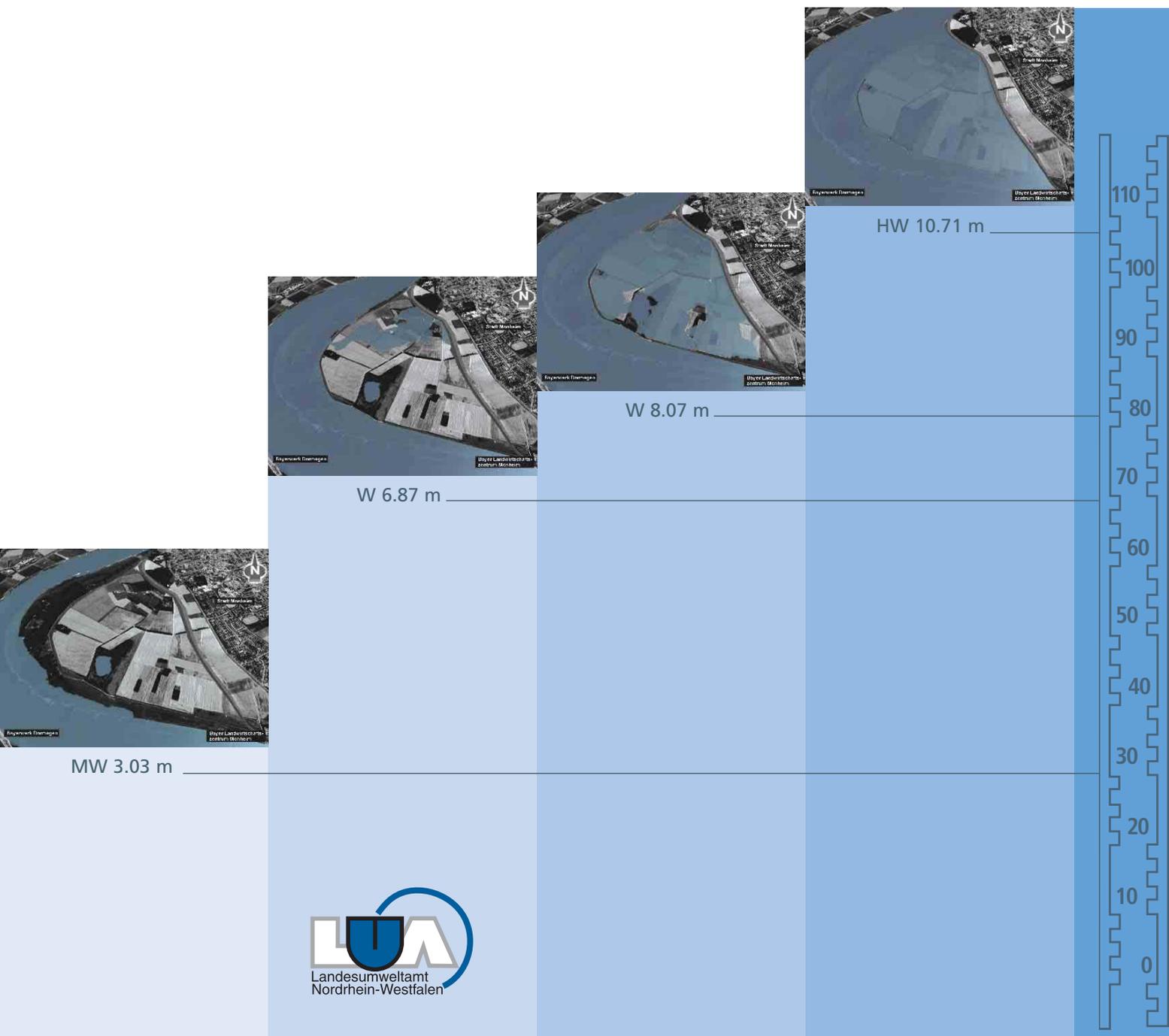


Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit HQ_T an den Pegeln des Rheins

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen 2002

Pegel Köln



KORREKTUREN
auf der CD gegenüber dem gedruckten Bericht

Seite	Erläuterungen alt	Korrekturen neu
S. 8 Tabellenverzeichnis	Tabelle 5.5.5.4	Tabelle 5.5.4
S. 12 rechte Spalte, 2. Absatz	(Tabelle 5.5.5.4).	(Tabelle 5.1.3.1).
S. 14 Marginalspalte	Tabelle 5.5.5.4:	Tabelle 5.5.4:
	¹⁾ Für gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte.	entfällt
	²⁾ Nur Jahresreihe 1946 bis 1995; Text von 1946 keine gesicherten Werte.	entfällt
S. 14 Tabelle, mittlere Spalte	jede 500	jede 500
S. 14 Tabelle, rechte Spalte	14.000	14.000
	14.200	14.200
	14.200	14.200
	14.800	14.800
	14.800	14.800
	14.700	14.700
	14.500	14.500
	13.400 ^{1) 2)}	13.400
13.300 ^{1) 2)}	13.300	
S. 40 Bild	Pfeil Ruhr	entfällt
	Pfeil Rhein	Pfeil Ruhr Pfeil Rhein
S. 41 linke Spalte, 1. Absatz		von 907 m ³ /s
S. 43 linke Spalte, 2. Absatz	die Hochwasserrückhaltemöglichkeiten für die Alme und damit für die Obere Lippe bieten.	entfällt
		Im Einzugsgebiet der Oberen Lippe befinden sich 12 Hochwasserrückhaltebecken mit einem Stauraum von 17,59 Mio m ³ .
S. 51 Tabelle, linke Spalte	Wesel Emmerich	Wesel ²⁾ Emmerich ²⁾
S. 51 Tabelle, rechte Spalte	14.000	14.000 ¹⁾
	14.200	14.200 ¹⁾
	14.200	14.200 ¹⁾
	14.900	14.900 ¹⁾
	14.900	14.900 ¹⁾
	14.800	14.800 ¹⁾
	14.600	14.600 ¹⁾
	13.400 ^{1) 2)}	13.400 ¹⁾
13.300 ^{1) 2)}	13.300 ¹⁾	

Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit HQ_T an den Pegeln des Rheins

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen 2002

Impressum

Der vorliegende Bericht wurde mit finanzieller Unterstützung des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen erstellt.

Herausgeber: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6, 45133 Essen
Telefon: (02 01) 79 95 - 0
e-mail: poststelle@lua.nrw.de

Redaktion: Gabriele Schmidt
Eberhard Winkhaus
Erarbeitet wurde dieser Bericht von Mitgliedern aus der Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen:
Bezirksregierung Düsseldorf
Bezirksregierung Köln
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
Landesumweltamt NRW (Obmannschaft)
Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland
Rijkswaterstaat RIZA
Staatliches Umweltamt Köln
Staatliches Umweltamt Krefeld
Wasser- und Schifffahrtsdirektion West

Bildnachweis: Titelbild: Deichrückverlegung, Monheim,
Bayer AG Leverkusen,
1 L. Bornefeld StUA Krefeld,
2, 3, 4, E. Städtler StUA Köln,
5, 6, 7, 8 Bundesanstalt für Gewässerkunde

ISSN: 1610 - 9619

Gestaltung: Yvonne Schmitz, sid GmbH

Informationsdienste: Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:
Internet unter <http://www.lua.nrw.de>

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 71 44 88

Vertrieb: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Postfach 102 363, 45023 Essen

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	12
1	Veranlassung	16
2	Hydrologie des Rheineinzugsgebietes	18
3	Untersuchungsgebiet	22
4	Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen	24
4.1	Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen im Rheineinzugsgebiet bis Andernach	24
4.1.1	Ausbaumaßnahmen	24
4.1.2	Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen	26
4.2	Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen am Rhein in NRW	29
4.2.1	Ausbaumaßnahmen	29
4.2.2	Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen	30
4.3	Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen an ausgewählten Nebengewässern des Rheins in NRW	35
	Sieg	35
	Wupper	38
	Ruhr	40
	Lippe	42
5	Überprüfung der Hochwasserbemessungsgrundlagen für den Rhein in NRW	44
5.1	Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen (HQ) bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (T) aus historischen Hochwasserscheitelwerten	45
5.1.1	Verfahrensweise	46
5.1.2	Berechnete Hochwasserscheitelabflüsse ausgewählter Eintrittswahrscheinlichkeiten	47
5.1.3	Vorschlag für HQ_T -Werte als Grundlage für die Festlegung eines Bemessungshochwassers	50
5.2	Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen auf historische Abflusswellen	52
5.2.1	Berechnung des Wellenablaufs ausgewählter Hochwasser mit mathematischen Modellierungen	52
5.2.1.1	Das hydrologische Modell SYNHP	52

5.2.1.2	Das hydraulische Modell SOBEK	53
5.2.1.3	Abflussganglinien ausgewählter Hochwasser	54
5.2.1.4	Berücksichtigte Ausbauzustände und Retentionsmaßnahmen	57
5.2.2	Simulationsergebnisse	59
5.3	Hochwasserscheitelabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Hochwasserscheitelwerten	63
5.3.1	Untersuchungsmethode	63
5.3.2	Ergebnisse für die Pegel Köln und Rees	66
5.4	Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltmaßnahmen auf Modellhochwasserwellen	67
5.4.1	Untersuchungsmethode	68
5.4.2	Ergebnis	70
5.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung aus Kapitel 5.1 bis 5.4 für die Bemessungsgrundlagen	73

6	Maßgebende Wasserspiegellinienhöhen	78
6.1	Verfahren zur Berechnung von Wasserspiegellagen	78
6.2	Verwendete Datengrundlage	80
6.3	Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnung für gleichwertige Abflusszustände des Rheins in NRW	83

7	Bemessungsdaten in den Niederlanden	88
7.1	Gesetzlicher Hintergrund	88
7.2	Heutiger Bemessungsabfluss am Pegel Lobith	89
7.3	Zukünftiger Bemessungsabfluss am Pegel Lobith (Vorschlag Rahmenbedingungenbuch 2001)	90

8	Ausblick	92
	Literatur	94
	Abkürzungsverzeichnis	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Einzugsgebiet des Rheins	19
Abbildung 2.2:	Vieljährige MHQ der Rheinpegel, Jahresreihe 1930 –1996	20
Abbildung 2.3:	Vieljährige MNQ, MQ, MHQ des Pegels Rees/Rhein	21
Abbildung 4.2.2.1:	Clever Deichreglement von 1767	30
Abbildung 4.2.2.2:	Rückhalteräume am Niederrhein	34
Abbildung 5.1.1:	Kriterien für hydrologisch unabhängige Hochwasserscheitelwerte	45
Abbildung 5.1.2.1:	Entwicklung der Abflüsse ausgewählter Jährlichkeiten entlang des Niederrheins zwischen Andernach und Emmerich	49
Abbildung 5.4.1.1:	Entwicklung von Modellhochwassern durch Erhöhung der Nebenflussganglinien ohne deren zeitliche Verschiebung	68
Abbildung 5.4.1.2:	Abhängigkeit der Scheitelabflüsse in Rees von den gewählten Faktoren zur Vergrößerung der Zuflussganglinien	69
Abbildung 6.1.1:	Eigenschaften des Modells KWERT der BfG	79
Abbildung 6.2.1:	Querprofil am Pegel Rees bei Rhein-km 837,4 (nach BfG)	81
Abbildung 6.2.2:	Verwendete Wasserspiegelfixierungen am Rhein	81
Abbildung 6.3.1:	Gemessene und berechnete Wasserspiegellagen im Bereich der Rheinstrecke zwischen Bonn und Köln	87
Abbildung 7.2.1:	Bemessungsabflusswelle Lobith, Stand 1992	90
Abbildung 7.3.1:	Bemessungsabflusswelle Lobith, Vorschlag Rahmenbedingungenbuch 2001	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.5.4:	Von der HSG NRW erarbeitete HQ _T für die Rheinpegel Bonn bis Emmerich	14
Tabelle 2.1:	Mittlere vieljährige Hochwasserabflüsse (MHQ) für Winter- und Sommerhalbjahre an den Pegeln des Rheins	18
Tabelle 4.1.1.1:	Abflussverschärfung am Oberrhein infolge des Staustufenbaus	25
Tabelle 4.1.2.1:	Rückhaltungen am Oberrhein (Stand 2000)	28
Tabelle 4.3.1:	Höchste Wasserstände und Abflüsse der Nebengewässer am Rhein in NRW	35
Tabelle 4.3.2:	Talsperren im Einzugsgebiet der Sieg	37
Tabelle 4.3.3:	Talsperren im Einzugsgebiet der Wupper	39
Tabelle 4.3.4:	Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr	41
Tabelle 5.1.2.1:	Abflüsse [m ³ /s] ausgewählter Jährlichkeiten [Jahre] für sieben Pegel am Rhein zwischen Moselmündung und deutsch-niederländischer Grenze, ermittelt aus den Zeitreihen 1901 bis 1995 bzw. 1946 bis 1995	48
Tabelle 5.1.2.2:	Gegenüberstellung von HQ _T und Kennwerten, ermittelt aus den beiden Teilreihen 1901 bis 1950 und 1946 bis 1995	50
Tabelle 5.1.3.1:	Von der HSG NRW erarbeitete HQ _T für die Rheinpegel Bonn bis Emmerich	51
Tabelle 5.2.1.3.1:	Auswahl historischer Hochwasser	56
Tabelle 5.2.1.4.1:	Bei der Modellierung betrachtete Zustände	57
Tabelle 5.2.1.4.2:	Die im Modell SOBEK berücksichtigten geplanten Retentionsmaßnahmen am Niederrhein	58
Tabelle 5.2.2.1:	Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Rees	60
Tabelle 5.2.2.2:	Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Köln	61
Tabelle 5.2.2.3:	Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Lobith	62
Tabelle 5.3.1.1:	Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Simulationsergebnissen der unterschiedlichen Zustände	63
Tabelle 5.3.1.2:	Homogenisierung auf den <i>Zustand 1977</i> (Vorgehen)	65

Tabelle 5.3.1.3:	Homogenisierung auf die <i>Zustände heute, geplant und 1955</i> (Vorgehen)	65
Tabelle 5.3.2.1:	Hochwasserscheitelabflüsse (berechnete Ergebnisse) unterschiedlicher <i>Jährlichkeiten</i> für die <i>Ausbauzustände 1955, 1977, heute und geplant</i> an den Pegeln <i>Klön</i> und <i>Rees</i>	66
Tabelle 5.3.2.2:	Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher <i>Jährlichkeiten</i> für die <i>Ausbauzustände 1977, heute und geplant</i> gegenüber <i>Zustand 1955 bzw. 1977</i> an den Pegeln <i>Klön</i> und <i>Rees</i>	67
Tabelle 5.4.2.1:	Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit <i>Jährlichkeiten</i> von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel <i>Rees</i> ; Varianten ohne Deichüberflutung am <i>Oberrhein</i>	71
Tabelle 5.4.2.2:	Die während der Modellhochwasserereignisse in Anspruch genommenen Retentionsvolumina am <i>Oberrhein</i> [Angaben in Mio. m ³]	71
Tabelle 5.4.2.3:	Deichüberflutungen am <i>Oberrhein</i> und deren Auswirkungen auf die Hochwasserscheitel am Pegel <i>Rees</i> (Differenz mit -ohne Deichüberflutung); Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit <i>Jährlichkeiten</i> von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel <i>Rees</i>	72
Tabelle 5.5.1:	Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher <i>Jährlichkeiten</i> für die <i>Ausbauzustände 1955, 1977, heute und geplant</i> an den Pegeln <i>Klön</i> und <i>Rees</i> (gerundete Werte)	74
Tabelle 5.5.2:	Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit <i>Jährlichkeiten</i> von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel <i>Rees</i> im Vergleich zu den entsprechenden statistisch ermittelten Scheitelabflüssen	75
Tabelle 5.5.3	HQ _T für die Rheinpegel <i>Klön</i> und <i>Rees</i>	76
Tabelle 5.5.4	HQ _T für die Rheinpegel <i>Bonn bis Emmerich</i> (Vorschlag der HSG NRW 1996 und Empfehlung 2000)	77
Tabelle 6.3.1:	Abflüsse als Grundlage für Wasserspiegellagenberechnungen am <i>Niederrhein</i>	85
Tabelle 6.3.2:	Wasserstandsdifferenzen zwischen Stromstrich und Ufer an den Pegeln <i>Düsseldorf</i> und <i>Ruhrort</i>	86
Tabelle 7.2.1:	Ergebnisse verschiedener theoretischer Verteilungen	88
Tabelle 7.3.1:	Ergebnisse verschiedener theoretischer Verteilungen	91

Vorwort

Die Hochwasserereignisse vom August 2002 an der Donau und Elbe haben uns allen deutlich vor Augen geführt, welche ungeheure Schäden von extremen Hochwässern ausgehen. Daher misst das Land Nordrhein-Westfalen dem vorsorgenden Hochwasserschutz eine große Bedeutung zu. So ist es erforderlich das Bemessungshochwasser, welches der Dimensionierung der Hochwasserschutzanlage zum Schutz von Menschen, Tieren und Sachgütern dient, insbesondere nach dem Ablauf von höheren Hochwasserereignissen auf seine Gültigkeit zu überprüfen. Die vorgelegte Untersuchung für den Rhein in Nordrhein-Westfalen enthält Abflüsse zu den Jährlichkeiten 100, 200 und 500 Jahren aufgrund von Berechnungen aus historischen Scheitelabflüssen.

Darüber hinaus werden Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit unter Berücksichtigung des Baus der Staustufen am Oberrhein zwischen 1955 und 1977 sowie der ausgleichenden Maßnahmen zur Wasserrückhaltung, die seit den 80er Jahren Zug um Zug realisiert werden, angegeben. Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Berechnungsschritte wird ein Vorschlag für Bemessungsabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für den Rhein in NRW unterbreitet. Allen Verantwortlichen muss aber angesichts der Hochwasserereignisse an der Elbe klar sein, dass die Festlegung von Bemessungsabflüssen nur den Hochwasserschutz für Abflüsse der gewählten Jährlichkeit bietet. Für darüber hinausgehende Ereignisse bleibt ein Restrisiko.



Mit dieser vorgelegten Untersuchung erfolgt keine Festlegung von Bemessungsabflüssen. Dies ist die Aufgabe der zuständigen Wasserbehörden. Die in dieser Untersuchung ermittelten Abflüsse sollen hierfür eine hydrologische Basis sein.

Der Bericht wurde von Fachleuten aus Rheinland-Pfalz, der Bundesanstalt für Gewässerkunde, den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen erarbeitet. Ich danke allen Personen und Institutionen, die tatkräftig zum Gelingen des Berichts beigetragen haben.

Harald Damer

Zusammenfassung

Die Festlegung eines Bemessungshochwassers für den nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt liegt schon Jahrzehnte zurück. Im Regierungsbezirk Köln galt der Wasserstand des Hochwassers 1926 zuzüglich 1,0 m als Orientierungsgröße; für den Regierungsbezirk Düsseldorf wurde ein auf Jährlichkeit begründetes Bemessungshochwasser festgelegt. Die inzwischen verlängerte Beobachtungsreihe mit einigen bedeutsamen Hochwassern, die Veränderungen im Flussbett und die Einflüsse der Flussbaumaßnahmen am Oberrhein erfordern eine Überprüfung des Bemessungshochwassers. Daher berief das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) – ehemals Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW – eine „Hochwasserstudien­gruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen“ (HSG NRW) und beauftragte diese, die aktuellen Abflüsse vorgegebener Jährlichkeiten an den Pegeln des Rheins in NRW zu ermitteln. Mit dem nachfolgenden Bericht werden die Ergebnisse vorgelegt.

Einführend wird zunächst ein Überblick über die Veranlassung (Kapitel 1) sowie die allgemeine Hydrologie des Rheineinzugsgebietes (Kapitel 2) und des Untersuchungsgebietes in NRW (Kapitel 3) gegeben.

Der Ausbau des Rheins wie auch die Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen haben Auswirkungen auf den Hochwasserablauf. Daher werden anschließend diese, beginnend am Oberrhein, beschrieben (Kapitel 4). Eine Übersicht über die wichtigsten Nebenflüsse des Rheins in NRW ergänzt die Beschreibung.

Die Überprüfung der Hochwasserbemessungsgrundlagen für den Rhein in NRW ist Kernpunkt von Kapitel 5.

In einem ersten Schritt werden nach Prüfung der Daten aus historischen Scheitelwerten und aufgrund wahrscheinlichkeitstheoretischer Berechnungen Abflüsse mit den Jährlichkeiten 100, 200 und 500 Jahre für die Rheinpegel von Bonn bis Emmerich ermittelt (Kapitel 5.1). Ein 200-jährlicher Hochwasserscheitelabfluss entspricht hier­nach beispielsweise am Pegel Bonn 12.600 m³/s und am Pegel Emmerich 13.100 m³/s (Tabelle 5.1.3.1).

Im zweiten Schritt erfolgt die Untersuchung der Auswirkungen des Rheinausbaus und der Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf im Rhein sowie auf die Hochwasserabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten. Hierzu wurden das hydrologische Modell SYNHP für den Rhein von Basel bis Andernach und das hydraulische Modell SOBEK für den Rhein von Andernach bis Lobith verwendet (Kapitel 5.2.1.1 und 5.2.1.2). Die für die Quantifizierung der Auswirkungen der Maßnahmen an Ober- und Niederrhein zusammengestellten Hochwasser umfassen ein Kollektiv von 35 historischen Ereignissen (Kapitel 5.2.1.3).

Zur Wirkungsabschätzung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen werden für den Rhein bis Andernach drei historische Bettzustände und ein geplanter Zustand im mathematischen Modell untersucht (Kapitel 5.2.1.4).

Für den Rheinabschnitt Andernach bis Lobith wird nur zwischen zwei Zuständen unterschieden. Bei dem zukünftigen Zustand wird gegenüber dem heutigen Zustand der Retentionsraum vergrößert. Insgesamt werden neun Rückhaltemaßnahmen mit einer Fläche von 1.778 ha berücksichtigt, zwei von ihnen als Polder (hier als „Taschenpolder“ bezeichnet) und die übrigen sieben Maßnahmen als Deichrückverlegungen (hier als „Flutpolder“ bezeichnet). Insgesamt werden die folgenden Zustände untersucht:

Zustand 1955: Zustand vor Ausbau des Oberrheins mit Staustufen.

Zustand 1977: Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen ohne Retentionsmaßnahmen.

Zustand heute: Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen und mit Teilmaßnahmen zur Retention am Oberrhein.

Zustand geplant: Zustand nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen und mit allen am Oberrhein hinsichtlich ihrer Wirkung vertraglich vereinbarten Retentionsmaßnahmen sowie geplanten Retentionsmaßnahmen am Rhein in NRW.

Als Ergebnis der Simulation liegt für jeden der drei Pegel Köln, Rees und Lobith eine Serie von 35 Hochwasserganglinien je Zustand vor. Es ergibt sich im Mittel für den Pegel Rees eine Abflussverschärfung um $243 \text{ m}^3/\text{s}$, die durch anthropogene Eingriffe hervorgerufen wird. Durch die Retentionsmaßnahmen am Oberrhein, wie sie heute schon eingesetzt werden und durch die geplanten Retentionsmaßnahmen an 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 jedoch auch bei Einsatz aller geplanten Maßnahmen eine mittlere Abflussverschärfung um $171 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Wirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen hängt jedoch wegen der ausgeprägten Regionalität der Hochwassergenese im Rheineinzugsgebiet stark vom Einzelereignis ab. Dabei ist der Einfluss der Retentionsmaßnahmen auf den Abflussscheitel unabhängig von dessen Größe (Kapitel 5.2.2).

Die der Hochwasserstatistik zugrunde gelegte Zeitreihe der historischen Scheitelabflüsse ist wegen der Veränderungen im Einzugsgebiet des Rheins inhomogen. Um den Einfluss der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf die Scheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten feststellen zu können, muss sie homogenisiert werden (Kapitel 5.3). Dies erfolgt mit Hilfe der Modelle SYNHP und SOBEK für jeden Pegel und die vier untersuchten Zustände für 35 Scheitelabflüsse. Zur Quantifizierung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen werden die Hochwasserscheitel der unterschiedlichen Zustände miteinander verglichen und mittels Korrelation zueinander in Bezug gesetzt. Mit Hilfe der so ermittelten Regressionsgleichungen werden schließlich für jeden Pegel das gesamte Kollektiv der Hochwasserextremwerte, die seit 1900 in die Hochwasserstatistik eingehen, in die unterschiedlichen Zustände umgerechnet, d. h. auf die entsprechenden Zustände homogenisiert. Jede dieser homogenisierten Datenreihen wird schließlich dem üblichen statistischen Verfahren zur Berechnung von Hochwasserscheitelabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeiten unterzogen.

Wie bei den Abflussscheiteln der modellierten Einzelereignisse zeigt sich auch bei den statistisch ermittelten Scheitelabflüssen, dass der Ausbau des Oberrheins durch Staustufen für alle Jährlichkeiten eine deutliche Verschärfung bewirkt. Ebenso führen die heute bereits durchgeführten und die weiteren vorgesehenen Retentionsmaßnahmen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel, es bleibt aber auch hier bei Einsatz aller Retentionsmaßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor dem Ausbau.

Aufgrund des Datenkollektivs aus 97 Jahren (1901 bis 1997) können Abflüsse bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren als abgesichert angesehen werden, während Abflüsse größerer Jährlichkeiten wegen der zu ihrer

Ermittlung notwendigen Extrapolationen zunehmend unsicherer sind. Wie das Gewässersystem des Rheins bei Abflüssen mit Jährlichkeiten von 200 bis 1000 Jahren reagiert und ob die Retentionsmaßnahmen dann die gleichen Wirkungen zeigen, wie sie die Hochwasserstatistik widerspiegelt, ist deshalb zunächst unklar. Die Entwicklung und Verwendung von Modellhochwassern mit Scheiteln extremer Jährlichkeit bietet die Möglichkeit, die Wirksamkeit der Retentionsmaßnahmen zu untersuchen (Kapitel 5.4.1). Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt, dass die geplanten wie auch die bereits einsatzfähigen Retentionsmaßnahmen auch bei sehr extremen Hochwassern Einfluss auf die Hochwasserscheitel haben. Der Einfluss ist allerdings abhängig von der Hochwasserentstehung. Deutlich abflussmindernd wirken die Maßnahmen auf Hochwasser, deren Entstehung im Oberrheingebiet liegt. In allen untersuchten Fällen bleibt aber auch im Fall der Modellhochwasser bei Einsatz aller Maßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem *Zustand von 1955* (Kapitel 5.4.2). Die vollständigen Ergebnisse sind im Bericht BfG 1221 enthalten.

Als Hochwasserscheitelabflüsse zu vorgegebenen Jährlichkeiten von 100, 200 und 500 Jahren empfiehlt die HSG NRW einvernehmlich die in der Tabelle genannten Werte (vgl. Kapitel 5.5). Sie entsprechen weitgehend denen, die 1996 von der HSG NRW aufgrund seinerzeit durchgeführten Untersuchungen vorgeschlagen wurden (vgl. Kapitel 5.1.3).

Tabelle 5.5.4:
Von der HSG NRW
erarbeitete HQ_T für die Rhein-
pegel Bonn bis Emmerich.

