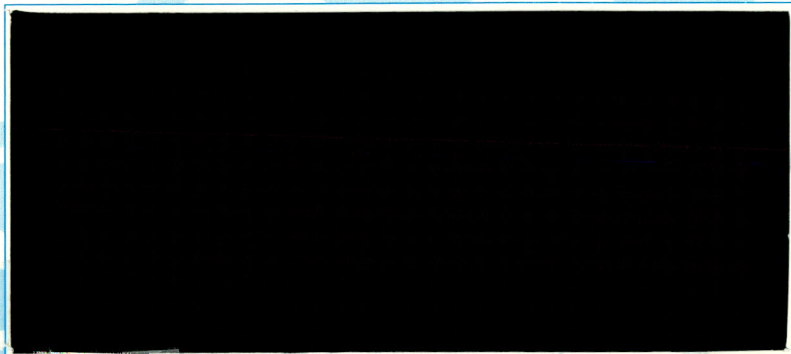


Bundesanstalt für Gewässerkunde



Lammens

**Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen
an Ober- und Niederrhein
auf extreme Abflüsse am Niederrhein**

Abschlussbericht

BfG-1221

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein

Abschlussbericht

BfG-1221

Jap-Nr. : 2551
Seitenzahl : 36
Zahl der Anlagen : 8
Bearbeiter/in : Dr.-Ing. Rita Lammersen
Dipl.-Met. Norbert Busch
Dipl.-Ing. Heinz Engel

Die Projektbearbeitung erfolgte auf der Grundlage der Übereinkunft über die Zusammenarbeit zwischen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) vom März 1996.

Koblenz, 31.12.1999

BfG-1221

Vervielfältigungen oder Veröffentlichungen des Berichtes – auch auszugsweise – bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Inhalt

1	Problemstellung und Zielsetzung.....	1
2	Flussbau- und Retentionsmaßnahmen am Rhein.....	3
3	Auswirkung unterschiedlicher Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf ausgewählter historischer Hochwasser.....	5
	3.1 Berechnung des Wellenablaufs ausgewählter Hochwasser mittels mathematischer Modellierung (Methodik).....	5
	3.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP.....	5
	3.1.2 Das numerische Modell SOBEK.....	7
	3.1.3 Abflussganglinien ausgewählter Hochwasser.....	8
	3.1.4 Berücksichtigte Ausbauzustände und Retentionsmaßnahmen.....	11
	3.2 Ergebnisse der Modellierung.....	13
	3.2.1 Abweichung der Modellergebnisse von den Messwerten (Modellgenauigkeit).....	14
	3.2.2 Auswirkung der unterschiedlichen Zustände auf den Wellenablauf (Simulationsergebnisse).....	18
4	Veränderung der Scheitelabflüsse unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten durch Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein.....	20
	4.1 Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen bestimmter Eintretenswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Datenreihen.....	20
	4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Pegel Köln und Rees.....	23
	4.3 Vergleich der hier erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen.....	24
5	Veränderung der Scheitelabflüsse von Hochwassern hoher Wiederholungszeitspannen.....	26
	5.1 Entwicklung von Modellhochwassern.....	26
	5.2 Einfluss des Oberrheinausbaus und der Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf die Scheitelabflüsse hoher Wiederholungszeitspannen.....	29
7	Zusammenfassung.....	34
8	Literatur.....	35

Abbildungen:

- Abb. 5.1: Entwicklung von Modellhochwassern durch Erhöhung der Nebenflussgangli-
nien ohne deren zeitliche Verschiebung..... 27
- Abb. 5.2: Abhängigkeit der Scheitelabflüsse in Rees von den gewählten Faktoren zur
Vergrößerung der Zuflussganglinien. 28

Tabellen:

Tab. 2.1:	Ausbauzustände am Oberrhein während der letzten 100 Jahre.....	4
Tab. 3.1:	Auswahl historischer Hochwasser	9
Tab. 3.2:	Bei der Modellierung betrachtete Zustände.....	12
Tab. 3.3:	Gemessene und simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein für den Pegel Rees	13
Tab. 3.4:	Abweichungen der gemessenen Abflussscheitel von den mit dem Modell SYNHP (von Basel bis Andernach), mit dem Modell SOBEK (von Andernach bis Rees) sowie mit dem gekoppelten Modell SYNHP-SOBEK (von Basel bis Rees) berechneten Scheitelwerten	17
Tab. 3.5:	Gemessene und simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein für den Pegel Rees	19
Tab. 4.1:	Homogenisierung auf den <i>Zustand 1977</i> (Vorgehen).....	21
Tab. 4.2:	Homogenisierung auf die <i>Zustände heute, geplant</i> und <i>1955</i> (Vorgehen).....	22
Tab. 4.3:	Hochwasserscheitelabflüsse (berechnete Ergebnisse) unterschiedlicher Wiederkehrzeiten für die <i>Ausbauzustände 1955, 1977, heute</i> und <i>geplant</i> am Pegel Köln und am Pegel Rees	23
Tab. 4.4:	Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die <i>Ausbauzustände 1977, heute</i> und <i>geplant</i> gegenüber <i>Zustand 1955</i> bzw. <i>1977</i> an den Pegeln Köln und Rees.....	24
Tab. 4.5:	Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die <i>Ausbauzustände 1977, heute</i> und <i>geplant</i> gegenüber den <i>Zuständen 1955</i> bzw. <i>1977</i> am Pegel Köln – Ergebnisse der Hochwasserstudiengruppe Kaub-Rolandswerth, 1993 – gerundete Werte.....	25
Tab. 5.1:	Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten 200, 500 und 1000 Jahre am Pegel Rees; Varianten ohne Deichüberflutung am Oberrhein	30
Tab. 5.2:	Die während der Modellhochwasserereignisse in Anspruch genommenen Retentionsvolumina am Oberrhein [Angaben in Mio. m ³]	30

Tab. 5.3: Deichüberflutungen am Oberrhein und deren Auswirkungen auf die Hochwasserscheitel am Pegel Rees (Differenz mit – ohne Deichüberflutung); Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees.....	31
Tab. 5.4: Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten 200, 500 und 1000 Jahre am Pegel Rees im Vergleich zu den entsprechenden statistisch ermittelten Scheitelabflüssen	32

Anlagen

- Anlage 1: Ausbau- und Retentionsmaßnahmen am Rhein
- Anlage 2: Randbedingungen und Eingabeparameter für die Modellierung
- Anlage 3: Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen (HQ) bestimmter Eintretenswahrscheinlichkeiten (T) an Fließgewässern im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland (WSV)
- Anlage 4: Vergleich der simulierten Scheitelwerte mit gemessenen Werten
- Anlage 5: Simulation, Homogenisierung der Datenreihe und Hochwasserstatistik Ergebnisse für den Pegel Köln
- Anlage 6: Simulation, Homogenisierung der Datenreihe und Hochwasserstatistik Ergebnisse für den Pegel Rees
- Anlage 7: Simulation und Homogenisierung der Datenreihe Ergebnisse für den Pegel Lobith
- Anlage 8: Ergebnisse der Modellhochwasserberechnungen

1 Problemstellung und Zielsetzung

Für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist der Bemessungsabfluss eine wichtige Größe. Die Festlegung dieses Wertes erfolgt sowohl für den Rhein in Deutschland als auch für das Rheindelta in den Niederlanden unter Berücksichtigung der Hochwasserstatistik.

Statistische Aussagen über das Hochwasserverhalten eines Gewässers basieren auf vieljährigen Datenreihen, die aus Messungen gewonnen werden. Die daraus errechneten statistischen Größen (z.B. Hochwasserscheitelabflüsse verschiedener Jährlichkeiten) sind nicht nur für jeden Pegel eines Gewässers unterschiedlich, sondern sind auch abhängig von der betrachteten Zeitreihe. So verändert sich beispielsweise der Hochwasserabfluss einer bestimmten Jährlichkeit alleine durch die Verlängerung der Datenreihe um neue Messwerte. Besonders starke Veränderungen sind zu beobachten, wenn ein oder gar mehrere außergewöhnliche Hochwasserereignisse hinzukommen, wie es am Niederrhein mit den Hochwassern 1993/1994 und Januar 1995 der Fall war.

Weitere Größen, die die Hochwasserstatistik beeinflussen, sind die anthropogenen Eingriffe entlang des Rheins, die sich auf das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen auswirken. Vor allem der Bau von Staustufen am Oberrhein, hochwasserwirksam seit 1955 und abgeschlossen seit 1977, sowie die ausgleichenden Retentionsmaßnahmen, die in den letzten Jahren bei Hochwasser ergriffen wurden, haben das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen verändert (Hochwasser-Studienkommission für den Rhein, 1978; Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth, 1993 u. v. a. m.). Die für die letzten 100 Jahre vorliegenden Datenreihen wurden also unter stark inhomogenen Abflussbedingungen gewonnen.

Dies gibt von deutscher Seite den Anlass, die 1996 von der „Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen“ dem Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen vorgelegten Hochwasserscheitelabflüsse vorgegebener Wahrscheinlichkeiten als Grundlage zur Festlegung von Bemessungshochwassern für den Niederrhein zu überprüfen (Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen, 1996).

Desgleichen gilt von niederländischer Seite für die Neufestlegung des Bemessungsabflusses für Lobith, die regelmäßig alle fünf Jahre erfolgt und die Grundlage für die im Jahr 2001 ministeriell neu festzulegenden Bemessungswasserstände darstellt.

Dieses beiderseits der Grenze am Rhein gegebene Interesse ist der Anlass dieses deutsch-niederländischen Projektes zur Untersuchung des Einflusses der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein.

Ziel dieses Projektes ist :

- Die Untersuchung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen am Rhein auf den Ablauf historischer Hochwasserereignisse,
- Die Homogenisierung der Datenreihen für die Pegel Köln, Rees und Lobith unter Berücksichtigung der wesentlichen Ausbauzustände an Ober- und Niederrhein,

- Die statistische Auswertung der Datenreihen für die Pegel Köln und Rees nach dem für den Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland üblichen Verfahren,
sowie
Die statistische Auswertung der Datenreihen für den Pegel Lobith nach dem in den Niederlanden üblichen Verfahren (dieser Teil des Projektes ist Gegenstand mehrerer separater Berichte in niederländischer Sprache; s.u.),
- Die Untersuchung der Wirksamkeit der Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein bei extremen Hochwassern (Jährlichkeit ≥ 200 Jahre) mittels Modellhochwasserberechnungen.

Die Bearbeitung des Projektes wurde im Oktober 1997 beschlossen und erfolgte im Rahmen der Übereinkunft über die Zusammenarbeit zwischen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) vom März 1996.

Neben den in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten der BfG wurden im wesentlichen die folgenden Arbeiten durch das RIZA beigesteuert bzw. durch die folgenden Arbeiten ergänzt:

- Erstellung neuer SOBEK-Profile für die geplanten Retentionsmaßnahmen am Niederrhein sowie eine erste Abschätzung der Wirkung dieser Retentionsmaßnahmen auf den Abfluss in Lobith (Haselen, 1999),
- Statistische Auswertung der homogenisierten Datenreihen für den Pegel Lobith (Zusammenfassung in: Parmet et al., 1999);
- Festlegung des Bemessungsabflusses für den Pegel Lobith (Zusammenfassung in: Parmet et al., 1999).

2 Flussbau- und Retentionsmaßnahmen am Rhein

Der Rhein unterliegt seit Jahrhunderten anthropogenen Eingriffen, die sich auf das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen auswirken. Diese Eingriffe und ihre Folgen waren schon häufig Gegenstand von Beschreibungen und Analysen und sollen hier nur angerissen werden.

Nach einer Bestandsaufnahme der Deutschen Kommission zum Schutze des Rheins (1997) waren die Eingriffe vor allem **am Oberrhein** sehr einschneidend. Vor dem 19. Jahrhundert wurden nur örtlich eng begrenzte Hochwasserschutzmaßnahmen durchgeführt. Erst mit der Oberrheinkorrektur nach den Plänen von Johann Gottfried Tulla wurde zwischen 1817 und ca. 1890 ein systematischer Hochwasserschutz von Basel bis unterhalb Mannheim realisiert. Hinzu kamen Verkürzungen des Rheinlaufes durch Durchstiche von Rheinschleifen bis Bingen. Durch den Verlust von Überschwemmungsflächen als Folge der Eintiefung des Hauptgerinnes und des Deichbaus sowie durch Laufverkürzungen haben diese Maßnahmen Auswirkungen auf den Hochwasserablauf.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfolgte eine Niedrigwasserregulierung des Oberrheins vor allem durch den Bau von Buhnen. Diese blieb weitestgehend ohne Wirkung auf die Hochwassersituation.

1928 begann die Phase des Oberrheinausbaus mit Staustufen. Zunächst (1928 – 1932 und 1948 – 1955) wurde auf der Rheinstrecke Basel bis Breisach der Rheinseitenkanal mit vier Staustufen gebaut. Da im Falle eines Hochwassers der Abfluss durch das infolge der Tulla'schen Eingriffe stark erodierte Rheinbett geleitet wird, hatte der Bau des Rheinseitenkanals keine weiteren Auswirkungen auf den Hochwasserablauf. Zwischen 1955 und 1970 wurden vier weitere Staustufen zwischen Marckolsheim und Straßburg in der sogenannten Schlingenlösung gebaut sowie 1970 – 1977 zwei weitere Staustufen direkt im Rhein errichtet. Vor allem die Ausbaumaßnahmen von 1955 – 1977 führten zu erheblichen Erhöhungen und Vorverlegungen der Hochwasserscheitel (Hochwasser-Studienkommission für den Rhein, 1978; Deutsche Kommission zum Schutze des Rheins, 1997).

Zum Ausgleich dieser Abflussverschärfungen haben sich Deutschland und Frankreich in einer Vereinbarung auf den Bau verschiedener Rückhalteräume und -maßnahmen geeinigt. Nach den derzeitigen Konzepten umfassen sie rund 288 Mio. m³ nutzbare Retentionsvolumina, von denen heute 91,3 Mio. m³, bei katastrophalen Hochwassern 116,3 Mio. m³ verfügbar sind. Einzelheiten sind in den Anlagen 1.1 bis 1.3 dargestellt. Auf die Steuerstrategien zur Nutzung der Rückhaltemaßnahmen wird im Zusammenhang mit der numerischen Modellierung näher eingegangen (Kapitel 3). Tabelle 2.1 fasst die wesentlichen Phasen und Ausbauzustände am Oberrhein seit 1900 zusammen.

Im Gegensatz zum Oberrhein wies das Strombett **des Mittelrheins**, abgesehen von einigen Inseln, von Natur aus keine Verzweigungen und große Mäander auf. Regelungsarbeiten in Form von Buhnen und Leitwerken beschränkten sich deshalb auf einzelne Stellen mit ungünstigen Strömungs- und Schiffsverkehrsbedingungen. Darüber hinaus wurde durch das Abtragen umfangreicher Felspartien am Binger Loch und an der Rheininsel bei Kaub eine 120 Meter breite Fahrrinne geschaffen, die einen ungefährdeten Schiffsverkehr erlaubt. Trotz Einengung

des Abflussquerschnittes durch den Bau von Straßen und Bahnlinien rechts und links des Flusses sowie einiger weniger Deichanlagen v.a. bei Neuwied haben all diese Maßnahmen aufgrund des ohnehin engen Mittelrheintals keine großräumigen Auswirkungen auf den Ablauf von Hochwasserwellen.

