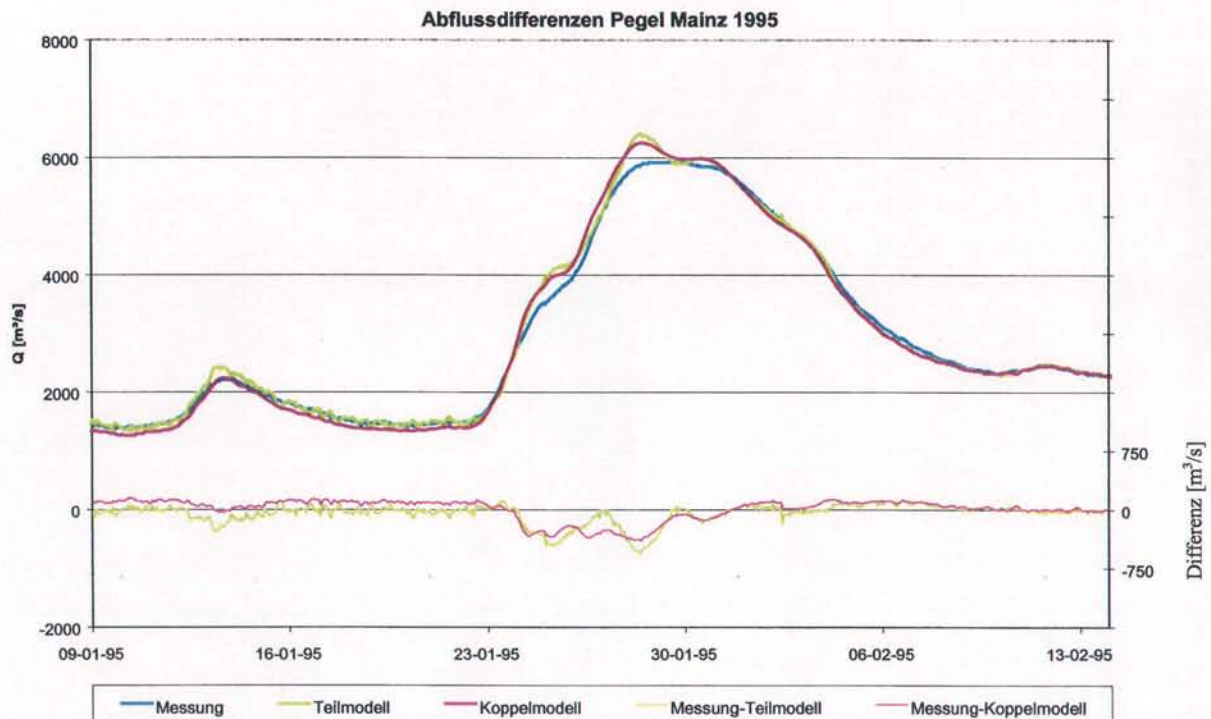
**Abb. 4-23: Simulation Hochwasser 1995 mit Teilmodellen und Gesamtmodell**



Tab. 4-6: Differenzen der Abflüsse und Wasserstände an einzelnen Pegeln am Rhein - Ergebnisse der Validierung Gesamtmodell

Jahr		Worms	Mainz	Kaub	Andernach	Köln	Rees	Lobith
1983	Max.Q Mess.[m³/s]	5250	5820	6110	9650	9910	9910	9755
	Diff.Q Mess-Sim [m³/s]	24	-172	-170	-208	-134	-292	-389
	Max. Zeitpkt. Q Mess.	28.05.83 07:30	29.05.83 07:00	29.05.83 09:30	29.05.83 15:30	30.05.83 04:00	30.05.83 11:30	31.05.83 16:00
	Differenz Zeit [h]	3,50	11,00	9,50	1,50	7,00	13,50	10,00
1988	Max. W Mess.[m]	91,43	85,47	75,07	61,27	44,92	18,55	15,91
	Diff. W Mess-Sim [m]	0,27	-0,03	-0,20	-0,15	-0,02	0,00	-0,12
	Max.Q Mess.[m³/s]	5268	6950	7140	9351	9579	10197	10364
	Diff.Q Mess-Sim [m³/s]	-103	156	217	-289	-417	-673	-476
1993	Max. Zeitpkt. Q Mess.	27.03.88 23:00	29.03.88 04:00	29.03.88 06:30	29.03.88 02:00	29.03.88 09:00	30.03.88 12:00	30.03.88 11:30
	Differenz Zeit [h]	4,00	2,00	-0,50	6,00	7,00	13,00	5,50
	Max. W Mess.[m]	91,44	86,13	75,84	61,12	44,92	18,73	16,08
	Diff. W Mess-Sim [m]	0,13	0,03	0,06	-0,18	-0,20	-0,14	-0,21
1995	Max.Q Mess.[m³/s]	4765	5567	6495	10602	10836	11116	11031
	Diff.Q Mess-Sim [m³/s]	-377	-690	-190	-601	-720	-848	-802
	Max. Zeitpkt. Q Mess.	22.12.95 17:00	23.12.93 8:30	23.12.93 16:00	23.12.93 21:30	24.12.93 03:00	25.12.93 09:30	25.12.93 12:00
	Differenz Zeit [h]	3,00	1,50	1,00	5,50	5,00	8,50	8,00
1995	Max. W Mess.[m]	91,02	85,20	75,32	61,98	45,60	19,03	16,39
	Diff. W Mess-Sim [m]	0,01	-0,47	-0,31	-0,34	-0,42	-0,25	-0,24
	Max.Q Mess.[m³/s]	4293	5935	6672	10257	10939	11763	11759
	Diff.Q Mess-Sim [m³/s]	-336	-317	36	-366	-289	-287	-526
1995	Max. Zeitpkt. Q Mess.	28.01.95 2:00	29.01.95 15:00	30.01.95 15:00	30.01.95 4:30	30.01.95 22:30	31.01.95 17:30	31.01.95 16:00
	Differenz Zeit [h]	4,00	27,00	35	6,50	15,50	9,50	2,0
	Max. W Mess.[m]	90,55	85,46	75,46	61,75	45,66	19,29	16,66
	Diff. W Mess-Sim [m]	-0,06	-0,21	0,05	-0,21	-0,01	-0,17	-0,12