Pegel	Jährlichkeit [Jahre]	Durchfluss [m ³ /s]
Bonn	100	11.700
	200	12.600
	500	14.000
Köln	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200
Düsseldorf	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200
Ruhrort	100	12.400
	200	13.400
	500	14.800
Wesel	100	12.400
	200	13.400
	500	14.800
Rees	100	12.300
	200	13.300
	500	14.700
Emmerich	100	12.200
	200	13.100
	500	14.500

Der Empfehlung liegen im Wesentlichen die folgenden Überlegungen zugrunde (vgl. Kap. 5.5):

Die Statistik unter Verwendung der homogenisierten Daten ergibt für die beiden untersuchten Hauptpegel Köln und Rees für den heutigen Zustand etwa die 1996 vorgeschlagenen Werte, welche von den Mitgliedern der Hochwasserstudien-Gruppe NRW dem MUNLV NRW im August 1996 berichtet wurden. Für den geplanten Zustand sind sie etwas kleiner. – Die Berechnungen unter Verwendung von drei Modellhochwassern, die auf den Einzelereignissen 1955, 1988 und 1995 beruhen, bestätigen die statistisch ermittelten Tendenzen. Abweichungen zeigen die Ergebnisse für das ausgeprägt moselbezogene Modellereignis 1995, wenn es auf 200- bzw. 1000jährige Scheitel in Köln vergrößert wird. Auch wenn die meteorologische Sinnhaftigkeit einer derart mosellastigen Vergrößerung der Abflüsse derzeit nicht zu verifizieren ist, scheint es dennoch nicht sinnvoll, die aus den Berechnungen sich ergebenden niedrigsten Werte (gemäß „Zustand geplant“) für die nächsten Jahre als HQ_T festzuschreiben. Es wird vielmehr vorgeschlagen, auf der sicheren Seite zu verbleiben und das Kollektiv der 1996 vorgeschlagenen HQ_T weitgehend zu belassen, das rechnerisch den Werten des „Zustandes heute“ entspricht. Lediglich der Abfluss für HQ_{500} in Rees ist zu ermäßigen, da die HQ_{500} sich an diesem Pegel für alle Zustände der aktuellen Berechnungen geringer ergeben als 1996. Vorgeschlagen wird $HQ_{500} = 14.700 \text{ m}^3/\text{s}$ in Rees. Das entspricht einem Abflusssprung

von $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ von HQ_{200} auf HQ_{500} . Diese Differenz ist korrigierend auch für Ruhrort, Wesel und Emmerich anzusetzen.

Da in der Praxis die aufgrund der Abflüsse sich einstellenden Wasserstände von besonderer Bedeutung sind, wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit dem ein-dimensionalen stationären Modell KWERT die Wasserspiegellagen für verschiedene gleichwertige Abflüsse für die Rheinstrecke in NRW ermittelt (Kapitel 6). Die Berechnungen wurden für Abflüsse größer $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $14.600 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Andernach in Schritten von $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Die vollständigen Ergebnisse dieser Berechnung sind in dem BfG-Bericht 862 (BUSCH et al. 1994 und 1997) enthalten.

Im Kapitel 7 wird schließlich die Ermittlung von Bemessungsabflüssen in den Niederlanden beschrieben. Der heutige Bemessungsabfluss in Lobith beträgt $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Nach dem Hochwasser von 1995 wurde der Bemessungsabfluss überprüft und die Analyse hat zu einer Erhöhung in Lobith auf $16.070 \text{ m}^3/\text{s}$ geführt. Auch bei diesen Untersuchungen bilden Zeitreihen homogener Hochwasserscheitelwerte die Grundlage der Hochwasserstatistik, wobei die Homogenisierung nach dem gleichen Verfahren durchgeführt wurde, wie für den Rhein in NRW. Für eine Festlegung des Bemessungsabflusses in Lobith im neuen Rahmenbedingungenbuch 2001 sind jedoch die Ergebnisse weiterer Untersuchungen abzuwarten.

1

1 Veranlassung

Am gesamten Rhein in NRW ist der Hochwasserschutz eine Aufgabe von besonderer Bedeutung. Menschen mit ihren Siedlungen, Gewerbe- und Industrieanlagen sind durch Hochwasserschutzanlagen – überwiegend Deiche – vor Überflutung zu schützen. An die Sicherheit der Hochwasserschutzanlagen werden daher sehr hohe Anforderungen gestellt. Eingehende Untersuchungen am Rhein haben ergeben, dass viele alte Deiche keine ausreichende Sicherheit mehr bieten. Im Generalplan Hochwasserschutz am Rhein in den Regierungsbezirken Köln und Düsseldorf wird auf diese Problematik verwiesen. So müssen auch nach Untersuchungen des damaligen Staatlichen Amtes für Wasser- und Abfallwirtschaft (StAWA) Düsseldorf aus dem Jahr 1990 von den vorhandenen Deichen auf einer Gesamtlänge von 260 km fünfzig Prozent saniert werden. Bei der Überprüfung der Hochwasserschutzanlagen ist grundsätzlich auch über den maßgebenden Bemessungswasserstand zu entscheiden.

Früher wurden Hochwasserschutzanlagen am nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt nach der Wasserspiegellage des bis dahin höchsten bekannten Wasserstandes von 1926 zzgl. eines Freibordes von 1 m bemessen. Diese Methode des höchsten bekannten Wasserstandes war bis Anfang der 70er Jahre Regel der Technik zur Festlegung des Bemessungshochwassers. Danach wurde dazu übergegangen, die Wiederkehrhäufigkeiten hoher Scheitelabflüsse zu ermitteln und aus diesen die Wasserstände zu berech-

nen. Diese Art der Ermittlung führte 1977 zu einer neuen Festlegung der Bemessungsabflüsse und -wasserstände durch die Bezirksregierung Düsseldorf für die Rheinstrecke zwischen Leverkusen und der deutsch-niederländischen Grenze.

Bei der Festlegung des Bemessungsabflusses sind auch die anthropogenen Eingriffe, die sich auf das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen auswirken, zu berücksichtigen. Vor allem der Bau der Staustufen am Oberrhein in den Jahren 1955 bis 1977, die Eindeichungen, die Versiegelung der Landschaft und die ausgebauten Nebenflüsse sowie die ausgleichenden Retentionsmaßnahmen, die in den letzten Jahren ergriffen wurden, haben das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen verändert. Über diese Auswirkungen wurden verschiedene Untersuchungen u.a. von der Hochwasserstudienkommission für den Rhein (HSK, 1978) und der HSG für die Rheinstrecke Kaub bis Rolandswerth (1993) vorgenommen.

Neue bedeutende Hochwasser – die Hochwasser im April bzw. Mai/Juni 1983 und das Hochwasser 1988 – und die inzwischen verlängerte Zeitreihe relevanter Hochwasserscheitelwerte führten zu einer Überprüfung des 1977 festgelegten Bemessungshochwassers. Dies veranlasste 1990 das MUNLV NRW, die „Hochwasserstudienkommission für den Rhein in NRW“ zu beauftragen, die Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten HQ_T an den Pegeln des Rheins in NRW zu ermitteln. In dieser Untersuchung waren die Einflüsse

der Hochwasserverschärfung aus dem Rheineinzugsgebiet oberhalb des Pegels Andernach und die Wirkung der geplanten Rückhaltemaßnahmen auf den Hochwasserabfluss zu berücksichtigen. Die Arbeit der Studiengruppe war fast beendet, als das Hochwasserereignis 1993/1994 stattfand. Die dabei gemessenen, dem Hochwasser 1926 nahe kommenden Scheitelwerte sollten noch in die Berechnung einfließen.

Die Arbeiten hierfür waren fast beendet, als das nächste Hochwasserereignis 1995 auftrat –das ebenfalls dem Scheitelwert von 1926 nahe kam und berücksichtigt werden musste.

Mit diesem Bericht hat die HSG NRW die Grundlage geschaffen, die maßgebenden Bemessungsabflüsse für den Hochwasserschutz am gesamten Rhein in NRW festzulegen.

2

2 Hydrologie des Rheineinzugsgebietes

Der Rheinlauf wurde bereits 1820 in sechs Teilstrecken untergliedert: Alpenrhein, Hochrhein, Oberrhein, Mittelrhein, Niederrhein und Rheindelta (Abbildung 2.1).

Im Verlauf des Rheins verschiebt sich das Verhältnis der mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) für Winter- und Sommerhalbjahre deutlich (Tabelle 2.1). Am Hochrhein treten die größeren Hochwasserabflüsse im Sommer auf. Ebenso ist auch der südliche Oberrhein vom Sommerhochwasser bestimmt. Am nördlichen Oberrhein, zwischen

Worms und Mainz, beginnt sich das Verhältnis umzukehren. Am Niederrhein schließlich sind die Winterhochwasser maßgebend. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Sommerhochwasser am Oberrhein in der Regel am Niederrhein keine schädlichen Auswirkungen haben. Diese Verschiebung der Hochwasserhältnisse ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Für den Pegel Rees ist zusätzlich dargestellt, wie sich im mittleren Jahresgang die NQ- und MQ-Entwicklung gegenüber den MHQ darstellt (Abbildung 2.3).

Tabelle 2.1:
Mittlere vieljährige Hochwasserabflüsse (MHQ) für Winter- und Sommerhalbjahre an den Pegeln des Rheins

Pegel	Einzugsgebiet [km ²]	Wi MHQ [m ³ /s]	So MHQ [m ³ /s]	Wi MHQ : So MHQ
Rheinfelden	34.550	2.220	2.590	0,86 : 1,0
Maxau	50.196	2.650	2.690	1,0 : 1,0
Worms	68.827	3.060	2.720	1,1 : 1,0
Mainz	98.206	3.880	2.980	1,3 : 1,0
Köln	144.232	6.300	3.810	1,7 : 1,0
Rees	159.300	6.530	3.940	1,7 : 1,0



Abbildung 2.1:
Einzugsgebiet des Rheins

Legende

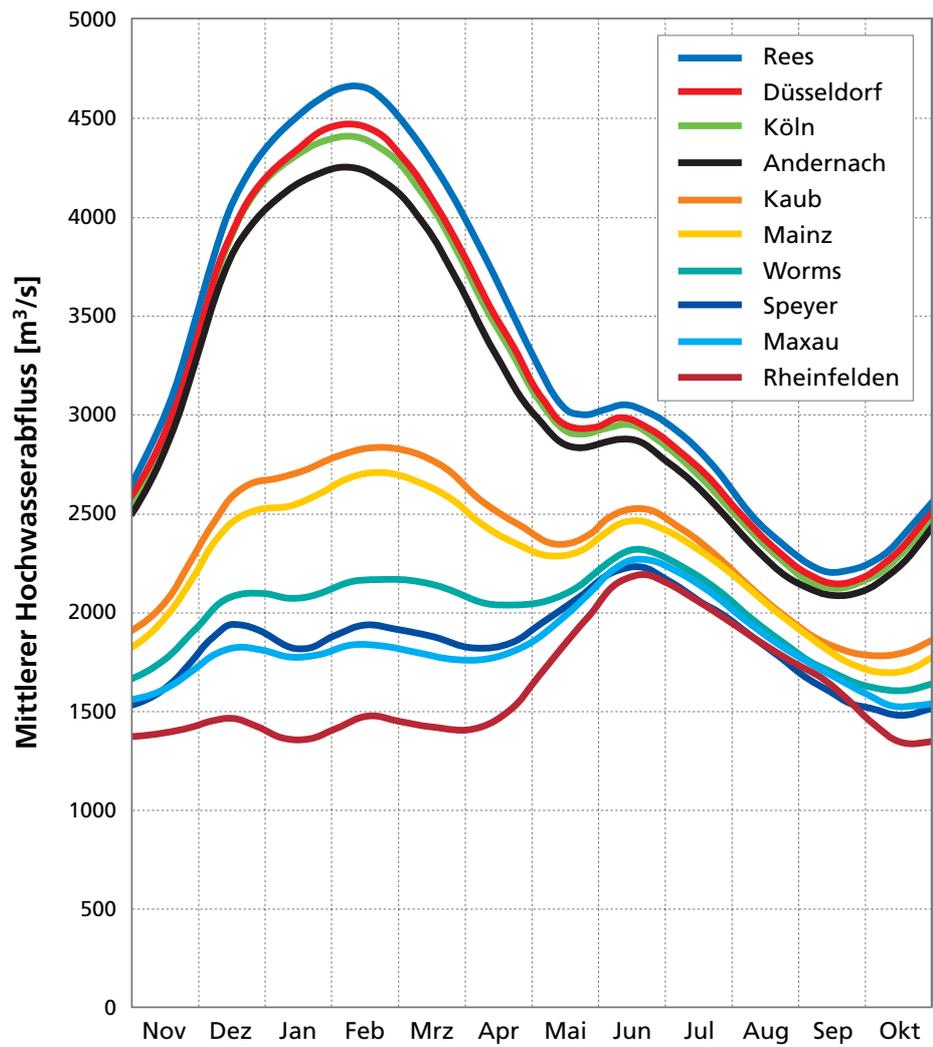
- █ Rheindelta
- █ Niederrhein
- █ Mittelrhein
- █ Oberrhein
- █ Hochrhein
- █ Alpenrhein

- - - Staatsgrenze/
Border
- ~ Gewässer/Waters

Maßstab/Scale
1 : 3.000.000
0 25 50 75km

2

Abbildung 2.2:
Vieljährige MHQ
der Rheinpegel,
Jahresreihe 1930 – 1996



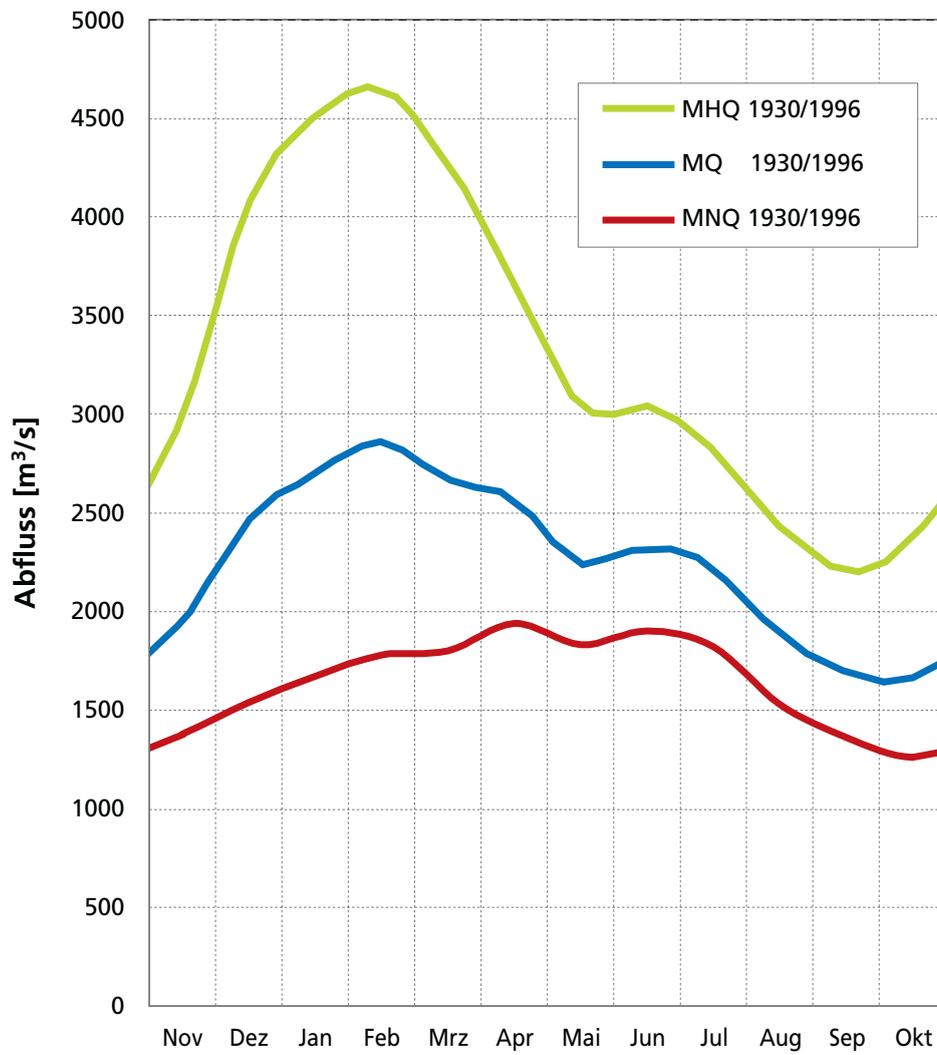


Abbildung 2.3:
 Vieljährige MNQ, MQ, MHQ
 des Pegels Rees/Rhein

3

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich auf den Niederrhein und ist fast identisch mit dem nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt mit einer Länge von 226 km. Hier verlässt der Rhein kurz vor Bonn das rheinische Schiefergebirge und tritt in eine im weiteren Verlauf immer weiter und flacher werdende Ebene ein, wo er als Flachlandstrom in breiten Mäandern fließt. Von dem ca. 185.000 km² großen Gesamteinzugsgebiet des Rheins entfallen auf NRW ohne die Ijsselmeerszuflüsse 22.795 km². Der wesentliche Teil des nordrhein-westfälischen Rheineinzugsgebiets liegt rechtsrheinisch und umfasst u.a. die Einzugsgebiete der Sieg ($A_{E0} = 2.861 \text{ km}^2$), der Wupper ($A_{E0} = 827 \text{ km}^2$), der Ruhr ($A_{E0} = 4.485 \text{ km}^2$) und der Lippe ($A_{E0} = 4.882 \text{ km}^2$). Größtes linksrheinisches Nebengewässer des Rheins in NRW ist die Erft mit einem Einzugsgebiet von 1.828 km².

In NRW schützen ca. 320 km Hochwasserschutzanlagen rd. 1.600 km² vor Überflutung durch den Rhein, das sind 4% der Fläche von NRW, auf der 8% der Bevölkerung des Landes leben. Im Regierungsbezirk Düsseldorf sind es sogar 25% der Fläche, die durch Deiche vor Rheinhochwasser bewahrt werden. Die Überflutungshöhe in den Poldern beträgt in Bergsenkungsgebieten bis über 10 m. Im potentiellen Überflutungsgebiet in NRW befinden sich Werte von rd. 250 Mrd. DM, wovon die weitaus höchsten Anteile auf Duisburg (16%), Köln (15%) und Düsseldorf (9%) entfallen (RWTH, RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN, MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NRW UND PRO AQUA INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER- UND UMWELTECHNIK MBH 2000).

4 Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen

Neben den natürlichen Faktoren wie Menge und Verteilung des Niederschlags, Bodenfeuchte zu Beginn einer Hochwasserperiode, Schneeverhältnisse und Verdunstungsmenge wird der Hochwasserlauf am Niederrhein maßgeblich beeinflusst durch Gewässerausbau- und Hochwasserschutzmaßnahmen im oberhalb gelegenen Rheineinzugsgebiet bis Andernach. Auch Ausbau- und Hochwasserschutzmaßnahmen am Niederrhein selber sowie seiner Nebenflüsse haben Auswirkungen auf das Hochwassergeschehen am Niederrhein. Deshalb sollen im Folgenden diese Einflussfaktoren beschrieben werden.

4.1 Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen im Rheineinzugsgebiet bis Andernach

Aus verschiedenen Untersuchungen z. B. (HSG Kaub bis Rolandswerth 1993) ist bekannt, dass Ausbaumaßnahmen am Rhein oberhalb von Andernach zu einer Erhöhung der Hochwasserscheitelabflüsse des Rheins in NRW geführt haben. Um diese Verschärfung zu kompensieren oder mindestens zu mindern, wurden Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen durchgeführt bzw. sind in Planung oder im Bau. Nachfolgend werden diese Maßnahmen beschrieben.

4.1.1 Ausbaumaßnahmen

Bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts hatte der Oberrhein noch den Charakter eines Wildstromes. Nur örtlich wurden eng begrenzte Hochwasserschutzmaßnahmen durchgeführt. Nach 1800 folgten drei Phasen eines koordinierten Ausbaus des Oberrheins.

Die erste und einschneidendste Phase am Oberrhein stellt die Rheinkorrektur durch die Umsetzung der TULLA'schen „Rektifikationsplanungen“ ab 1817 dar.

Das Ziel dieser Pläne war:

„Die möglichst gerade Leitung der Flüsse, die Abschneidung ihrer Seitenarme, die Demolierung der schädlichen Dämme oder die Rektifikation der Flüsse ist diejenige Operation, durch welche ihren Zerstörungen Einhalt getan und der Wasserspiegel so gesenkt wird, dass die Nachteile der Überschwemmungen und die Eisgänge vermindert oder vollkommen beseitigt werden“ (TULLA 1825).

Mäanderschlingen wurden durchstoßen und der gesamte Oberrhein in ein festes Bett mit einer Breite zwischen 200 m und 300 m verlagert. Die Gesamtmaßnahmen führten auf der Strecke zwischen Basel und Worms zu einer Laufverkürzung um ca. 80 Stromkilometer (28 % der Gesamtlauflänge).

TULLA's Nachfolger HONSEL führte in der zweiten Phase des Oberrhein-Ausbaus ein System von Bühnen und Leitwerken ein, das eine Mindestwassertiefe von etwa 2 m auf einer Fahrwasserbreite von 80 bis 100 m sicherstellte. Dies war notwendig, um der zunehmenden Schifffahrt auf dem Rhein bessere Bedingungen zu verschaffen.

Der Bau von Schöpfwerken zur Verbesserung der Vorflutsituation der Nebengewässer des Rheins (z. B. Isenach, Altbach) bzw. zur Kontrolle der Grundwasserstände (besonders nach dem Anstieg des Grundwasserstandes infolge von Frühjahrshochwassern in der Vegetationsperiode) verbesserte weiterhin die landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Altaue sowie die Möglichkeit der dauerhaften Besiedlung dieser Bereiche.

In der dritten Phase des Oberrhein-Ausbaus wurden zur Nutzung der Wasserkraft und zur weiteren Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse

zwischen Rhein-km 170 (bei Basel) und Rhein-km 291,5 (bei Straßburg) acht Staustufen errichtet. Vier davon liegen im Rheinseitenkanal, der von 1928 bis 1959 zwischen Basel und Breisach gebaut wurde. Vier weitere wurden von 1961 bis 1970 zwischen Marckolsheim und Straßburg in „Schlingelösung“ geschaffen. Unterhalb von Straßburg wurden 1974 die Staustufe Gamsheim und 1977 die Staustufe Iffezheim direkt im Rhein errichtet.

Der Bau von Staustufen oberhalb von Iffezheim hat zwischen Breisach und Iffezheim neue Deiche unmittelbar am Mittelwasserbett des Rheins erforderlich gemacht, um den Hebungen der Niedrig- und Mittelwasserspiegel durch die Stauwehre Rechnung tragen zu können. Die ausgedeichten Niederungen waren zuvor natürliche Überflutungs- und damit natürliche Retentionsgebiete des Rheins bei Hochwasser. Das nach TULLA geschaffene Deichsystem hat damit zwischen Breisach und Iffezheim weitgehend seine Bedeutung verloren.

Staufufen unterbinden den Nachschub des Geschiebes. Durch Einbringen von Kies und Schotter wird der fortschreitenden Sohlenerosion entgegengewirkt, die zum Absinken der Wasserstände in

der anschließenden Rheinstrecke und damit auch zum Absinken der Grundwasserstände in der Rheinebene führen würde. Einer Erosion und damit dem Absinken der Grundwasserstände wird durch die regelmäßige Zugabe von Geschiebe im Unterwasser der Staustufe Iffezheim seit 1977 entgegengewirkt.

Auf eine schon geplante weitere Staustufe bei Au/Neuburg wird verzichtet, solange durch die Geschiebezugabe die Sohlenerosion aufgehalten werden kann.

Der Ausbau des Rheins zwischen Basel und Iffezheim mit zehn Staustufen hat zum Verlust von rd. 130 km² natürlicher Überschwemmungsfläche, das sind 60 % der vorher vorhandenen und somit zu einer Verringerung der Hochwasserspeicherräume geführt. Entlang des Rheinseitenkanals zwischen Basel und Breisach sind so gut wie keine weiteren Retentionsverluste eingetreten, da dort der Rhein aufgrund seiner Sohleneintiefung ohnehin kaum noch über die Ufer treten kann.

	Pegel Karlsruhe/Maxau	Pegel Worms
Ausbauwassermenge	5.000 m ³ /s	6.000 m ³ /s
200-jährlicher Abfluss des Rheins vor Ausbau (1955)	5.000 m ³ /s	6.000 m ³ /s
200-jährlicher Abfluss des Rheins nach Ausbau (1977)	5.700 m ³ /s	6.800 m ³ /s
Hochwassererhöhung	700 m ³ /s	800 m ³ /s

Table 4.1.1.1:
Abflussverschärfung am
Oberrhein infolge des
Staufufenbaus

Quelle:
HSK Abschlussbericht 1978

Als Folge der genannten Retentionsraumverluste fließen die Hochwasserwellen des Rheins schneller ab als vor dem Ausbau. Die Basel passierenden Rheinwellen treffen in Straßburg, Karlsruhe, Mannheim und Worms nun früher ein und überlagern sich ungünstig mit den Hochwasserwellen der Nebenflüsse. Dies wird besonders am Beispiel des Neckars deutlich, wo es durch die Beschleunigung der Rheinwelle zu einem Zusammentreffen der Hochwasserwellen von Rhein und Neckar kommt, während vor dem Ausbau die Neckarwelle der Rheinwelle noch um fast zwei Tage vorausgeeilt war.

Das führt zu einer erheblichen Hochwasserverschärfung unterhalb der Neckarmündung, aber auch zu Erhöhungen unterhalb der Mündungen weiterer großer Nebenflüsse.

Diese Abflussverschärfung wird durch einen Vergleich der 200-jährlichen Hochwasserabflüsse vor und nach dem Ausbau verdeutlicht (Tabelle 4.1.1.1). Da sich die Ausbauabflüsse der einzelnen Rheinabschnitte nicht geändert haben, kommt diesen heute eine geringere Jährlichkeit zu.

4.1.2 Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen

Zum Ausgleich der Abflussverschärfung wurde zwischen der Republik Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland am 06.12.1982 eine Vereinbarung geschlossen, in der sich beide Staaten verpflichten, auf der Grundlage des Schlussberichtes der HSK die erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, um unterhalb der Staustufe Iffezheim den vor dem Ausbau des Oberrheins vorhandenen Hochwasserschutz wiederherzustellen. Dies sind fünf Rückhalteräume auf badenwürttembergischem Gebiet, zwei Rückhalteräume auf

französischem Staatsgebiet, der Sonderbetrieb¹ der französischen Rheinkraftwerke sowie weitere nicht näher bezeichnete Rückhalteräume unterhalb der deutsch-französischen Grenze auf rheinland-pfälzischem Gebiet mit etwa 30 Mio. m³ Retentionsvolumen.

In einem weiteren Verwaltungskommen zwischen dem Bund, Rheinland-Pfalz und Hessen (1977, geändert 1989) ist u.a. geregelt, dass auf der linken Rheinseite unterhalb der deutsch-französischen Grenze weitere 14 Mio. m³ Rückhalteräume eingerichtet werden, um gegenüber den Festlegungen in der deutsch-französischen Vereinbarung von 1982 eine Verschlechterung der Hochwassersituation unterhalb Worms zu vermeiden.

Gemäß den Berichten der HSG Worms bis Kaub für die Rheinstrecken unterhalb Worms wird das Hochwasserschutzkonzept am Oberrhein die Abfluss-erhöhungen bei 200-jährlichen Hochwassern für den Mittel- und Niederrhein nahezu ausgleichen. Bei kleineren Hochwassern wird eine geringe Abfluss-erhöhung entstehen.

In der Tabelle 4.1.2.1 sind die Maßnahmen in Frankreich, in Baden-Württemberg und in Rheinland-Pfalz nach dem Konzept von 1982 und nach dem derzeitigen Konzept zusammengestellt.

Beim derzeitigen Stand der Baumaßnahmen und Planungen wird angenommen, dass die Gesamtheit der französischen Hochwasserrückhalte-maßnahmen im Rahmen des deutsch-französischen Übereinkommens aus Dezember 1982 im Jahr 2001 umgesetzt ist. Der Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke ist möglich, der Moderpolder ist zur Hochwasserrückhaltung einsatzbereit und der Ersteinpolder befindet sich in der Schlussphase der behördlichen

1) Hierbei wird der Durchfluss an den Rheinkraftwerken gedrosselt, so dass die Hochwasserwelle vermehrt durch das alte Rheinbett fließt und dabei der natürlichen Retention unterliegt.

Genehmigung. Die zusätzlichen Maßnahmen, die potenzielle Standorte für Flutungen umfassen, sind noch im Stadium von Vorstudien.