Tab. 2.1: Ausbauzustände am Oberrhein während der letzten 100 Jahre.

Zeitraum	Zustand Bezeichnung	Zustand Beschreibung
1900-1955	<i>Zustand 1955</i>	Zeitraum vor Ausbau des Oberrheins mit Staustufen
1955-1977	Übergang zwischen <i>Zustand 1955</i> und <i>Zustand 1977</i>	Phase des Staustufenbaus am Oberrhein
1977-1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	<i>Zustand 1977</i>	Zeitraum nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, ohne Retentionsmaßnahmen
Hochwasser März 1988 und Februar 1990	ca. <i>Zustand heute</i> (1999)	Zeitraum nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit Teilmaßnahmen zur Retention am Oberrhein

Ausbaumaßnahmen am **Niederrhein** bedeuteten vor allem die Festlegung der ursprünglich instabilen und sich häufig verlagernden Mäander und Stromspaltungen sowie den Ausbau des Rheins zur Schifffahrtsstraße mit festgelegten Mindesttiefen, einheitlichen Fahrwasserbreiten und ausgedehnten Bühnenfeldern. Diese Maßnahmen waren bis 1900 weitestgehend abgeschlossen. Hinzu kam die fast vollständige Eindeichung des Niederrheins ab Köln. Dadurch wurde das natürliche Überschwemmungsgebiet des Rheins im Laufe der Jahrhunderte immer weiter eingeeengt. Auch diese Maßnahmen waren zu Beginn dieses Jahrhunderts größtenteils abgeschlossen. Einzelne Eindeichungen größeren Umfangs fanden aber auch noch nach 1945 statt. Deren Wirkung auf den Ablauf von Hochwasserwellen waren jedoch gering.

Zur Sicherung des bisher gewährleisteten Hochwasserschutzes durch die z.T. sehr alten Deiche wurden 1990 und 1991 umfangreiche Generalpläne zum „Hochwasserschutz am Niederrhein“ und zum „Hochwasserschutz am Rhein im Regierungsbezirk Köln“ aufgestellt. Diese Pläne enthalten auch Vorschläge zur Rückgewinnung großräumiger Überflutungsflächen (47 km²) mit einem Retentionsvolumen von insgesamt 173 Mio. m³. Einzelheiten sind der Anlage 1.4 zu entnehmen.

3 Auswirkung unterschiedlicher Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf ausgewählter historischer Hochwasser

Der Bau der Staustufen am Oberrhein, hochwasserwirksam seit 1955 und abgeschlossen seit 1977, sowie die ausgleichenden Retentionsmaßnahmen, die seit den 1980er Jahren bei Hochwasser sukzessive realisiert werden, haben das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen verändert und werden es weiter verändern. Mittels numerischer Simulation werden die Auswirkungen unterschiedlicher Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf untersucht.

3.1 Berechnung des Wellenablaufs ausgewählter Hochwasser mittels mathematischer Modellierung (Methodik)

In der BfG werden zur Untersuchung der großräumigen Auswirkung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Hochwasserablauf am Rhein zur Zeit zwei Modelle eingesetzt:

- das hydrologische Wellenablaufmodell **SYNHP** und
- das numerische Wellenablaufmodell **SOBEK**.

Im Rahmen der hier dargelegten Untersuchungen wurden das Modell SYNHP zur Wellenablaufberechnung im Rhein von Basel bis Andernach und das Modell SOBEK für die Rheinstrecke Andernach bis Lobith genutzt.

3.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP

Das synoptische Hochwasserablaufmodell SYNHP wurde in der Landesanstalt für Umweltschutz (LFU) Baden-Württemberg zu Beginn der 80er Jahre zur Simulation der Hochwasserhältnisse am Oberrhein entwickelt und zur Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein eingesetzt (Homagk, 1985). Dieses für den *Zustand 1977* sowie unterschiedliche Retentionsszenarien gültige Modell wurde später auch für den *Zustand 1955* (vor Oberrheinausbau mit Staustufen) erstellt und auf die Rheinstrecken Worms - Köln ausgeweitet (Berg et al., 1990; Busch et al., 1993).

Das Modell SYNHP gehört zur Familie der hydrologischen Modelle, bei denen die Bewegungsgleichung durch den Ansatz linearer Einzelspeicher ersetzt wird. Für jeden Speicher der Flussstrecke wird bei der Kalibrierung des Modells eine Volumen-Abfluss-Beziehung ermittelt. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung kann bei gegebenen Zuflüssen der Abfluss am unteren Ende eines jeden Flussabschnittes berechnet werden. Im obersten Flussabschnitt wird der Zufluss durch eine Zuflussganglinie (z.B. Messdaten) definiert, die Zuflüsse in den unteren Flussabschnitten ergeben sich aus den berechneten Abflüssen am unteren Ende des nächst höhergelegenen Flussabschnittes. Zuflüsse aus Nebengewässern werden als Abflussganglinien (z.B. Messdaten) dem Modell zur Verfügung gestellt. Neben der Translation von Durchflusswellen und deren Verformung durch unterschiedliche Gerinnegeometrien ermöglicht das Modell die Berechnung von gesteuerten und nicht gesteuerten Retentionsvorgängen oberhalb

von Wehren und in Poldern sowie die Simulation der sogenannten Manöver (Schließung und Öffnung der Turbinen der Rheinkraftwerke) zur Rückhaltung von Hochwassern.

Die Entwicklung des Modells SYNHP in den 80er Jahren erfolgte auf der Grundlage eines in der BfG für die Berechnungen der Hochwasser-Studienkommission für den Rhein erstellten hydrologischen Modells. Im Gegensatz zu diesem Vorläufermodell der BfG berechnet das Modell SYNHP zeitschrittweise den momentanen Abfluss der gesamten Flussstrecke (synoptisch), während das Modell der BfG nacheinander für jeden Speicher jeweils die gesamte Ganglinie berechnete, was einen erheblichen Mehraufwand bei den Simulationen von gesteuerten Maßnahmen bedeutete.

3.1.2 Das numerische Modell SOBEK

Das eindimensionale, numerische Abflussmodell SOBEK ist eine Entwicklung von Delft Hydraulics und dem Ministerie van Verkeer en Waterstaat in den Niederlanden. Die Abflussberechnungen von SOBEK beruhen auf dem De Saint Venant'schen Gleichungssystem, bestehend aus der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung. Letzere berücksichtigt die lokale und konvektive Beschleunigung, das Wasserspiegelgefälle, Dichteunterschiede im Wasser sowie Energieverluste durch die Rauheit der Gewässersohle, durch Windeffekte (optional) und durch weitere lokal beschränkte Einflussfaktoren (optional). Die numerische Lösung erfolgt über die finite Differenzenmethode nach dem Preissmann-box-Verfahren (Delft Hydraulics and the Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 1997). Neben der Berechnung von Abflüssen, Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten ist es auch möglich, Salzintrusionsvorgänge sowie die Gewässergüte und den Sedimenttransport zu berechnen.

Wichtige Eingabegrößen stellen die Querprofilaten dar. SOBEK unterscheidet dabei in Hauptgerinne, Überflutungsraum 1 und Überflutungsraum 2, so dass Bühnenfelder und Vorländer einschließlich Sommerdeiche und Polder ebenso berücksichtigt werden können wie andere Bauwerke (Wehre, Schleusen, Pumpen etc.).

Bei der Kalibrierung des SOBEK-Modells Andernach-Lobith zeigte sich, dass eine Anpassung simulierter an gemessene Ganglinien entweder nicht oder nur durch die Wahl physikalisch unrealistischer Rauheiten erfolgen kann (Barneveld und Meijer, 1997). Schon durch den Vergleich gemessener Durchflussganglinien zweier benachbarter Pegel wird deutlich, dass auch unter Berücksichtigung seitlicher Zuflüsse im ansteigenden Ast von Hochwasserwellen negative Wasserbilanzen und im absteigenden Ast positive Wasserbilanzen auftreten. Die Erklärung dieses Phänomens liegt darin, dass beim Wellenanlauf Wasser vom Fluss in das Grundwasser infiltriert und 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. Ausgehend von dem Gesetz nach Darcy und unter Einhaltung der Kontinuitätsbedingungen für das im Grundwasser gespeicherte Wasservolumen werden in Abhängigkeit vom Wasserstand im Fließgewässer der Austausch zwischen Flusswasser und Grundwasser sowie die Grundwasserstände für jeden Flussabschnitt berechnet. Der Geologie am Niederrhein entsprechend gehen Infiltrationskoeffizienten, effektive Porositäten des Grundwasserleiters sowie die Breite des am Austauschvorgang beteiligten Grundwasserleiters entlang des Gewässers als Modellparameter ein. Durch eine einmonatige Vorlaufzeit für die Berechnung der Grundwasserhältnisse werden die Niederschläge- und Flusswasserstände vor dem Hochwasser, die die Grundwasserstände zu Beginn der Hochwasserwelle maßgeblich beeinflussen, berücksichtigt.

3.1.3 Abflussganglinien ausgewählter Hochwasser

Die hier gewählten Verfahren zur Berechnung des Wellenablaufs im Rhein setzen voraus, dass die Zuflussganglinien an den Modellrändern bekannt sind. Deshalb müssen zunächst wichtige Hochwasserzeiträume ausgewählt und anschließend für jeden dieser Zeiträume die Abflussganglinien des Rheins bei Basel sowie aller relevanten Nebengewässer zusammengestellt werden.

3.1.3.1 Auswahl der historischen Hochwasserereignisse

Die für die Quantifizierung der Auswirkung der Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein ausgesuchten Hochwasser umfassen ein Kollektiv von 35 historischen Ereignissen. Dieses Kollektiv basiert auf 30 Hochwassern des Zeitraums 1882-1980, die bereits Gegenstand der Untersuchungen der Hochwasserstudienkommission für die Rheinstrecke Worms-Kaub (1985) waren. Bei der Auswahl dieser Hochwasser war angestrebt worden, die bezogen auf den Pegel Kaub 30 größten Hochwasser seit der Korrektur des Oberrheins durch Tulla zu erfassen. Dabei konnten die Hochwasser vom November 1944 und Februar 1945 aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Statt dieser wurden zwei weniger große Hochwasser ausgewählt.

Bei späteren Untersuchungen der BfG (Busch und Engel, 1987) wurden diesem Datenkollektiv vier weitere Ereignisse aus den Jahren 1981-1985, und im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchungen die vier großen Hochwasser seit 1987 hinzugefügt. Aufgrund fehlender Ganglinien der Nebenflüsse am Niederrhein vor 1900 wurde schließlich auf die drei ältesten Hochwasser verzichtet. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die gewählten Hochwasserereignisse und stellt sie dem Hochwasserkollektiv älterer Untersuchungen gegenüber.

Aus der Rangordnung der ausgesuchten Hochwasserereignisse über den Zeitraum 1901 bis 1997 für den Pegel Köln wird ersichtlich, dass außer vier Hochwassern alle Ereignisse bis Rang 30 vertreten sind (Tabelle 3.1). Die nicht berücksichtigten Hochwasser vom November 1944 und Februar 1945 belegen die Ränge 22 und 25. Aufgrund des erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwandes für die Bereitstellung des kompletten Datensatzes für die Wellenablaufberechnungen von Basel bis Köln wurde auch auf die Hochwasser vom Dezember 1982 (Rang 28) und März 1997 (Rang 29) verzichtet. Im Datenkollektiv befinden sich statt dessen bezüglich des Pegels Köln eine Reihe mittlerer und kleinerer Hochwasser, die am Pegel Kaub zu den 30 größten Hochwassern zählen. Ein Vergleich mit den Ereignissen, die von der Hochwasserstudienkommission für den Rhein für den Zeitraum 1873 bis 1972 zusammengestellt wurden und die die seinerzeit 10 größten Hochwasser bei Worms und 9 größten Hochwasser bei Maxau umfassten, zeigt, dass sich ein großer Teil der damals ausgewählten Oberrheinhochwasser im heutigen Hochwasserkollektiv wiederfindet.

Tab. 3.1: Auswahl historischer Hochwasser
 (HSK = Hochwasserstudienkommission; HSG = Hochwasserstudiengruppe).

Ereignis			HSK (1978)	HSG Worms- Kaub (1985)	BfG (Busch, N. und Engel, H., 1987)	HSG Kaub- Rolands- werth (1993)	Aktuelle Untersuchung [Rang in der Hochwas- serstatistik Köln 1901- 1997]
Nr	Name	Zeitraum					
	Nov/Dez 1882	22.11.82-5.12.82	X	X	X	X	
	1882/1883	23.12.82-20.1.83	X	X	X	X	
	Mrz 1896	4.3.96-30.3.96	X	X	X	X	
1	1918/1919	21.12.18-14.1.19	X	X	X	X	57
2	1919/1920	21.12.19-10.1.20	X	X	X	X	12
3	Jan 1920	10.1.20-30.1.20	X	X	X	X	4
4	Apr/Mai 1924	28.4.24-20.5.24	X	X	X	X	53
5	Okt/Nov 1924	30.10.24-17.11.24		X	X	X	10
6	1925/1926	20.12.25-15.1.26		X	X	X	1
	Mai 1930		X				
7	Nov/Dez 1930	16.11.30-9.12.30		X	X	X	16
8	Feb/März 1937	17.2.37-8.3.37		X	X	X	41
9	Jan/Febr 1941	20.1.41-9.2.41		X	X	X	20
10	Mrz 1942	10.3.42-2.4.42		X	X	X	17
	Juni 1946	21.6.46-8.7.46				X	
11	1947/1948	26.12.47-13.1.48	X	X	X	X	8
12	Jan 1948	13.1.48-29.1.48		X	X	X	19
	Juli 1948		X				
13	Mrz/Apr 1952	19.3.52-12.4.52		X	X	X	39
14	1952/1953	15.12.52-4.1.53		X	X	X	27
	Juni/Juli 1953		X				
15	Jan 1955	10.1.55-30.1.55	X	X	X	X	11
16	Mrz 1956	1.3.56-17.3.56	X	X	X	X	34
17	Feb/Mrz 1957	25.2.57-12.3.57	X	X	X	X	45
18	Feb 1958	5.2.58-22.2.58	X	X	X	X	24
19	Feb/Mrz 1958	22.2.58-10.3.58	X	X	X	X	14
	Juni 1965		X				
20	Dez 1965	3.12.65-25.12.65		X	X		30
	Sept. 1968		X				
21	Feb 1970	2.2.70-20.2.70	X	X	X		32
22	Feb/Mrz 1970	19.2.70-8.3.70	X	X	X		6
23	Mai 1970	8.5.70-26.5.70		X	X		23
	Nov 1972		X				
24	Feb 1977	5.2.77-18.2.77		X	X		76
25	Feb/Mrz 1977	19.2.77-8.3.77		X	X		47
26	Mai/Juni 1978	20.5.78-5.6.78		X	X		56
27	Feb 1980	31.1.80-20.2.80		X	X		13
28	1981/1982	29.12.81-21.1.82			X	X	18
29	Apr 1983	4.4.83-25.4.83			X	X	7
30	Mai/Juni 1983	20.5.83-8.6.83			X	X	5
31	Feb 1984	29.1.84-18.2.84			X	X	15
32	Mrz/Apr 1988	11.3.88-10.4.88				X	9
33	Feb 1990	11.2.90-28.2.90					26
34	1993/1994	1.12.93-31.1.94					3 + 21
35	Jan 1995	11.1.95-1.3.95					2
	Weitere Hochwasser:						
	5 zwischen 1946 und 1955					X	
	9 zwischen 1980 und 1986					X	

3.1.3.2 Abflussganglinien

Grundlage der Modellierung des Wellenablaufs historischer Hochwasser von Basel bis Lobith ist die Bereitstellung der Abflussganglinien des Rheins bei Basel sowie der entsprechenden Ganglinien der Nebenflüsse des Rheins zwischen Basel und Lobith. Eine Aufstellung aller Nebenflüsse, die berücksichtigt wurden, ist der Anlage 2.2 zu entnehmen.