**Abb. 4-24: Abflussganglinie am Pegel Mainz, Hochwasser 1995**

Nach Tab. 4-6 werden auch die Scheitelwasserstände größtenteils überschätzt; allerdings streuen diese Werte je nach Hochwasser und Pegel erheblich mit Werten zwischen 1 und 20 cm, in Einzelfällen auch darüber bis maximal 47 cm. Die Scheitelwerte treten zudem meist später auf als die gemessenen Scheitelwerte.

Im Zeitrahmen des LAHoR-Projektes war es nicht möglich, die eigentlich anzustrebende Nachkalibrierung des gekoppelten Modells durchzuführen. Für die Fragestellung des LAHoR-Projektes können die erzielten Genauigkeiten jedoch als ausreichend angesehen werden, weil hier vor allem Szenarienberechnungen durchgeführt und Differenzen zwischen Berechnungsvarianten betrachtet werden. Für die Zukunft sind jedoch weitere Verbesserungen des Modells vorgesehen. Dabei sollten die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Für Aussagen, die sich auf den Pegel Lobith beziehen, sollte das Modell möglichst nicht bei Lobith enden, da der Pegel Lobith als untere Randbedingung durch den Einfluss der Stauregelung in den Rheinarmen schlecht geeignet ist. Vielmehr sollte das Modell mit dem Modell der Rheinarme verknüpft werden, so dass für Lobith zuverlässigere Aussagen getroffen werden können.
- Es ist zu prüfen, ob die Eingabedaten für die oberen und seitlichen Randbedingungen (Abflüsse aus den oberen und seitlichen Einzugsgebieten) gut sind. Dies bezieht sich sowohl auf die Wassermenge, als auch auf die Fließzeiten zwischen Pegel und Mündung. Hier ist es nötig, systematische Wasserbilanzen aufzustellen und die Fließzeiten und Flächenfaktoren ggf. anzupassen.



- Im Zusammenhang mit der Wasserbilanz ist auch zu untersuchen, inwieweit der Grundwassereinfluss berücksichtigt werden muss. Dies betrifft vor allem die Bereiche zwischen Maxau und Mainz sowie den Bereich zwischen Moselmündung und Andernach. Es ist darüber hinaus langfristig anzustreben, den Austausch zwischen Grund- und Flusswasser am Niederrhein mit Hilfe des Grundwassermodells in SOBEK intern zu berechnen und nicht - wie bisher - extern.
- Grundsätzlich sind die Mündungsbereiche von Mosel, Main und Neckar einer detaillierten Nachkalibrierung zu unterziehen. Hierzu bieten sich die folgenden Teilmodellbetrachtungen an:
  - Maxau bis Worms mit unterem Neckar
  - Worms bis Kaub mit Main
  - Kaub bis Andernach mit Mosel
- Bisher wurden die Teilmodelle bei den instationären Berechnungen nur mit Hochwasserereignissen überprüft. Bedingt durch das heterogene Einzugsgebiet des Rheins treten Hochwasser immer nur regional auf. Deshalb sind die Modelle bei unterschiedlichen Ereignissen zu überprüfen. Dabei sollte das gesamte Spektrum von Niedrig- bis Hochwasser einbezogen werden.

Bei einer möglichen Verbesserung des Geobasisdatensatzes BASELINE sollten die folgenden Punkte beachtet werden. Vor allem für den Rhein zwischen Maxau und Andernach sind die Kompartimentgrenzen im Vorland zu überprüfen. Z.B. sollten die Seen einem Kompartiment zugeschlagen und an die Normallinie angeschlossen werden. Das Höhenmodell des Oberrheins ist nach Möglichkeit in kleinere Abschnitte zu unterteilen. Es hat sich gezeigt, dass das Arbeiten mit einem fast 300 Rhein-km abdeckenden Höhenmodell unbefriedigend ist. Eine Möglichkeit ist, die Höhenmodelle abschnittsweise zu erstellen. Es sollte geprüft werden, ob neue Höheninformationen vorhanden sind. Die Höhendaten von der Mainmündung bis nach Andernach können als zuverlässig angesehen werden. Hier könnte aus dem bisher vorhandenen TIN ein neues GRID (siehe Anl. 5) für den Vorlandbereich erstellt werden.

Besonderes Augenmerk ist auf die Sommerdeiche sowohl am Ober- als auch am Niederrhein zu richten.

Da am Neckar eine Reihe von Querprofilen manuell verändert werden mussten, ist auch hier eine Kontrolle des BASELINE-Datensatzes angeraten.

Weitere Hinweise sind Bommel und Rabbers (2001), Weidema (2000) sowie Meijer und Weidema (2001) zu entnehmen.