Von den ursprünglich fünf in Baden-Württemberg vorgesehenen Rückhalteräumen sind zwei – das Kulturwehr Kehl/Straßburg und der Polder Altenheim – fertig gestellt und zumindest teilweise einsatzbereit. Für drei weitere Räume – das Kulturwehr Breisach, den Polder Breisach/Burkheim und den Polder Söllingen/Greffern – sind die Raumordnungsverfahren abgeschlossen. Hier werden zurzeit die Unterlagen für die Einleitung der Planfeststellungsverfahren vorbereitet.

Die Erfahrungen bei den ersten Einsätzen des Kulturwehres Kehl/Straßburg und der Polder Altenheim (Hochwasser März 1988, Februar 1990), wie auch die Erkenntnisse bei der Planung und aus den Umweltverträglichkeitsstudien zu den weiteren Rückhalteräumen haben deutlich gemacht, dass Rückhalteräume mit großen Einstauhöhen ökologisch und auch technisch erhebliche Schwierigkeiten bereiten. Daher wurde das seit 1982 verfolgte Hochwasserschutzkonzept, das vorsah, den auf Baden-Württemberg entfallenden Anteil von 126 Mio. m³ über lediglich fünf Rückhalteräume bereitzustellen, nicht mehr weiterverfolgt.

Ein neues Hochwasserschutzkonzept wurde entwickelt, das anstelle der bisherigen fünf Rückhalteräume nun 13 Räume vorsieht (Tabelle 4.1.2.1). Die Einrichtung weiterer Rückhalteräume wurde vor allem wegen der Beschränkung der Überflutungshöhe auf im Mittel 2,5 m und wegen des Erfordernisses einer ständigen Durchströmung der Rückhalteräume während der Rückhaltung erforderlich. Mit der zusätzlichen Durchführung von öko-

logischen Flutungen in diesen Räumen können nun die wichtigsten ökologischen Anforderungen erfüllt werden. Bei ökologischen Flutungen werden die Rückhalteräume auch in Zeiten, in denen kein Hochwasserrückhaltebedarf besteht, in geringer Höhe mit Rheinwasser überflutet. Der Zeitpunkt dieser ökologischen Flutungen wird ausschließlich von der Rheindynamik bestimmt.

Das neue Konzept führt neben einem erhöhten Flächenbedarf auch zu einem größeren Volumenbedarf, sodass anstelle der 126 Mio. m³ nun 167,3 Mio. m³ erforderlich werden. Durch die Ausdehnung auf 13 Standorte ergibt sich ein anderes Zusammenwirken dieser Räume untereinander bzw. im Verbund mit den von Frankreich und Rheinland-Pfalz zu bauenden Rückhalteräumen. Dies führte dazu, dass im Gegensatz zum alten Konzept auch unterhalb Iffezheim noch drei Rückhalteräume benötigt werden, um das Hochwasserschutzziel für den Bereich der Neckarmündung zu erreichen.

Der Abschluss aller Bauarbeiten ist in Baden-Württemberg nicht vor dem Jahr 2010 zu erwarten.

Die Verpflichtung zum Bau von zusammen rd. 44 Mio. m³ Rückhalteraum will Rheinland-Pfalz nach dem derzeitigen Konzept an zehn Standorten abdecken (Tabelle 4.1.2.1).

Dabei handelt es sich um acht Polder und vier Deichrückverlegungen. Das Gesamtvolumen beträgt 63 Mio. m³. Davon sind rd. 55 Mio. m³ für den Hochwasserschutz wirksam. Das Mehr an rd. 8 Mio. m³ gegenüber der Bauverpflichtung ist erforderlich, um eventuell auftretenden Schwierigkeiten im weiteren Gang der Verwaltungsv erfahren begegnen zu können.

4

Für alle Standorte der Rückhaltungen in Rheinland-Pfalz liegen positive raumordnerische Entscheide vor. Alle Hochwasserrückhaltungen befinden sich entweder im Planfeststellungsverfahren oder das Planfeststellungsverfahren wird vorbereitet.

Die Polder Daxlander Au und Flotzgrün sind fertig gestellt; Baubeginn für den Polder Kollerinsel war November 2000. Der Abschluss aller Bauarbeiten ist in Rheinland-Pfalz nicht vor dem Jahr 2006 zu erwarten.

Tabelle 4.1.2.1:
Rückhaltungen am Oberrhein
(Stand 2000)

→ Bereits fertiggestellte und einsatzbereite Rückhaltungen, davon am Kulturwehr Kehl/Straßburg zz. nur rd. 12 Mio. m³.

1) Angegeben sind Maximalwerte, das tatsächlich genutzte Volumen ist abhängig vom Durchfluss im Rhein.

2) Die Wirksamkeit aller Maßnahmen am frei fließenden Rhein unterhalb von Iffezheim ist abhängig vom Durchfluss im Rhein.

Rückhalteraum	Art der Rückhaltung ²⁾	Nach Konzept von 1982 [Mio. m ³]	Nach derzeitigem Konzept [Mio. m ³]
Frankreich:			
→ Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke ¹⁾	Betriebsregelung	45	45
→ Erstein	Polder	6	7,8
→ Moder	Polder	5	5,6
Zwischensumme Frankreich		56	58,4
Baden-Württemberg:			
Südlich KW Breisach	Wehr oder 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
Freistett	Polder	–	9,0
Söllingen/Greffern	Polder	8	12,0
Bellenkopf/Rappenwört	Polder oder Deichrückverlegung	–	14,0
Elisabethenwört	Polder oder 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		4,2
Wörth/Jockgrim	Polder		12,0
Mechtersheim	Polder		7,4
Flotzgrün	Polder		5,0
Kollerinsel	Polder		6,1
Waldsee/Altrip/Neuhofen	Polder		7,9
Waldsee/Altrip/Neuhofen	Deichrückverlegung		1,2
Petersau/Bannen	Deichrückverlegung		1,4
Worms-Mittlerer Busch	Deichrückverlegung		2,1
Bodenheim/Laubenheim	Polder		6,4
Ingelheim	Polder		3,8
Zwischensumme Rheinland-Pfalz		44	62,6
Gesamtsumme		226	rd. 288

4.2 Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen am Rhein in NRW

Für die Ermittlung des Bemessungsabflusses für den Rhein in NRW ist u.a. die Kenntnis über den Gewässerausbau, die Morphologie (Gewässerstrukturgüte) und die Hochwasserschutzmaßnahmen von Bedeutung.

4.2.1 Ausbaumaßnahmen

Zur Sicherung der Rheinufer sind schon im 16. und 17. Jahrhundert vereinzelt Rheinschleifen abgetrennt worden. In der Zeit von etwa 1770 bis 1825 erfolgten eine Reihe von Begradigungen, so z. B. 1788 an der Bislicher Insel oder 1819 bei Grieth. Diese Maßnahmen verkürzten den Rheinlauf um mindestens 15 km. Deichbau und Durchstiche hatten somit bereits Anfang des 19. Jahrhunderts in den Grundzügen die heutige Deichlinie vorgegeben. Ausbaumaßnahmen wie am Oberrhein (Staufstufen und Parallelkanäle) sind in den letzten 100 Jahren am Niederrhein nicht vorgenommen worden.

Ein besonderes Problem stellt die Sohlenerosion und ein Defizit bei der Geschiebeführung dar. Im Rhein sind wie in jedem frei fließenden Strom, Erosion und Anlandung natürliche Erscheinungen. Sie sind großräumig und langfristig zu sehen und entwickeln sich in den verschiedenen Streckenabschnitten unterschiedlich stark. Ablagerungen und wandernde Bänke, die zu Fehlstellen für die Schifffahrt führen können, wechseln mit andauernden Erosionstendenzen der Sohle. Jede Veränderung im Gewässerbett führt zu neuen Sohlenlagen und zur Veränderung des Strömungsbildes und der Gefälleverhältnisse. Die heterogene Sohlenstruktur führt immer wieder zum „Herauswachsen“ von Schwellen und Einzelblöcken und beeinträchtigt

den Umfang der Schiffbarkeit. Die Erosionsverminderung ist eine ständige Aufgabe. Sie ist ein Reagieren auf den Strom, so wie der Strom es verlangt. In einem Gesamtkonzept sind die Interessen der Schifffahrt mit ökologischen und wirtschaftlichen Interessen (Land-/Bund-Gutachten „Gesamtkonzept Rhein in NRW – Hochwasserschutz, Schifffahrt und Ökologie“) abgestimmt.

Das Ziel der Erosionsverminderung verfolgt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bereits seit vielen Jahren. Die Erosionsraten konnten in Duisburg von 4 cm/Jahr bis Mitte der 1960er Jahre, auf 0 bis 1 cm/Jahr gesenkt werden. Der Streckenbereich Emmerich weist noch Erosionsraten von über 2 cm/Jahr auf.

Folgende Maßnahmen werden zur Erosionsverminderung angewendet:

- Geschiebeumlagerung (Ausbaggerung und Wiedereinbau an anderer Stelle)
- Geschiebezugabe
- Kolkverfüllung
- Sohlaufhöhung (meist zum Ausgleich von Bergsenkungen)
- Bühnen- und Parallelwerksbau (wird häufig aus ökologischer Sicht begrüßt, weil dadurch die Ufer strukturiert werden und Stillwasserzonen – Fischkinderstuben – geschaffen werden)
- Flutmulden im Vorland (zur besseren Hochwasserabführung)
- Vorlandabgrabungen (meist in Verbindung mit Auskiesungen, ebenfalls zur besseren Hochwasserabführung)
- Vorlandgestaltung zur besseren Stromführung (Leitdämme, Freihalten von Bepflanzung)

Eine Kombination aus mehreren der vorstehenden Maßnahmen sind zur Erosionsverminderung erforderlich. Große Erfahrung im Flussbau in Verbindung mit hydraulischen Berechnungen und Modellversuchen sind die Voraussetzung zur richtigen und behutsamen Anwendung der einzelnen Maßnahmen.

4.2.2 Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen

Ausgehend von den Niederlanden begann der Deichbau am Niederrhein im 13. Jahrhundert zunächst nur für kleine Polder. Anschließend setzte der Zusammenschluss zu Deichverbänden ein; die erste schriftliche Urkunde eines Verbandes stammt aus dem Jahre 1343 (Kranenburger Deichrecht). Nur langsam wuchsen die Polder zu größeren Einheiten zusammen.

Erste Versuche zu einheitlichen, vom Staat gestützten Regelungen kamen im 16. Jahrhundert auf. Aber erst das Clever Deichreglement (Abbildung 4.2.2.1) von 1767 schuf mit seinen 195 Paragraphen für die Verbandsarbeit eine einheitliche und solide Grundlage, die in Teilen bis in die 20er Jahre des 20. Jahrhunderts Gültigkeit hatte. Das Reglement legte auch fest, dass alle Bann-Deiche auf eine egale Höhe gebracht werden: und zwar wenigstens 1 rheinländischer Fuß höher, als das höchste Wasser jemals gewesen ist“ (1 rheinl. Fuß = 12 Zoll = 0,314 m). Dies war der erste Bemessungswasserspiegel, dessen Grundgedanke sogar bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts Bestand hatte.

Abbildung 4.2.2.1:
Clever Deichreglement
von 1767

No. 14. Erneueretes Reichs-Schau-Graben- und Schleusen-Reglement in dem Herzogthum Cleve. De Dato Berlin, den 24. Febr. 1767.

Von der Anlage, Höhe, Krone und Doffirung der Deiche.

§. 16.

Es sollen alle Bann-Deiche auf eine egale Höhe gebracht werden; nemlich wenigstens einen rheinländischen Fuß höher, als das höchste Wasser jemahls gewesen ist. Dann Bann-Deiche müssen das ganze Land und die Häuser derer Einwohner für Ueberschwemmungen decken; Auch können die Bann-Deiche, wegen ihrer grossen Höhe, keinen Ueberlauf des Wassers aushalten, sondern sie stehen in Gefahr, durchzubrechen; wodurch denn, wie die Erfahrung vielfältig bestättiget, ganze Gegenden besandet und verdorben werden.

§. 16. Die Bann-Deiche sollen auf eine egale Höhe gebracht werden.

Ab 1851 wurde der Rhein planmäßig für den Schiffsverkehr und für die schnelle Hochwasserableitung ausgebaut. Drei große Deichbaumaßnahmen fixierten endgültig die heutige Deichlinie. Die Ilvericher Rheinschlinge wurde zunächst nur durch einen Leitdeich vom Flusslauf abgeschnitten, der Banndeichschluss erfolgte erst im 20. Jahrhundert. In den Jahren 1935 bis 1937 folgte der 18,6 km lange Banndeich Orsoy. Die letzte große Maßnahme war 1965 der Bau des 11 km langen Deichs Grieth-Griethausen (Bereich Bylerward), der zusätzlich eine Fläche von rd. 60 km² vor Überflutungen schützt.

Zwischen der Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz und dem Norden der Stadt Köln sind nur Teilstrecken eingedeicht; die Polder sind klein und in sich geschlossen. In Höhe Dormagen beginnt die geschlossene Deichlinie; die Polder werden größer, sind aber zunächst noch überwiegend voneinander getrennt. Ab Duisburg sind die Polder zusammenhängend und gehen in die

niederländischen Polder über. Die Deichhöhen betragen infolge des Bergbaus am mittleren Niederrhein örtlich bis zu 15 m.

Mitte der 80er Jahre begann die Überprüfung der Standsicherheit der niederrheinischen Deiche. Das Ergebnis zwang zum Handeln: Von 320 km Rheindeichen in NRW sind rd. 170 km sanierungsbedürftig. Kurz darauf begannen die ersten Sanierungsmaßnahmen.

Die 1989 von den ehemaligen Staatlichen Ämtern für Wasser- u. Abfallwirtschaft (StWA) Düsseldorf und Bonn gefertigte Untersuchung Generalplan Hochwasserschutz am Niederrhein stellt darüber hinaus Überlegungen vor, wie der Hochwasserschutz stärker auf natürliche Weise unterstützt werden kann, und schlägt Bereiche für Deichrückverlegungen vor. Diese Überlegungen flossen 1992 in das Gesamtkonzept Rhein in NRW - Hochwasserschutz, Schifffahrt und Ökologie ein.



Bild 1:
Rheinhochwasser 1995
Haus Bürgel

4

Die großen Hochwasser zu Weihnachten 1993 und 13 Monate später, im Januar 1995, bewirkten, dass die Umweltminister der EU-Rheinanliegerstaaten schon am 4. Februar 1995 in Arles erklärten, dass sie es für notwendig erachteten, die mit Hochwasser verbundenen Risiken sobald wie möglich zu verringern. Dazu beauftragten sie die Flussgebietskommissionen von Rhein, Saar, Mosel und Maas mit der Erstellung von Hochwasser-Aktionsplänen. Das Vorgehen wurde im Vorfeld mit der Schweiz abgestimmt und noch im Februar 1995 übertrug die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) der Projektgruppe „Aktionsplan Hochwasser“ die Ausarbeitung eines Aktionsplans für den Rhein. Erstmals wird hier international gefordert, dass dem Rhein für die Ausbreitung der Hochwasser wieder wesentlich mehr Raum gegeben werden muss.

In NRW wurde 1996 das Programm zum „nachhaltigen Hochwasserschutz“ verkündet; vier Ziele werden dabei verfolgt:

- Sanieren der vorhandenen Hochwasserschutzanlagen,
- Rückhalteräume (nicht nur am Rhein) erhalten und wenn möglich, zurückgewinnen,
- Gewässer renaturieren, Überschwemmungsgebiete freihalten,
- entsiegeln von Flächen (u.a. Durchlässigkeit wiederherstellen und Regenwasser vor Ort versickern).

Bild 2:
Rheinhochwasser 1995
Altstadt von Köln



Ein wichtiges Mittel, Hochwasserscheitel zu entschärfen, sind Rückhalteräume. Es wird unterschieden in:

- Gesteuerte Rückhalteräume (Taschenpolder); sie kappen gezielt die Hochwasserscheitel. Sie sind daher aus der Sicht des Hochwasserschutzes sehr wirkungsvoll, aus ökologischer Sicht dagegen eher problematisch. Solche Räume benötigen umfangreiche Steuerungsbauwerke und sollten ökologisch geflutet werden.
- Frei durchflossene Rückhalteräume; sie sichern eine natürliche Entwicklung. Zwar kappen sie die Hochwasserscheitel nur wenig, verlangsamen dafür aber den Anstieg der Hochwasserwelle. Sie sind aus Sicht des Hochwasserschutzes weniger wirkungsvoll, aus ökologischer Sicht dagegen zu begrüßen.

Die im nordrhein-westfälischen Programm zum nachhaltigen Hochwasserschutz genannten Retentionsräume sind in Abbildung 4.2.2.2 aufgeführt. Der Raum Orsoy-Land (220 ha bzw. 10 Mio. m³, Kosten rd. 42 Mio. DM) wurde 2000 fertig gestellt. Die Arbeiten für den Raum Bislicher Insel (rd. 1.000 ha bzw. 50 Mio. m³, Kosten bei

60 Mio. DM) begannen 1999, für den Raum Monheim (rd. 200 ha bzw. 9 Mio. m³, Kosten bei 60 Mio. DM) im Frühjahr 2000. Diese drei Rückhalteräume sind frei durchflossen und entstehen durch Rückverlegung des Banndeiches. Für die anderen Räume laufen Untersuchungen. Die im Programm genannten Retentionsräume umfassen insgesamt rd. 47 km² und sollen ca. 174 Mio. m³ Wasser zurückhalten können.

Die Polder am Niederrhein erbringen Überflutungsflächen, die sich flussabwärts summieren und die größte Wirkung an der deutsch-niederländischen Grenze erreichen. Die Niederlande planen ebenfalls in ihrem Programm Raum für den Fluss durch Profiländerungen im Abflussquerschnitt, durch Beseitigung von Abflusshindernissen und durch die Anlage von Poldern dem Fluss mehr Platz zu verschaffen.

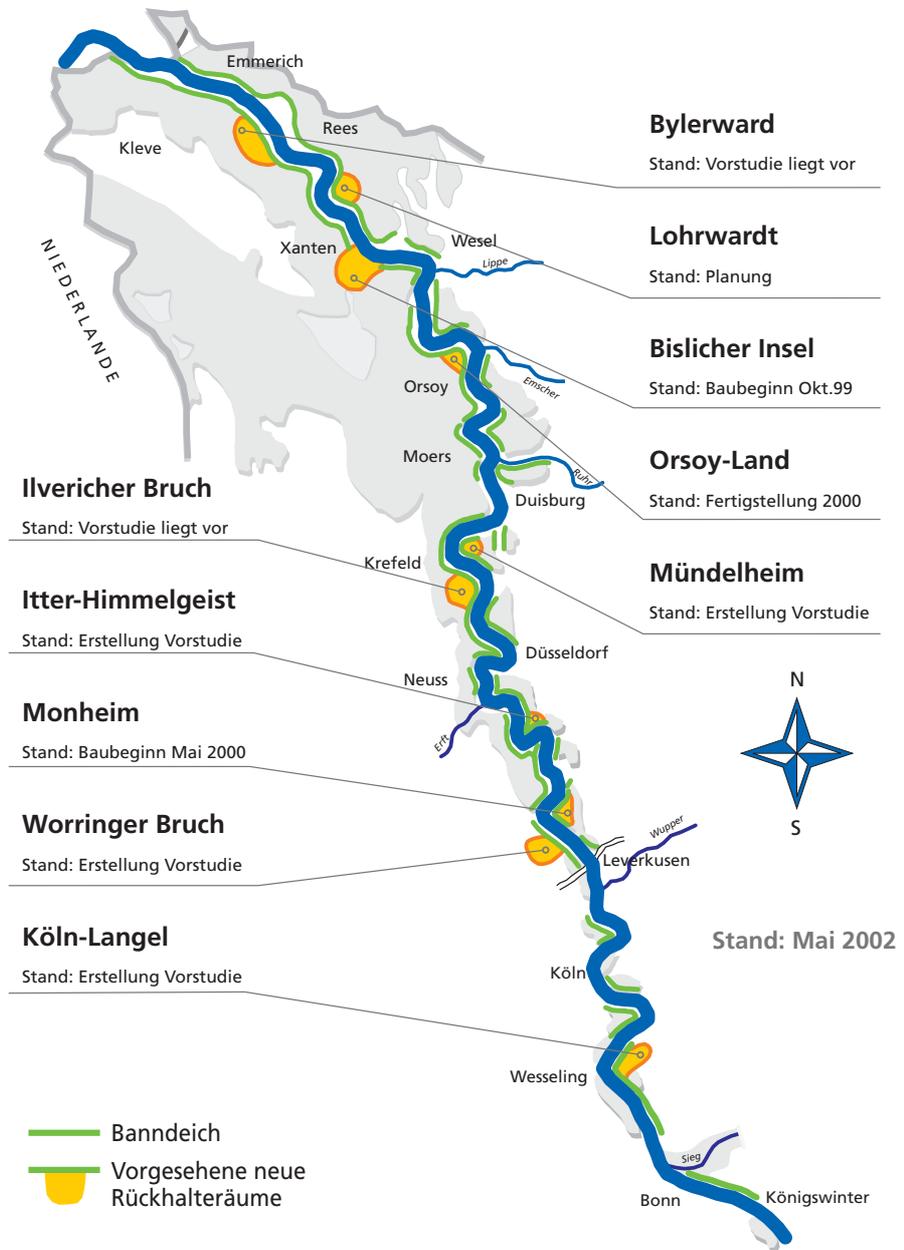
Bei allen Deichsanierungsmaßnahmen am Niederrhein wird geprüft, ob sich nicht weitere kleine Deichrückverlegungen verwirklichen lassen – in einigen Fällen ist dies gelungen. Die Senkung der Hochwasserscheitel am Rhein selbst und im Einzugsgebiet ist eine ständige Aufgabe.



Bild 3:
Rheinhochwasser 1995
Pegel Köln

4

Abbildung 4.2.2.2:
Rückhalteräume am
Niederrhein



4.3 Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen an den ausgewählten Nebengewässern des Rheins in NRW

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Nebengewässer des Niederrheins beschrieben, insbesondere im Hinblick auf Gewässerausbau und Hochwasserschutzanlagen. Es wird angegeben, inwieweit sich die Hochwasserabflüsse aus diesen Gewässern auf den Hochwasserscheitel des Rheins auswirken.

Sieg

Die Sieg entspringt am Ederkopf im Rothaargebirge in einer Höhe von 603 müNN, fließt durch das Siegerland zwischen dem Bergischen Land und dem Westerwald hindurch und mündet nördlich von Bonn bei Rhein-km 660,0.

Das Einzugsgebiet der Sieg umfasst insgesamt 2.861 km², ihre Lauflänge beträgt 152,13 km. Der höchste Abfluss im Zeitraum 1964 bis 1995 am Pegel Menden (Unterlauf) beträgt $HQ = 1.053 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen am 07.02.1984.

Fluss	Pegel	Datum	W [cm]	HQ [m ³ /s]
Sieg	Menden	07.02.1984	447	1.053
Wupper	Opladen	23.09.1957	306	181
Ruhr	Hattingen	01.01.1994	604	907
Lippe	Schermbeck	03.11.1998	658	396

Tabelle 4.3.1:
Höchste Wasserstände und Abflüsse der Nebengewässer am Rhein in NRW



Bild 4:
Rheinhochwasser 1995
„Zur Siegfähre“



Bild 5:
Rheinhochwasser 1995
Sieg­mündung

Im Zuge der Rheinregulierung von 1851 bis 1887 wurde die Siegmündung, die bis dahin rechtwinklig zum Rhein bei Strom-km 656 lag, rheinabwärts nach Rhein-km 660,0 verlegt und hydraulisch günstiger gestaltet.

Die Sieg wurde über weite Strecken durch wasserbauliche Maßnahmen wie Böschungssicherungen, Stau­einrichtungen und Deichbauten verändert, die sich auch auf den Hochwasserabfluss auswirken: So gingen in der Vergangenheit große Retentionsräume an der Sieg durch den Bau von Straßendämmen und Hochwasserschutzdeichen verloren. Nach einer in 1999 erfolgten Erhebung des Staatlichen Umweltamtes (StUA) Köln sind allein im nordrhein-westfälischen Teil des Einzugsgebietes der Sieg 11 km² Retentionsflächen mit einem Retentionsvolumen von annähernd 10 Mio. m³ verloren gegangen – unter Zugrundelegung eines Wasserstandes mit 100-jährlichem Wiederkehrintervall. Bei der Wiederherstellung verloren gegangener Retentionsräume kann nach einer hydraulischen Berechnung des StUA Köln mit einer Reduzierung der Abflussscheitel um 50 m³/s an der Mündung der Sieg gerechnet werden. Bei ablaufender Welle ist jedoch eine Abflusserhöhung um 25 m³/s zu erwarten. Bei der Berechnung wurde vorausgesetzt, dass die Füllung der Retentionsräume aus ökologischen Gründen bereits bei einjährlichem Hochwasser beginnt und keine Steuerung der Füll- und Entleerungsvorgänge erfolgt.

Oberhalb der Mündung liegt die Sieg bei Hochwasser im Rückstau­bereich des Rheins. Die sich einstellenden Wasserstände werden durch das Rheinhochwasser bestimmt. Der Rückstau erstreckt sich bis zum Pegel Menden. Eine Untersuchung der zeitlichen Aufeinanderfolge der Hochwasser hat gezeigt, dass der Hochwasserscheitel der Sieg in

der Regel zwei bis fünf Tage vor dem Scheitel im Rhein auftritt. Eine Beeinflussung des Hochwasserscheitels des Rheins durch den Abfluss der Sieg ist daher im Mittel nicht zu erwarten. In Einzelfällen, wie z. B. beim Hochwasser 1995 trafen die Hochwasserscheitel von Rhein und Sieg aufeinander, was zu einer deutlichen Erhöhung des Hochwasserscheitels im Rhein führte.

Im Einzugsgebiet der Sieg und ihres größten Nebenflusses, der Agger ($A_{EO} = 805,32 \text{ km}^2$), liegen die in der nachstehenden Tabelle 4.3.2 aufgeführten Talsperren.

Der in den Talsperren insgesamt zur Verfügung stehende Hochwasserrückhalteraum ist mit 13,39 Mio. m^3 gering. Hinzu kommt, dass dieser Rückhalteraum in vier verschiedenen Talsperren zur Verfügung steht, die an unterschiedlichen Gewässern liegen und von denen jede nach einem eigenen Betriebsplan gesteuert wird.

Zwar werden die Hochwasserscheitel der Nebengewässer der Sieg von den in ihren Einzugsgebieten liegenden Talsperren wesentlich reduziert, auf die Hochwasserscheitel der Sieg haben sie einen nur unbedeutenden Einfluss.

Lfd. Nr.	Name	Jahr der Fertigstellung	Bauart (1)	A_{EO} (km^2)	Stauziel müNN	Stauraum (Mio. m^3)	Hochwasserschutzraum (Mio. m^3)	Nutzung (2)
1	Breitenbach-Talsperre	1956/82	D	11,64	370,0	7,8	1.160	T, H, A
2	Obernau-Talsperre	1972/86	D	21,52	370,9	14,9	1.130	T, H
3	Wahnbach-Talsperre	1958	D	69,97	124,1	41,4	2.000	T, H, A
4	Aggertalsperre	1930	M	40,57	284,4	19,3	4.500	H, K, A, E, T
5	Genkeltalsperre	1954	D	11,50	327,5	8,2	---	T
6	Wiehltalsperre	1974	D	45,87	292,5	31,5	4.600	T, H

Tabelle 4.3.2:
Talsperren im Einzugsgebiet der Sieg

1) D = Damm
M = Mauer

2) T = Trinkwasserversorgung
H = Hochwasserschutz
K = Energiegewinnung
A = Niedrigwasseraufhöhung
E = Erholung



Bild 6:
Rheinhochwasser 1995
Wuppermündung

Wupper

Auch die Wupper ist ein hochwasser-relevanter Mittelgebirgsfluss. Sie entspringt im Oberbergischen Land in der Nähe von Meinerzhagen. Nach einer Fließstrecke von 114 km und einem Gefälle von insgesamt 397 m (0,35 %) durch ein 827 km² großes Einzugsgebiet mündet sie in Leverkusen in den Rhein, bei Rhein-km 703. Unterteilt wird sie in die Obere und Untere Wupper.