Zur Festlegung der Zuflüsse aus den Nebengewässern wurden die Abflüsse an den Pegeln herangezogen, die jeweils der Mündung in den Rhein am nächsten liegen und von denen ausreichend Beobachtungsdaten verfügbar sind. Die berücksichtigten Pegel sowie deren Entfernung zur Mündung des entsprechenden Nebenflusses sind ebenfalls in der Anlage 2.2 zusammengefasst. Die Entfernung der Pegel zur Nebenflussumündung wird dem Modell als Laufzeit (ts) zur Verfügung gestellt und durch Verschiebung der Ganglinie um diesen Zeitschritt berücksichtigt.

Bei der Zusammenstellung der Ganglinien für die ausgewählten Hochwasserereignisse (Tabelle 3.1) konnte auf umfangreiches Material zurückgegriffen werden, das im Laufe der letzten 25 Jahre im Rahmen unterschiedlicher Untersuchungen zusammengetragen worden war. Die ältesten Unterlagen aus den Arbeiten der Hochwasserstudienkommission für den Rhein (1978) umfassen Ganglinien bis 1970 im Rheinabschnitt Basel bis Worms (vgl. Tabelle 3.1). Im Rahmen der Arbeiten der Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Worms bis Kaub (1985) wurde dieses Datenmaterial ergänzt durch Ganglinien, die auch die Nebenflüsse der Rheinstrecke Worms bis Kaub abdecken. Darüber hinaus wurden für weitere Hochwasserereignisse Nebenflussganglinien für die gesamte Rheinstrecke Basel – Kaub zusammengestellt. Daran anschließende Arbeiten der BfG (Busch und Engel, 1985a) und der Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth (1993) ergänzten diesen Datensatz um die Rheinstrecke bis Köln und um die in Tabelle 3.1 zusammengestellten Zeiträume von 1981 bis 1984 bzw. 1990. Schließlich kamen die beiden Hochwasser 1993/1994 und Januar 1995 hinzu.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurde das Datenkollektiv schließlich (soweit nicht vorhanden) um die Nebenflüsse am Rhein ab Andernach ergänzt.

Einen Überblick über die zur Modellierung zur Verfügung stehenden Ganglinien gibt Anlage 2.3. Nähere Erläuterungen zur Zusammenstellung der Daten sind den entsprechenden Berichten zu entnehmen.

Außer den Zuflüssen aus dem Hochrhein in Basel und den genannten Nebenflüssen erhält der Rhein auch Zuflüsse aus anderen, meist kleineren, nicht durch Pegel erfassten Gebieten, die trotzdem nicht vernachlässigt werden dürfen.

Im Modell SYNHP, d.h. bei der Modellierung bis Andernach werden diese Gebiete als „Resteinzugsgebiete“ behandelt. Hier gehen alle Gebiete ein, für die keine Ganglinien bekannt sind. Im Einzelfall können dies auch größere Nebenflüsse oder der Unterlauf größerer Nebengewässer sein, für die keine Daten vorhanden sind oder das Datenmaterial Lücken aufweist wie z.B. bei der Moder bis 1966 (vgl. Anlage 2.2).

Auf der Strecke Basel – Andernach werden die folgenden 4 Resteinzugsgebiete unterschieden:

1. Resteinzugsgebiet Basel – Maxau
2. Resteinzugsgebiet Maxau - Worms
3. Resteinzugsgebiet Worms – Kaub
4. Resteinzugsgebiet Kaub – Andernach

Zur Ermittlung der Abflüsse aus den Resteinzugsgebieten wurden zunächst Abflusssummen aus den vorhandenen Abflussganglinien an den Rhein- und Rheinzuflasspegeln berechnet. Für jeden der 4 Teilabschnitte des Rheins wurden daraus die Bilanzen einander zeitlich zugeordneter Abflussfüllen ermittelt. Aus den so gewonnenen Abflussvolumina wurde schließlich je Einzugsgebiet der über den jeweiligen Hochwasserzeitraum gemittelte Abfluss berechnet und dem Modell als konstanter Zufluss zur Verfügung gestellt.

In einigen Fällen wurden Zuflüsse aus Rest- bzw. Zwischeneinzugsgebieten aber auch als Abflussganglinien berücksichtigt (vgl. Anlage 2.3, Zwischeneinzugsgebiete 1 bis 6). Nähere Erläuterungen zur Zusammenstellung auch dieser Daten sind vor allem dem Bericht der Hochwasserstudien­gruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth (1993) zu entnehmen.

Im Modell SOBEK, d.h. bei der Modellierung der Strecke Andernach bis Lobith, wurde eine andere Methode der Berücksichtigung von Resteinzugsgebieten gewählt. Das Teileinzugsgebiet eines Nebenflusses unterhalb des Pegels wurde berücksichtigt, indem die Ganglinie mit Hilfe eines Faktors vergrößert wurde. Dabei berücksichtigt der Faktor das Verhältnis zwischen der gesamten Fläche des Einzugsgebietes und der durch den Pegel erfassten Teilfläche. Aufgrund des starken Austausches zwischen Fluss- und Grundwasser ist es am Niederrhein nicht möglich über Bilanzrechnungen weiterer Resteinzugsgebiete zu berücksichtigen.

3.1.4 Berücksichtigte Ausbauzustände und Retentionsmaßnahmen

Zur Wirkungsabschätzung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen mittels Modellrechnung müssen zunächst Zustände im Flusssystem definiert werden, die untersucht werden sollen. Im Zusammenhang mit der Homogenisierung eines vorliegenden Datenkollektivs müssen dabei möglichst alle relevanten Zustände, die im Laufe des betrachteten Zeitraums geherrscht haben, erfasst werden.

Unter Vernachlässigung von Übergangsphasen lassen sich, den Ausführungen in Kapitel 3 folgend, für den Rhein bis Andernach seit 1900 drei (historische) Ausbauzustände festlegen, die durch den Ausbau des Oberrheins geprägt sind. Ein vierter Zustand kommt hinzu, um die Wirkung der geplanten Retentionsmaßnahmen am Oberrhein zu untersuchen. Die berücksichtigten Ausbauzustände sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tab. 3.2: Bei der Modellierung betrachtete Zustände.

Bezeichnung des Ausbauzustandes	Beschreibung des Ausbauzustandes	
	Am Oberrhein	Am Niederrhein
<i>Zustand 1955</i>	Zustand vor Ausbau des Oberrheins mit Staustufen	Heutiger Zustand am Niederrhein (ohne Retentionsmaßnahmen)
<i>Zustand 1977</i>	Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, ohne Retentionsmaßnahmen	
<i>Zustand heute</i>	Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit Teilmaßnahmen zur Retention am Oberrhein	
<i>Zustand geplant</i>	Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit allen am Oberrhein geplanten d.h. hinsichtlich ihrer Wirkung vertraglich vereinbarten Retentionsmaßnahmen	Zustand mit geplanten Retentionsmaßnahmen am Niederrhein

Die Berücksichtigung des *Zustandes 1955* und des *Zustandes 1977* erfolgt im Modell SYNHP durch veränderte Speicherkoeffizienten (Abfluss-Volumen-Beziehungen), mit deren Hilfe die Veränderungen der Geometrie des Gerinnes charakterisiert werden. Der im *Zustand heute* und *Zustand geplant* zur Verfügung stehende Retentionsraum wird als Speichervolumen berücksichtigt, das nach vorgegebenen Steuerkriterien gefüllt oder geleert wird. Die berücksichtigten Retentionsmaßnahmen und die Steuerkriterien sind den Anlagen 2.4, 2.5 und 2.6 zu entnehmen.

Für den Rheinabschnitt Andernach-Lobith kann nur zwischen zwei Zuständen unterschieden werden, dem Zustand bis heute und dem geplanten Zustand, d.h. *Zustand 1955*, *Zustand 1977* und *Zustand heute* werden am Niederrhein als identisch angesehen (vgl. Tabelle 3.2). Der Unterschied zwischen dem geplanten Zustand gegenüber dem heutigen Zustand besteht in einer Vergrößerung des Retentionsraumes. In das Modell SOBEK wird diese in Form veränderter Querprofile eingeführt. Auf der Grundlage des Erkenntnisstandes 1998 (mündliche Absprache mit dem StUA Krefeld und dem StUA Köln) werden insgesamt neun Rückhaltemaßnahmen berücksichtigt, von denen zwei (Köln Langel und Worringer Bruch) als Taschenpolder und die übrigen sieben Maßnahmen als Flutpolder (Deichrückverlegungen) betrachtet werden (Anlage 2.7). Gemäß den noch wenig detaillierten Unterlagen sind die bei der Modellierung berücksichtigten Flächen deutlich kleiner als die 1990 und 1991 in den Generalplänen zum „Hochwasserschutz am Niederrhein“ und zum „Hochwasserschutz am Rhein im Regierungsbezirk Köln“ ausgewiesenen Flächen. Zu den hier dargestellten Untersuchungen wurde in Absprache mit den Staatlichen Umweltämtern jedoch bewusst eine Variante gewählt, die zum Zeitpunkt der Modellerstellung hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit als relativ sicher erschien. Dabei handelt es sich um ein Minimal-Szenario mit nur geringen Auswirkungen auf Hochwasserscheitel in Rees und Lobith (Haselen, 1999). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit fortlaufender Planung und Umsetzung der vorbeugenden Hochwasserschutzmaßnahmen am Niederrhein mehr Retentionsvolumen mit einer größeren Wirkung zur Verfügung stehen wird.

Einzelheiten über die im Modell berücksichtigten Rückhalteräume sind der Anlage 2.7 zu entnehmen.

3.2 Ergebnisse der Modellierung

Für jeden der bei der Modellierung ausgewählten Ausgabepunkte ergibt die Simulation eine Serie von 35 Hochwasserganglinien je Zustand. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Ergebnisse der Pegel Köln, Rees und Lobith näher betrachtet. Tabelle 3.3 zeigt die Scheitelwerte dieser Hochwasserganglinien für den Pegel Rees und stellt sie den gemessenen Abflussscheitelwerten gegenüber. Die Ergebnisse für den Pegel Köln und den Pegel Lobith sind den Anlagen 5.1 und 7.1 zu entnehmen.

Tab. 3.3: Gemessene und simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein für den Pegel Rees.

Rees	Datum	Messung Q [m³/s]	Simulation			
			Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/c]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]
HW [Bezeichnung]		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)
1918/1919	04.01.19	6880	6703	6980	6997	6960
1919/1920	02.01.20	9600	9530	9641	9556	9498
Jan 1920	18.01.20	10500	11136	11436	11444	11345
Apr/Mai 1924	07.05.24	6790	6827	6980	6992	6937
Okt/Nov 1924	07.11.24	9260	9700	9879	9879	9803
1925/1926	03.01.26	12200	11562	11779	11779	11725
Nov/Dez 1930	27.11.30	8740	8895	9040	9040	9002
Feb/Mrz 1937	27.02.37	7290	7439	7600	7600	7541
Jan/Febr 1941	29.01.41	7970	7691	7814	7814	7785
Mrz 1942	22.03.42	8790	8494	8500	8500	8487
1947/1948	03.01.48	9320	9791	10342	10334	10233
Jan 1948	18.01.48	8310	8154	8155	8155	8133
Mrz/Apr 1952	03.04.52	7420	7189	7162	7162	7159
1952/1953	26.12.52	8000	7910	8026	8026	7967
Jan 1955	20.01.55	9500	10013	10413	10167	10130
Mrz 1956	08.03.56	7620	7665	8137	8137	8084
Feb/Mrz 1957	02.03.57	6950	7181	7856	7773	7741
Feb 1958	14.02.58	7560	7833	8125	8125	8059
Feb/Mrz 1958	01.03.58	9140	9325	9436	9443	9407
Dez 1965	09.12.65	7560	7759	7772	7772	7729
Feb 1970	13.02.70	7420	7432	7475	7475	7475
Feb/Mrz 1970	26.02.70	9950	10529	10791	10771	10710
Mai 1970	16.05.70	7590	7517	7804	7804	7783
Feb 1977	15.02.77	5930	5952	6284	6301	6321
Feb/Mrz 1977	24.02.77	6600	7073	7041	7041	7027
Mai/Juni 1978	28.05.78	6360	6295	6691	6645	6596
Feb 1980	09.02.80	8780	9312	9677	9677	9617
1981/1982	10.01.82	7850	8053	8154	8154	8114
Apr 1983	14.04.83	9490	9445	9918	9811	9741
Mai/Juni 1983	31.05.83	9900	9527	10085	9964	9850
Feb 1984	11.02.84	8600	8713	8862	8862	8813
Mrz/Apr 1988	30.03.88	10200	10592	10878	10781	10741
Feb 1990	20.02.90	7310	7578	8266	8224	8083
1993/1994	25.12.93	11020	11230	11421	11421	11340
Jan 1995	31.01.95	11600	11883	12005	12001	11962

Werte können zum Vergleich Simulationswerte-Messwerte herangezogen werden

3.2.1 Abweichung der Modellergebnisse von den Messwerten (Modellgenauigkeit)

Aufgrund der unvollständigen Erfassung aller Einflussfaktoren unterliegt die Simulation von Naturvorgängen mittels mathematischer Modelle gewissen Ungenauigkeiten. Dies gilt auch für die Modellierung von Hochwasserwellen. Durch die Kalibrierung der Modelle werden diese Abweichungen minimiert, jedoch nicht völlig eliminiert.

Sowohl das Modell SYNHP als auch das Modell SOBEK wurden in der Vergangenheit einer Kalibrierung unterzogen, bei der durch die Wahl geeigneter Modellparameter angestrebt wurde, die für ausgewählte Hochwasserereignisse berechneten Ganglinien möglichst gut an die gemessenen Ganglinien anzupassen (Barneveld und Meijer, 1997; Berg et al., 1990; Busch et al., 1993). Das Modell SYNHP wurde anhand von Abflussganglinien kalibriert, während das Modell SOBEK in erster Linie an Wasserstandsganglinien angepasst wurde. Die gemessenen Abflussganglinien dienten hier in erster Linie der Abflussfüllenkontrolle.

Kriterien der Anpassung waren neben der Volumen- und Formtreue auch die Wiedergabe des Abflussscheitelwertes und der Laufzeit der Ganglinie. Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung rückt die Betrachtung von Abflussscheitelwerten in den Mittelpunkt des Interesses. Deshalb soll bei den folgenden Betrachtungen nur auf diese Größe eingegangen werden.