Die Obere Wupper erstreckt sich von der Quelle bis zum Stausee Beyenburg. Die Untere Wupper reicht von der Stau-mauer des Stausees Beyenburg bis zur Mündung. Bedeutende Nebengewässer der Unteren Wupper sind Morsbach, Eschbach und Dhünn, der Oberen Wupper Lingese, Rönsahl, Kerspe, Gaulbach und Bever.

Der Untergrund des Gebietes besteht fast durchweg aus dichten Tonschiefern, die an der Erdoberfläche zu steinigem Lehm verwittern. Nennenswerte Kies-ablagerungen, die den Niederschlag als Grundwasser speichern könnten, sind nicht vorhanden. Deshalb fließen die Niederschläge, die im Oberlauf der Wupper 1.300 mm im Jahr betragen können, sehr schnell und ungleichmäßig ab. Die Wupper weist wegen dieser geo-logischen Verhältnisse ein krasses Ver-hältnis von NNQ zu HHQ auf, es beträgt 1 : 600 (NNQ = 0,5 m³/s, HHQ = 300 m³/s an der Mündung). Ihr Tal ist geprägt von steilen Hängen und einer relativ schma-len Aue, die sich nur im Unterlauf auf-weitert und größere Retentionsflächen bildet. Darüber hinaus ist das Einzugs-gebiet bei einer Besiedlungsdichte von 1.200 E/km² stark anthropogen über-formt. Diese ungünstigen Rahmenbe-dingungen führten in der Vergangen-heit zu häufigen Hochwassern mit Über-schwemmungen, die wegen der überaus dichten Besiedlung im engen Tal der Wupper hohe Schäden zur Folge hatten. Zur Vermeidung dieser Schäden wurden neben dem Bau von Deichen entlang

der Unteren Wupper von den Anliegern im 19. Jahrhundert im Oberlauf Talsperren errichtet, die neben dem angestrebten Hochwasserschutz auch die notwendige Versorgung mit Trink- und Brauchwasser für die Bevölkerung gewährleisten sollten.

Im Verlauf der letzten 100 Jahre sind mehrere Talsperren errichtet worden, die den natürlichen Hochwasserabfluss in der Wupper entscheidend reduzieren, da in ihnen die Abflüsse aus ca. 35% des Einzugsgebietes erfasst und gedrosselt an den Unterlauf abgegeben werden (Tabelle 4.3.3). Der 100-jährliche Hochwasserabfluss kann dadurch auf ca. 200 m³/s reduziert werden.

Die häufigsten Überflutungen treten heute am Unterlauf zwischen Wipper Aue und Opladen auf, wobei es sich hier meist um landwirtschaftlich genutzte Flächen handelt. In besiedelten Gebieten sind Überflutungen nur in beschränktem Umfang zu erwarten. Die Deiche im Mündungsbereich der Wupper und der Dhünn dienen dem Schutz des Hinterlandes vor Rheinhochwasser.

Auf den Rheinwasserstand hat der Zufluss aus der Wupper keinen entscheidenden Einfluss. Die Pegelaufzeichnungen an beiden Flüssen belegen, dass ein Aufeinandertreffen der Hochwasserscheitel statistisch betrachtet außerhalb einer 100-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit liegt.

Lfd. Nr.	Name	Jahr der Fertigstellung	Bauart (1)	Einzugsgebiet (km ²)	Stauziel müNN	Stauraum (Mio. m ³)	Hochwasserschutzraum (Mio. m ³)	Nutzung (2)
1	Bruchertalsperre	1913	GM	5,80	369,00	3,300	0,400	H, A, E
2	Lingesetalsperre	1899	GM	9,34	340,50	2,600	1,100	H, A, E
3	Kerspetalsperre	1913	GM	27,89	327,75	15,500	---	T
4	Schevelinger Talsperre	1941	StD	10,60	307,80	0,300	---	T, A
5	Neyetalsperre	1906	GM	11,85	303,20	6,000	---	T
6	Bevertalsperre	1939	StD	25,64	295,50	23,700	5,000	H, A, E
7	Panzertalsperre	1893	GM	1,62	292,73	0,300	---	T
8	Wuppertalsperre	1988	StD	204,00	252,50	25,900	9,900	H, A, K, E
9	Stauanlage Dahlhausen	1922	StD	217,08	217,70	0,200	---	K, J
10	Ülfetalsperre	1927	StD	6,58	295,00	0,040	---	E
11	Stauanlage Beyenburg	1953	StD	249,53	137,00	0,460	---	A, K, E
12	Obere Herbringhauser Talsperre	1902	GM	5,70	271,50	2,900	---	T
13	Untere Herbringhauser Talsperre	1927	StD	9,19	197,37	0,200	---	T
14	Ronsdorfer Talsperre	1899	GM	0,80	255,54	0,300	---	E
15	Eschbachtalsperre	1891	GM	5,25	242,28	1,070	---	T
16	Sengbachtalsperre	1903	GM	12,04	147,60	2,900	---	T
17	Halbachtalsperre	1903	ED	15,93	104,90	0,400	---	K, E
18	Große Dhünnalsperre	1987	StD	89,00	176,50	81,000	8,500	T, H, E

Tabelle 4.3.3:
Talsperren im Einzugsgebiet der Wupper

- 1) GM = Gewichtsstauwand
StD = Steinschüttdamm
ED = Erddamm
- 2) T = Trinkwasserversorgung
H = Hochwasserschutz
K = Energiegewinnung
A = Niedrigwasseraufhöhung
E = Erholung
J = Betriebswasserentnahme



Bild 7:
Rheinhochwasser 1995
Ruhrmündung

Ruhr

Die Ruhr ist nach Gefälle, Fließgeschwindigkeit und Abflussschwankungen ein typischer Mittelgebirgsfluss. Sie entspringt bei Winterberg 675 m üNN und mündet nach 218 km Lauflänge bei Duisburg-Ruhrort in den Rhein.

Bei einem mittleren Gefälle von 3% beträgt der Höhenunterschied zwischen Quelle und Mündung rd. 650 m.

Das Einzugsgebiet ist 4.485 km² groß und liegt überwiegend im Sauerland. Die dort vorherrschenden, wenig sickerfähigen Ton- und Schieferböden führen den größten Teil des Niederschlages direkt der Ruhr zu, sodass schon Niederschlagsereignisse von mittlerer Intensität schnell zu Hochwasser führen. Das Hochwasser an der Ruhr wird maßgeblich von Volme und Lenne bestimmt. Das Einzugsgebiet der Volme mit 430 km² weist keine nennenswerten Rückhaltemöglichkeiten auf. Das 1.340 km² große Lenne-Einzugsgebiet umfasst die besonders niederschlagsreichen Höhengebiete des Sauerlands. Die Hochwasserscheitel der Lenne lassen sich über die Steuerung des Hochwasserschutzraums der Biggetalsperre verringern. Das Hochwasser in der Oberen Ruhr wird durch Sorpe-, Henne- und Möhnetalsperre beeinflusst; vor allem die Möhnetalsperre trägt deutlich zur Dämpfung der Hochwasserscheitel bei. Die fünf großen Ruhrstauseen – Hengstey-, Harkort-, Kemnader-, Baldeney- und Kettwiger Stausee – sind zwar als Talsperren einzustufen, haben aber keine nennenswerte Retentionswirkung bei Hochwasser.

Die gesicherten Pegelaufzeichnungen der vergangenen 40 Jahre belegen einen Hochwasserabfluss unter Berücksichtigung des Talsperrenmanagements von etwa 1.000 m³/s an der Mündung. Als gesicherter höchster Abfluss gelten der Wert von 1.020 m³/s im Abflussjahr 1961

Lfd. Nr.	Name	Jahr der Fertigstellung	Bauart (1)	A _{EO} (km ²)	Stauziel müNN	Stauraum (Mio. m ³)	Hochwasserschutzraum (Mio. m ³)	Nutzung (2)
1	Hennetalsperre mit Beileitungen	1955	StD	55,2 98,5	323,3	38,4	7,0	A, H, E, K
2	Möhnetalsperre	1913	GM	436,0	213,7	134,5	10,0	A, H, E, K
3	Sorpetalsperre mit Beileitungen	1935	StD	52,7 100,3	283,0	70,0	---	A, (T), E, K
4	Versetalsperre	1951	ED	23,7	389,8	32,8	---	A, T, E, K
5	Fürwiggetalsperre	1904	GM	4,5	438,9	1,67	---	T, A, E
6	Ennepetalsperre	1904 1912	GM	48,2	307,9	10,3 12,6	---	T, A, J, E, H
7	Biggetalsperre	1965	StD	287,0	307,5	171,7	32	A, H, E, K

Tabelle 4.3.4:

Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr

1) GM = Gewichtsstaumauer
StD = Steinschüttdamm
ED = Erddamm

2) T = Trinkwasserversorgung
H = Hochwasserschutz
K = Energiegewinnung
A = Niedrigwasseraufhöhung
E = Erholung
J = Betriebswasserentnahme

(vor dem Bau der Biggetalsperre) und von 907 m³/s im Abflussjahr 1994. Das HQ₁₀₀ wird mit etwa 1.500 m³/s angesetzt. Das HHQ, das durch Festlegung der Landesanstalt für Gewässerkunde 1931 im Nachgang zu dem Hochwasser von 1890 mit 2.200 m³/s angenommen wurde, lief vor dem Bau der Talsperren im Einzugsgebiet ab und war zudem eine grobe Schätzung.

Im ungünstigsten Fall treffen im Bereich Hengstey-/Harkortsee die Hochwasserscheitel aus Oberer Ruhr, Lenne und Volme zusammen und gefährden die Altstadt von Schwerte und Bereiche um Mülheim. Bei Zusammenreffen von Rhein- und Ruhrhochwasser stehen infolge des Rückstaus in der Ruhr weite Teile des Duisburger Hafens unter Wasser.

Zwischen Essen und Duisburg schützen ca. 15 km Deiche eine Wassergewinnungsanlage, Siedlungsbereiche und landwirtschaftliche Flächen vor Hochwasser.

Die Undurchlässigkeit des Untergrunds verhindert die Bildung eines Grundwasservorrats, sodass die natürliche Niedrigwasserführung in Trockenzeiten auf Werte unter 5 m³/s sinkt. Die zum Hochwasserschutz und zu Trinkwasserzwecken angelegten Talsperren wirken ausgleichend auf diese extremen Schwankungen, sodass heute aus Gründen der Wasserkraftnutzung und aus ökologischen Gründen die Untere Ruhr eine Mindestwassermenge von etwa 15 m³/s und die Mittlere Ruhr eine von 8,4 m³/s führt.

Zukünftige Maßnahmen an der Mittleren und Unteren Ruhr, von der Einmündung der Möhne bis zur Mündung in den Rhein bei Duisburg-Ruhrort, haben zum Ziel, die ökologische Durchgängigkeit zu erreichen; Biotopentwicklungskonzepte und das 1998 aufgestellte Ruhrauenkonzept bilden hierfür die Grundlage. Retentionsflächen für Hochwasser sind allerdings wegen der Enge und intensiven Nutzung des Ruhrtals nur in sehr beschränktem Umfang zu gewinnen.



Bild 8:
Rheinhochwasser 1995
Lippemündung

Lippe

Die Lippe entspringt in Bad Lippspringe und mündet nach 230 km bei Wesel in den Rhein. Das Einzugsgebiet umfasst 4.882 km². Der Höhenunterschied zwischen Quelle und Mündung beträgt nur 123 m. Bei Niedrigwasser unter 10 m³/s am Pegel Hamm werden durch Einspeisung aus der Pumpwerkskette des Westdeutschen Kanalnetzes bis zu 4,5 m³/s der Lippe zugegeben. Der maximale Hochwasserabfluss liegt bei 396 m³/s am 03.11.1998 am Pegel Schermbeck.

Bereits im 13. Jahrhundert und ab dem 19. Jahrhundert führte die Wasserkraftnutzung für den Mühlenbetrieb zur Beeinträchtigung der Durchgängigkeit, zu einer Umgestaltung des Längsprofils und zu einer Änderung des Abflussvorganges. Heute existieren an der Lippe zwischen Lippborg und Wesel noch neun Wehranlagen zum Zwecke der Kühlwasserentnahme, der Speisung der Kanäle oder als Kulturstau. Im Jahr 1784 wurde versucht, der zunehmenden Verlandung im Mündungsbereich durch den Rheindurchstich Budericher Insel/Isaak entgegenzuwirken. Zwischen dem 17. und 19. Jahrhundert gab es erhebliche Anstrengungen, durch Begradigungen eine Schiffbarkeit zu erreichen.

Die Summe der wasserbaulichen Maßnahmen –und nicht zuletzt auch die Rheinsohlenerosion –verursachten starke Eintiefungen der Lippe in ihrer Aue. Diese Tiefenerosion hat zu Abflussverschärfungen geführt, da durch die höhere Kapazität des Flussbettes vorhandener Retentionsraum in den Auen nicht mehr genutzt wird. Dies führt bei Hochwasser zu größeren Spitzenwerten und zu beschleunigtem Abfluss.

Bergsenkungen sowie der zum Teil parallel verlaufende Datteln-Hamm-Kanal und Wesel-Datteln-Kanal sind verantwortlich für eine Einschränkung des Hochwasserprofils. Bergsenkungen erforderten auf 22 km Länge den Bau von Deichen ein- oder beidseitig der Lippe.

Zwei Talsperren gibt es im Lippe-einzugsgebiet: die Stevertalsperre für Trinkwassergewinnung ohne Rückhaltungsmöglichkeit für Hochwasser und die Aabachtalsperre. Im Einzugsgebiet der Oberen Lippe befinden sich 12 Hochwasserrückhaltebecken mit einem Stauraum von 17,59 Mio. m³.

Die negativen Einflüsse der Vergangenheit sollen zukünftig durch Umsetzung des Lippeauenprogrammes des Landes NRW gemindert werden. Wichtigste Maßnahme ist eine Entkoppelung der Sohlvertiefung von Rhein und Lippe durch Bau eines sohlstützenden Bauwerkes im Lippe-mündungsraum.

Zum anderen sollen durch Rückbau der Begradigungen, durch Bau von sohlstützenden Bauwerken zur Sohl-anhebung u. Ädie Retentionswirkungen im Einzugsgebiet und im Überschwemmungsgebiet verbessert werden.

5

5 Überprüfung der Hochwasserbemessungsgrundlagen für den Rhein in NRW

Im 1767 erlassenen Clever Deichreglement (Kapitel 4.2.2) wurde festgelegt, dass alle Banndeiche ... wenigstens einen rheinländischen Fuß höher als das höchste Wasser ... gebaut werden sollten. Die hinter dieser Aussage stehende Philosophie, Bemessungshochwasser aus höchsten bekannten Wasserständen zu ermitteln, ist bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hinein gültig geblieben. So wurde im Jahre 1977 erstmals das aus dem Extremereignis von 1926 abgeleitete Bemessungshochwasser für den Rhein unterhalb von Köln aufgrund von Wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen neu festgelegt.

Ein besonderes Problem hinsichtlich der zu ermittelnden Abflüsse bestimmter Jährlichkeiten ist neben der Auswahl geeigneter theoretischer Verteilungsfunktionen und Anpassungstests die Zusammenstellung der Wertekollektive.

- Es sind die gemessenen Wasserstände zu prüfen und zu vereinheitlichen (Nullpunktkorrekturen, Bereinigung von Stauwirkungen z.B. Eis τ -Umrechnungen wegen Lageveränderungen der Pegel etc.).
- Es sind abgesicherte Wasserstand-Abflussbeziehungen zu schaffen und deren zeitliche Gültigkeitsintervalle festzulegen.
- Gegebenenfalls sind die Daten zu homogenisieren, d. h. anthropogene Einflüsse auf das Abflussverhalten zu eliminieren.

Im Rahmen der Untersuchungen, die zu den hiermit vorgelegten Ergebnissen geführt haben, wurde der Versuch unternommen, Grundlagenmaterial für eine bestmöglich abgesicherte Ermittlung von Bemessungshochwassern bereitzustellen.

Dies erfolgte in zwei Schritten:

- Zunächst wurden Hochwasserscheitelabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten aus historischen Hochwasserscheitelwerten ermittelt (Kapitel 5.1).
- Es folgten in einem zweiten Schritt Untersuchungen zu den Auswirkungen des Gewässerausbau und der Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf im Rhein (Kapitel 5.2) sowie auf die Hochwasserabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (Kapitel 5.3 und 5.4).

5.1 Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen (HQ) bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (T) aus historischen Hochwasserscheitelwerten

HQ_T ist derjenige Scheitelabfluss, der in einer längeren Reihe von n aufeinander folgenden Jahren in der Zeitspanne von T Jahren einmal, somit insgesamt n/T mal, erreicht oder überschritten wird.

Der Wert HQ_T kann auch für Halbjahre (Winter und Sommer) gebildet werden; für Monate ist dies im Allgemeinen nicht sinnvoll. Bei der Ermittlung von HQ_T werden nur unabhängige Hochwasserscheitelwerte berücksichtigt. Dabei muss der Abfluss bzw. Durchfluss zwischen zwei benachbarten Hochwasserscheiteln mindestens bis auf die halbe Höhe des kleineren Scheitelwertes –bezogen auf das MQ der be-

trachteten Jahresreihe –abgesunken sein. Von dieser Bedingung kann abgewichen werden, wenn die benachbarten Scheitelwerte einen Abstand von mindestens sieben Tagen haben (Abbildung 5.1.1). Diese Bedingung ist eine notwendige Festlegung, die eine einheitliche Ermittlung gewährleisten soll. Sie dokumentiert nicht in jedem Fall die hydrologische Unabhängigkeit der einzelnen Hochwasserscheitelwerte voneinander. Es können partielle Serien oder/und Jahresreihen zugrunde gelegt werden. Bekannte historische Ereignisse außerhalb der verwendeten Zeitreihen sind bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Stichprobe ist auf Repräsentanz, Konsistenz und Homogenität zu prüfen [Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) und Bundesministerium für Verkehr (BMV), 1997].

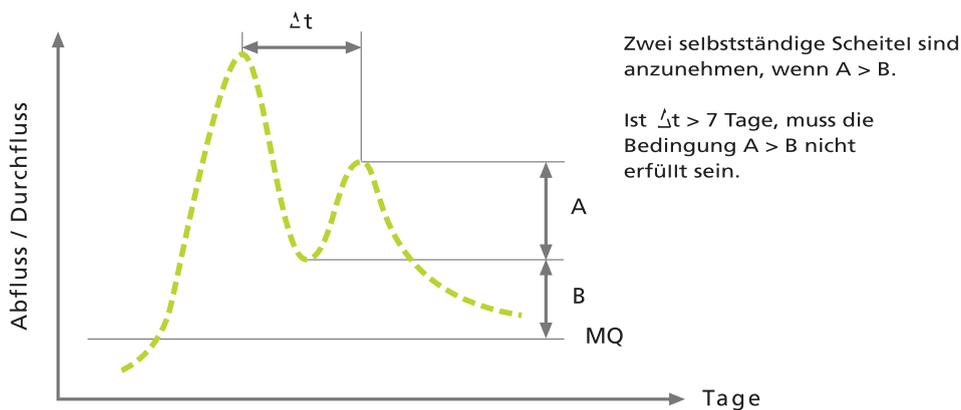


Abbildung 5.1.1: Kriterien für hydrologisch unabhängige Hochwasserscheitelwerte

5.1.1 Verfahrensweise

In Deutschland gibt es eingeführte Verfahren zur Berechnung von HQ_T . Sie finden vor allem durch Schriften des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1979 und 1999) in der Fachwelt Anwendung. Neben einer umfangreichen Auswahl unter theoretischen Verteilungen werden dort Verfahren zur Parameterschätzung und Tests zur Prüfung der Anpassung der Verteilungsfunktionen an die verschiedenen Stichproben angeboten. Für die Wahl der Stichproben selbst werden prinzipiell zwei Möglichkeiten genannt:

- jährliche Serien (a)
- partielle Serien (b)

a) Jährliche Serien umfassen als Stichproben je einen Wert pro Jahr. In der Regel handelt es sich dabei um die jeweils höchsten Scheitelabflüsse pro Einzeljahr, es können jedoch auch die Jahreshöchstwerte, behaftet mit einem besonderen Merkmal (Winter, Sommer, Schneeschmelze usw.) sein.

b) Partielle Serien bestehen in aller Regel aus mehr Werten als die Anzahl der Jahre, denen sie entstammen. Üblicherweise wird ein Schwellenwert festgelegt, über dem alle unabhängigen Scheitel Berücksichtigung finden.

Im Rahmen der Aktivitäten der HSK wurde Anfang der 70er Jahre eine davon abweichende Methode der Datengewinnung für die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten vereinbart und allen entsprechenden HSK-Untersuchungen zugrunde gelegt. Die BfG hat für die Pegel der WSV diese Methode übernommen.

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der je zwei höchsten Abflussscheitel für die Winter- und Sommerhalbjahre des Abflussjahres gemäß Pegelvorschrift (LAWA und BMV, 1997).
- Bildung von partiellen HQ-Serien für Winter, Sommer und Jahr für **n Jahre**.
- Alle Werte der jeweiligen Reihe ($n \times 2$ Scheitel für Winter und Sommer, $n \times 4$ Scheitel für Jahr) werden der Größe nach geordnet.
- Die n größten Werte der Reihe bilden die Kollektive für die Berechnung der Verteilungsfunktionen.
- Ermittlung der Abflüsse ausgewählter Jährlichkeiten (Tabelle für $T = 2$ Jahre bis 1.000 Jahre) unter Verwendung von neun theoretischen Verteilungsfunktionen.
- Auswahl der Werte durch Prüfung der theoretisch erreichten Anpassung und Vergleich der Kurven mit den Plotting Positions, mit T , ermittelt über die empirische Formel nach Cunnane ($T = \frac{N + 0,2}{R - 0,4}$), worin N die Werteanzahl und R der Rang der Werte in der Reihe ist.
- In der Regel zeigt sich die Verteilung gemäß LOG Pearson III als die für WSV-Pegel am Besten angepasste.

Zwar ergeben die Berechnungen Scheitelabflüsse bis zur Jährlichkeit $T = 1.000$ Jahre, doch ist zu berücksichtigen, dass Extrapolationen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen um so weniger sicher sind, je größer die ermittelte Wiederholungszeitspanne gegenüber der Beobachtungszeitspanne wird. Die doppelte bis höchstens zweieinhalbfache Länge der Beobachtungszeitspanne sollte die Obergrenze der Extrapolation darstellen. Höhere Jährlichkeiten haben nur noch die Qualität von Abschätzungen und sind als solche zu kennzeichnen.

Üblicherweise werden die Ergebnisse für die **hydrologischen Jahre** für Bemessungszwecke benutzt. Die Ergebnisse für die Halbjahre dienen im Allgemeinen lediglich als Grundlage für Sonderuntersuchungen und spezielle Bewertungen. Es ist möglich, die Jahresverteilung direkt aus den Kollektiven der Jahreshöchstwerte zu ermitteln oder als kombinierte Verteilung aus den Halbjahresergebnissen $P_{UK} = 1 - \{(1 - P_{UWI}) + (1 - P_{USO}) + (1 - P_{UWI}) \cdot (1 - P_{USO})\}$ zu berechnen.

Die Berechnungen der HQ_T für die Niederrheinstrecke von Bonn bis Rees, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden, wurden im April 1996 in der BfG durchgeführt. Grundlage waren die vier Jahreshöchstwerte.

5.1.2 Berechnete Hochwasserscheitelabflüsse ausgewählter Eintrittswahrscheinlichkeiten

Unterhalb der Moselmündung liegen an der deutschen Rheinstrecke vier Pegel (Andernach, Köln, Düsseldorf und Rees), für die seit vielen Jahrzehnten Abflüsse ermittelt werden. Zwischen diesen Pegeln sind weitere Messstellen eingeschoben, für die offiziell nur Wasserstände erhoben werden. Abflussmessungen

aus der Nachkriegszeit ermöglichen es jedoch, inzwischen auch hier Durchflüsse anzugeben.

Eine Zusammenstellung der Scheitelabflüsse, mit dem Ziel Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu bestimmen, erfordert die Plausibilisierung zeitlich aufeinander folgender Abflusskurven an den einzelnen Pegeln und der Abflusskurven benachbarter Pegel. Eine Abstimmung der Datenreihen ab 1901 erschien aussichtsreich, weshalb einheitlich das Scheitelabfluss-Kollektiv 1901 bis 1995 als Grundlage für die HQ-Berechnungen angestrebt und hinsichtlich der vier oben genannten Hauptpegel auch ohne größere Probleme möglich war.

Eine verlässliche Abflussermittlung am Pegel Bonn war nicht möglich. Für die Pegel Ruhrort, Wesel und Emmerich ergaben sich Schwierigkeiten, die für Ruhrort letztlich ausräumbar waren, für die Pegel Wesel und Emmerich jedoch hinsichtlich der Zeitreihe 1901 bis 1945 bestehen blieben. Es ergaben sich wie folgt ausreichend plausible Datenkollektive:

1901 bis 1995: Andernach, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Rees

1946 bis 1995: Wesel, Emmerich

Diesen Datenkollektiven entsprechend waren die HQ_T für fünf Pegel aus Werten einer 95er-Jahresreihe und für zwei Pegel aus Werten einer 50er-Jahresreihe ermittelbar. Um die Ergebnisse für alle Pegel vergleichbar zu machen, wurden die HQ_T für die Pegel mit den langen Reihen auch aus verkürzten Kollektiven (1946 bis 1995) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1.2.1 für ausgewählte Jährlichkeiten zusammengestellt. Da aus Wahrscheinlichkeitsberechnungen nur sinnvolle Ergebnisse zu erwarten sind, wenn die

5

berechneten Jährlichkeiten maximal die doppelte Länge der Datenreihe erreichen, können die Abflüsse für 200 Jahre (Reihe 1946 bis 1995) bzw. für 500 Jahre (Reihe 1901 bis 1995) jeweils nur als grobe Anhaltswerte betrachtet werden. Die entsprechenden Daten sind deshalb kursiv gedruckt. -Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind diese in Abbildung 5.1.2.1 entlang des Rheins Pegel für Pegel aufgetragen.

Aus der Grafik lässt sich erkennen, dass die Abflüsse gleicher Jährlichkeiten in Ruhrort bzw. Wesel die Maxima erreichen und dass sich in Düsseldorf systematisch niedrigere Werte als in Köln ergeben.

Das rheinabwärts unsystematische Schwanken der HQ-Werte gleicher Jährlichkeiten findet seine Entsprechung in der stromab unsystematischen Zu- oder Abnahme der Abflussscheitel.

Die Scheitelwerte von Hochwasserereignissen sind eine Funktion der Abflussfülle, der Weiterleitung durch die örtliche Geometrie und des Retentionsvermögens einzelner Gewässerabschnitte. Zwischen den Pegeln am Niederrhein können einerseits erhebliche Retentionseinflüsse wirksam sein; seitliche Zuflüsse bedingen andererseits nur unter bestimmten Voraussetzungen merkbare Scheiterhöhungen. -Dementsprechend kann nicht erwartet werden, dass Scheitelwerte desselben Hochwasserereignisses stromab grundsätzlich zunehmen oder zumindest gleich bleiben.

Tabelle 5.1.2.1:
Abflüsse [m³/s] ausgewählter Jährlichkeiten [Jahre] für sieben Pegel am Rhein zwischen Moselmündung und deutsch-niederländischer Grenze, ermittelt aus den Zeitreihen 1901 bis 1995 bzw. 1946 bis 1995

1) Für eine gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug. Deshalb sind die angegebenen Werte nur als Anhaltswerte zu verstehen.

HQ _T [m³/s]								
Zeitreihe	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95
Jährlichkeit	2		5		10		20	
Andernach	6600	7100	7860	8270	8740	9050	9620	9800
Köln	6770	7270	8020	8440	8900	9230	9770	10000
Düsseldorf	6820	7310	8050	8460	8900	9210	9710	9930
Ruhrort	6960	7410	8270	8630	9200	9470	10130	10290
Wesel		7320		8570		9450		10320
Rees	7010	7390	8270	8590	9160	9410	10050	10220
Emmerich		7350		8550		9380		10210

HQ _T [m³/s]								
Zeitreihe	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95 ¹⁾	1901 – 95 ¹⁾	1946 – 95
Jährlichkeit	50		100		200		500	
Andernach	10800	10790	11730	11550	12700	12320	14050	–
Köln	10950	11020	11880	11810	12840	12610	14180	–
Düsseldorf	10820	10870	11670	11590	12550	12310	13770	–
Ruhrort	11400	11380	12400	12220	13450	13100	14930	–
Wesel		11500		12420		13390		–
Rees	11260	11300	12220	12150	13230	13010	14630	–
Emmerich		11310		12170		13060		–

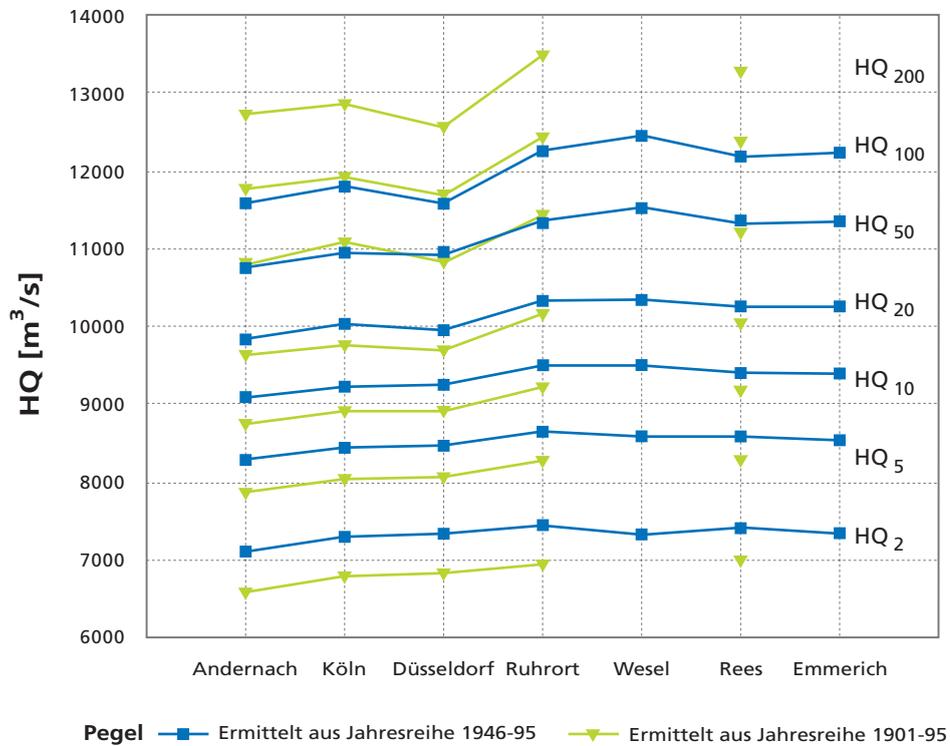


Abbildung 5.1.2.1:
Entwicklung der Abflüsse
ausgewählter Jährlichkeiten
entlang des Niederrheins
zwischen Andernach und
Emmerich

Darüber hinaus wird aus Abbildung 5.1.2.1 ersichtlich, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus den kurzen Reihen gegenüber denen aus den langen Reihen um das HQ_{50} als Drehpunkt verkippt sind. Dies bedeutet, die Abflüsse $< HQ_{50}$ zeigen bei den langen Reihen eine Tendenz zu kleineren Werten als die der kurzen Reihen; die Abflüsse $> HQ_{50}$ liegen für die langen Reihen dementsprechend tendenziell über denen aus den kurzen Reihen.

Ergänzende Berechnungen zeigen, dass die Mittelwerte der Scheitelabflüsse 1946 bis 1995 höher liegen als die Mittelwerte der Scheitelabflüsse 1901 bis 1950. Gleiches gilt für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen

der Reihe 1946 bis 1995 gegenüber 1901 bis 1950. Ein Vergleich der Scheitelwert-Kollektive ergibt zudem, dass die kleinsten in den Reihen 1946 bis 1995 enthaltenen Scheitelabflüsse um 220 bis 460 m^3/s größer sind als die minimalen Scheitelabflüsse in den Kollektiven 1901 bis 1995 und um 530 bis 820 m^3/s größer als die minimalen Scheitelabflüsse in den Kollektiven 1901 bis 1950. In Tabelle 5.1.2.2 sind die Ergebnisse der ergänzenden Berechnungen zusammengestellt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden aus anderen Untersuchungen gestützt, nach denen in den letzten 100 Jahren die Abflüsse an allen Rheinpegeln sowohl im Mittel als auch in den Extremen Tendenzen des Anstiegs zeigen.

5.1.3 Vorschlag für HQ_T -Werte als Grundlage für die Festlegung eines Bemessungshochwassers

Ziel der Extremwertstatistik ist es, zu Bemessungsabflüssen zu gelangen, die in den nächsten Jahren als gültige Richtwerte bei allen Planungen und Baumaßnahmen zugrunde gelegt werden können. Einerseits sollten die verwendeten Datenkollektive für derartige Statistiken im Sinne ausreichender Stabilität möglichst lange Zeiträume umfassen. Andererseits ist von den Daten eine möglichst weitgehende Homogenität zu verlangen. Der Konflikt aus beiden Forderungen vergrößert sich mit zunehmender Länge der Datenreihen.

Während sich die Inhomogenitäten infolge Veränderungen der Bettverhältnisse des Rheins und einiger großer Nebenflüsse durch Einsatz mathematischer Modelle noch herausrechnen lassen, ist das für die Veränderungen an allen anderen Gewässern und im Einzugsgebiet insgesamt nicht möglich.

Hochwasserablaufberechnungen an Rhein, Mosel und Saar lassen erwarten, dass langfristig von den Flussbaumaßnahmen an diesen Gewässern Wirkungen im Bereich der kleineren Hochwasser verbleiben werden, während die großen Hochwasser statistisch nach Größe und Häufigkeit kaum Änderungen erfahren. Insofern treffen die 50-Jahres-Kollektive der historischen Scheitelabflüsse (1946 bis 1995) tendenziell die derzeitigen Verhältnisse eher als die Daten aus den langen Reihen.

Da wegen der verbleibenden Unsicherheit der statistischen Verfahren und anderer möglicher Fehlerquellen die Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten nie exakt berechnet werden können, ist in jedem Fall eine abschließende Festlegung auf bestimmte Werte erforderlich. Diese muss auf sorgfältigen hydrologischen Überlegungen basieren und durch Diskussion mit allem beteiligten Sachverständigen abgesichert sein.

Tabelle 5.1.2.2:
Gegenüberstellung von HQ_T
und Kennwerten, ermittelt aus
den beiden Teilreihen 1901 bis
1950 und 1946 bis 1995

Pegel	Scheitelabflüsse [m ³ /s] der Jährlichkeiten [Jahre]												Mittel der Scheitelabflüsse [m ³ /s]			Niedrigste Scheitelabflüsse [m ³ /s]		
	2		5		10		20		50		100		im Kollektiv			im Kollektiv		
	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	Δ Q	01/50	46/95	Δ Q
Andernach	6000	7100	7290	8270	8260	9050	9290	9800	10760	10790	11970	11550	6380	7334	954	4950	5700	750
Köln	6140	7270	7420	8440	8380	9230	9380	10000	10800	11020	11970	11810	6511	7518	1007	5070	5890	820
Düsseldorf	6420	7310	7500	8466	8430	9210	9370	9930	10700	10870	11770	11590	6585	7525	940	5150	5860	710
Ruhrort	6410	7410	7780	8630	8810	9470	11060	10290	11450	11380	12730	12220	6817	7679	862	5250	6050	800
Wesel	--	7320	--	8570	--	9450	--	10320	--	11500	--	12420	--	7620	--	--	6030	--
Rees	6539	7390	7850	8590	8820	9410	9820	10220	11220	11300	12360	12150	6904	7660	756	5410	5940	530
Emmerich	--	7350	--	8550	--	9380	--	10210	--	11310	--	12170	--	7623	--	--	5940	--

Was die Tatsache anbetrifft, dass die Abflüsse gleicher Jährlichkeiten in Ruhrort bzw. Wesel ihr Maximum erreichen, so wurde es seinerzeit für schwierig gehalten, eine Abnahme der Abflüsse gleicher Jährlichkeiten den Betroffenen stromab verständlich zu machen. Ein erster Vorschlag enthielt HQ_T für Jährlichkeiten zwischen 10 und 500 Jahren. Als Maximum wurde ein Abfluss zwischen den Rechenwerten für Ruhrort und Wesel gewählt und ab Ruhrort für die Reststrecke konstant gehalten. Die Werte für Andernach bzw. Köln sollten jeweils auch für Bonn bzw. Düsseldorf gelten.

Die HSG NRW hat auf Grundlage der beschriebenen Untersuchungen und nach intensiver Diskussion hydrologisch begründete Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten erarbeitet. Diese sind in Tabelle 5.1.3.1 aufgeführt. Die Werte des Pegels Bonn wurden mit Bezug zum Pegel Andernach statistisch ermittelt und gelten bereits ab der Landesgrenze. Der Inhalt der Tabelle 5.1.3.1 wurde im August 1996 durch das Landesumweltamt NRW offiziell bekannt gemacht und ist eine hydrologische Grundlage auch für die noch festzulegenden Bemessungsabflüsse für den Rhein in NRW.

Pegel	Jährlichkeit [Jahre]	Durchfluss [m^3/s]
Bonn	100	11.700
	200	12.600
	500	14.000 ¹⁾
Köln	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200 ¹⁾
Düsseldorf	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200 ¹⁾
Ruhrort	100	12.400
	200	13.400 ¹⁾
	500	14.900 ¹⁾
Wesel ²⁾	100	12.400
	200	13.400
	500	14.900 ¹⁾
Rees	100	12.300
	200	13.300 ¹⁾
	500	14.800 ¹⁾
Emmerich ²⁾	100	12.200
	200	13.100
	500	14.600 ¹⁾

Tabelle 5.1.3.1:
Von der HSG NRW erarbeitete HQ_T für die Rheinpegel Bonn bis Emmerich.

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

²⁾ Nur Jahresreihe 1946 bis 1995; vor 1946 keine gesicherten Werte.

5.2 Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen auf historische Abflusswellen

Der Bau der Staustufen am Oberrhein, zwischen 1955 und 1977 sowie die ausgleichenden Retentionsmaßnahmen, die seit den 80er Jahren sukzessive realisiert werden, haben das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen verändert und werden es weiter verändern. Diese Einflüsse waren in den im Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungen unberücksichtigt geblieben. Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf mittels numerischer Simulation untersucht.

5.2.1 Berechnung des Wellenablaufs ausgewählter Hochwasser mit mathematischen Modellierungen

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

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

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

5.2.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP

Das synoptische Hochwasserablaufmodell SYNHP wurde in der Landesanstalt für Umweltschutz (LFU) Baden-Württemberg zu Beginn der 80er Jahre auf Grundlage eines im Rahmen

der HSK von der BfG entwickelten und für die Kommission betriebenen Modells zur Simulation der Hochwasserhältnisse am Oberrhein entwickelt und zur Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen 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 bis Köln ausgeweitet (BERG et al., 1990; BUSCH et al., 1993).

Das Modell SYNHP wie auch das Vorgängermodell gehören 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 höher gelegenen 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 so genannten Manöver (Schließung und Wiederöffnung der Turbinen der Rheinkraftwerke).

5.2.1.2 Das hydraulische 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 Gewässer- sohle, 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 Sommerdeich und Polder ebenso berücksichtigt werden können wie andere Bauwerke (Wehre, Schleusen, Pumpen etc.).

Bei der Kalibrierung des SOBEK-Modells Andernach bis 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. Den geologischen Verhältnissen 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.

5.2.1.3 Abflussganglinien ausgewählter Hochwasser

Das hier gewählte Verfahren zur Berechnung des Wellenablaufs im Rhein setzt 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.

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 bis 1980, die bereits Gegenstand der Untersuchungen der HSG für die Rheinstrecke Worms bis 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 bis 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 5.2.1.3.1 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 5.2.1.3.1). 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 1981 (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 HSG NRW für den Zeitraum 1873 bis 1972 zusammengestellt wurden und die seinerzeit zehn größten Hochwasser bei Worms und neun größten Hochwasser bei Maxau umfassten, zeigt, dass sich ein großer Teil der damals ausgewählten Oberrheinhochwasser im heutigen Hochwasserkollektiv wiederfindet.

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 dem Bericht 1221 der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) 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 im Bericht 1221 der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) 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 5.2.1.3.1) konnte auf umfangreiches Material zurückgegriffen werden, das im Laufe der letzten 25 Jahre im Rahmen unterschiedlicher Untersuchungen zusammengetragen worden war (HSK, 1978; HSG für die Rheinstrecke Worms bis Kaub, 1985; BUSCH und ENGEL, 1985 und HSG für die Rheinstrecke Kaub bis Rolandswerth, 1993). Diese wurden um die beiden Hochwasser 1993/1994 und Januar 1995 sowie um die Nebenflüsse am Rhein ab Andernach ergänzt (LAMMERSEN et al., 1999).

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 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.

Auf der Strecke Basel bis Andernach werden die folgenden vier Resteinzugsgebiete unterschieden:

1. Resteinzugsgebiet Basel bis Maxau
2. Resteinzugsgebiet Maxau bis Worms
3. Resteinzugsgebiet Worms bis Kaub
4. Resteinzugsgebiet Kaub bis Andernach

Zur Ermittlung der Abflüsse aus den Resteinzugsgebieten wurden zunächst Abflusssummen aus den vorhandenen Abflussganglinien an den Rhein- und Rheinzufusspegeln berechnet. Für jeden der vier 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. Nähere Erläuterungen zur Zusammenstellung auch dieser Daten sind vor allem dem Bericht der HSG für die Rheinstrecke Kaub bis 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 weitere Resteinzugsgebiete zu berücksichtigen.

Ereignis			HSK	HSG	BfG	HSG	Aktuelle Untersuchung
Nr.	Name	Zeitraum	(1978)	Worms- Kaub (1985)	(Busch, N. und Engel, H., 1987)	Kaub-Rolands- werth (1993)	[Rang in der Hoch- wasserstatistik Köln 1901 – 1997]
	Nov/Dez 1882	22.11.82-05.12.82					
	1882/1883	23.12.82-20.01.83					
	Mrz 1896	04.03.96-30.03.96					
1	1918/1919	21.12.18-14.01.19					57
2	1919/1920	21.12.19-10.01.20					12
3	Jan 1920	10.01.20-30.01.20					4
4	Apr/Mai 1924	28.04.24-20.05.24					53
5	Okt/Nov 1924	30.10.24-17.11.24					10
6	1925/1926	20.12.25-15.01.26					1
	Mai 1930						
7	Nov/Dez 1930	16.11.30-09.12.30					16
8	Feb/März 1937	17.02.37-08.03.37					41
9	Jan/Febr 1941	20.01.41-09.02.41					20
10	Mrz 1942	10.03.42-02.04.42					17
	Juni 1946	21.06.46-08.07.46					
11	1947/1948	26.12.47-13.01.48					8
12	Jan 1948	13.01.48-29.01.48					19
	Juli 1948						
13	Mrz/Apr 1952	19.03.52-12.04.52					39
14	1952/1953	15.12.52-04.01.53					27
	Juni/Juli 1953						
15	Jan 1955	10.01.55-30.01.55					11
16	Mrz 1956	01.03.56-17.03.56					34
17	Feb/Mrz 1957	25.02.57-12.03.57					45
18	Feb 1958	05.02.58-22.02.58					24
19	Feb/Mrz 1958	22.02.58-10.03.58					14
	Juni 1965						
20	Dez 1965	03.12.65-25.12.65					30
	Sept 1968						
21	Feb 1970	02.02.70-20.02.70					32
22	Feb/Mrz 1970	19.02.70-08.03.70					6
23	Mai 1970	08.05.70-26.05.70					23
	Nov 1972						
24	Feb 1977	05.02.77-18.02.77					76
25	Feb/Mrz 1977	19.02.77-08.03.77					47
26	Mai/Juni 1978	20.05.78-05.06.78					56
27	Feb 1980	31.01.80-20.02.80					13
28	1981/1982	29.12.81-21.01.82					18
29	Apr 1983	04.04.83-25.04.83					7
30	Mai/Juni 1983	20.05.83-08.06.83					5
31	Feb 1984	29.01.84-18.02.84					15
32	Mrz/Apr 1988	11.03.88-10.04.88					9
33	Feb 1990	11.02.90-28.02.90					26
34	1993/1994	01.12.93-31.01.94					3 + 21
35	Jan 1995	11.01.95-01.03.95					2

Weitere Hochwasser:

5 zwischen 1946 und 1955

9 zwischen 1980 und 1986

Tabelle 5.2.1.3.1:
Auswahl historischer
Hochwasser

5.2.1.4 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 4 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 5.2.1.4.1 zusammengefasst.

Bezeichnung des Ausbauzustandes	Beschreibung des Ausbauzustandes	
	am Oberrhein	am Niederrhein
<i>Zustand 1955</i>	Zustände vor Ausbau des Oberrheins mit Staustufen	heutiger Zustand am Niederrhein
<i>Zustand 1977</i>	Zustände nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, ohne Retentionsmaßnahmen	
<i>Zustand heute</i>	Zustände nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit Teilmaßnahmen zur Retention am Oberrhein	
<i>Zustand geplant</i>	Zustände 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

Tabelle 5.2.1.4.1:
Bei der Modellierung betrachtete Zustände

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. Dabei werden im *Zustand heute* 116,3 Mio. m³ und im *geplanten Zustand* 263 Mio. m³

Speicherkapazität berücksichtigt. Einzelheiten zu diesen Retentionsmaßnahmen und die Steuerkriterien sind dem Bericht der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) zu entnehmen.

Für den Rheinabschnitt Andernach bis 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 5.2.1.4.1).

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 werden insgesamt neun Rückhaltemaßnahmen berücksichtigt, von denen zwei (Köln Langel und Worringer Bruch) als gesteuerter Polder (Taschenpolder) und die übrigen sieben Maßnahmen als Flutpolder (Deichrückverlegungen) geführt werden (Tabelle 5.2.1.4.2). 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 dargestellt. Zu den hier beschriebenen Untersuchungen wird in Absprache mit den zuständigen Wasserbehörden jedoch bewusst eine Variante gewählt, die zum Zeitpunkt der Modellerstellung Flächen, die als Polder genutzt werden könnten, berücksichtigt und somit Chancen zu ihrer Realisierbarkeit aufwies. Dabei handelt es sich um ein Minimal-Szenario mit nur geringen Auswirkungen auf Hochwasserscheitel in Rees und Lobith (VAN 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.

Tabelle 5.2.1.4.2:
Die im Modell SOBEK
berücksichtigten geplanten
Retentionsmaßnahmen am
Niederrhein

	Überflutungsfläche/ Speichervolumen (Deutsche Kommission zum Schutze des Rheins, 1997)	Sobek-Profile		
		Flusskilometer Profilname	berücksichtigte Überflutungsfläche	Berechnet als Taschenpolder (TP) oder Flutpolder (FP)
Bylerward	720 ha / 30 Mio m ³	848,5 -849,5 Dornick	231 ha	FP
Lohrwardt	500 ha / 20 Mio m ³	832,5 -833,5 Niedermörmter	300 ha	FP
Bislicher Insel	1100 ha / 50 Mio m ³	818,5 -819,5 Flüren	50 ha	FP
Orsoy Land	220 ha / 10 Mio m ³	802,5 -803,5 Mehrum	202 ha	FP
Mündelheim	150 ha / 5 Mio m ³	765,5 -766,5 Hohenbudberg	92 ha	FP
Ilvericher Bruch	600 ha / 25 Mio m ³	750,0 -754,0	-	-
Itter-Himmelsgeist	60 ha / 2 Mio m ³	726,5 -727,5 Uedesheim	50 ha	FP
Monheim	200 ha / 8 Mio m ³	712,5 -713,5 Monheim	200 ha	FP
Worringer Bruch	600 ha / 13 Mio m ³	705,5 -706,5 Hitdorf	245 ha	TP
Köln-Langel	500 ha / 10 Mio m ³	669,5 -670,5 Wesseling	408 ha	TP
Niederkassel	35 ha / 1 Mio m ³	669,0 -672,0	-	-
Summe	4685 ha / 174 Mio m ³		1778 ha	

5.2.2 Simulationsergebnisse

Als Ergebnis der Simulation liegt für jeden der drei Pegel Köln, Rees und Lobith eine Serie von 35 Hochwasserganglinien je Zustand vor. Tabelle 5.2.2.1 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 die Abflussscheitel unabhängig vom Ausgangswert. 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 zu kurzer Vorhersagezeiten und wegen teilweise nur bei Hochwasser vor Ort funktionierender Rückhaltmaßnahmen) durch Retention am Oberrhein nicht oder kaum gedämpft werden. Die Hochwassergenese mit ihrer ausgeprägten Regionalität im Rheineinzugsgebiet ist hier der entscheidende Faktor.

Vereinzelt kann es zu geringen Verschärfungen der Abflussscheitelwerte durch 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 Hochwasserscheitel so erfolgt, dass die dadurch hervorgerufene Abflusserhöhung rheinabwärts auf die Hochwasserscheitel größerer Nebenflüsse trifft.

Die Verkürzung der Laufzeit der Hochwasserwellen im Oberrhein als Folge des beim Oberrheinausbau verloren gegangenen Retentionsraums ist die Hauptursache für die Hochwasserverschärfung (HSK, 1978). Die Hochwasserscheitel des Rheins treffen 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

5

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 Tabellen 5.2.2.2 und 5.2.2.3 zusammengefasst. Die dort wiedergegebenen Abflussscheitel verhalten sich ähnlich wie die am Pegel Rees. Auf weitere Erläuterungen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 5.2.2.1:
Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse 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	
		Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	
HW [Bezeichnung]	(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/Feb 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

Köln	Datum	Messung Q [m³/s]	Simulation				Differenzen zwischen den Zuständen			
			Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	1977 - 1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HW [Bezeichnung]		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]
1918/1919	03.01.19	6370	6425	6748	6718	6681	323	-30	-67	256
1919/1920	01.01.20	8980	9018	9337	9243	9145	319	-94	-192	127
Jan 1920	16.01.20	10700	10641	10951	10958	10847	310	7	-104	206
Apr/Mai 1924	06.05.24	6550	6412	6603	6630	6558	191	27	-45	146
Okt/Nov 1924	05.11.24	9570	9603	9797	9797	9728	194	0	-69	125
1925/1926	01.01.26	11100	10789	11021	11021	10990	232	0	-31	201
Nov/Dez 1930	25.11.30	8380	8482	8581	8581	8543	99	0	-38	61
Feb/Mrz 1937	25.02.37	7070	7162	7372	7372	7323	210	0	-49	161
Jan/Feb 1941	28.01.41	7890	7826	7918	7918	7901	92	0	-17	75
Mrz 1942	21.03.42	8050	8198	8239	8239	8229	41	0	-10	31
1947/1948	02.01.48	9600	9569	10265	10252	10136	696	-13	-129	567
Jan 1948	17.01.48	7900	7732	7720	7720	7710	-12	0	-10	-22
Mrz/Apr 1952	01.04.52	7160	7130	7102	7102	7101	-28	0	-1	-29
1952/1953	24.12.52	7620	7613	7645	7645	7608	32	0	-37	-5
Jan 1955	19.01.55	9550	9881	10324	10009	9964	443	-315	-360	83
Mrz 1956	06.03.56	7350	7238	7764	7764	7713	526	0	-51	475
Feb/Mrz 1957	28.02.57	6810	6812	7580	7504	7490	768	-76	-90	678
Feb 1958	12.02.58	7720	7789	8141	8141	8080	352	0	-61	291
Feb/Mrz 1958	27.02.58	8690	8764	8902	8910	8889	138	8	-13	125
Dez 1965	08.12.65	7490	7445	7423	7423	7398	-22	0	-25	-47
Feb 1970	12.02.70	7460	7308	7378	7377	7377	70	-1	-1	69
Feb/Mrz 1970	25.02.70	9740	9778	10137	10120	10064	359	-17	-73	286
Mai 1970	15.05.70	7730	7430	7740	7740	7730	310	0	-10	300
Feb 1977	14.02.77	5890	5787	6161	6183	6233	374	22	72	446
Feb/Mrz 1977	23.02.77	6760	6914	6861	6861	6856	-53	0	-5	-58
Mai/Juni 1978	26.05.78	6370	6078	6401	6355	6315	323	-46	-86	237
Feb 1980	08.02.80	8820	8614	9084	9082	9043	470	-2	-41	429
1981/1982	08.01.82	8030	7620	7745	7745	7707	125	0	-38	87
Apr 1983	14.04.83	9690	9345	9888	9765	9707	543	-123	-181	362
Mai/Juni 1983	29.05.83	9910	9357	9953	9827	9743	596	-126	-210	386
Feb 1984	10.02.84	8500	8345	8589	8589	8532	244	0	-57	187
Mrz/Apr 1988	29.03.88	9580	9710	10022	9907	9888	312	-115	-134	178
Feb 1990	18.02.90	7670	7723	8336	8285	8177	613	-51	-159	454
1993/1994	24.12.93	10800	10792	10988	10988	10911	196	0	-77	119
Jan 1995	30.01.95	10940	10761	10852	10841	10815	91	-11	-37	54
Mittelwert						271	-27	-70	201	

Tabelle 5.2.2.2:
Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Köln

5

Tabelle 5.2.2.3:
 Gemessene und für unterschiedliche Zustände in
 Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasser-
 scheidelabflüsse für
 den Pegel Lobith

Lobith	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]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]
		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(2 - 1)	(3 - 2)	(4 - 2)	(4 - 1)
1918/1919	04.01.19	7075	6664	6896	6911	6883	232	15	-13	219
1919/1920	02.01.20	10000	9449	9577	9495	9420	128	-82	-157	-29
Jan 1920	18.01.20	11365	11093	11394	11402	11299	301	8	-95	206
Apr/Mai 1924	08.05.24	6715	6770	6898	6906	6860	128	8	-38	90
Okt/Nov 1924	07.11.24	9300	9637	9812	9812	9735	175	0	-77	98
1925/1926	04.01.26	12280	11473	11694	11694	11634	221	0	-60	161
Nov/Dez 1930	27.11.30	9075	8858	9005	9005	8964	147	0	-41	106
Feb/Mrz 1937	28.02.37	7365	7354	7557	7557	7497	203	0	-60	143
Jan/Feb 1941	30.01.41	7940	7612	7735	7735	7705	123	0	-30	93
Mrz 1942	23.03.42	8475	8427	8431	8430	8416	4	-1	-15	-11
1947/1948	04.01.48	9785	9702	10231	10224	10117	529	-7	-114	415
Jan 1948	18.01.48	~	8100	8104	8104	8079	4	0	-25	-21
Mrz/Apr 1952	03.04.52	7165	7040	7019	7019	7015	-21	0	-4	-25
1952/1953	27.12.52	7605	7858	7987	7987	7927	129	0	-60	69
Jan 1955	21.01.55	9510	9927	10328	10088	10048	401	-240	-280	121
Mrz 1956	08.03.56	7610	7617	8060	8060	8007	443	0	-53	390
Feb/Mrz 1957	03.03.57	6905	7079	7807	7729	7695	728	-78	-112	616
Feb 1958	14.02.58	~	7765	8024	8024	7959	259	0	-65	194
Feb/Mrz 1958	01.03.58	9120	9256	9370	9378	9338	114	8	-32	82
Dez 1965	09.12.65	7108	7706	7732	7732	7687	26	0	-45	-19
Feb 1970	13.02.70	~	7360	7390	7388	7388	30	-2	-2	28
Feb/Mrz 1970	27.02.70	9850	10522	10780	10759	10697	258	-21	-83	175
Mai 1970	17.05.70	7328	7499	7775	7775	7753	276	0	-22	254
Feb 1977	15.02.77	~	5926	6249	6266	6282	323	17	33	356
Feb/Mrz 1977	24.02.77	6279	6946	6940	6940	6924	-6	0	-16	-22
Mai/Juni 1978	29.05.78	6341	6264	6656	6610	6561	392	-46	-95	297
Feb 1980	09.02.80	8811	9262	9630	9629	9569	368	-1	-61	307
1981/1982	10.01.82	7931	8018	8122	8123	8081	104	1	-41	63
Apr 1983	15.04.83	9323	9359	9817	9713	9641	458	-104	-176	282
Mai/Juni 1983	31.05.83	9707	9495	10043	9920	9798	548	-123	-245	303
Feb 1984	11.02.84	8697	8655	8803	8803	8753	148	0	-50	98
Mrz/Apr 1988	30.03.88	10274	10572	10852	10758	10716	280	-94	-136	144
Feb 1990	20.02.90	7028	7418	8156	8117	7973	738	-39	-183	555
1993/1994	25.12.93	11039	11098	11284	11284	11202	186	0	-82	104
Jan 1995	31.01.95	11885	11847	11934	11930	11891	87	-4	-43	44
Mittelwert							242	-22	-74	168

~ es liegen keine Werte vor

5.3 Hochwasserscheitelabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Hochwasserscheitelwerten

Grundlage der Festlegung eines Bemessungsabflusses zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Ermittlung von Scheitelabflüssen unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeiten. 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.