Zur Abschätzung der Abweichungen der simulierten Werte von den gemessenen stehen zunächst die gemessenen Scheitelwerte der 15 ausgewählten Hochwasser bis 1955 zur Verfügung, die mit den entsprechenden für den *Zustand 1955* berechneten Hochwasserscheiteln verglichen werden können. Sie sind in Tabelle 3.3 grau markiert. Die gemessenen Scheitelwerte der Hochwasser ab 1977 können mit den entsprechenden Simulationsergebnissen für den *Zustand 1977* verglichen werden (in Tabelle 3.3 ebenfalls durch eine graue Markierung kenntlich gemacht). Die Ereignisse März 1988 und Februar 1990 sind wegen der am Oberrhein eingeleiteten Rückhaltemaßnahmen nicht zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse des Vergleiches der Simulationswerte mit denen der Messungen für die Pegel Andernach, Köln, Rees und Lobith sind in den Anlagen 4.1a und 4.1b zusammengefasst. Es wird deutlich, dass für die Pegel Andernach und Köln (Anlage 4.1a) im Mittel sehr geringe Abweichungen auftreten, in Einzelfällen jedoch Abweichungen bis 700 m³/s bzw. 6,5% vom Messwert zu beobachten sind. Die kleinen mittleren Abweichungen sind u. a. darin begründet, dass sowohl positive als auch negative Abweichungen der Simulationswerte von den Messwerten auftreten.

Anders sieht es bei den Ergebnissen für die Pegel Rees und Lobith aus (Anlage 4.1b). Während am Pegel Rees für die Hochwasser bis Januar 1955 sehr geringe mittlere Abweichungen auftreten, ist die mittlere Differenz zwischen den simulierten und gemessenen Scheitelwerten der Hochwasser ab 1977 mit 400 m³/s bzw. 4,9% relativ hoch. Letzteres wird nicht nur durch hohe Abweichungen hervorgerufen, sondern auch dadurch, dass ab dem Hochwasserereignis vom Februar 1977 alle Differenzwerte positiv sind, d.h. alle simulierten Werte sind höher als die entsprechenden Messwerte.

Ähnlich sieht es für den Pegel Lobith aus (Anlage 4.1b). Im Gegensatz zu Rees tritt in Lobith die große, mittlere Abweichung für die Hochwasser bis 1955 auf, wobei nicht nur hohe Einzelwerte, sondern fast ausschließlich negative Abweichungen (= simulierte Werte sind kleiner als die entsprechenden Messwerte) zu beobachten sind. Die mittlere Abweichung der Hochwasser nach 1977 ist dagegen wieder sehr gering, obwohl auch hier im einzelnen große Differenzen zwischen gemessenen und beobachteten Scheitelabflüssen auftreten. Da diese sich sowohl negativ als auch positiv ergeben, heben sie sich im Mittel auf.

Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse des aus dem Modell SYNHP und dem Modell SOBEK gekoppelten Gesamtmodells werden beeinflusst durch die Abweichungen der Einzelmodelle. Die Modellgenauigkeit von SYNHP entspricht den bereits betrachteten Abweichungen der Simulationsergebnisse von den gemessenen Werten am Pegel Andernach (vgl. Anlage 4.1a). Um die Modellgenauigkeit des Modells SOBEK festzustellen, wurden im Rahmen einiger Sonderuntersuchungen die ausgewählten Hochwasserwellen nur für die Strecke Andernach bis Lobith nachgerechnet, wobei jeweils die gemessene Abflussganglinie des Pegels Andernach eingegeben wurde. Differenzen der simulierten zu den gemessenen Ganglinien beispielsweise bei Rees resultieren somit nur aus den Berechnungsfehlern von SOBEK. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen finden sich in der Anlage 4.2. Auch hier treten z.T. beträchtliche Differenzen auf.

Hydronumerische Modelle werden in der Regel an Wasserstandsganglinien angepasst, weil bei den Messungen die Wasserstände die primären Größen darstellen und die Modelle Wasserstände direkt berechnen können, während hydrologische Modelle wie SYNHP nur Abflüsse berechnen. So wurde das Modell SOBEK nicht, wie das Modell SYNHP, mit historischen Abflussganglinien, sondern mit gemessenen Wasserstandsganglinien kalibriert (Barneveld und Meijer, 1997).

Stellvertretend für alle anderen Pegel am Niederrhein werden für den Pegel Rees die simulierten Wasserstandsscheitelwerte den gemessenen Scheitelwerten der 35 ausgewählten Hochwasser gegenübergestellt (Anlage 4.3). Dabei zeigen sich für die jüngeren Hochwasser (ab Hochwasser Februar 1980) sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und simulierten Werten, was den Kalibrierungs- und Verifizierungsergebnissen von Barneveld und Meijer (1997) entspricht, bei denen die Abweichungen der simulierten Wasserstandsscheitelwerte von den gemessenen unter 0,1 m lagen, was als ausreichend genau betrachtet wurde.

Für die Wasserstandsdifferenzen wurden unter Verwendung der jeweils gültigen Abflusstafeln Abflussdifferenzen berechnet (Differenz Q in Anlage 4.3). Diese sind deutlich geringer als die durch den direkten Vergleich zwischen den simulierten Abflüssen und den „historischen Abflüssen“ ermittelten Abflussdifferenzen (Anlage 4.2).

Die Abflüsse selbst sind nicht messbar. Sie werden aus Wasserständen mittels Abflusstafeln berechnet. Die beim Ablauf einer Hochwasserwelle auftretende Hysterese im Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss wird in der Abflusstafel nicht berücksichtigt, so dass bei der Berechnung der Abflüsse aus gemessenen Wasserständen Fehler auftreten können. Hinzu kommt, dass die meisten Abflusstafeln im Bereich hoher Abflüsse bzw. Wasserstände extrapoliert sind, da nur wenige oder keine Messwerte vorliegen. Auch hier ist die Fehlerwahrscheinlichkeit relativ hoch.

Bei den Hochwasserereignissen vor 1980 treten z.T. sehr hohe Abweichungen auf, insbesondere Ende der 70er Jahre, kurz vor Einführung eines neuen Pegel-Nullpunktes in Rees (Anlage 4.3). Die großen Veränderungen des Pegel-Nullpunktes weisen auf starke Änderungen im Messprofil des Pegels hin und werfen die Frage auf, in wieweit die Messdaten auch hierdurch Fehler behaftet sind.

Wasserstände reagieren empfindlich auf Veränderungen im Flussquerschnitt. Diese Tatsache kann mit dem Modell nicht berücksichtigt werden, da bei der Simulation von gleichbleibenden Gerinneverhältnissen ausgegangen wird. Es ist also plausibel, wenn vor allem bei länger zurückliegenden Hochwassern größere Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Ganglinien (Inhomogenitätsprobleme) auftreten.

Tabelle 3.4 stellt abschließend die Abweichungen der Ergebnisse der Einzelmodelle SYNHP (Basel-Andernach) und SOBEK (Andernach-Rees) bezüglich der Scheitelabflüsse den Abweichungen des Gesamtmodells bis Rees gegenüber. Daraus geht hervor, dass sich die Abflussdifferenzen des Gesamtmodells mit wenigen Ausnahmen im wesentlichen aus denen der Einzelmodelle SYNHP und SOBEK zusammensetzen.

Insgesamt lassen sich folgende Schlussfolgerungen treffen:

- Differenzen aus dem Vergleich von Simulations- und Messwerten gehen sowohl auf Mess- als auch auf Simulationsfehler zurück (Stichworte: Instrumentenfehler, fehlerhafte Abflusstafeln, Hysterese etc. einerseits und falsche Modellparameter, fehler- und lückenhafte Inputdaten für die Modellierung etc. andererseits)
- Es ist plausibel, wenn die Differenzen zwischen Simulations- und Messwerten für länger zurückliegende Zeiträume größer werden, da hier die im Modell berücksichtigten Randbedingungen (vor allem Gerinnegeometrien) nicht unbedingt den historischen Bedingungen entsprechen. Zur Bestimmung der Modellgenauigkeit sollten nur jüngere Messdaten herangezogen werden.
- Bei der Nutzung von Simulationsergebnissen für absolute Aussagen (z.B. absolute Abflussscheitelwerte) ist Vorsicht geboten. Bei der Untersuchung der Auswirkung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen in einem Flusssystem werden beispielsweise Simulationsergebnisse der gleichen Hochwasserereignisse unterschiedlicher Ausbauvarianten im Flusssystem miteinander verglichen. Da der Fehler im Wellenablauf in allen Fällen gleich ist, wird er durch die Differenzenbildung beispielsweise der Scheitelabflüsse aufgehoben. Die Relativaussage ist also unabhängig von den absoluten Abweichungen der Modellergebnisse von den Messwerten. Für Relativaussagen ist der Einsatz von Simulationsmodellen deshalb mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet.

Tab. 3.4: Abweichungen der gemessenen Abflussscheitel von den mit dem Modell SYNHP (von Basel bis Andernach), mit dem Modell SOBEK (von Andernach bis Rees) sowie mit dem gekoppelten Modell SYNHP-SOBEK (von Basel bis Rees) berechneten Scheitelwerten.

HW [Bezeichnung]	Abweichung Basel-Andernach (SYNHP)		Abweichung Andernach-Rees (nur SOBEK) *		Summe der Abweichun- gen Basel-Andernach (SYNHP) und Ander- nach-Rees (nur SOBEK)		Abweichungen Basel- Rees, gekoppeltes Modell SYNHP-SOBEK **	
	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert
<i>Zustand 1955</i>								
1918/1919	-217	-3,34	46	0,67	-171	-2,68	-177	-2,57
1919/1920	89	1,02	-101	-1,05	-12	-0,03	-70	-0,73
Jan 1920	-117	-1,10	646	6,15	529	5,05	636	6,06
Apr/Mai 1924	44	0,71	-8	-0,12	36	0,59	37	0,54
Okt/Nov 1924	-84	-0,89	392	4,23	308	3,35	440	4,75
1925/1926	-718	-6,47	-305	-2,50	-1023	-8,97	-638	-5,23
Nov/Dez 1930	45	0,55	381	4,36	426	4,91	155	1,77
Feb/Mrz 1937	-44	-0,63	154	2,11	110	1,48	149	2,04
Jan/Febr 1941	-238	-2,97	106	1,33	-132	-1,64	-279	-3,50
Mrz 1942	-81	-1,01	-285	-3,24	-366	-4,25	-296	-3,37
1947/1948	-129	-1,35	558	5,99	429	4,64	471	5,05
Jan 1948	-277	-3,55	86	1,03	-191	-2,52	-156	-1,88
Mrz/Apr 1952	-83	-1,17	-225	-3,03	-308	-4,20	-231	-3,11
1952/1953	-108	-1,46	13	0,16	-95	-1,29	-90	-1,13
Jan 1955	144	1,49	317	3,34	461	4,83	513	5,40
Mittelwert	-107	-1,19	121	1,31	14	0,13	31	0,27
HW [Bezeichnung]	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert	Q [m³/s]	% vom Messwert
<i>Zustand 1977</i>								
Feb 1977	176	2,97	144	2,43	320	5,41	354	5,97
Feb/Mrz 1977	65	0,99	217	3,29	282	4,29	441	6,68
Mai/Juni 1978	109	1,75	219	3,44	328	5,19	331	5,20
Feb 1980	176	2,07	677	7,71	853	9,78	897	10,22
1981/1982	-238	-3,04	556	7,08	318	4,04	304	3,87
Apr 1983	246	2,59	221	2,33	467	4,92	428	4,51
Mai/Juni 1983	108	1,12	43	0,44	151	1,56	185	1,87
Feb 1984	139	1,70	180	2,09	319	3,79	262	3,05
1993/1994	176	1,66	259	2,35	435	4,01	401	3,64
Jan 1995	157	1,54	430	3,70	587	5,24	405	3,49
Mittelwert	111	1,34	295	3,49	406	4,82	400,8	4,85
<p>* Als obere Randbedingung für das Modell Andernach-Lobith diente die gemessene Abflussganglinie von Andernach</p> <p>** Als obere Randbedingung für das Modell Andernach-Lobith diente die mit SYNHP berechnete Abflussganglinie von Andernach</p>								

3.2.2 Auswirkung der unterschiedlichen Zustände auf den Wellenablauf (Simulationsergebnisse)

Als Ergebnis der Simulation liegt für jeden Pegel eine Serie von 35 Hochwasserganglinien je Zustand vor. Tabelle 3.5 zeigt die Scheitelwerte dieser Hochwasserganglinien für den Pegel Rees. Die Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Abflussscheitel zeigen sich in den Differenzwerten zwischen den Zuständen, wobei positive Werte Abflussverschärfungen und negative Werte Verminderungen der Abflussscheitel anzeigen. Im Mittel ergibt sich für den Pegel Rees eine Abflussverschärfung um $243 \text{ m}^3/\text{s}$, die durch den Ausbau des Oberrheins mit Staustufen hervorgerufen wird. Durch die Retentionsmaßnahmen am Oberrhein, wie sie heute schon eingesetzt werden, und durch die geplanten Retentionsmaßnahmen am Ober- und Niederrhein wird diese Situation im Mittel um $23 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $72 \text{ m}^3/\text{s}$ verbessert. Gegenüber dem ursprünglichen Zustand (vor Ausbau des Oberrheins) verbleibt auch bei Einsatz aller geplanten Maßnahmen eine mittlere Abflussverschärfung um $171 \text{ m}^3/\text{s}$.

Eine nähere Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Wirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen jedoch stark vom Einzelereignis abhängt. Dabei ist der Einfluss der Retentionsmaßnahmen auf den Abflussscheitel unabhängig vom Abflussscheitelwert. So ist beispielsweise die Wirkung der Retentionsmaßnahmen des heutigen Zustandes auf das Hochwasserereignis Januar 1955 mit $246 \text{ m}^3/\text{s}$ relativ hoch, während das Hochwasser vom Januar 1995 bei einem höheren Scheitelabfluss (bezogen auf den *Zustand 1955*) fast unbeeinflusst bleibt. Vergleichbares gilt für die Wirkung der geplanten Maßnahmen. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass die Retentionsmaßnahmen am Oberrhein nur die Hochwasser beeinflussen können, die durch den Abfluss des Rheins bei Basel und die Oberrheinzuflüsse (mit-) verursacht werden. Hochwasser am Niederrhein, die vor allem durch stark angeschwollene Nebenflüsse an Mittel- und Niederrhein hervorgerufen werden, können wegen nicht ausreichender Vorhersagen und teilweise nur bei Hochwasser vor Ort funktionierender Rückhaltmaßnahmen durch Retention am Oberrhein nicht oder kaum gedämpft werden. Die Hochwassergenese ist hier der entscheidende Faktor.

Vereinzelt kann es sogar zu geringen Verschärfungen der Abflussscheitelwerte durch die Retentionsmaßnahmen (z.B. Februar 1977, April/Mai 1924) kommen. Solche Phänomene treten auf, wenn die Vorentleerung der aus ökologischen Gründen gefluteten Polder oder Flusstauräume am Oberrhein oder deren planmäßige Entleerung bei anlaufender Hochwasserwelle so erfolgt, dass die dadurch hervorgerufene Abflusserhöhung Rhein abwärts auf die Hochwasserscheitel größerer Nebenflüsse trifft. Die Verkürzung der Laufzeit der Hochwasserwellen im Oberrhein als Folge des beim Oberrheinausbau verlorengegangenen Retentionsraums ist die Hauptursache für die Hochwasserverschärfung (Hochwasserstudienkommission für den Rhein, 1978). Der Hochwasserscheitel des Rheins trifft heute häufiger mit den Hochwasserscheiteln aus den Nebenflüssen Neckar, Main und Mosel zusammen als früher. Diese Tatsache muss auch als Hauptgrund für die nach Einsatz aller geplanten Retentionsmaßnahmen verbleibende Restverschärfung angesehen werden, da diese Maßnahmen überwiegend nur Scheitel dämpfend, nicht aber verzögernd auf den Wellenablauf im Hauptstrom wirken.

Die Ergebnisse für den Pegel Köln und den Pegel Lobith sind in den Anlagen 5.1 bzw. 7.1 zusammengefasst. Die dort wiedergegebenen Abflussscheitel verhalten sich ähnlich wie die am Pegel Rees. Auf weitere Erläuterungen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Tab. 3.5: Gemessene und simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein für den Pegel Rees.

Rees	Datum	Messung	Simulation				Differenzen zwischen den Zuständen			
		Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	1977- 1955	heute- 1977	geplant- 1977	geplant- 1955	
HW [Bezeichnung]		Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]
		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(2-1)	(3-2)	(4-2)	(4-1)
1918/1919	04.01.19	6880	6703	6980	6997	6960	277	17	-20	257
1919/1920	02.01.20	9600	9530	9641	9556	9498	111	-85	-143	-32
Jan 1920	18.01.20	10500	11136	11436	11444	11345	300	8	-91	209
Apr/Mai 1924	07.05.24	6790	6827	6980	6992	6937	153	12	-43	110
Okt/Nov 1924	07.11.24	9260	9700	9879	9879	9803	179	0	-76	103
1925/1926	03.01.26	12200	11562	11779	11779	11725	217	0	-54	163
Nov/Dez 1930	27.11.30	8740	8895	9040	9040	9002	145	0	-38	107
Feb/Mrz 1937	27.02.37	7290	7439	7600	7600	7541	161	0	-59	102
Jan/Febr 1941	29.01.41	7970	7691	7814	7814	7785	123	0	-29	94
Mrz 1942	22.03.42	8790	8494	8500	8500	8487	6	0	-13	-7
1947/1948	03.01.48	9320	9791	10342	10334	10233	551	-8	-109	442
Jan 1948	18.01.48	8310	8154	8155	8155	8133	1	0	-22	-21
Mrz/Apr 1952	03.04.52	7420	7189	7162	7162	7159	-27	0	-3	-30
1952/1953	26.12.52	8000	7910	8026	8026	7967	116	0	-59	57
Jan 1955	20.01.55	9500	10013	10413	10167	10130	400	-246	-283	117
Mrz 1956	08.03.56	7620	7665	8137	8137	8084	472	0	-53	419
Feb/Mrz 1957	02.03.57	6950	7181	7856	7773	7741	675	-83	-115	560
Feb 1958	14.02.58	7560	7833	8125	8125	8059	292	0	-66	226
Feb/Mrz 1958	01.03.58	9140	9325	9436	9443	9407	111	7	-29	82
Dez 1965	09.12.65	7560	7759	7772	7772	7729	13	0	-43	-30
Feb 1970	13.02.70	7420	7432	7475	7475	7475	43	0	0	43
Feb/Mrz 1970	26.02.70	9950	10529	10791	10771	10710	262	-20	-81	181
Mai 1970	16.05.70	7590	7517	7804	7804	7783	287	0	-21	266
Feb 1977	15.02.77	5930	5952	6284	6301	6321	332	17	37	369
Feb/Mrz 1977	24.02.77	6600	7073	7041	7041	7027	-32	0	-14	-46
Mai/Juni 1978	28.05.78	6360	6295	6691	6645	6596	396	-46	-95	301
Feb 1980	09.02.80	8780	9312	9677	9677	9617	365	0	-60	305
1981/1982	10.01.82	7850	8053	8154	8154	8114	101	0	-40	61
Apr 1983	14.04.83	9490	9445	9918	9811	9741	473	-107	-177	296
Mai/Juni 1983	31.05.83	9900	9527	10085	9964	9850	558	-121	-235	323
Feb 1984	11.02.84	8600	8713	8862	8862	8813	149	0	-49	100
Mrz/Apr 1988	30.03.88	10200	10592	10878	10781	10741	286	-97	-137	149
Feb 1990	20.02.90	7310	7578	8266	8224	8083	688	-42	-183	505
1993/1994	25.12.93	11020	11230	11421	11421	11340	191	0	-81	110
Jan 1995	31.01.95	11600	11883	12005	12001	11962	122	-4	-43	79
Mittelwert							243	-23	-72	171

4 Veränderung der Scheitelabflüsse unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten durch Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein

Grundlage der Festlegung eines Bemessungsabflusses zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Ermittlung von Scheitelabflüssen unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeit. Aufgrund der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein sind die zur Durchführung der Hochwasserstatistik herangezogenen Zeitreihen der historischen Scheitelabflüsse inhomogen. Durch eine Homogenisierung der Datenreihen und der statistischen Auswertung der homogenisierten Datenreihen kann der Einfluss der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf die Scheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten festgestellt werden.

4.1 Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen bestimmter Eintretenswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Datenreihen

Die Berechnung des Wellenablaufs der 35 ausgewählten Hochwasser mit den Modellen SYNHP und SOBEK liefert für jeden Pegel bezüglich der vier untersuchten Zustände ein Kollektiv von 35 Scheitelabflüssen. Zur Quantifizierung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen werden die Hochwasserscheitel der unterschiedlichen Zustände miteinander verglichen und mittels Korrelationsanalysen zueinander in Bezug gesetzt.

Die Gleichung der Regression zwischen den Scheitelwerten des *Zustandes 1955* und denen des *Zustandes 1977* (Regression [1] für die Pegel Köln, Rees und Lobith in den Anlagen 5.2, 6.2 und 7.2) gilt als Maß für die Auswirkungen des Oberrheinausbaus mit Staustufen auf den Hochwasserwellenablauf. Da alle Hochwasserereignisse vom Oberrheinausbau beeinflusst werden, werden alle 35 ausgewählten Hochwasserereignisse in die Regressionsbetrachtungen mit einbezogen. Die Hochwassergenese kann dabei nicht berücksichtigt werden, d.h. die im mittleren und nördlichen Rheineinzugsgebiet entstehenden Hochwasser werden genauso behandelt wie diejenigen, die im Oberrheingebiet entstehen.

Die Regression zwischen den simulierten Hochwasserscheiteln des *Zustandes 1977* und den entsprechenden Abflüssen des *Zustandes heute* gilt als Maß der Veränderungen, wie sie heute schon gegenüber dem Zustand nach Ausbau zu beobachten sind (Regression [2] in den Anlagen 5.3, 6.3 und 7.3). In diese Analyse gehen jedoch nur die Hochwasser ein, bei denen im Oberrheingebiet die Retentionsmaßnahmen anspringen würden, da nur diese Hochwasserereignisse von den Retentionsmaßnahmen am Oberrhein beeinflusst werden. Als Kriterium gilt das Überschreiten des Abflusses von 3800 m³/s am Pegel Maxau. Alle anderen Hochwasser werden bei der Korrelationsanalyse nicht berücksichtigt. Hier wird die Hochwassergenese berücksichtigt.

Entsprechend gilt der Zusammenhang zwischen dem *Zustand 1977* und dem *geplanten Zustand* als Maß der Veränderungen, wie sie bei Einsatz aller bis 2010 geplanten Retentionsmaßnahmen zu erwarten sind (Regression [3] in den Anlagen 5.4, 6.4 und 7.4). Hierbei werden alle Ereignisse mit in die Regressionsbetrachtungen eingeschlossen, weil die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Maxau den Schwellenwert von 3800 m³/s erreichen bzw. überschreiten. Die Hochwassergenese kann auch hier nicht berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der durch die Regressionsanalyse ermittelten Regressionsgleichungen wird schließlich für jeden Pegel das gesamte Kollektiv der Hochwasserextremwerte seit 1900, das in die Hochwasserstatistik eingeht, in die unterschiedlichen Zustände umgerechnet, d.h. auf die entsprechenden Zustände hin homogenisiert.

Zunächst wird die historische Datenreihe auf den *Zustand 1977* hin homogenisiert. Dabei wird berücksichtigt, dass die Werte der Datenreihe von 1977 bis 1997 dem *Zustand 1977* entsprechen. Hier können also die historischen Daten beibehalten werden. Eine Ausnahme stellen die Hochwasser März/April 1988 und Februar 1990 dar. Hier wurden erstmals Retentionsmaßnahmen am Oberrhein eingesetzt, während bei den Hochwassern 1993/1994 und Februar/März 1995 keine Retentionsmaßnahmen eingeleitet wurden. Die Kriterien dazu waren nicht erfüllt. Bei der Homogenisierung werden deshalb die historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [2] (Zusammenhang zwischen *Zustand 1977* und *Zustand heute*) umgerechnet in den *Zustand 1977*. Zur Umrechnung der historischen Daten bis 1955 in den *Zustand 1977* wird die Regressionsgleichung [1] (Zusammenhang zwischen *Zustand 1955* und *Zustand 1977*) herangezogen. Für den Zeitraum 1955 bis 1977, der die Phase des Oberrheinausbaus mit den 6 Staustufen zwischen Marckolsheim und Iffezheim darstellt, muss eine Übergangsberechnung durchgeführt werden. Dabei wird angenommen, dass der Übergang zwischen dem *Zustand 1955* und 1977 linear erfolgte. Diese Annahme ist in sofern realistisch, als die Staustufen in regelmäßigen Zeitabständen fertiggestellt wurden. Tabelle 4.1 fasst die wesentlichen Schritte der Homogenisierung auf den *Zustand 1977* zusammen.

Tab. 4.1: Homogenisierung auf den *Zustand 1977* (Vorgehen).

Zeitraum	Bezeichnung der Zustände	Vorgang der Homogenisierung
Bis 1955	<i>Zustand 1955</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1]* ¹
1956-1977	Übergang zwischen <i>Zustand 1955</i> und <i>Zustand 1977</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1] unter Berücksichtigung des linearen Übergangs zwischen <i>Zustand 1955</i> und <i>Zustand 1977</i> * ¹
1977-1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	<i>Zustand 1977</i>	Historische Daten (außer für die Hochwasser März 1988 und Februar 1990)
Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Ca. <i>Zustand heute</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der nach <i>Zustand 1977</i> aufgelösten Regressionsgleichung [2]* ¹

*¹ Die Umrechnung erfolgt nur für den Gültigkeitsbereich der Regressionsgleichung, d.h. nur für den Bereich der Gleichung, bei dem die berechneten Abflüsse größer sind als die historischen Daten.

Analog dem Vorgehen zur Homogenisierung für den *Zustand 1977* wird die Homogenisierung auch für die anderen drei Zustände durchgeführt. Grundlage hierfür sind jedoch nicht die historischen Datenreihen, sondern die auf den *Zustand 1977* homogenisierten Reihen. Details sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tab. 4.2 Homogenisierung auf die *Zustände heute, geplant und 1955* (Vorgehen).

Zeitraum	Vorgang der Homogenisierung
Homogenisierung auf den <i>Zustand heute</i>	
Bis 1955	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der Regressionsgleichung [2]* ¹ . Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand heute</i> erfolgt nur für die Werte, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, da nur die Hochwasser, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, einen veränderten Wellenablauf aufweisen können.
1956-1977	
1977-1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	
Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Historische Daten
Homogenisierung auf den <i>Zustand geplant</i>	
Bis 1955	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der Regressionsgleichung [3]* ¹ . Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand geplant</i> erfolgt für alle Werte, weil die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Worms den Schwellenwert von 3800 m ³ /s erreichen, sondern auch solche, die am Oberrhein kein Hochwasser erzeugt haben.
1956-1977	
1977-1997 auch Hochwasser März 1988 und Februar 1990	
Homogenisierung auf den <i>Zustand 1955</i>	
Bis 1955	Historische Daten Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der (nach <i>Zustand 1955</i> aufgelösten) Regressionsgleichung [1]* Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand 1955</i> erfolgt für alle Werte.
1956-1977	
1977-1997 auch Hochwasser März 1988 und Februar 1990	

*¹ Die Umrechnung erfolgt nur für den Gültigkeitsbereich der Regressionsgleichung, d.h. nur für den Bereich der Gleichung, bei dem die berechneten Abflüsse kleiner sind als die für den *Zustand 1977*.

Für jeden Pegel ergeben sich vier bezüglich der vier Zustände homogene Datenreihen. Sie sind für die Pegel Köln, Rees und Lobith in den Anlagen 5.5, 6.5 und 7.5 wiedergegeben und können nun dem üblichen Verfahren der Hochwasserstatistik unterzogen werden. Für die Pegel Köln und Rees erfolgt dies nach der im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland üblichen Methode (Anlage 3). Die Statistik für den Pegel Lobith wird nach den in den Niederlanden üblichen Verfahren durchgeführt. Die Beschreibung der Methodik und der Ergebnisse ist Gegenstand mehrerer Berichte des RIZA. Eine Zusammenfassung findet sich bei Parmet et al. (1999). Deshalb wird auf die Untersuchungen für Lobith nicht weiter eingegangen.

4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Pegel Köln und Rees

Tabelle 4.3 fasst die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Hochwasserscheitelabflüsse der homogenisierten Datenreihen für den Pegel Rees und den Pegel Köln zusammen (vgl. auch Anlage 5.6 und 6.6). Daraus geht zunächst hervor, dass für beide Pegel die Werte für die historische Datenreihe gegenüber dem *Zustand 1955* höher liegen, und gegenüber dem *Zustand 1977* niedriger. Dies ist insofern plausibel, als die Zustände im Gewässer, die den historischen Datenreihen zugrunde liegen, zum Teil dem *Zustand 1955* und zum Teil dem *Zustand 1977* entsprechen.

Tab. 4.3: Hochwasserscheitelabflüsse (berechnete Ergebnisse) unterschiedlicher Wiederkehrzeiten für die Ausbauzustände 1955, 1977, heute und geplant am Pegel Köln und am Pegel Rees.