5.3.1 Untersuchungsmethode

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 Tabelle 5.3.1.1) 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 Korrelationsbetrachtungen 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.

Köln			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,0168 * Q_{1955} + 131,38$	0,9784
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9785 * Q_{1977} + 112,40$	0,9954
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9727 * Q_{1977} + 163,94$	0,9977
Rees			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,0043 * Q_{1955} + 205,42$	0,9852
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9892 * Q_{1977} + 33,163$	0,9975
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9807 * Q_{1977} + 98,821$	0,9985
Lobith			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,002 * Q_{1955} + 224,28$	0,9847
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9894 * Q_{1977} + 31,761$	0,9976
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9801 * Q_{1977} + 101,91$	0,9985

Tabelle 5.3.1.1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Simulationsergebnissen der unterschiedlichen Zustände

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 Tabelle 5.3.1.1). 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 $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Maxau. Alle anderen Hochwasser finden in die Korrelationsanalyse keinen Eingang. Hier wird die Hochwassergenese in eingeschränktem Umfang berücksichtigt.

Entsprechend gilt der regressive 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 Tabelle 5.3.1.1). Hierbei werden alle Ereignisse mit in die Korrelationsbetrachtungen eingeschlossen, weil die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Maxau den Schwellenwert von $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen bzw. überschreiten. Die durch Regionalität geprägte Genese der Hochwasser kann auch hier nicht berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der durch die Korrelationsanalyse 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 homogenisiert.

Zunächst wird die historische Datenreihe auf den *Zustand 1977* 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 dies bei den Hochwassern 1993/1994 und Januar/Februar 1995 nicht geschah, weil die Kriterien dazu nicht erfüllt waren. 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 sechs Staustufen zwischen Marckolsheim und Iffezheim darstellt, muss eine Übergangsrechnung durchgeführt werden. Dabei wird angenommen, dass der Übergang zwischen dem *Zustand 1955* und *1977* linear erfolgte. Diese Annahme ist insofern realistisch, als die Staustufen in regelmäßigen Zeitabständen fertiggestellt wurden. Tabelle 5.3.1.2 fasst die wesentlichen Schritte der Homogenisierung auf den *Zustand 1977* zusammen.

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, sondern die auf den *Zustand 1977* homogenisierten Reihen. Details sind in Tabelle 5.3.1.3 zusammengefasst.

Zeitraum	Bezeichnung der Zustände	Vorgang der Homogenisierung
Bis 1955	<i>Zustand 1955</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1] ¹⁾
1956 bis 1977	Übergang zwischen <i>Zustand 1955</i> und <i>Zustand 1977</i>	<i>Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1] unter Berücksichtigung des linearen Übergangs zwischen Zustand 1955 und Zustand 1977¹⁾</i>
1977 bis 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	<i>Ca. Zustand heute</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der nach <i>Zustand 1977</i> aufgelösten Regressionsgleichung [2] ¹⁾

Tabelle 5.3.1.2:
Homogenisierung auf den Zustand 1977 (Vorgehen)

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.

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⁾ .
1956 bis 1977	
1977 bis 1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand heute</i> erfolgt nur für die Werte, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3.800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, da nur die Hochwasser, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3.800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, einen veränderten Wellenablauf aufweisen können.
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⁾ .
1956 bis 1977	
1977 bis 1997 auch Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand geplant</i> erfolgt für alle Werte, da die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Worms den Schwellenwert von 3.800 m ³ /s erreichen, sondern auch solche, die am Oberrhein kein Hochwasser erzeugt haben.
Homogenisierung auf den <i>Zustand 1955</i>	
Bis 1955	Historische Daten
1956 bis 1977	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der (nach <i>Zustand 1955</i> aufgelösten) Regressionsgleichung [1] ¹⁾
1977 bis 1997 Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand 1955</i> erfolgt auch für alle Werte.

Tabelle 5.3.1.3:
Homogenisierung auf die Zustände heute, geplant und 1955 (Vorgehen)

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.

5

Für jeden Pegel ergeben sich vier bezüglich der vier Zustände homogene Datenreihen, die nun dem üblichen Verfahren der Hochwasserstatistik unterzogen werden können. Für die Pegel Köln und Rees erfolgt dies nach der im Bereich der WSV üblichen Methode (Kapitel 5.1). Die Statistik für den Pegel Lobith wird nach den in den Niederlanden üblichen Verfahren durchgeführt. Die Beschreibung der Methode und der Ergebnisse ist Gegenstand von Kapitel 6.

5.3.2 Ergebnisse für die Pegel Köln und Rees

Tabelle 5.3.2.1 fasst die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Hochwasserscheitelabflüsse der homogenisierten Datenreihen für den Pegel Rees und den Pegel Köln zusammen. 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.

Erwartungsgemäß ist auch die Tatsache, dass bei beiden Pegeln für alle Jährlichkeiten die Abflussscheitelwerte des *Zustandes 1955* am niedrigsten sind, die des *Zustand 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 5.3.2.2). Hier wird augenscheinlich, dass der Aus-

Tabelle 5.3.2.1:
Hochwasserscheitelabflüsse (berechnete Ergebnisse) unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Ausbauzustände 1955, 1977, heute und geplant an den Pegeln Köln und Rees

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

Ergebnisse der Hochwasserstatistik – Berechnete Werte –										
Jährlichkeit [Jahre]	Historische Datenreihe	Pegel Köln				Pegel Rees				
		Homogenisierte Reihe				Historische Datenreihe	Homogenisierte Reihe			
		Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant		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]	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

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 [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/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

Tabelle 5.3.2.2:
Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Ausbaustände 1977, heute und geplant gegenüber Zustand 1955 bzw. 1977 an den Pegeln Köln und Rees

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

bau 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 verbleibt. Dabei ist die verbleibende Restverschärfung am Pegel Köln etwas höher als am Pegel Rees. Bei beiden Pegeln nimmt die Restverschärfung mit zunehmender Jährlichkeit ab.

5.4 Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltmaßnahmen auf Modellhochwasserwellen

Die Basis für die Hochwasserstatistik für die Pegel Köln und Rees ist ein Abflussdatenkollektiv aus dem Zeitraum 1901 bis 1997. 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. Inwieweit das Gewässersystem des Rheins bei Hochwasserabflüssen von Jährlichkeiten zwischen 200 bis 1000 bzw. 1250 Jahren wie bei kleineren Abflüssen reagiert und ob die Retentionsmaßnahmen bei allen Abflüssen 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.

5.4.1 Untersuchungsmethode

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 zurzeit nicht möglich, da Niederschlag-Abfluss-Modelle gekoppelt mit Wellenablaufmodellen für das ganze Rheingebiet noch nicht vorliegen. Zudem stehen auch noch keine Aussagen über mögliche großräumige meteorologische

Extremsituationen zur Verfügung. Letzteres wäre nötig, um Modellhochwasser durch eine zeitliche Verschiebung historischer Nebenflussganglinien zu entwickeln, weshalb auch auf dieses Verfahren verzichtet wird. Stattdessen 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 der Scheitelabfluss des jeweils ausgesuchten Hochwassers am Pegel Rees den Scheitelwert HQ_{200} , HQ_{500} bzw. HQ_{1000} erreicht. Dabei wird jeweils eine spezifische Grundlast der Größe des kleinsten Abflusses jeder Ganglinie von der Abflusserhöhung ausgenommen. Da es sich hierbei nicht unbedingt um den Basisabfluss im hydrologischen Sinne handelt, wird dieser Begriff bewusst vermieden. Zusätzlich werden bekannte Maxima der Nebenflüsse bzw. des Rheins bei Basel im Sinne möglicher Abflussgrenzen berücksichtigt (vgl. LAMMERSEN et al., 1999), d. h. bei Erreichen dieser Abflüsse wird die Vergrößerung der betroffenen Gewässer beendet.

Abbildung 5.4.1.1:
Entwicklung von Modellhochwassern durch Erhöhung der Nebenflussganglinien ohne deren zeitliche Verschiebung

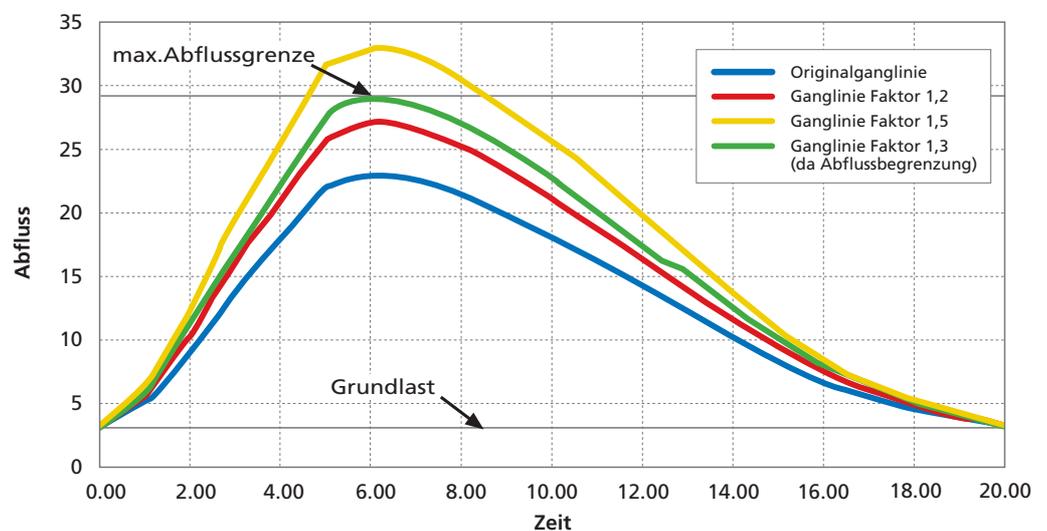


Abbildung 5.4.1.1 macht das angewandte Verfahren der Modellhochwasserentwicklung deutlich.

Als Grundlage der Modellhochwasserentwicklung werden historische Hochwasserganglinien gewählt, die ein großes Spektrum möglicher Hochwasserereignissen 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 Scheitelabflüsse von $HQ_{200} = 13.300 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ_{500} = 14.700 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw.

$HQ_{1000} = 15.800 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden.

Alle Modellhochwasser werden im *Zustand 1977* entwickelt. Es wird also davon ausgegangen, dass der Oberrhein mit Staustufen ausgebaut ist und Retentionsmaßnahmen nicht eingeleitet werden. Zur Erläuterung der wichtigsten Parameter der Modellhochwasser und die zur Berechnung der Modellhochwasser benutzten Faktoren siehe LAMMERSEN et al., 1999.

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, handelt es sich um einen iterativen Vorgang. Abbildung 5.4.1.2 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

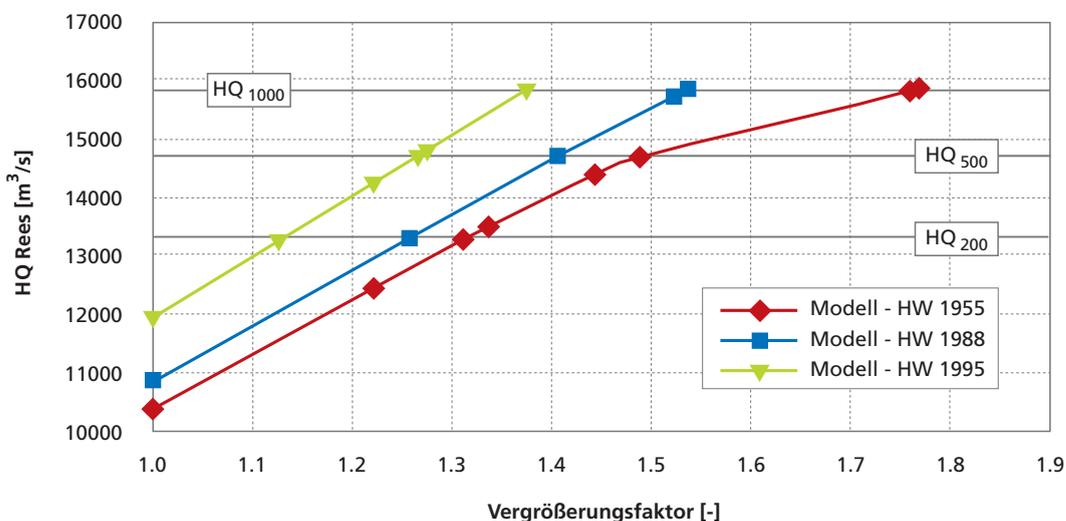


Abbildung 5.4.1.2: Abhängigkeit der Scheitelabflüsse in Rees von den gewählten Faktoren zur Vergrößerung der Zuflussganglinien

einem oder mehreren Nebenflüssen der maximal mögliche Abfluss erreicht ist, noch bevor sich der gewünschte Scheitel am Zielpegel 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, führt zu einer deutlichen Abweichung des Zusammenhanges zwischen gewähltem Vergrößerungsfaktor und Scheitelabfluss von der Linearität am Pegel Rees.

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 zwischen Iffezheim und Neckarmündung bei Abflüssen über $5.400 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Maxau und zwischen Neckar- und Mainmündung bei $6.300 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Worms zu Deichüberflutungen kommt. Dabei wird die Ganglinie beim Überschreiten dieser Werte gekappt.

5.4.2 Ergebnis

Tabelle 5.4.2.1 zeigt die für den Pegel Rees 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 Ausbau-

maßnahmen (Differenz *Zustand 1977 bis 1955*) verschärfend auf die Scheitelwerte aus. Ebenso ist die Hochwasserscheitel dämpfende Wirkung der heute schon realisierten Retentionsmaßnahmen (Differenz *Zustand heute bis 1977*) und die der geplanten Retentionsmaßnahmen (Differenz *Zustand geplant bis 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 nördlichen Rheingebiet hervorgerufen wurde.

Die durch die unterschiedlichen Regionalitäten geprägten Genesen der Hochwasser werden auch bei der Betrachtung des jeweils in Anspruch genommenen Retentionsraums am Oberrhein deutlich (Tabelle 5.4.2.2). Während bei dem Modellhochwasser 1955 die Retentionsräume am Oberrhein (bis Worms) mit einem Gesamtvolumen von rd. 120 Mio. m^3 bzw. 260 Mio. m^3 vollständig und bei dem Modellhochwasser 1988 weitestgehend ausgeschöpft werden, kommt bei dem Modellhochwasser 1995 der größte Teil der Rückhaltevolumina nicht zum Einsatz.

Deichüberflutungen führen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel. Dies zeigen die Ergebnisse in Tabelle 5.4.2.3 (Differenzen zwischen den Hochwasserscheiteln der Simulationen mit Deichüberflutungen und denen ohne Deichüberflutung). Besonders deutlich wird dies bei den Berechnungen mit den Modellhochwassern 1955. In allen zwölf

Modellhochwasser 1955									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1955	Zustand				Modell- HW 1955	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	12538	13300	12888	12368	HQ 200	762	-412	-932	-170
HQ 500	13888	14698	14422	13858	HQ 500	810	-275	-839	-29
HQ1000	14953	15791	15557	14993	HQ1000	839	-234	-799	40

Modellhochwasser 1988									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1988	Zustand				Modell- HW 1988	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	12674	13301	12948	12679	HQ 200	627	-353	-621	6
HQ 500	13935	14701	14348	14298	HQ 500	766	-353	-402	363
HQ1000	14977	15811	15501	15005	HQ1000	834	-311	-807	27

Modellhochwasser 1995									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1995	Zustand				Modell- HW 1995	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	13173	13297	13292	13272	HQ 200	124	-5	-25	100
HQ 500	14421	14697	14611	14593	HQ 500	276	-87	-104	171
HQ1000	15527	15812	15821	15795	HQ1000	285	9	-17	268

Tabelle 5.4.2.1:
Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees; Varianten ohne Deichüberflutung am Oberrhein

	Modell-HW 1955 Zustand		Modell-HW 1988 Zustand		Modell-HW 1995 Zustand	
	heute	geplant	heute	geplant	heute	geplant
HQ 200	117,61	236,98	95,74	141,88	17,22	31,87
HQ 500	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

Tabelle 5.4.2.2:
Die während der Modellhochwasserereignisse in Anspruch genommenen Retentionsvolumina am Oberrhein [Angaben in Mio. m³]

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 innerhalb der Abflusskapazität zwischen den Deichen, so dass es zu keiner weiteren Scheitelabflachung kommt. Bei allen Berechnungen mit den Modellhochwassern 1995 tritt keine Deichüberflutung ein.

5

Tabelle 5.4.2.3:
Deichüberflutungen am
Oberrhein und deren Aus-
wirkungen auf die Hoch-
wasserscheitel am Pegel Rees
(Differenz mit – ohne
Deichüberflutung); Modell-
hochwasser 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
HQ 200	W	M/W	M/W	M/W	HQ 200	-305	-642	-404	-176
HQ 500	M/W	M/W	M/W	M/W	HQ 500	-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
HQ 200	nein	W	nein	nein	HQ 200	0	-44	0	0
HQ 500	nein	M/W	W	W	HQ 500	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
HQ 200	nein	nein	nein	nein	HQ 200	0	0	0	0
HQ 500	nein	nein	nein	nein	HQ 500	0	0	0	0
HQ1000	nein	nein	nein	nein	HQ1000	0	0	0	0

Zusammenfassend ergibt sich:

- Sowohl die geplanten als auch die bereits durchführbaren Retentionsmaßnahmen haben bei extremen Hochwassern Einfluss auf die Hochwasserscheitel am Pegel Rees.
- Der Einfluss ist abhängig von der Hochwassergenese: Deutlich entschärfend wirken die Maßnahmen auf Hochwasser, deren Entstehung im Oberrheingebiet liegt. Weniger deutlich bis vernachlässigbar sind die Effekte bei Hochwassern, die im Wesentlichen dem nördlichen und mittleren Einzugsgebiet entstammen.
- 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 entstandenen Hochwasser, für die die Hochwassergenese nicht berücksichtigt wird und damit auch nicht die spezifische Effektivität der Maßnahmen bei extremen Abflüssen.

5.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus Kapitel 5.1 bis 5.4 für die Bemessungsgrundlagen

Das Bemessungshochwasser (BHQ) ist nach dem Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1989) das Ereignis, das der Dimensionierung einer Hochwasserschutzanlage dient. Als Grundlage zur Festlegung von Bemessungshochwassern wird heute die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten bzw. Wiederholungszeitspannen der Hochwasserabflüsse herangezogen. Die 1990 durch das jetzige MUNLV NRW gegründete HSG NRW hat für die Hauptpegel am Rhein zwischen Andernach und Emmerich Abflüsse zu den Jährlichkeiten 100, 200 und 500 Jahren erarbeitet und abgestimmt (Tabelle 5.1.3.1), die als Grundlage der Neufestlegung des Bemessungshochwassers am Niederrhein dienen können (vgl. Kapitel 5.1).

Die bis 1996 hierfür von der HSG NRW durchgeführten Studien ließen mögliche Auswirkungen anthropogener Eingriffe im Rheineinzugsgebiet unberücksichtigt. Mit den Untersuchungen gemäß Kapitel 5.2 bis 5.4 wurden die Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrzeiten für die auf vier Ausbauzustände homogenisierten Datenreihen untersucht (Kapitel 5.3). Tabelle 5.5.1 fasst die ermittelten Hochwasserscheitelabflüsse ausgewählter Jährlichkeiten zusammen. Angegeben sind auf drei Ziffern gerundete Werte.

Wie in Kapitel 5.2 anhand berechneter (nicht gerundeter) Werte erläutert, wird auch für gerundete Hochwasserscheitelwerte deutlich,

- dass der Ausbau des Oberrheins mit Staustufen für alle Jährlichkeiten an den Pegeln Köln und Rees eine Verschärfung der Abflussscheitelwerte hervorruft,
- dass die heute schon durchgeführten sowie die geplanten Retentionsmaßnahmen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel führen und
- dass bei Einführung aller geplanten Retentionsmaßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor Ausbau bestehen bleibt.

5

Tabelle 5.5.1:
Hochwasserscheitelabflüsse
unterschiedlicher Jährlich-
keiten für die Ausbaustände
1955, 1977, heute und geplant
an den Pegeln Köln und Rees
(gerundete Werte)

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

Jähr- lichkeit [Jahre]	Pegel Köln					Pegel Rees				
	Histori- sche Daten- reihe	1901 bis 1997				Histori- sche Daten- reihe	1901 bis 1997			
		Homogenisierte Reihe					Homogenisierte Reihe			
	Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]		Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]	
2	6760	6620	6870	6860	6840	6990	6900	7130	7130	7100
5	8010	7870	8130	8120	8080	8250	8150	8400	8380	8330
10	8890	8740	9010	8990	8930	9130	9040	9280	9260	9200
50	10900	10800	11100	11000	10900	11200	11100	11400	11300	11200
100	11800	11700	12000	11900	11800	12200	12100	12300	12300	12200
200	12800	12600	13000	12900	12700	13200	13100	13300	13200	13100
500 ¹⁾	14100	13900	14300	14200	14000	14600	14500	14700	14600	14500
1000 ¹⁾	15200	15000	15400	15200	15100	15700	15600	15800	15700	15600

Die Datenbasis für die Hochwasser-
statistik ist eine 97-jährige Datenreihe.
Daraus ermittelte Abflüsse ver-
schiedener Jährlichkeiten können
deshalb bis zu einer Jährlichkeit von
100 Jahren als abgesichert angesehen
werden. Die Werte für die Jährlich-
keiten größer 100 Jahre sind extrapo-
liert. Durch Berechnungen mit Modell-

hochwassern der Jährlichkeiten 200,
500 und 1000 Jahre wird am Beispiel
des Pegels Rees gezeigt, dass auch bei
extrem hohen Hochwassern mit
Wirkungen der Retentionsmaß-
nahmen gerechnet werden kann.
Die Wirkungen hängen jedoch stark
von der Genese der Hochwasser ab
(vgl. Kapitel 5.4).

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₂₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₂₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	12500	13300	12900	12400	Mod-HQ 1955	12200	12700	12500	12200
Mod-HQ 1988	12700	13300	12900	12700	Mod-HQ 1988	12700	13300	12900	12700
Mod-HQ 1995	13200	13300	13300	13300	Mod-HQ 1995	13200	13300	13300	13300
HQ ₂₀₀ aus Statistik	13100	13300	13200	13100					

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₅₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₅₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	13900	14700	14400	13900	Mod-HQ 1955	13000	13300	13200	13000
Mod-HQ 1988	13900	14700	14300	14300	Mod-HQ 1988	14000	14200	14100	14000
Mod-HQ 1995	14400	14700	14600	14600	Mod-HQ 1995	14400	14700	14600	14600
HQ ₅₀₀ aus Statistik	14500	14700	14600	14500					

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₁₀₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₁₀₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	15000	15800	15600	15000	Mod-HQ 1955	13600	13800	13700	13600
Mod-HQ 1988	15000	15800	15500	15000	Mod-HQ 1988	14800	14900	14900	14800
Mod-HQ 1995	15500	15800	15800	15800	Mod-HQ 1995	15500	15800	15800	15800
HQ ₁₀₀₀ aus Statistik	15600	15800	15700	15600					

Tabelle 5.5.2: Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees im Vergleich zu den entsprechenden statistisch ermittelten Scheitelabflüssen

- 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 Tabelle 5.5.2 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 2.000 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.

In allen in Tabelle 5.5.2 dargestellten Fällen ist der aus der Hochwasserstatistik entnommene Scheitelwert für den Zustand 1977 der höchste.

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.

5

Tabelle 5.5.3 stellt die bereits 1996 vorgeschlagenen Abflüsse gegebener Jährlichkeiten den entsprechenden Werten der neueren Untersuchungen mit homogenisierten Datenreihen gegenüber. Hieraus wird ersichtlich, dass die Statistik unter Verwendung der homogenisierten Daten für die beiden untersuchten Hauptpegel Köln und Rees für den *heutigen Zustand* etwa die 1996 vorgeschlagenen Werte ergibt. Für den *geplanten Zustand* sind sie etwas kleiner. – Die Berechnungen

unter Verwendung von drei modellhaften Hochwassern, die auf den Einzelereignissen 1955, 1988 und 1995 beruhen, bestätigen die statistisch ermittelten Tendenzen. Abweichungen zeigen die Ergebnisse für das ausgeprägt moselbezogene Modellereignis 1995, wenn es auf 200 bzw. 1000-jährliche Scheitel in Rees vergrößert wird. Auch wenn die meteorologische Sinnhaftigkeit einer derart mosellastigen Vergrößerung der Abflüsse derzeit nicht zu verifizieren ist, scheint es dennoch

Tabelle 5.5.3:
HQ_T für die Rheinpegel
Köln und Rees

Pegel	Jährlichkeit	HSG NRW 1996 (Tabelle 5.1.3.1)	aus Statistik mit homogenisierter Datenreihe (Tabelle 5.5.1)			Empfehlung 2000
			<i>Zustand</i>			
			1977	heute	geplant	
	Jahre	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Köln	100	12.000	12.000	11.900	11.800	12.000
	200	12.900	13.000	12.900	12.700	12.900
	500	14.200	14.300	14.200	14.000	14.200
Rees	100	12.300	12.300	12.300	12.200	12.300
	200	13.300	13.300	13.200	13.100	13.300
	500	14.800	14.700	14.600	14.500	14.700

nicht sinnvoll, die aus den Berechnungen sich ergebenden niedrigsten Werte (gemäß „Zustand geplant“) für die nächsten Jahre als HQ_T festzuschreiben. Es wird vielmehr vorgeschlagen, auf der sicheren Seite zu verbleiben und das Kollektiv der 1996 vorgeschlagenen HQ_T weitgehend zu belassen, das rechnerisch den Werten des „Zustandes heute“ entspricht. Lediglich der Abfluss für HQ_{500} in Rees ist zu ermäßigen, da die HQ_{500} sich an diesem Pegel für alle Zustände der

aktuellen Berechnungen geringer ergeben als 1996. Vorgeschlagen wird $HQ_{500} = 14.700 \text{ m}^3/\text{s}$ in Rees. Das entspricht einem Abflusssprung von $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ von HQ_{200} auf HQ_{500} . Diese Differenz ist korrigierend auch für Ruhrort, Wesel und Emmerich angesetzt.

Die für die Zuordnung von Hochwasserscheitelabflüssen zu vorgegebenen Jährlichkeiten empfohlenen Werte sind in der Tabelle 5.5.4 zusammengestellt.