Ergebnisse der Hochwasserstatistik – berechnete Werte -										
Jährlichkeit [Jahre]	Historische Datenreihe Q [m³/s]	Pegel Köln Homogenisierte Reihe				Pegel Rees Homogenisierte Reihe				
		Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	Historische Datenreihe	Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant
		Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]
2	6757	6623	6866	6860	6842	6991	6898	7134	7128	7095
2.5	7086	6949	7198	7190	7166	7317	7225	7462	7455	7418
3.33	7483	7342	7598	7586	7557	7713	7621	7860	7850	7808
5	8013	7869	8133	8117	8078	8247	8154	8396	8381	8334
10	8886	8735	9014	8988	8934	9133	9038	9283	9260	9203
20	9752	9597	9888	9852	9782	10022	9923	10169	10138	10072
25	10034	9877	10172	10133	10058	10312	10212	10458	10424	10354
40	10633	10473	10777	10730	10643	10932	10829	11075	11034	10959
50	10922	10760	11068	11017	10925	11231	11127	11373	11329	11250
100	11838	11674	11993	11929	11819	12187	12077	12322	12266	12178
200	12791	12623	12955	12876	12747	13185	13069	13312	13244	13146
500 ¹	14115	13945	14291	14191	14034	14582	14457	14694	14607	14496
1000 ¹	15173	15001	15358	15240	15060	15704	15571	15802	15699	15577

¹ Für eine gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte

Erwartungsgemäß ist auch die Tatsache, dass bei beiden Pegeln für alle Jährlichkeiten die Abflussscheitelwerte des *Zustandes 1955* am niedrigsten sind, die des *Zustandes 1977* am höchsten und die des *Zustandes heute* und des *Zustandes geplant* dazwischen liegen. Dabei sind die Abflussscheitelwerte für den *Zustand heute* wiederum höher als für den *Zustand geplant*. Dies ergibt sich auch bei der Betrachtung der Differenzen der Abflussscheitel nach Einsatz der verschiedenen Maßnahmen (Tabelle 4.4). Hier wird augenscheinlich, dass der Ausbau des Oberrheins durch Staustufen für alle Jährlichkeiten eine Verschärfung der Abflussscheitelwerte (positive Differenzen) bedeutet, während die heute schon durchgeführten Retentionsmaßnahmen sowie die geplanten Maßnahmen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel führen. Wie bei der Betrachtung der Simulationswerte zeigt sich auch hier, dass trotz Einsatz aller geplanten Retentionsmaßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor Ausbau bleibt. Dabei ist die verbleibende Restverschärfung am Pegel Köln etwas höher als

am Pegel Rees. Bei beiden Pegeln nimmt die Restverschärfung mit zunehmender Jährlichkeit ab.

Tab. 4.4: Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Ausbauzustände 1977, heute und geplant gegenüber Zustand 1955 bzw. 1977 an den Pegeln Köln und Rees.

Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse – berechnete Werte -								
Jährlichkeit [Jahre]	Pegel Köln				Pegel Rees			
	Differenz der Abflussscheitel				Differenz der Abflussscheitel			
	Zustand 1977-1955	Zustand heute-1977	Zustand geplant- 1977	Zustand geplant- 1955	Zustand 1977-1955	Zustand heute-1977	Zustand geplant- 1977	Zustand geplant- 1955
	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]
2	243	-6	-24	219	236	-6	-39	197
2,5	249	-8	-32	217	237	-7	-44	193
3,33	256	-12	-41	215	239	-10	-52	187
5	264	-16	-55	209	242	-15	-62	180
10	279	-26	-80	199	245	-23	-80	165
20	291	-36	-106	185	246	-31	-97	149
25	295	-39	-114	181	246	-34	-104	142
40	304	-47	-134	170	246	-41	-116	130
50	308	-51	-143	165	246	-44	-123	123
100	319	-64	-174	145	245	-56	-144	101
200	332	-79	-208	124	243	-68	-166	77
500 ¹	346	-100	-257	89	237	-87	-198	39
1000 ¹	357	-118	-298	59	231	-103	-225	6

¹ Für eine gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte

4.3 Vergleich der hier erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen

Vergleichbare Untersuchungen wurden in den vergangenen 25 Jahren wiederholt für die Pegel Maxau, Worms, Mainz, Kaub, und Andernach vorgenommen (Hochwasserstudienkommission für den Rhein, 1978; Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Worms-Kaub, 1985; Busch, N. und Engel, H., 1985a und Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth, 1993). Die beiden letztgenannten Untersuchungen weisen auch Ergebnisse für den Pegel Köln auf. Dabei kam ausschließlich das Modell SYNHP zum Einsatz, während bei den hier vorgestellten Simulationen SYNHP nur für die Berechnungen bis Andernach angewandt wurde und ab Andernach das Modell SOBEK. Vor allem die Ergebnisse der Hochwasserstudiengruppe Kaub-Rolandswerth (1993) eignen sich zu einem Vergleich, da die Randbedingungen der Modellierung (Modellparameter, Eingabeganglinien etc.) und der statistischen Auswertung (Länge der Datenreihe etc.) denen der hier vorliegenden Studie sehr nahe kommen. Tabelle 4.5 fasst die damals berechneten Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher

Jährlichkeiten sowie die Differenzen der Scheitelabflüsse zwischen den damals gerechneten Zuständen im Rhein zusammen.

Tab. 4.5: Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die *Ausbauzustände 1977, heute und geplant* gegenüber den *Zuständen 1955 bzw. 1977 am Pegel Köln* – Ergebnisse der Hochwasserstudiengruppe Kaub-Rolandswerth, 1993 – gerundete Werte.

Köln Jähr- lichkeit	Zustand	Zustand	Zustand	Zustand	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz
	1955	1977	heute	geplant	Zustand 1977-1955	Zustand heute-1977	Zustand geplant-1977	Zustand geplant-1955
[Jahre]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]
2	6550	6700	6700	6700	150	-0	-0	150
5	7950	8200	8200	8180	250	-0	-20	230
10	8900	9250	9210	9160	350	-40	-90	260
25	10050	10550	10400	10280	500	-150	-270	230
50	10950	11550	11350	11170	600	-200	-380	220
100	11850	12550	12200	12050	700	-350	-500	200
200	12750	13550	12980	12850	800	-570	-700	100

Es ergaben sich seinerzeit deutlich höhere Scheitelabflüsse für alle Jährlichkeiten ab 5 Jahren und für alle Zustände. Auch die berechneten Differenzen zwischen den Scheitelwerten der verschiedenen Zustände waren ab einer Jährlichkeit von 5 Jahren größer, wobei die errechneten Restverschärfungen (= Differenz der Scheitelwerte zwischen dem *Zustand 1955* und dem geplanten Zustand) den heutigen Werten sehr nahe kommen.

Für die Ergebnisunterschiede sind mehrere Ursachen zu nennen:

1. Unterschiede in den eingesetzten Modellen:
 - Die im Modell implementierten Regelmechanismen am Oberrhein berücksichtigen heute den neuesten Stand des Maßnahmenkataloges.
 - Die in das Modell eingegebenen Abflussganglinien werden immer wieder nach dem neuesten Stand der Kenntnisse überarbeitet. Gleichzeitig wird das Modell fortlaufend weiter kalibriert.
 - Das Modell SOBEK berücksichtigt auf der Rheinstrecke Andernach-Köln den Einfluss des Grundwassers, was beim Modell SYNHP nicht der Fall ist.
2. Die der bei der Hochwasserstatistik berücksichtigten Zeitreihen sind nicht identisch (Untersuchungen von 1993: 1870-1988; Untersuchungen heute: 1900-1997). So schließen die Untersuchungen aus dem Jahr 1993 das extreme Hochwasser 1882 mit ein, nicht aber die Hochwasser 1993/1994 und Januar 1995. Bei den heutigen Untersuchungen ist das Umgekehrte der Fall.
3. Die statistischen Auswertungen beruhen auf unterschiedlichen Verfahren. Früher wurden zunächst die Verteilungsfunktionen der partiellen Serien der Sommer- und Winterhochwasser getrennt und anschließend die kombinierten Wahrscheinlichkeiten als Jahresstatistik berechnet. Hier werden unmittelbar die abflussbezogenen Jährlichkeiten ermittelt (vgl. Anlage 3).

5 Veränderung der Scheitelabflüsse von Hochwassern hoher Wiederholungszeitspannen

Die Basis für die Hochwasserstatistik für die Pegel Köln und Rees ist ein Abflussdatenkollektiv aus den letzten 97 Jahren. Die daraus ermittelten Abflüsse verschiedener Jährlichkeiten können deshalb bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren als abgesichert angesehen werden, während alle Jährlichkeiten größer 100 Jahre Extrapolationen darstellen. In wie weit das Gewässersystem des Rheins bei Hochwassern mit Abflüssen von Jährlichkeiten von 200 bis 1000 bzw. 1250 Jahren genauso reagiert und ob die Retentionsmaßnahmen die gleichen Wirkungen zeigen, wie sie die Hochwasserstatistik widerspiegelt, ist zunächst unklar.

Die Entwicklung und Verwendung von Modellhochwassern, bei denen Abflussscheitel der extremen Jährlichkeiten von 200, 500, 1000 und 1250 Jahren erreicht werden, bietet die Möglichkeit, die Wirksamkeit von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen bei extremen Abflüssen zu untersuchen.

5.1 Entwicklung von Modellhochwassern

Zur Entwicklung von Modellhochwassern wurde der Einsatz der folgenden Möglichkeiten überprüft:

- Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen;
- Zeitliche Verschiebung historischer Hochwasserganglinien der Nebenflüsse, so dass ihre Abflussscheitel so zusammentreffen, dass extrem hohe Abflüsse im Rhein entstehen;
- Erhöhung historischer Hochwasserganglinien der Nebenflüsse durch einen Faktor. Das zeitliche Zusammentreffen der Ganglinien bleibt dabei erhalten.

Eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung des gesamten Rheineinzugsgebietes in Kopplung mit Untersuchungen zur Wirkung der Ausbaumaßnahmen und Retentionsmaßnahmen im Gewässer ist zur Zeit nicht möglich, da N-A-Modelle gekoppelt mit Wellenablaufmodellen nicht vorliegen. Zudem stehen zur Zeit keine Aussagen über mögliche großräumige meteorologische Extremsituationen zur Verfügung. Letzteres wäre auch nötig, um Modellhochwasser durch eine zeitliche Verschiebung historischer Nebenflussganglinien zu entwickeln. Deshalb wird auch auf dieses Verfahren verzichtet. Statt dessen werden Modellhochwasser durch Vergrößerung der Ganglinien erzeugt. Dabei werden alle Abflussganglinien der Nebenflüsse des Rheins sowie die Abflussganglinie des Rheins bei Basel durch einen pro Ereignis für alle Nebenflüsse einheitlichen Faktor so erhöht, dass bei Simulation des Zustandes 1977 der Scheitelabfluss des jeweils ausgesuchten Hochwassers am Pegel Rees den Scheitelwert HQ_{200} , HQ_{500} bzw. HQ_{1000} erreicht. Dabei wird jeweils der kleinste Abfluss jeder Ganglinie als spezifische Grundlast von der Abflusserhöhung ausgenommen. Da es sich hierbei nicht unbedingt um den Basisabfluss im hydrologischen Sinne handelt, wird dieser Begriff bewusst vermieden. Ebenso werden bekannte Maxima möglicher Abflussgrenzen der Nebenflüsse bzw. des Rheins bei Basel berücksichtigt (vgl. HQ_{max} in Anlage 2.2), d.h. bei Erreichen dieses Abflusses wird die Vergrößerung

beendet. Abbildung 5.1 macht das angewandte Verfahren der Modellhochwasserentwicklung deutlich.

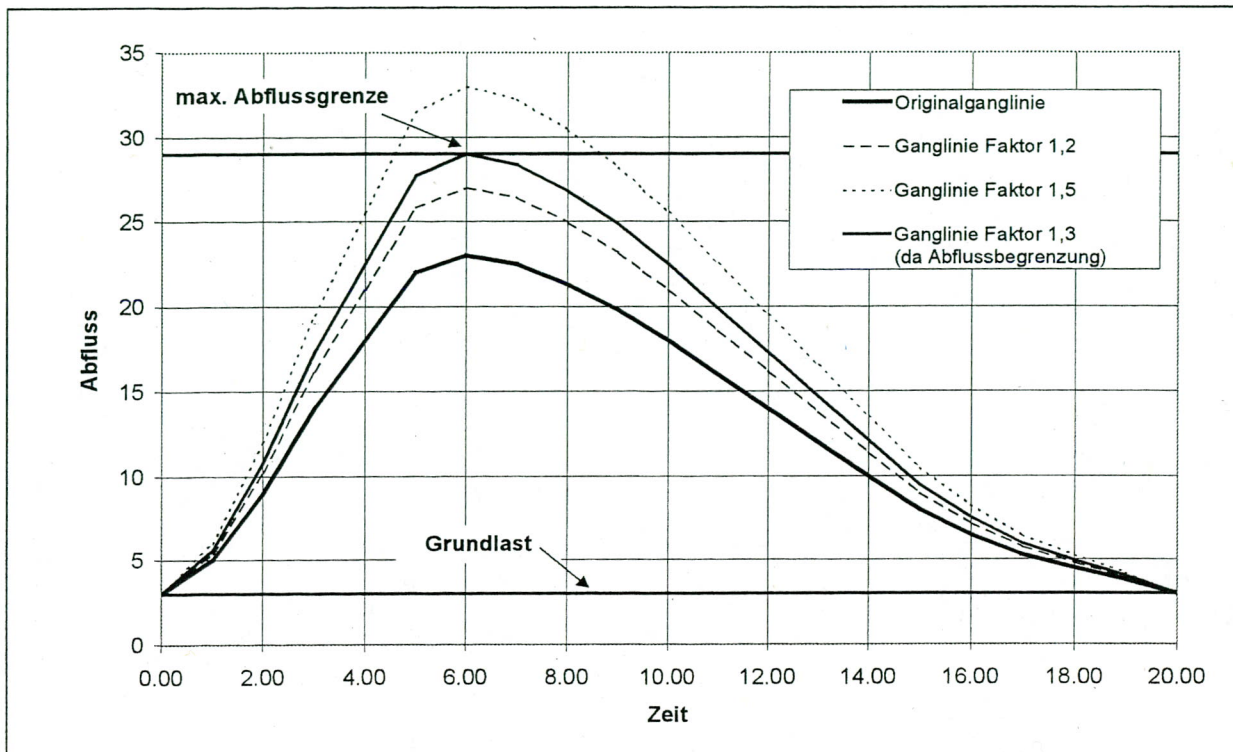


Abb. 5.1: Entwicklung von Modellhochwassern durch Erhöhung der Nebenflussganglinien ohne deren zeitliche Verschiebung.

Als Grundlage der Modellhochwasserentwicklung werden historische Hochwasserganglinien gewählt, die ein großes Spektrum möglicher Hochwassergenesen im Rheineinzugsgebiet abdecken:

- Das Hochwasser vom Januar 1955, das vor allem im Einzugsgebiet des Oberrheins entstanden ist,
- das Hochwasser vom März 1988, das durch starke Niederschläge sowohl im Oberrheingebiet als auch im Einzugsgebiet des Mittelrheins hervorgerufen wurde sowie
- das Hochwasser vom Januar 1995, das entscheidend durch die Zuflüsse zu Mittel- und Niederrhein aufgebaut wurde.

Die Modellhochwasser werden stets auf einen ausgewählten Pegel hin entwickelt. Im Rahmen dieser Studie ist dies der Pegel Rees. Für jedes der drei genannten historischen Hochwasser werden die Nebenflussganglinien nach dem oben beschriebenen Verfahren so lange vergrößert, bis am Pegel Rees die Scheitelabflüsse von $HQ_{200} = 13300 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ_{500} = 14700 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $HQ_{1000} = 15800 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden. Alle Modellhochwasser werden für den Zustand 1977 entwickelt. Es wird also davon ausgegangen, dass der Oberrhein mit Staustufen ausgebaut ist, Retentionsmaßnahmen jedoch nicht eingeleitet werden. Dadurch ist es möglich, die Effektivität der Retentionsmaßnahmen zu überprüfen. Die wichtigsten Parameter der Modellhochwas-

ser sowie die zur Berechnung der Modellhochwasser benutzten Faktoren sind der Anlage 8.1 zu entnehmen.

Bei der Ermittlung des Faktors, mit dem die Nebenflussganglinien und die Ganglinie des Rheins bei Basel multipliziert werden müssen, um den gewünschten Wert in Rees zu erreichen ist, handelt es sich um einen iterativen Vorgang. Abbildung 5.2 stellt die Abhängigkeit des Scheitelabflusses bei Rees von den gewählten Faktoren dar. Es wird deutlich, dass über große Bereiche ein linearer Zusammenhang besteht. Erst bei höheren Faktoren bzw. Abflüssen knickt die Kurve deutlich ab. Diese Abweichung des Zusammenhanges von der Linearität wird dadurch hervorgerufen, daß bei einem oder mehreren Nebenflüssen der maximal mögliche Abfluss erreicht ist noch bevor sich der gewünschte Scheitel am Zielpiegel einstellen kann. In diesen Fällen erhöhen sich bei weiteren Iterationsschritten nur noch die Faktoren für die Nebenflüsse, bei denen der maximal mögliche Abfluss noch nicht erreicht wurde. Bei den anderen Nebenflüssen bleibt der Faktor konstant. Dies führt dazu, daß in diesen Fällen schließlich unterschiedliche Faktoren für die einzelnen Zuflüsse gelten. Besonders die Abflussbegrenzung der Mosel, die nur beim Modellhochwasser 1955 auftritt (Anlage 8.1.1) führt zu einer deutlichen Abweichung des Zusammenhanges zwischen Vergrößerungsfaktor und Scheitelabfluss bei Rees von der Linearität.

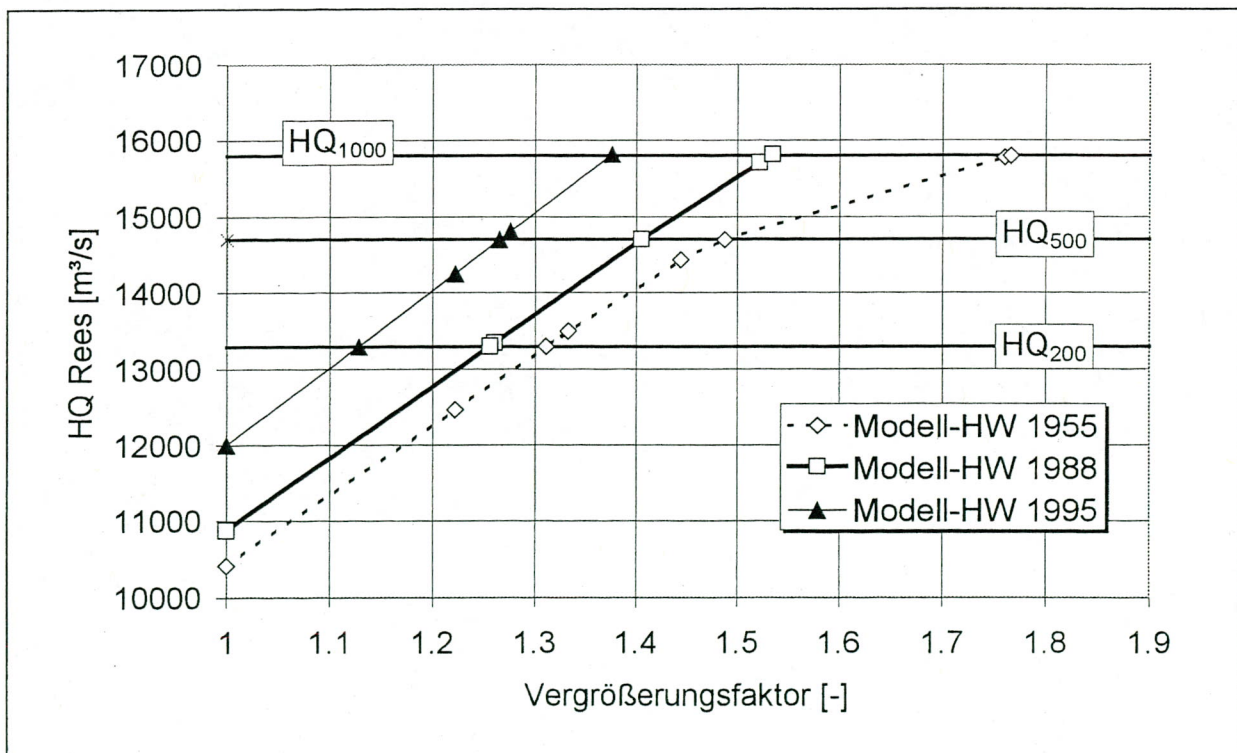


Abb. 5.2: Abhängigkeit der Scheitelabflüsse in Rees von den gewählten Faktoren zur Vergrößerung der Zuflussganglinien.

5.2 Einfluss des Oberrheinausbaus und der Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf die Scheitelabflüsse hoher Wiederholungszeitspannen

Zur Untersuchung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein werden mit Hilfe der Modellhochwasser Simulationen für den *Zustand 1955*, *Zustand 1977*, *Zustand heute* und *Zustand geplant* durchgeführt. Zunächst wird angenommen, dass es an keiner Stelle entlang des Rheins zu Deichüberflutungen kommt. In einer weiteren Serie von Berechnungen werden Szenarien angenommen, bei denen es zwischen Iffezheim und Neckarmündung bei Abflüssen über 5400 m³/s am Pegel Maxau und zwischen Neckar- und Mainmündung bei 6300 m³/s am Pegel Worms zu Deichüberflutungen kommt. Dabei wird die Ganglinie beim Überschreiten dieser Werte gekappt.

Tabelle 5.1 zeigt die für den Pegel Rees für die verschiedenen zustände berechneten Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren ohne Deichüberflutung. Demnach wirken sich auch bei extremen Hochwassern die Ausbaumaßnahmen (Differenz Zustand 1977-1955) verschärfend auf die Scheitelwerte aus. Ebenso ist die Hochwasserscheitel dämpfende Wirkung der heute schon realisierten Retentionsmaßnahmen (Differenz Zustand heute – 1977) und die der geplanten Retentionsmaßnahmen (Differenz Zustand geplant – 1977) bei den hier simulierten extremen Hochwassersituationen zu beobachten. Die Effekte auf die Modellhochwasser 1955 und 1988 sind deutlich größer als die auf das Modellhochwasser 1995. Die Erklärung hierfür liegt im Unterschied der Hochwassergenese dieser drei Hochwasser: Sowohl 1955 als auch 1988 waren die Zuflüsse des Oberrheins (einschließlich des Rheins bei Basel) maßgeblich beteiligt, während das Hochwasser 1995 vor allem im nördliche Rheingebiet hervorgerufen wurde.

Die unterschiedliche Genese der Hochwasser werden auch bei der Betrachtung des jeweils in Anspruch genommenen Retentionsraums am Oberrhein deutlich (Tabelle 5.2). Während bei dem Modellhochwasser 1955 die Retentionsräume am Oberrhein (bis Worms) mit einem Gesamtvolumen von rd. 120 Mio. m³ bzw. 260 Mio. m³ vollständig und bei dem Modellhochwasser 1988 weitestgehend ausgeschöpft werden, kommt bei dem Modellhochwasser 1995 der größte Teil der Rückhaltevolumina nicht zum Einsatz.

Tab. 5.1: Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten 200, 500 und 1000 Jahre am Pegel Rees; Varianten ohne Deichüberflutung am Oberrhein.

Modellhochwasser 1955									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees				Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees					
Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten ohne Deichüberflutung					
Modell- HW 1955	Zustand				Modell- HW 1955	Differenzen Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant -1955
HQ200	12538	13300	12888	12368	HQ200	762	-412	-932	-170
HQ500	13888	14698	14422	13858	HQ500	810	-275	-839	-29
HQ1000	14953	15791	15557	14993	HQ1000	839	-234	-799	40
Modellhochwasser 1988									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees				Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees					
Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten ohne Deichüberflutung					
Modell- HW 1988	Zustand				Modell- HW 1988	Differenzen Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant -1955
HQ200	12674	13301	12948	12679	HQ200	627	-353	-621	6
HQ500	13935	14701	14348	14298	HQ500	766	-353	-402	363
HQ1000	14977	15811	15501	15005	HQ1000	834	-311	-807	27
Modellhochwasser 1995									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees				Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees					
Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten ohne Deichüberflutung					
Modell- HW 1995	Zustand				Modell- HW 1995	Differenzen Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant -1955
HQ200	13173	13297	13292	13272	HQ200	124	-5	-25	100
HQ500	14421	14697	14611	14593	HQ500	276	-87	-104	171
HQ1000	15527	15812	15821	15795	HQ1000	285	9	-17	268

Tab. 5.2: Die während der Modellhochwasserereignisse in Anspruch genommenen Retentionsvolumina am Oberrhein [Angaben in Mio. m³].

	Modell-HW 1955		Modell-HW 1988		Modell-HW 1995	
	Zustand		Zustand		Zustand	
	heute	geplant	heute	geplant	heute	geplant
HQ200	117,61	236,98	95,74	141,88	17,22	31,87
HQ500	119,42	256,54	113,83	207,20	30,14	54,93
HQ1000	120,75	259,68	97,22	226,95	27,82	72,73

Deichüberflutungen führen zu einer weiteren Reduzierung der Hochwasserscheitel. Dies zeigen die Differenzen zwischen den Hochwasserscheiteln der Simulationen mit und ohne Deichüberflutung. (Tabelle 5.3). Besonders deutlich wird dies bei den Rechnungen mit den Modellhochwassern 1955. In allen 12 Fällen kommt es zu Deichüberflutungen mit zum Teil erheblichen Auswirkungen auf den Abflussscheitelwert bei Rees. Auch bei den Modellhochwassern 1988 führen in einigen Fällen Deichüberflutungen zu einer Reduktion der Scheitelwerte. In anderen Fällen bleibt der Abfluss bei Maxau und Worms jedoch unterhalb der Abflusskapazität zwischen den deichen, so dass es zu keiner weiteren Scheitelabflachung kommt. Bei allen Berechnungen mit den Modellhochwassern 1995 wird keine Deichüberflutung beobachtet, was wiederum auf die Genese zurückzuführen ist.

Tab. 5.3: Deichüberflutungen am Oberrhein und deren Auswirkungen auf die Hochwasserscheitel am Pegel Rees (Differenz mit – ohne Deichüberflutung); Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees.

Überflutete Deiche am Oberrhein (M= bei Maxau; W=bei Worms)					Auswirkung der Deichüberflutung auf die Hochwasserscheitel [m ³ /s] am Pegel Rees Differenz mit – ohne Deichüberflutung				
Modellhochwasser 1955									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ200	W	M/W	M/W	M/W	HQ200	-305	-642	-404	-176
HQ500	M/W	M/W	M/W	M/W	HQ500	-896	-1359	-1192	-826
HQ1000	M/W	M/W	M/W	M/W	HQ1000	-1390	-1998	-1825	-1392
Modellhochwasser 1988									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ200	nein	W	nein	nein	HQ200	0	-44	0	0
HQ500	nein	M/W	W	W	HQ500	0	-512	-215	-302
HQ1000	W	M/W	M/W	W	HQ1000	-133	-920	-634	-222
Modellhochwasser 1995									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ200	nein	nein	nein	nein	HQ200	0	0	0	0
HQ500	nein	nein	nein	nein	HQ500	0	0	0	0
HQ1000	nein	nein	nein	nein	HQ1000	0	0	0	0

Ähnliche Ergebnisse wurden für den Pegel Köln erzielt. Sie sind in der Anlage 8.2 zusammengefasst. Hierbei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die in Anlage 8.2 dargestellten Ergebnisse mit den Modellhochwassern erzielt wurden, deren Jährlichkeiten sich auf den Pegel Rees beziehen. Eine Vergleichbarkeit mit den Abflussscheitelwerten entsprechender Jährlichkeiten bei Köln gibt es nicht.

In Tabelle 5.4 werden die Ergebnisse der Modellhochwasserberechnungen (gerundete Werte) den entsprechenden aus der Hochwasserstatistik entnommenen (gerundeten) Werten gegenübergestellt. Abweichungen der mit Hilfe der Modellhochwasser berechneten Scheitelabflüsse von den statistisch ermittelten Werten um bis zu 2000 m³/s nach unten treten vor allem bei den Varianten „mit Deichüberflutungen“ auf. Abweichungen nach oben sind eher selten und erreichen Werte bis zu 200 m³/s.

Tab. 5.4: Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten 200, 500 und 1000 Jahre am Pegel Rees im Vergleich zu den entsprechenden statistisch ermittelten Scheitelabflüssen.

HQ ₂₀₀ [m ³ /s]	Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
	Zustand				Zustand			
	1955	1977	heute	geplant	1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	12500	13300	12900	12400	12200	12700	12500	12200
Mod-HQ 1988	12700	13300	12900	12700	12700	13300	12900	12700
Mod-HQ 1995	13200	13300	13300	13300	13200	13300	13300	13300
HQ₂₀₀ aus Statistik	13100	13300	13200	13100	13100	13300	13200	13100
HQ ₅₀₀ [m ³ /s]	Zustand				Zustand			
	1955	1977	heute	geplant	1955	1977	heute	geplant
	Mod-HQ 1955	13900	14700	14400	13900	13000	13300	13200
Mod-HQ 1988	13900	14700	14300	14300	14000	14200	14100	14000
Mod-HQ 1995	14400	14700	14600	14600	14400	14700	14600	14600
HQ₅₀₀ aus Statistik	14500	14700	14600	14500	14500	14700	14600	14500
HQ ₁₀₀₀ [m ³ /s]	Zustand				Zustand			
	1955	1977	heute	Geplant	1955	1977	heute	geplant
	Mod-HQ 1955	15000	15800	15600	15000	13600	13800	13700
Mod-HQ 1988	15000	15800	15500	15000	14800	14900	14900	14800
Mod-HQ 1995	15500	15800	15800	15800	15500	15800	15800	15800
HQ₁₀₀₀ aus Statistik	15600	15800	15700	15600	15600	15800	15700	15600
HQ	kleinster Wert der Modellhochwasserberechnungen je Zustand und Modellhochwasser							
HQ	größter Wert der Modellhochwasserberechnungen je Zustand und Modellhochwasser							
HQ	Wert aus der Statistik							
HQ	größter Wert in der Jährlichkeits-Matrix							

In allen in Tabelle 5.4 dargestellten Fällen ist der aus der Hochwasserstatistik entnommene Scheitelwert für den Zustand 1977 der höchste Wert. Je nach Hochwassergenese kann er jedoch auch bei den Modellhochwasserberechnungen erreicht werden, nämlich dann, wenn wie beim Hochwasser 1995 der Einfluss der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein gering ist.

Auch die in Tabelle 5.4 zusammengestellten Werte zeigen dass die im Einzelfall zu erwartende Restverschärfung größer ist, als die, die aus der statistischen Analyse folgt, da die Statistik und das angewandte Verfahren zur Homogenisierung der Datenreihen die Hochwassergenese unberücksichtigt lassen.