Pegel	Jährlichkeit T in Jahren	Scheitelabflüsse in m^3/s	
		Vorschlag HSG NRW 1996	Empfehlung 2000
Bonn	100	11.700	11.700
	200	12.600	12.600
	500	14.000	14.000
Köln	100	12.000	12.000
	200	12.900	12.900
	500	14.200	14.200
Düsseldorf	100	12.000	12.000
	200	12.900	12.900
	500	14.200	14.200
Ruhrort	100	12.400	12.400
	200	13.400	13.400
	500	14.900	14.800 ¹⁾
Wesel	100	12.400	12.400
	200	13.400	13.400
	500	14.900	14.800 ¹⁾
Rees	100	12.300	12.300
	200	13.300	13.300
	500	14.800	14.700 ¹⁾
Emmerich	100	12.200	12.200
	200	13.100	13.100
	500	14.600	14.500 ¹⁾

Tabelle 5.5.4:
*HQ_T für die Rheinpegel
Bonn bis Emmerich
(Vorschlag der HSG NRW
1996 und Empfehlung 2000)*

1) Werte wurden gegen-
über 1996 geändert.

6 Maßgebende Wasserspiegellinienhöhen

In der Praxis sind die aufgrund der Abflüsse sich einstellenden Wasserstände von besonderem Interesse. Das Wissen um die kennzeichnenden Abflüsse und Wasserstände darf sich aber keinesfalls allein nur auf die Pegelstandorte beschränken. Entsprechende Aussagen werden mit gleicher Zuverlässigkeit für jeden beliebigen Ort längs eines Gewässers erwartet. Zur Ermittlung der Wasserstände zwischen Pegeln werden heute in der Regel mathematische Strömungsmodelle eingesetzt. In der BfG ist dies ein stationäres, eindimensionales Verfahren zur Berechnung von Wasserspiegellagen (Modell KWERT), das seit ca. 30 Jahren für hydraulische Berechnungen verwendet wird. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse von Wasserspiegellagenberechnungen für Hochwasserabflüsse im Rhein für die Rheinstrecke in NRW dargestellt.

6.1 Verfahren zur Berechnung von Wasserspiegellagen

Alle mathematischen Modelle beruhen auf Modellannahmen, Modellgleichungen und Lösungsverfahren. Im Fall der eindimensionalen stationären Wasserspiegellagenberechnungen handelt es sich um mathematische Strömungsmodellierungen mit stark vereinfachenden Modellannahmen und Gleichungen. Das grundlegende Verfahren zur Berechnung des Wasserspiegels bei stationär ungleichförmigem Abfluss in Gerinnen besteht in einer von Querprofil zu Querprofil fortschreitenden Berechnung von Wasserständen, wobei der bernouillische Energiehöhenvergleich als Berechnungsgrundlage dient. In der Abbildung 6.1.1 sind die wesentlichen Eigenschaften von KWERT im Überblick zusammengestellt. Hierin wird stichpunktartig Auskunft zu Modellgleichungen und Modellannahmen, benötigten Daten, möglichen Verfahrensweisen, Ergebnissen und

Anwendungen gegeben. Eine detaillierte Beschreibung ist in dem BfG-Bericht 862 (BUSCH et al. 1994) enthalten.

In den vorgenommenen Untersuchungen wurden Wasserspiegellagenberechnungen zunächst im Rahmen der Modellkalibrierung zur Feststellung der Gerinnerauheiten (K_{St} -Werte) durchgeführt. Danach wurde KWERT zur Ermittlung theoretischer Wasserspiegellagen für gleichwertige Rheinabflüsse eingesetzt.

Kalibrierung (= KWERT-Rückrechnung)

Wichtigste Aufgabe in der Phase der Modellkalibrierung ist die Ermittlung der tiefenabhängigen und abschnittsweise gültigen Rauheiten. Bei der KWERT-Rückrechnung wird der K_{St} -Wert bei vorgegebenem Abfluss und vorgegebenen Wasserständen unten und oben für einen bestimmten Flussabschnitt iterativ berechnet. Ausgehend vom unteren Wasserstand wird entgegen der Fließrichtung an allen Querprofilen des Abschnitts der Wasserstand errechnet. Der auf diese Weise am oberen Ende der Berechnungsstrecke ermittelte Wasserstand wird mit dem dort vorgegebenen verglichen. Bei Variation des K_{St} -Wertes werden solange Wiederholungsläufe durchgeführt, bis die Wasserstände aus Messungen (vorgegeben) und Rechnung identisch sind.

Theoretische Wasserspiegellagenberechnung

Wichtigstes Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung von Wasserspiegellagen für ausgewählte stationäre Abflusszustände des Rheins. Im Unterschied zur KWERT-Rückrechnung wird bei einer theoretischen Wasserspiegellagenberechnung der aus der Kalibrierung abgeleitete K_{St} -Wert vorgegeben. Das Berechnungsverfahren ist mit der KWERT-Rückrechnung identisch, es ist aber nur ein Durchlauf erforderlich.

1-dim. Wasserspiegellagenberechnungen für stationäre Abflusszustände

Name / Entwickler	<ul style="list-style-type: none"> • KWERT • BFG, Referat M1 • Programmiersprache FORTRAN 77, PC Pentium
Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Bernoulli - Energiehözensatz • Geschwindigkeitsparametrisierung nach Manning - Strickler
Modellannahmen	<ul style="list-style-type: none"> • horizontaler Wasserspiegel (1-dim.) • gegliederte Querprofile in Hauptöffnung, Vorländer und Retentionsgebiete • gegliederte Rauheitswerte: $K_{st}(\text{Vorländer}) = 0,4 \cdot K_{st}(\text{Hauptöffnung})$
benötigte Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Querprofile bis über HHW, Lagepläne • Wasserspiegelfixierungen bei stationären Abflüssen (MNQ, MQ, MHQ und HQ) • Abflusskurven
Verfahrensweisen	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrierung des Modells (Ermittlung der abflussabhängigen, abschnittsweise gültigen Rauheitswerte (K_{st}-Werte)) • Wasserspiegellagenberechnungen für beliebige Abflüsse mit Vorgabe der K_{st} - Werte und Ausgangswasserständen
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • K_{st} - Werte • Wasserspiegellagen • mittlere Fließgeschwindigkeiten, Fließzeiten • Wasservolumen, mittl. Wassertiefen, hydraul. Radien, Breiten
Kontrollen	<ul style="list-style-type: none"> • Abstimmung berechneter W mit W an Pegeln mit Abflussermittlung • Anpassung berechneter Wasserstände an gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen • Prüfung, ob in frei bleibender Strömung dW/dQ monoton fallend ist
Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von HSW, HW zu HQ_n usw. • Berechnung der Wasserränder für HQ_n, Fließzeiten • Berechnungen der Volumenänderungen aufgrund großräumiger Ausbaumaßnahmen an BWStr
Anwendungsgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • aktuell: Main, Mosel, Rhein, Saar, Sauer, Weser, Elbe • zukünftig: Alle BWStr im Binnenbereich

Abbildung 6.1.1:
Eigenschaften des Modells
KWERT der BfG

Vorzugeben sind zusätzlich zum Rauheitsparameter der stationäre Abfluss und der Wasserstand am unteren Ende

der Berechnungsstrecke (hier: deutsch/niederländische Grenze: Rhein-km 865.4).

6.2 Verwendete Datengrundlage

Im Allgemeinen werden für Wasserspiegellagenberechnungen Lagepläne, Querprofile, Wasserspiegelfixierungen und Abflusskurven benötigt. Die Unterlagen werden größtenteils von der WSV zur Verfügung gestellt.

Lagepläne

Topographische Karten des Niederrheins in kleinen und großen Maßstäben (1 : 10.000, 1 : 50.000) standen in ausreichender Anzahl und flächendeckend zur Verfügung. Als hydrologisch äußerst aufschlussreich erwiesen sich die Topographischen Karten 1 : 10.000. In ihnen sind die Überschwemmungsgebiete des Rheinhochwassers von März 1988 für die gesamte nordrhein-westfälische Rhein-strecke lagemäßig festgehalten worden. Weiterhin ist aus diesen Karten das stark komplexe Deichsystem des Niederrheins ersichtlich. Hochwasserwege, Flutmulden, Inseln und Polder lassen sich mit Hilfe dieser Karte somit leicht festlegen. All diese Informationen sind verwertbar hinsichtlich der Gliederung der Querprofile in Fließzonen, die im Rahmen der Modellerstellung und Kalibrierung vorgenommen werden muss.

Querprofile

Für eindimensionale Wasserspiegellagenberechnungen muss die Geometrie der Gewässer in Form von Querprofilkoordinaten vorliegen. Da auch Wasserstände für extreme Rheinabflüsse zu berechnen waren, muss zudem sichergestellt sein, dass in Querprofilen der gesamte abflusswirksame Bereich dargestellt wird. Nur vollständige Querprofile können als Eingangsgrößen für die Modellberechnungen verwendet werden. Allen Querprofilen liegt die gewässerkundliche Fünf-Jahrespeilung von 1990 zugrunde, die von den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern Duisburg-Rhein und Köln zur

Verfügung gestellt wurden. In den Wasserspiegellagenberechnungen werden Querprofile in der Regel nur in 500 m Abständen berücksichtigt. Abbildung 6.2.1 zeigt das Querprofil bei Rhein-km 837.4 (= Pegel Rees). Auch die gewählte hydraulische Einteilung, die in diesem Fall das Querprofil in vier Durchflussbereiche aufgliedert, kann der Abbildung entnommen werden.

Die Geometrie des Rheins und seiner unmittelbar angrenzenden Talauflänge entlang der ca. 226 km langen Untersuchungsstrecke ist äußerst heterogen. So beträgt beispielsweise die Profilbreite am Pegel Köln bei extremem Hochwasser nur 450 m. Während im Bereich der Bislicher Insel, oberhalb Xanten, entsprechende Profilbreiten bis 4.000 m überflutet werden.

Wasserspiegelfixierungen

Gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen, die zur Feststellung der Gerinnerauheiten benötigt werden, lagen in ausreichender Anzahl vor. Es ist zu beachten, dass die Einmessungen im Gültigkeitszeitraum der verwendeten Peilung vorgenommen wurden. Fünf Wasserspiegelfixierungen aus jüngster Zeit (1989 bis 1995) konnten für die hydraulischen Berechnungen zur Feststellung der K_{St} -Werte herangezogen werden. Hierbei handelt es sich um folgende Messzeiträume:

NW-Bereich:	13. – 22.09.1991
MW-Bereich:	22. – 24.05.1989
MHW-Bereich:	29. – 30.12.1993
HW 1993:	23. – 24.12.1993
HW 1995:	30.01.1995

In der Abbildung 6.2.2 sind die verwendeten Wasserspiegelfixierungen für die Rheinstrecke von der Landesgrenze Rheinland-Pfalz bis Rhein-km 700 im Längsschnitt dargestellt. Oberhalb der Siegmündung (Rhein-km 659.200) wurden die höchsten verfügbaren

Wasserstände im Zuge des Hochwassers vom Dezember 1993 gemessen. Bedingt durch den Abfluss der Sieg überstiegen die Rheinwasserstände unterhalb der Siegmündung im Scheitelpunkt des Hochwassers 1995 die des Hochwassers 1993 um wenige Zentimeter.

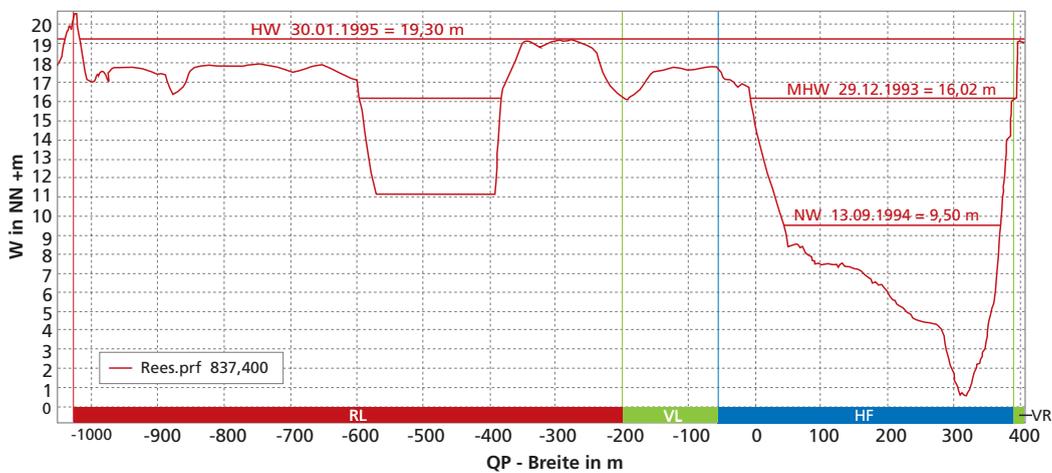


Abbildung 6.2.1:
Querprofil am Pegel Rees bei Rhein-km 837.4 (nach BfG)

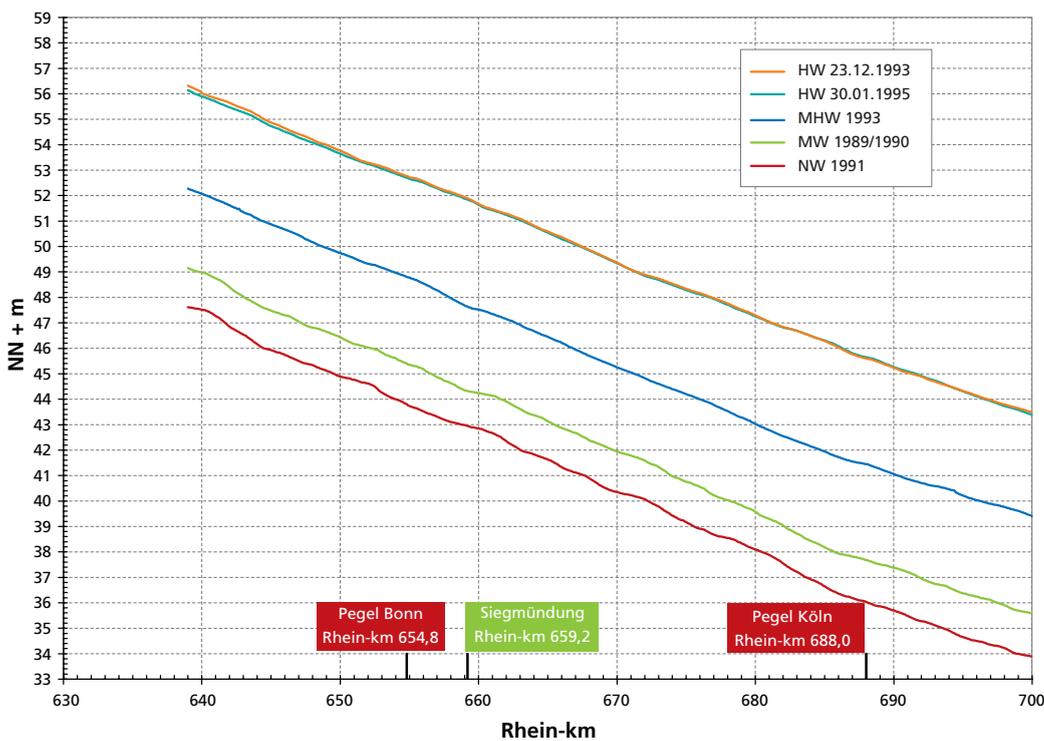


Abbildung 6.2.2:
Verwendete Wasserspiegelfixierungen am Rhein

Abflusskurven

Abflusskurven beschreiben die W/Q -Verhältnisse an den Pegelstandorten. Im Gegensatz zu den Querprofilen und den gemessenen Wasserständen aus Wasserspiegelfixierungen werden die Abflusskurven jedoch nicht unmittelbar in die Berechnungsprozedur mit eingebunden.

Die Abflusskurven dienen im Rahmen der Untersuchungen der Feinjustierung der gewählten K_{St} -Werte. Aufgrund der vorhandenen Wasserspiegelfixierungen am Niederrhein ist die Erstellung funktionaler Beziehungen $K_{St} = f(Q)$ für alle Unterabschnitte der Berechnungsstrecke gegeben. In der Regel ergeben sich im Rahmen der KWERT-Rückrechnungen in Abhängigkeit vom Abfluss unterschiedliche K_{St} -Werte. Da diese durch Ausgleichsgeraden angepasst werden, entsteht eine kaum vermeidbare Ungenauigkeit im Zuge der Festlegung der Rauheits-Abfluss-Beziehungen. Diese mitunter „grobe“ Vorgabe der K_{St} -Werte hat zur Folge, dass die in den theoretischen Berechnungen für ausgewählte Rheinabflüsse errechneten Wasserstände an den Pegelstandorten zunächst nicht identisch sind mit den Wasserständen, die sich dort gemäß den gültigen Abflusskurven einstellen sollten. Folglich werden wiederholte Rechendurchläufe mit modifizierten K_{St} -Werten nötig. Diese bewirken eine Veränderung der berechneten Wasserspiegellagen. Das Verfahren wird beendet, wenn sich die gewünschten Übereinstimmungen der berechneten Wasserstände mit den Wasserständen der Abflusskurven ergeben haben.

Alle aktuell gültigen Abflusskurven der Pegel am Niederrhein wurden überprüft, ehe sie in die hydraulischen Untersuchungen Eingang fanden. In allen Fällen musste im extremen Hochwasserbereich extrapoliert werden. Je nach Pegel variiert der extrapolierte Wasserstandsbereich zwischen 250 bis 300 cm. Zur Extrapolation der Abflusskurven wurden die Steigungen und Krümmungen der vorhandenen Abflusskurven in den Hochwasserbereichen ermittelt und analysiert. Da immer ein eindeutiger Trend im Krümmungsverhalten der Abflusskurven feststellbar war, wurde die Extrapolation mittels Fortschreibung der Krümmungen vorgenommen.

Die Abbildungen im Anhang 1 des ergänzenden BfG-Berichtes 862 (BUSCH et al. 1997) zeigen die aktuell gültigen, extrapolierten Abflusskurven für die Rheinpegel von Bonn bis Emmerich. Anhang 1 enthält auch die entsprechenden Abflusstafeln.

6.3 Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnungen für gleichwertige Abflusszustände des Rheins in NRW

Als wesentliches Ergebnis der Modellerstellung und der anschließenden Kalibrierung ist festzuhalten, dass die 226 km lange Rheinstrecke in NRW für die Berechnungen in 67 verschiedenen lange Unterabschnitte zu unterteilen ist. Die aus den Rückrechnungen sich ergebenden, streckenweise gültigen und abflussabhängigen K_{St} -Werte werden in jedem Unterabschnitt durch Ausgleichsgeraden $K_{St} = f(Q)$ angepasst.

Alle hydraulischen Berechnungen zur Ermittlung theoretischer Wasserspiegellagen starten wie die KWERT-Rückrechnung am unteren Ende der Rheinstrecke (Rhein-km 865.400). Für diesen Startpunkt muss die W/Q -Beziehung (Abflusskurve) bekannt sein. Die für die ausgewählten Rheinabflüsse zu berechnenden Wasserspiegellagen stützen sich auf die Wasserstände, die sich aus der Abflusskurve bei Rhein-km 865.400 ergeben. Da bisher für diese Stelle des Rheins keine Abflusskurve vorhanden war, musste sie zunächst mit Hilfe der Wasserstandsmessungen aus den fünf verfügbaren Wasserspiegelfixierungen konstruiert werden.

Die Rheinabflüsse an der deutsch-niederländischen Grenze, für die die Wasserspiegellagen zu berechnen sind, gelten nur für den Bereich Rhein-km 865.40 bis 844.70. Durchgehende Berechnungen für die gesamte Untersuchungsstrecke von der deutsch-

niederländischen Grenze bis Rolandswerth erfordern entsprechende Festlegungen der Rheinabflüsse für alle Berechnungsabschnitte. Diese können zwar unabhängig voneinander vorgenommen werden, doch scheint es im Hinblick auf die maßgebenden Wasserspiegellagen für die Gesamtstrecke sinnvoll, die Abflüsse so zueinander in Beziehung zu setzen, dass sie gleichwertige Wasserstände ergeben. Das heißt, bei stationären Verhältnissen (kein Wellendurchlauf) würden sich im statistischen Mittel entlang der Flussachse systematisch abgestufte Abflüsse ergeben. Die Stufungen lagen jeweils an Nebengewässereinmündungen. Bei extrem hohen Abflüssen kann allerdings auf Stufungen im Bereich unbedeutender Zuflüsse verzichtet werden, wenn sie prozentual sehr gering ausfallen.

Andererseits ist es denkbar, dass minimale Zuflüsse durch gleichzeitige Grundwassereinspeisungen (Bodenwasservorratsänderung) ausgeglichen werden. Schließlich ist zu sehen, dass es sich hier um theoretische Berechnungen handelt. Der Versuch scheinbar exakter Annahmen wird sich mit tatsächlichen Ereignissen nicht decken, da diese von den statistischen Mittelwerten mehr oder weniger stark abweichen. Dies ist selbst für den sehr träge reagierenden, für die Schifffahrt bei Niedrigwasser relevanten Gleichwertigen Wasserständerbereich (GIW-Bereich, gemessen in [cm]), gemäß DIN 4049, Teil 3, Ziffer 2.5.10 bekannt, auf den die Festlegungen mit ausgedehnt sind.

Tabelle 6.3.1 enthält die Zusammenstellung aller Abflüsse, die der Ermittlung der theoretischen Wasserspiegellagen zugrunde gelegt wurden. Dabei ist unterschieden zwischen Ausgangs- bzw. Stützwerten und eingerechneten Daten.

Die Stützwerte sind:

- Die gleichwertigen Abflüsse $_{51-70}$ (GIQ, gemessen in $[m^3/s]$), gemäß DIN 4049, Teil 3, Ziffer 2.5.9 für alle Pegel Diese Werte sind seit 1971 Grundlage der von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) alle zehn Jahre festgelegten GIW im Rhein.
- $MQ_{1931/92}$ und $MHQ_{1931/92}$ Die mittleren Abflüsse sind der offiziellen Statistik für das Deutsche Gewässerkundliche Jahrbuch (DGJ) entnommen und liegen deshalb nur für die Pegel Andernach, Köln, Düsseldorf und Rees vor.
- HQ_x Theoretische Hochwasserabflüsse, berechnet aus historischen Werten der Zeitreihe 1901 – 1990, wurden an den DGJ-Abflusspegeln als Interpolationsgrundlagen benutzt.

Für die Entwicklung der Tabelle 6.3.1 ist von Andernach ausgegangen, wo Hochwasserabflüsse in regelmäßiger Stufung von $500 m^3/s$ ausgewählt wurden. Entsprechend den HQ_x -Verhältnissen ergeben sich zugeordnete Stützwerte für die Pegel Köln, Düsseldorf und Rees. Da alle Wasserspiegellagenberechnungen stationäre Verhältnisse voraussetzen, können gleichwertige Abflüsse stromab nur zunehmen. Dementsprechend wurden an den Abflusspegeln wie auch bei der Inter- bzw. Extrapolation der Werte für die übrigen Pegel stromab nur steigende oder allenfalls gleichbleibende Abflüsse zugelassen.

Nach Festlegung der gleichwertigen Abflüsse der zu untersuchenden Rheinstrecke von der deutsch-niederländischen Grenze bis Rolandswerth, der Ermittlung der zu den ausgewählten Abflüssen gehörenden Wasserstände aus der Abflusskurve für Rhein-km 865.40 und der Festlegung der K_{St} -Werte gemäß den Ausgleichsgeraden für den ersten Untersuchungsabschnitt von Rhein-km 865.40 bis 861.50 konnte mit den hydraulischen Berechnungen für den ersten Untersuchungsabschnitt begonnen werden. Die berechneten Wasserstände an der Unterabschnittsgrenze bei Rhein-km 861.50 wurden danach als Ausgangswasserstände für die sich anschließenden Berechnungen für den zweiten Untersuchungsabschnitt von Rhein-km 861.50 bis 860.0 verwendet usw.

Die Berechnung theoretischer Wasserspiegellagen in frei fließenden Gewässern führt zu sinnvollen Ergebnissen, wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

1. Die gemessenen Wasserstände aufgrund von Wasserspiegelfixierungen werden mittels der theoretischen Wasserspiegellagenberechnungen hinreichend genau reproduziert.
2. Die berechneten Abflusskurven an allen Unterabschnittsgrenzen genügen der notwendigen hydraulischen Plausibilitätsbedingung, dass die berechneten Steigungen der Abflusskurven monoton abnehmen.
3. Die errechneten Wasserstände für die vorgegebenen Abflüsse sind an den Pegelstandorten identisch mit den dort sich aufgrund der aktuell gültigen Abflusskurven ergebenden Wasserständen.

Pegel Lage Rhein-km	Andernach 613.78	Bonn 654.78	Köln 688.00	D'dorf 744.20	Ruhrort 780.80	Wesel 814.00	Rees 837.38	Emmerich 851.96
Bereich:	592.3-629.3	629.3-659.2	659.2-703.5	703.5-780.0	780.0-797.7	797.7-814.4	814.4-844.7	844.7-865.4
Abflüsse in m³/s								
646	661	694	729	739	742	746	750	
870	890	935	960	985	995	1020	1020	
1325	1345	1395	1420	1460	1470	1500	1500	
2010	2035	2090	2120	2195	2210	2260	2260	
2735	2765	2825	2855	2935	2950	3000	3000	
3450	3490	3560	3590	3680	3695	3750	3750	
4185	4225	4305	4335	4425	4445	4500	4500	
4915	4960	5050	5080	5170	5190	5250	5250	
5645	5695	5795	5825	5915	5935	6000	6000	
6160	6210	6320	6360	6470	6490	6560	6560	
6300	6355	6580	6620	6705	6730	6800	6800	
6500	6562	6900	6944	7015	7040	7110	7110	
7000	7069	7450	7507	7565	7590	7650	7650	
7500	7571	7970	8040	8090	8110	8160	8160	
8000	8072	8470	8546	8595	8630	8680	8680	
8500	8572	8970	9052	9090	9120	9160	9160	
9000	9072	9470	9558	9600	9610	9650	9650	
9500	9569	9950	10030	10070	10080	10120	10120	
10000	10063	10410	10490	10520	10530	10560	10560	
10500	10561	10900	10980	10995	11005	11020	11020	
11000	11050	11330	11410	11450	11460	11500	11500	
11500	11556	11870	11947	11960	11970	11970	11970	
12000	12061	12400	12470	12470	12470	12470	12470	
12500	12556	12870	12940	12940	12940	12940	12940	
13000	13056	13370	13420	13420	13420	13420	13420	
13500	13555	13850	13900	13900	13900	13900	13900	
14000	14055	14350	14400	14400	14400	14400	14400	
14600	14650	14950	15000	15000	15000	15000	15000	

Tabelle 6.3.1:
Abflüsse als Grundlage für
Wasserspiegellagenberechnungen am Niederrhein

Zur Realisierung der dritten Bedingung müssen in einem Annäherungsverfahren wiederholt Wasserspiegellagenberechnungen mit jeweils modifizierten K_{St} -Werten vorgenommen werden. Im ersten Berechnungsvorgang wird von den K_{St} -Werten ausgegangen, die sich in den Unterabschnitten gemäß den Ausgleichsgeraden ergeben. Danach wird iterativ ermittelt, um welches Maß die ursprünglich vorge-

gebenen K_{St} -Werte verändert werden müssen, damit für die ausgewählten Abflüsse die angestrebte Identität der Wasserstände aus Rechnung und Abflusskurve erreicht wird.

Auf das gleichmäßige Erfülltsein aller drei Bedingungen wurde streng geachtet. Im Rahmen der theoretischen Wasserspiegellagenberechnungen wurde für die unmittelbaren Strecken-

6

bereiche der Pegel Düsseldorf und Ruhrort außerdem berücksichtigt, dass sich dort im Hochwasserfall aufgrund der örtlichen Strömungsverhältnisse ein nicht zu vernachlässigendes Quergefälle einstellt. Da die Wasserstände bei ein-dimensionalen, stationären Wasserspiegellagenberechnungen primär für den Bereich des Stromstrichs gelten, dürfen beim Wasserstandsabgleich die

berechneten Wasserstände in den Pegelprofilen nicht mit den Wasserständen, die sich aus den Abflusskurven für die Pegel Düsseldorf und Ruhrort ergeben, verglichen werden.