Zusammenfassend ergibt sich:

- Sowohl die geplanten als auch die bereits durchführbaren Retentionsmaßnahmen haben bei extremen Hochwassern Einfluss auf die Hochwasserscheitel.
- Der Einfluss ist abhängig von der Hochwassergenese: Deutlich entschärfend wirken die Maßnahmen, deren Entstehung im Oberrheingebiet liegt. Weniger deutlich bis vernachlässigbar sind die Effekte bei Hochwassern die im wesentlichen aus dem nördlichen und mittleren Einzugsgebiet kommen.
- In allen Fällen bleibt auch bei Einsatz aller Maßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem *Zustand 1955*.
- Diese Restverschärfung ist größer als die, die aus der statistischen Analyse folgt. Dies gilt vor allem für die im nördlichen und mittleren Einzugsgebiet des Rheins entstehenden Hochwasser. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass bei der statistischen Analyse die Genese nicht berücksichtigt wird und damit auch nicht die spezifische Effektivität der Maßnahmen bei extremen Abflüssen.
- Besonders „effektiv“ bezüglich einer Reduzierung von Hochwasserscheiteln wirken sich Deichüberflutungen aus.

6 Zusammenfassung

Seit Jahrhunderten hat der Mensch an der Flusslandschaft des Rheins Veränderungen vorgenommen, die sich auf das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen auswirken. Vor allem aus dem Bau von Staustufen am Oberrhein in den Jahren 1955 bis 1977 sowie den Retentionsmaßnahmen, die in den letzten Jahren bei Hochwasser ergriffen werden, ergibt sich eine große Wirkung auf den Wellenablauf und die Höhe von Abflussscheitelwerten von Hochwassern.

Die numerische Simulation des Ablaufs von 35 historischen Hochwasserereignissen in vier verschiedenen Szenarien von Ausbauzuständen unter Berücksichtigung von Retentionsmaßnahmen im Flusslauf des Rheins zeigen für die Pegel Köln, Rees und Lobith:

- Dass der Ausbau des Oberrheins durch Staustufen (*Zustand 1977*) gegenüber der Situation vor Ausbau (*Zustand 1955*) zu einer Verschärfung der Hochwassersituation am Niederrhein geführt hat,
- Dass durch die bei Hochwasser heute schon getroffenen Retentionsmaßnahmen am Oberrhein eine Reduzierung der Hochwasserscheitel erfolgt
- dass die geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein zu einer weiteren Abflussschwächung führen werden, und
- Dass auch bei Einsatz aller z.T. erst geplanten Maßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor Oberrheinausbau bestehen bleibt.

Die Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf Abflussscheitelwerte am Niederrhein ist abhängig von der Genese des jeweiligen Hochwassers: Am größten sind die Auswirkungen auf Hochwasser, die am Oberrhein entstehen, am geringsten sind sie auf Hochwasser, die sich an Mittel- und Niederrhein aufbauen.

Auch die Ergebnisse der Hochwasserstatistik, bei der für die Pegel Köln und Rees die Scheitelabflüsse unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Datenreihen ermittelt wurden, zeigen die oben beschriebenen Effekte (Verschärfung der Hochwassersituation nach Ausbau des Oberrheins, Reduktion der Scheitelwerte durch die heute durchgeführten Retentionsmaßnahmen, weitere Reduktion durch die geplanten Retentionsmaßnahmen und verbleibende Restverschärfung gegenüber der Situation vor Ausbau des Oberrheins). Hierbei konnten die Hochwassergenese jedoch nicht berücksichtigt werden. Deshalb und weil die Bestimmung von Hochwassern mit Jährlichkeiten von 200 Jahren und mehr eine Extrapolation darstellt, wurden Berechnungen mit Modellhochwassern durchgeführt. Deren Genese entspricht der Entstehung der Hochwasser Januar 1955, März 1988 und Januar 1995 und ihre Scheitel erreichten am Pegel Rees die Abflusswerte der Jährlichkeiten 200, 500 und 1000 Jahre. Dabei wird erkennbar, dass

- auch bei extrem hohen Hochwassern deutliche Wirkungen von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen zu erwarten sind,
- diese Wirkungen stark von der Hochwassergenese abhängen,
- in allen Fällen auch bei Einsatz aller Maßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem *Zustand 1955* bleibt, und dass
- diese Restverschärfung größer ist als die, die aus der statistischen Analyse folgt.

Literatur

BARNEVELD, H. J. UND MEIJER, D. G. (1997): SOBEK-Model Andernach-Lobith, Model construction, calibration and verification, Final report of a cooperative project RIZA-BfG; 46S., Anlagen.

BERG, G.; PLONKA, B.; MEUSER, A. UND WORRESCHK, B. (1990): Das Synoptische Hochwasserablaufmodell Rheinabschnitt Basel-Maxau, Ausbauzustand 1955. Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz; 9 S., Anlagen.

BUSCH, N. UND ENGEL, H. (1985a): Untersuchung der Auswirkungen des Oberrheinausbaus auf die Abflussverhältnisse am Niederrhein, Bericht No. 1 Zusammenstellung und Diskussion des Kollektivs der den Untersuchungen zugrundegelegten historischen Hochwasser. 16 S..

BUSCH, N. UND ENGEL, H. (1985b): Untersuchung der Auswirkungen des Oberrheinausbaus auf die Abflussverhältnisse am Niederrhein, Bericht No. 2 Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse; BfG-Bericht-0288, 22 S.; Anlagen.

BUSCH, N. UND ENGEL, H. (1987): Auswirkungen des Oberrheinausbaus auf die Abflussverhältnisse am Niederrhein unter Berücksichtigung der Rückhaltemaßnahmen bis Worms, BfG-Bericht-0391, 15 S.; Anlagen.

BUSCH, N., MEUSER, A., PLONKA, B. UND WORRESCHK, B. (1993): Das Synoptische Hochwasserablaufmodell Rheinabschnitt Worms-Köln. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz. 74 S.; Anhang.

DELFT HYDRAULICS AND THE MINISTRY OF TRANSPORT, PULPIC WORKS AND WATER MANAGEMENT (1997): SOBEK, Technical Reference Manual.

DEUTSCHE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1997): Hochwasserschutz im deutschen Rheingebiet – eine Bestandsaufnahme – 57 S.; Anlagen.

DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1989): Wahl des Bemessungshochwassers, Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 209; 71 S..

HASELEN, C. VAN (1999): Polder langs de Niederrhein, Effecten op waterstand en afvoer van retentie- en bergingsgebieden „Een minimum-variant“, RIZA-Werkdokument 99.127x.

HOMAGK, P. (1985): Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein mit Hilfe von mathematischen Modellen. In: 1. Wissenschaftliche Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft, Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Maßnahmen“, 18. – 20. März 1985. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) Universität Karlsruhe. S. H6-1 – H6-10.

HOCHWASSERSTUDIENKOMMISSION FÜR DEN RHEIN (1978): Ergebnisse der Untersuchungen über die Hochwasser und ihre Entwicklung von Beginn der Aufzeichnungen an, die Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser, den derzeitigen Stand des Hochwasserschutzes sowie Empfehlungen für Maßnahmen gegen die vergrößerte Hochwassergefahr (Teil 1: Text; Teil 2: Anlagen; Teil 3: Berichte der Delegationen; Teil 4: Dokumentation von Pegelunterlagen und sonstige Daten).

HOCHWASSERSTUDIENGRUPPE FÜR DIE RHEINSTRECKE KAUB-ROLANDSWERTH (1993): Der Einfluss des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln; Bericht: Auswirkung der Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein nach dem deutsch-französischen Vertrag von 1982. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Ministerium für Umwelt, Rheinland-Pfalz. 74 S.; Anlagen.

HOCHWASSERSTUDIENGRUPPE FÜR DIE RHEINSTRECKE WORMS-KAUB (1985): Entwicklung des Hochwasserschutzes am Rhein zwischen Worms und Kaub; 74 S. (unveröffentlicht).

HOCHWASSERSTUDIENGRUPPE FÜR DEN RHEIN IN NORDRHEIN-WESTFALEN (1996): Bericht Der Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen, Herausgeber: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, August 1996; unveröffentlichter Bericht als Arbeitspapier an das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen.

INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1997): Hochwasserschutz am Rhein – Bestandsaufnahme -; 62 S..

PARMET, B.; LANGEMHEEN, H. VAN DE; CHBAB, H.; KWADIJK, J.; DIERMANSE, F. UND KLOPSTRA, D. (1999): De maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith, Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001, RIZA Rapport 99.xx, concept.

Anlage 1

Ausbau- und Retentionsmaßnahmen am Rhein

Anlage 1.1: Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein (nach: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, 1997).

Stand Sept. 1996

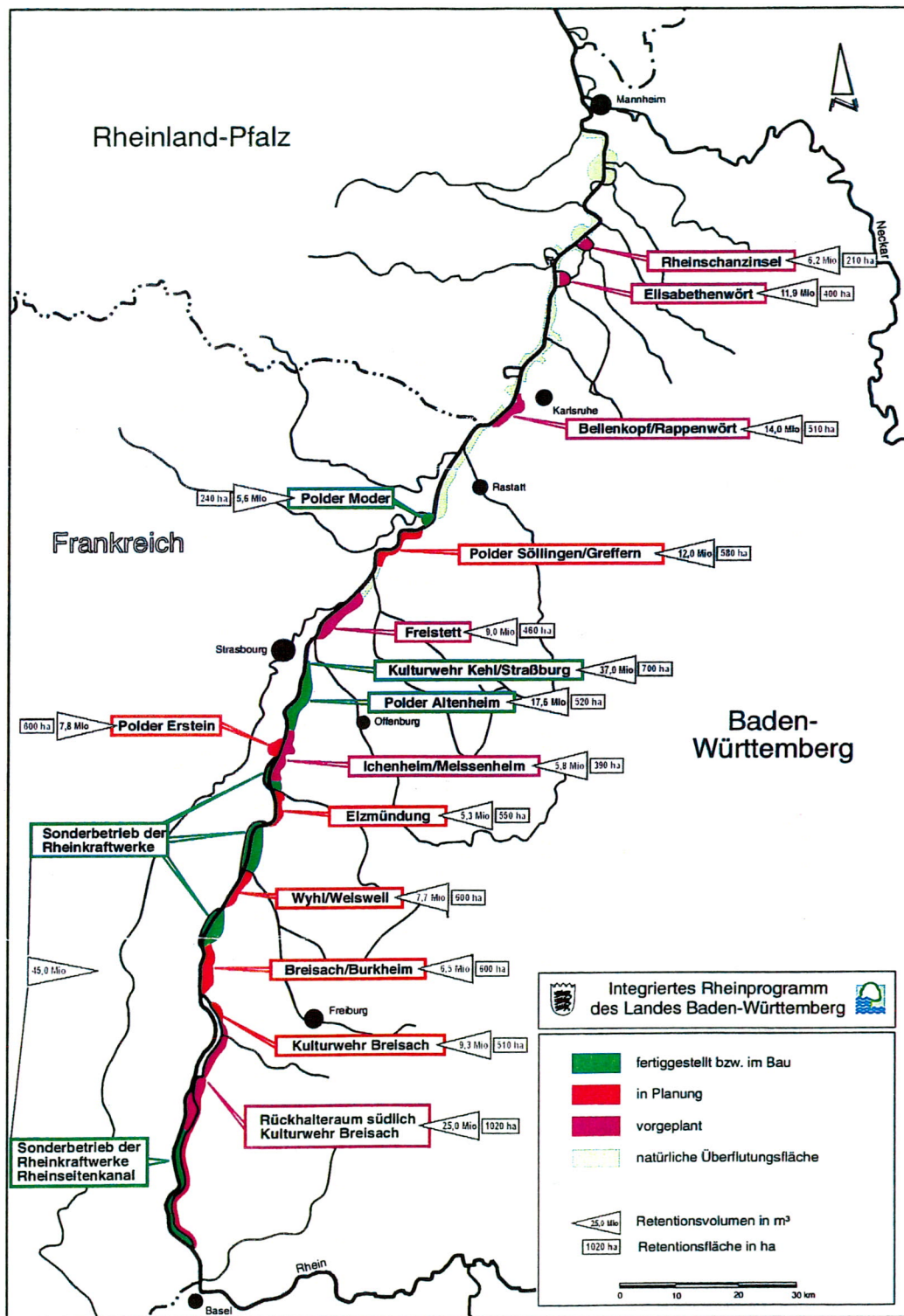
Rückhalteraum	Art der Rückhaltung ²⁾	Geplante Maßnahmen	
		Nach Konzept von 1982 [Mio. m ³]	Nach derzeitigem Konzept [Mio. m ³]
Frankreich:			
→ Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke ¹⁾	Betriebsregelment	45	45 ✓
Erstein	Polder	6	7,8 (L)
→ Moder	Polder	5	5,6 ✓
Zwischensumme Frankreich		56	58,4
Baden-Württemberg:			
Südlich KW Breisach	Wehr od. Vorlandtieferlegung	53	25,0
Kulturwehr Breisach ¹⁾	Wehr	10	9,3
Breisach/Burkheim	Polder	-	6,5
Wyhl/Weisweil	Polder	-	7,7
Elzmündung	Polder	-	5,3
Ichenheim/Meißenheim	Polder	-	5,8
→ Altenheim	Polder	18	17,6 ✓
→ Kulturwehr Kehl/Straßburg ¹⁾	Wehr	37	37,0 12 ✓
Freistett	Polder	-	9,0
Söllingen/Greffern	Polder	8	12,0
Bellenkopf/Rappenwört	Polder od. Deichrückverlegung	-	14,0
Elisabethenwört	Poder od. Deichrückverlegung	-	11,9
Rheinschanzinsel	Polder	-	6,2
Zwischensumme Baden-Württemberg		126	167,3
Rheinland-Pfalz:			
nicht standortmäßig festgelegt		30 + 14	
→ Daxlander Au	Polder		5,1 ✓
Wörth/Jockgrim	Deichrückverlegung		8,8
Neupotz	Polder		8,6
Mechtersheim	Poder		7,4
Flotzgrün	Polder		5,0 ✓
Kollerinsel	Polder		6,1 ✓
Waldsee/Altrip/Neuhofen	Polder		8,1
Petersau/Bannen	Deichrückverlegung		1,4
Mittelbusch (Worms II)	Deichrückverlegung		2,3
Bodenheim/Laubenheim	Poder		6,0
Ingelheim	Polder		3,8
Zwischensumme Rheinland-Pfalz		44	62,6
Gesamtsumme		226	rd. 288

→ bereits fertiggestellte und einsatzbereite Rückhaltungen, davon am Kulturwehr Kehl/Straßburg z.Zt. nur rd. 12 Mio. m³ (nur in Ausnahmefällen können bei katastrophalen Hochwassern 37 Mio m³ genutzt werden)

- 1) Angegeben sind Maximalwerte, das tatsächlich genutzte Volumen ist abhängig vom Durchfluss im Rhein
- 2) Die Wirksamkeit aller Maßnahmen am freifließenden Rhein unterhalb von Iffezheim ist abhängig vom Durchfluss im Rhein

+ Worms - Burgerweide 3,4

Anlage 1.2: Rückhaltemaßnahmen und deren Standorte am Rhein in Baden-Württemberg, Frankreich und Rheinland-Pfalz bis Worms (aus: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, 1997).



© Oberrheinagentur Lahr, Stand 09/96

Anlage 1.3: Rückhaltemaßnahmen und deren Standorte in der pfälzischen Rheinniederung
 (aus: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, 1997).