Tabelle 6.3.2 enthält Angaben über Wasserstandsunterschiede zwischen Stromstrich (= Rechnung) und den Pegelstandorten Düsseldorf und

*Tabelle 6.3.2:
Wasserstandsunterschiede
zwischen Stromstrich und
Ufer an den Pegeln
Düsseldorf und Ruhrort*

Pegel Düsseldorf		Pegel Ruhrort	
Q(m³/s)	ΔW (cm)	Q(m³/s)	ΔW (cm)
729	0	739	0
960	0	985	0
1420	0	1460	0
2121	0	2195	0
2855	0	2935	0
3590	0	3680	0
4335	0	4425	0
5080	0	5170	0
5825	1	5915	0
6360	2	6470	0
6620	3	6705	0
6944	4	7015	1
7507	5	7565	2
8040	6	8090	3
8546	7	8595	4
9052	8	9090	5
9558	9	9600	6
10030	10	10070	7
10490	11	10520	8
10980	12	10995	8
11410	13	11450	8
11947	14	11960	9
12470	15	12470	10
12940	15	12940	10
13420	15	13420	10
13900	15	13900	10
14400	15	14400	10
15000	15	15000	10

Ruhrort, die in den Wasserspiegellagenberechnungen für die genannten Abflüsse angenommen wurden. Im Bereich dieser beiden Pegel sind die angegebenen Differenzen von dem jeweiligen Wasserstand in Stromstrich auf der rechten Uferseite zu addieren, auf der linken zu subtrahieren. Diese Information ist bei Arbeiten mit dem ergänzenden BfG-Bericht 862 (BUSCH et al. 1997) zu berücksichtigen, da dieser die Tabelle 6.3.2 nicht enthält.

Der ergänzende BfG-Bericht 862 (BUSCH et al. 1997) enthält für das Hochwasser Januar 1995 Wasserstandsangaben für das rechte und linke Ufer sowie den

Stromstrich für den gesamten Rhein in NRW. Hieraus lässt sich ableiten, welche Quergefälle sich entlang der Rhein-strecke in NRW beim Hochwasser im Januar 1995 eingestellt haben. Alle berechneten Wasserstände für die Strecke von der deutsch-niederländischen Grenze bis Rolandswerth für die Hochwasserabflüsse, die am Pegel Andernach $6.500 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen oder übersteigen (Tabelle 6.3.1), sind in den Anhängen 3 und 4 des ergänzenden BfG-Bericht 862 (BUSCH et al. 1997) tabellarisch und graphisch dargestellt. Abbildung 6.3.1 zeigt beispielhaft gemessene und einige berechnete Wasserspiegellagen für die Rheinstrecke zwischen Köln und Bonn.

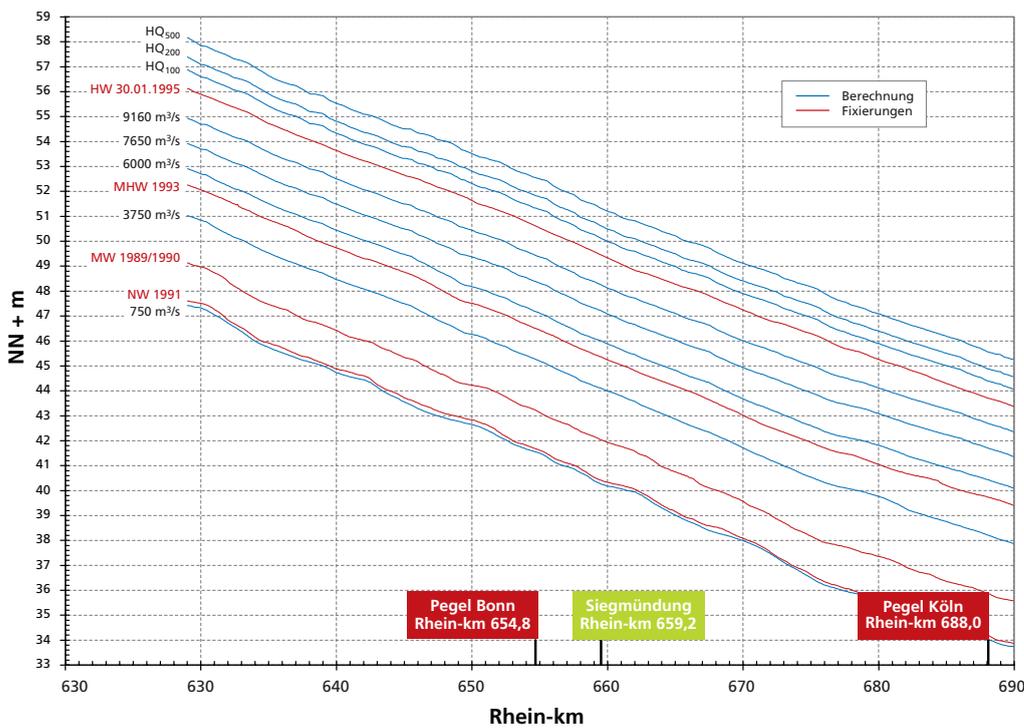


Abbildung 6.3.1: Gemessene und berechnete Wasserspiegellagen im Bereich der Rheinstrecke zwischen Bonn und Köln

7

7 Bemessungsdaten in den Niederlanden

7.1 Gesetzlicher Hintergrund

Seit 1996 werden die Sicherheitsnormen für den Hochwasserschutz (Hochwasserschutzgesetz – Wet op de Waterkering) in den Niederlanden gesetzlich festgelegt (im Gesetz über Wasserschutzbauwerke). Darin ist vorgesehen, dass der bestehende Bemessungsabfluss alle fünf Jahre neu zu ermitteln ist; die Bemessungsvorgaben werden danach ggf. erneut festgelegt. Hierzu gibt der Minister so genannte Rahmenbedingungenbücher (Randvoorwaardenboeken) heraus.

Die Norm für die Flussgebiete ohne Gezeiteneinfluss besteht in einem Schutz gegen 1250-jährliche Hochwasser. Der Bemessungsabfluss ist der hauptsächlich bestimmende Wert für

die mit einer zweidimensionalen Wasserspiegellagenberechnung zu ermittelnden Bemessungswasserstände. Mit Zuschlägen für Wellenauflauf, Setzung des Deichkörpers und Bodensenkung wird die endgültige Deichhöhe festgelegt.

Das nächste Rahmenbedingungenbuch wird 2001 veröffentlicht. Nachfolgend werden die verschiedenen Schritte zur Festlegung der Bemessungswasserstände sowie die vorläufigen Ergebnisse beschrieben.

Zuerst wird jedoch der heutige Sachstand, der dem Rahmenbedingungenbuch von 1996 entspricht, vorgestellt. Er bezieht sich auf die niederländische Stromstrecke des Rheins und wird durch den Pegel Lobith charakterisiert.

Tabelle 7.2.1:
Ergebnisse verschiedener
theoretischer Verteilungen

Verteilung	Schwellenwert	HQ ₁₂₅₀
Gumbel	7.000 m ³ /s	15.375 m ³ /s
Pearson III	–	14.250 m ³ /s
Log-normal	–	14.025 m ³ /s
Mittelwert	–	14.500 m³/s

7.2 Heutiger Bemessungsabfluss am Pegel Lobith

Der (1250-jährliche) Bemessungsabfluss wird statistisch ermittelt aus einer Zeitreihe von am Pegel Lobith gemessenen Scheitelabflüssen. Dabei werden theoretische Verteilungsfunktionen verwandt. Es besteht die Möglichkeit, Jahresmaxima oder partielle Serien von Abflüssen oberhalb bestimmter Schwellenwerte heranzuziehen. Mit der Wahl der Verteilungsfunktion wird allerdings zu einem Teil auch die Art der Zeitreihe festgelegt.

Der heutige Bemessungsabfluss wurde 1992 durch die „Kommission zur Prüfung der Ausgangspunkte für Flussdeichverstärkungen“ (Commissie Boertien I) unter Anwendung von drei unterschiedlichen Verteilungsfunktionen (Gumbel, Pearson III, Log-normal) ermittelt. Die drei genannten Verteilungsfunktionen sind geeignet für die Verwendung von Jahresmaxima. In den Niederlanden werden dazu die Höchstabflüsse der hydrologischen Jahre gewählt.

Die Gumbelverteilung (extreme value type 1) gibt eine gute Anpassung für Abflüsse größer als $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Abflüsse unterhalb dieses Wertes werden nicht berücksichtigt, wobei der Schwellenwert durch visuelle Analyse festgelegt wird. Für die Pearson III und die Log-normal Verteilung gelten keine Schwellenwerte. Das HQ_{1250} bei Lobith ist als Mittelwert der drei genannten Verteilungen festgelegt (siehe Tabelle 7.2.1); er beträgt $14.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bei der Festlegung von 1992 wurde die Inhomogenität der Zeitreihen infolge des Oberrheinausbaus berücksichtigt, was unüblich war. Dabei musste auf ein indirektes Verfahren zurückgegriffen werden, weil für Lobith keine homogenisierte Zeitreihe verfügbar war. Dagegen lagen homogenisierte Daten für den Pegel Köln, für Zustände ohne und mit Einsatz von (100 und 212 Mio. m^3) Retentionsmaßnahmen vor. Hierfür wurden Verteilungsfunktionen (Log-normal) abgeleitet. Diese waren die Grundlage für verschiedene Zustände, HQ_{1250} für Köln zu ermitteln. Die Unterschiede zwischen den Zuständen 1955, 1977 ohne und 1977 mit (100 bzw. 212 Mio. m^3) Retention wurden auch für Lobith angenommen. Die Resultate dieser Analyse zeigten, dass der 1250-jährliche Abfluss sich zwischen 1955 und 1977 um ca. $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht hat. Bei Einsatz von 100 Mio. m^3 Retentionsvolumen verbleibt eine Erhöhung um $700 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei Berücksichtigung aller geplanten Retentionen (212 Mio. m^3) beträgt die Erhöhung noch $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Schließlich ist über die schon einsetzbaren Retentionen hinaus ein Teil der noch zu realisierenden Maßnahmen berücksichtigt worden. Damit ergibt sich eine Erhöhung des HQ_{1250} durch den Oberrheinausbau um rd. $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Wert wurde dem mit den Verteilungsfunktionen ermittelten HQ_{1250} hinzuaddiert, was zu dem heutigen Bemessungsabfluss von $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ geführt hat.

Der auf der Basis der Zeitreihe 1901 bis 1995 in NRW ermittelte Wert für ein HQ_{500} am Pegel Emmerich beträgt $14.600 \text{ m}^3/\text{s}$. Wegen der Unterschiede der verwendeten Zeitreihen und dem großen Einfluss der letzten Hochwasser ist ein direkter Vergleich der Untersuchungen in den Niederlanden und in NRW nicht möglich. Gleich nach dem Hochwasser von 1995 wurde jedoch der Einfluss auf den 1250-jährlichen Abfluss bei Lobith abgeschätzt. Es ergab sich eine Erhöhung auf $16.050 \text{ m}^3/\text{s}$. Diesen Wert zugrunde gelegt, ermittelt sich das HQ_{500} in Lobith zu $14.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieses Ergebnis liegt nah an $14.600 \text{ m}^3/\text{s}$, dem HQ_{500} in Emmerich.

Im Gegensatz zu Deutschland wird der Bemessungsabfluss in den Niederlanden zusätzlich durch eine „Bemessungswelle“ charakterisiert. Die Berücksichtigung einer Wellenform ist wichtig, um die Wellenabflachung in den Rheinarmen simulieren zu können. Die Standard-Bemessungswelle ist in Abbildung 7.2.1 dargestellt.

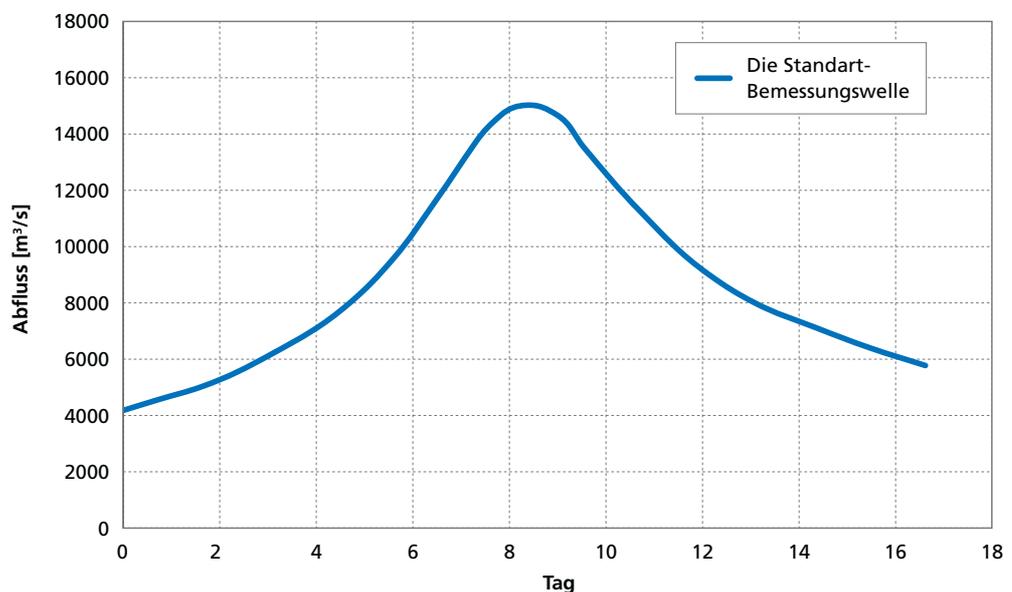
7.3 Zukünftiger Bemessungsabfluss am Pegel Lobith (Vorschlag Rahmenbedingungenbuch 2001)

Gleich nach dem Hochwasser von 1995 wurde der Einfluss auf den 1250-jährlichen Abfluss (HQ_{1250}) bei Lobith abgeschätzt. Diese Analyse hat eine Erhöhung des HQ_{1250} auf $16.050 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben. Für das neue Rahmenbedingungenbuch 2001 werden jedoch die Ergebnisse eingehender Untersuchungen berücksichtigt.

Zunächst wird eine Homogenisierung der Zeitreihe für den Pegel Lobith durchgeführt. Dabei wurde das gleiche Verfahren verwandt, das in den Kapiteln 5.2 und 5.3 beschrieben ist. Die für den Zustand 1977 homogenisierte Zeitreihe wird dann einer statistischen Analyse unterzogen.

Da die 'Commissie Boertien II' (Untersuchungen Maas), zusätzlich zu den oben genannten Verteilungsfunktionen die Anwendung der exponentiellen Verteilung empfohlen hatte, wurde die Zeitreihe nun an vier Verteilungsfunktionen angepasst.

Abbildung 7.2.1:
Bemessungsabfluss-
welle Lobith, Stand 1992



Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.3.1. Schließlich wird für das Rahmenbedingungenbuch 2001 ein mittlerer Bemessungsabfluss von 16.000 m³/s vorgeschlagen (gerundet). Dieses Mehr führt gegenüber 15.000 m³/s durch Flusserweiterung in den Niederlanden zu keiner Wasserspiegelerhöhung.

Auch für die Festlegung von Bemessungswellen wurde eine neue Methode entwickelt. Diese Methode ist gegründet auf eine Analyse der Dauer historischer Hochwasser. Sind maximaler Abflusswert und Überschreitungswahrscheinlichkeit gegeben, dann ist es möglich die dazugehörige Abflusswelle zu generieren.

In Abbildung 7.3.1 ist die neue Abflusswelle für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 50 %, bei dem vorgeschlagenen Bemessungsabfluss von 16.000 m³/s, dargestellt. Im Vergleich zu der bisher verwendeten Abflusswelle (blau) hat die neue mittlere Welle eine bedeutend breitere Form.

Verteilung	Schwellenwert	HQ ₁₂₅₀
Gumbel	7.000 m ³ /s	16.830 m ³ /s
Pearson III	–	15.185 m ³ /s
Log-normal	–	15.135 m ³ /s
Exponentiell	5.000 m ³ /s (partielle Serie)	17.125 m ³ /s
Mittelwert		16.070 m³/s

Tabelle 7.3.1:
Ergebnisse verschiedener
theoretischer Verteilungen

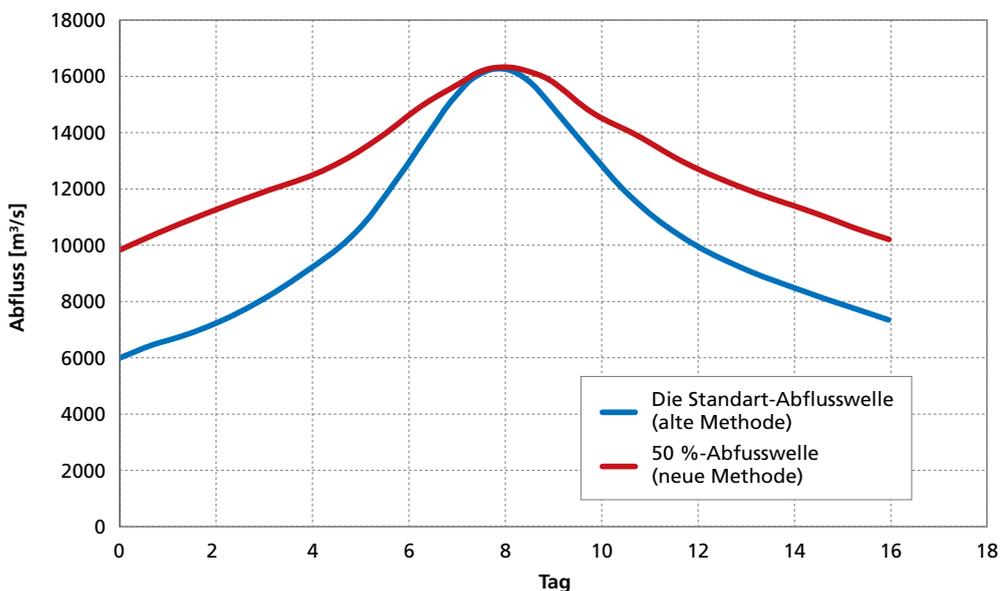


Abbildung 7.3.1:
Bemessungsabflusswelle
Lobith, Vorschlag Rahmen-
bedingungenbuch 2001

8 Ausblick

In diesem Kapitel werden Schwerpunkte aufgezeigt, die von der HSG NRW im Rahmen dieser Untersuchung nicht bearbeitet werden konnten, die aber für die zukünftige Beurteilung der zu erwartenden Hochwasser und die dazu zu ergreifenden Maßnahmen als bedeutsam angesehen werden. Bei einigen dieser Themen wurde mit der Bearbeitung bereits begonnen, andere sollten angegangen werden.

- Für den Niederrhein ist das Winterhalbjahr die hochwassergefährliche Zeit, in dieser Jahreszeit stellen sich aber im Bodensee regelmäßig niedrige Wasserstände ein. Der See wirkt heute schon als Retentionsraum, diese Wirkung könnte für den Rhein in NRW durch eine gezielte Steuerung verstärkt werden. Durch einen Rückhalt von jeweils $35 \text{ m}^3/\text{s}$, der dann beim Hochwasserscheiteldurchfluss am Niederrhein fehlt, mindert sich dort der Wasserstand um jeweils 1 cm. Der maximale Abfluss am Pegel Rekingen, dem ersten Pegel unterhalb des Bodensees, lag beim Hochwasser Februar 1970 bei mehr als $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, der Wert für das Mittelwasser beträgt $432 \text{ m}^3/\text{s}$. Es wäre zu untersuchen, ob die meteorologischen und hydrologischen Vorhersagemöglichkeiten eine Steuerung nach den heutigen Kenntnissen sinnvoll erscheinen lassen.
- Weil es problematisch ist, einen 1250-jährlichen Abfluss aus einer Zeitreihe von nur knapp 100 Jahren abzuleiten, wird in den Niederlanden an einer neuen Methode gearbeitet, die auf einem statistischen Niederschlagsgenerator und einem hydrologisch/hydraulischen Modell für das Rheingebiet basiert. Diese neue Methode muss die Probleme

mit der Länge und Homogenität der Messreihe lösen und die Plausibilität der Verteilungsfunktionen abschätzen.

- Ein wesentliches Problem ist auch die Genese von Hochwasserereignissen. Erwartet wird, dass der Niederschlagsgenerator mehr Einsichten in das Geneseproblem liefert und in Zukunft auch die Abschätzung von veränderten Klimaverhältnissen unterstützt.

Mit dem hydrologisch/hydraulischen Modell gibt es die Möglichkeit, Auswirkungen von Maßnahmen im Einzugsgebiet und im und am Fluss abzuschätzen. Eine Wissenslücke bleibt die Abschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen zur Erweiterung der wasserspeichernden Kapazität durch veränderte Landnutzung. Mehr Einsicht in die physikalische Beschreibung und Parametrisierung von Niederschlags-Abflussprozessen wird erforderlich.

Mathematische Modelle sind schon gut in der Lage, Auswirkungen von Maßnahmen zu simulieren. Es ist jedoch mehr Kenntnis des Abflussvermögens erforderlich und es ist deswegen wichtig, die Auswirkung der Retentionsmaßnahmen und möglicher Deichüberflutungen weiter zu untersuchen.

- Zugleich wird auf eine Methode hingearbeitet, die auch Überschwemmungsgefahren einbezieht. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, nicht nur Bemessungswasserstände, sondern auch andere Aspekte zur Ermittlung des Sicherheitsniveaus, wie Deichbruchgefahr und Hochwasserschäden, zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass nicht nur die Höhe, sondern auch die

Dauer einer Abflusswelle sowie alle Unsicherheiten in Höhe und Dauer mit erwogen werden. Dieses Verfahren bietet zudem die Möglichkeit eines Vergleichs mit anderen Sicherheitsrisiken, beispielsweise mit dem von Flugzeugkatastrophen oder mit dem von Störfällen in Chemiewerken.

- Eine wichtige Aufgabe, die sich in den nächsten Jahrzehnten hinsichtlich der niederländischen Rheinarme stellt, ist die Erhaltung der Sicherheit auch bei höheren Bemessungsabfluss. Zu dem höheren Bemessungsabfluss gehören im Prinzip (ca. 20 bis 40 cm) höhere Bemessungswasserstände. Weitere Deicherhöhungen und -verstärkungen werden jedoch zum Schluss-Stein des Hochwasserschutzes. Die niederländische Regierung hat sich daher für mehr Raum für den Fluss entschieden und erstellt im Moment gemeinsam mit den betroffenen Institutionen einen Plan für die Erweiterung des Fließquerschnitts von Rhein und Maas (Ausführung zwischen 2000 und 2015).

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., CHOJETZKI, U., ENGEL, H. UND GUNDERT, P. J. (1994): Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch/niederländischen Grenze, BfG-Bericht BfG-862.
- BUSCH, N., CHOJETZKI, U. UND ENGEL, H. (1997): Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnung am Rhein in Nordrhein-Westfalen – Ergänzung zum BfG-Bericht BfG-862.
- 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 zugrunde gelegten historischen Hochwasser. 16 S.
- 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, PUBLIC 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.
- DIN 4049 Teil 3, Ziffer 2.5.9:**
GIQ Definition
- DIN 4049 Teil 3, Ziffer 2.5.10:**
GIW: Definition
- DOHMS, PETER (1991): Meerbusch. Die Geschichte der Stadt und der Altgemeinden
- DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1979): Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit ; DVWK-Regel zur Wasserwirtschaft Nr. 101; 8 S.
- 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.
- DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 251; 42 S.
- HASELEN, C. VAN (1999): Polder langs de Niederrhein, Effecten op waterstand en afvoer van retentieen bergingsgebieden „Een minimum-variant“, RIZA-Werkdokument 99.127x.

HOMAGK, P. (1985): Ermittlung von Steuerreglementen 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).

INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1997): Hochwasserschutz am Rhein – Bestandsaufnahme -; 62 S. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes: Das Rheingebiet – Hydrologische Monographie.

LAMMERSEN, R., ENGEL, H. UND BUSCH, N. (1999): Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein, BfG-Bericht Nr. 1221.

LAWA (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER) UND BMV (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR), 1997: Pegelvorschrift, Kulturbuch Verlag Berlin GmbH; Stammtext 105 S. und Anlagen A bis E.

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.

RWTH RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN, LEHR- UND FORSCHUNGSGEBIET INGENIEURHYDROLOGIE, MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NRW UND PRO AQUA INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER- UND UMWELTECHNIK MBH (2000): Hochwasserschadenspotenzial am Rhein in NRW – Abschlussbericht.

STAATLICHES AMT FÜR WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFT BONN, 1991: Generalplan Hochwasserschutz am Rhein im Regierungsbezirk Köln.

STAATLICHES AMT FÜR WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFT DÜSSELDORF, 1990: Generalplan Hochwasserschutz am Niederrhein.

TULLA, JG (1825): Über die Rectification des Rheins, von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in das Großherzogtum Hessen. Karlsruhe.

Abkürzungsverzeichnis

1-dim.	eindimensional	LOG Pearson III	Verteilungsfunktion
AEO	oberirdisches Einzugsgebiet [km ²]	Log-normal	Verteilungsfunktion
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde	MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss [m ³ /s]
BHQ	Bemessungshochwasser	MHW	mittlerer Hochwasserstand [cm]
BMV	Bundesministerium für Verkehr	MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss [m ³ /s]
BWStr	Bundeswasserstraßen	MNW	mittlerer Niedrigwasserstand [cm]
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch	MQ	mittlerer Abfluss [m ³ /s]
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau	MUNLV NRW	Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
dW/dQ	Differenzenquotient; Steigerung der Abflusskurve	MW	Mittelwasserstand [cm]
E	Einwohner	n	längere Reihe von aufeinander folgenden Jahren
FP	Flutpolder	N	Werteanzahl
GIQ	Gleichwertige Abflüsse [m ³ /s]	NNQ	niedrigster Niedrigwasserabfluss [m ³ /s]
GIW	Gleichwertige Wasserstände [cm]	NQ	Niedrigwasserabfluss [m ³ /s]
Gumbel	Verteilungsfunktion	NRW	Nordrhein-Westfalen
HHQ	höchster Hochwasserabfluss [m ³ /s]	NW	Niedrigwasserstand [cm]
HHW	höchster Hochwasserstand [cm]	P	probability (Wahrscheinlichkeit)
HQ	Hochwasserabfluss [m ³ /s]	Pearson III	Verteilungsfunktion
HQ_T	ist derjenige Scheitelabfluss, der zu einer längeren Reihe von aufeinander folgenden Jahren in der Zeitspanne von T Jahren einmal, somit insgesamt n/T mal, erreicht oder überschritten wird	Q	Abfluss [m ³ /s]
HSG NRW	Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen	R	Rang der Werte in der Reihe
HSK	Hochwasserstudien Kommission für den Rhein	So	Sommer
HW	Hochwasserstand [cm]	SOBEK	Programmname; hydrodynamisches, eindimensionales Hochwasserablaufmodell
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins	StAWA	Staatliches Amt für Wasser- u. Abfallwirtschaft
K	Kalenderjahr	StUA	Staatliches Umweltamt
K_s	absolute Rauheit [m]	SYNHHP	Programmname; Synoptisches Hochwasserablaufprogramm
K_{st}	Geschwindigkeitsbeiwert nach Strickler	T	Wiederholungszeitspanne (Jährlichkeit)
KWERT	Programmname; eindimensional stationäres Wasserspiegellagenberechnungsverfahren	TP	Taschenpolder
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser	U	Unterschreitung
LFU	Landesanstalt für Umweltschutz	W	Wasserstand [cm]
		Wi	Winter
		WSV	Wasser- u. Schifffahrtsverwaltung
		ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt