

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

**Wirksamkeit von Hochwasservorsorge-
und Hochwasserschutzmaßnahmen**

LAWA



LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER

Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Vorsitz: Umweltministerium Mecklenburg – Vorpommern
LAWA-Arbeitskreis „Bewirtschaftung oberirdischer Gewässer, Wasserbau“
in der LAWA-Arbeitsgruppe „Oberirdische Gewässer und Küstenschutz“

Schwerin, April 2000

Verantwortlich: MR Dr.-Ing. Bernd Worreschk, Ministerium für Umwelt und Forsten
Rheinland-Pfalz

Gliederung

I. Vorwort/Einleitung

II. Wirkungsabschätzung von Hochwasservorsorge- und Hochwasserschutzmaßnahmen

1. Retention im Einzugsgebiet

1.1 Bewuchs

1.2 Boden

1.3 Gelände

1.4 Struktur des Gewässernetzes

1.5 Hochwasserrückhaltungen

1.6 Wirkung von Flusstauhaltungen

2. Retention am und im Hauptgewässer

III. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

I. Vorwort/Einleitung

Hochwasseraktionspläne sollen auf eine deutliche Minderung der Schadensrisiken und der Hochwasserstände abzielen. Die Verstärkung des Hochwasserbewusstseins und die Verbesserung der Hochwassermeldesysteme stellen weitere wichtige Ziele der Hochwasservorsorge dar.

Bereits in den Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz der LAWA werden die Möglichkeiten genannt, die geeignet sind, Hochwasserereignisse zu dämpfen. Diese Maßnahmen unterschiedlichen Charakters reichen vom flächenhaften Wasserrückhalt, Rückhalt im Gewässer und der Talau bis hin zu dem technischen Hochwasserschutz mittels Rückhaltebecken und Talsperren. In ihren Leitsätzen zur Schadensbegrenzung bei Hochwasser erwartet die LAWA, dass alle diese Möglichkeiten auch genutzt und ausgeschöpft werden, um die Hochwassersicherheit und Hochwasservorsorge in Deutschland zu verbessern.

Für eine qualifizierte Bewertung der Wirksamkeit reicht eine qualitative Aneinanderreihung zu ergreifender Maßnahmen allerdings nicht aus. Erstmals konnte in einer Wirkungsabschätzung der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR) zu den Maßnahmen im Aktionsplan Hochwasser für den Rhein der komplexe Zusammenhang verschiedenartiger Maßnahmenbündel für das Abflussregime eines großen Stromes übersichtlich dargestellt werden, die Grundlage dieses Berichtes ist. Dabei wurde deutlich, dass die mit Abstand wirksamsten Maßnahmen zur Absenkung des Wasserspiegels bei Hochwasser i.d.R. in der durch Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes möglichen Wiedergewinnung ehemals vorhandener Überschwemmungsgebiete in der Talau bestehen. Darüber hinaus dürfen jedoch die vielfältigen abflussdämpfenden und verzögernden Maßnahmen in der Fläche keinesfalls vernachlässigt werden.

II. Wirkungsabschätzung von Hochwasservorsorge- und Hochwasserschutzmaßnahmen

Die nachfolgend beschriebenen Hochwasservorsorgemaßnahmen sind aus heutiger Sicht realistisch. Spezielle Maßnahmen müssen zu gegebener Gelegenheit auf ihre Wirksamkeit untersucht werden.

1. Retention im Einzugsgebiet

Maßgebend für die Höhe des Hochwassers sind neben der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlags die Speicherwirkungen von Bewuchs, Boden einschließlich Schneedecke, Gelände und Gewässernetz des Einzugsgebietes.

1.1 Bewuchs

Bewuchs hat vielfachen Einfluss auf die Abflussvorgänge. Durch die lebenden und abgestorbenen oberirdischen Organe wirkt er über die Interzeption verdunstungserhöhend und damit prinzipiell abflussreduzierend. Durch intensive Durchwurzelung des Bodens wirkt der Bewuchs in entsprechendem Maße auf die Infiltrationsfähigkeit. Darüber hinaus verändert der Bewuchs die Rauigkeit der Oberfläche. Er bremst und reduziert damit den Oberflächenabfluss.

Interzeption (vorübergehendes Speichern von gefallenem und abgesetztem Niederschlag auf (Pflanzen-) Oberflächen) ist bei höherwüchsigen Vegetationsformen besonders ausgeprägt und erlangt vor allem bei immergrünen Arten ganzjährig hohe Bedeutung. Bei landwirtschaftlichen Kulturen spielt Interzeption nur in der Vegetationszeit eine größere Rolle.

Für Wald kann eine mittlere Interzeptionsrate von etwa 25 % des Jahresfreilandniederschlags angenommen werden. Für immergrüne Bestände (z.B. Fichte) sind Größenordnungen zwischen 30 % und 50 % anzusetzen, für laubabwerfende Arten (z.B. Buche) dagegen etwa 15 % - 20 %. Buschbestände verhalten sich ähnlich wie Laubwald. Bei landwirtschaftlichen Kulturen erreichen die mittleren jährlichen Interzeptionsraten Größenordnungen von immerhin 10 % des Jahres-Freilandniederschlags. *Dies bedeutet, dass die Größenordnung der Interzeption zwischen 0,5 und etwa 5 mm Niederschlagshöhe/Ereignis liegt.* Die Interzeptionskapazitäten der Streuschicht unter Wald liegen im Mittel bei 2 mm.

Aus den genannten Werten ist abzuleiten, dass die Interzeption bei großen Hochwassern nur eine relativ geringe Rückhaltewirkung hat. Für kleinere und mittlere Hochwasser ist jedoch der kumulative Effekt der Interzeption zu berücksichtigen.

Der Bewuchs steuert durch seine **Durchwurzelung** auch die **Infiltrationsfähigkeit** in den Boden. Im allgemeinen werden unter Wald sehr hohe bis mittlere Infiltrationsraten beobachtet. Mittlere Raten ergeben sich für intensiv genutztes Grünland, während bei Acker sehr geringe bis sehr hohe Raten möglich sind - je nach Bearbeitungszustand.

Je höher die **Rauhigkeit** des Bewuchses ist, desto mehr wird Oberflächenabfluss verlangsamt bzw. zurückgehalten. Prinzipiell gilt hierbei: je dichter und je heterogener die Vegetation, desto mehr Wasser wird zurückgehalten. Wald verhindert die Entstehung von Oberflächenabfluss fast vollständig. Auf Wirtschaftsgrünland können dagegen beträchtliche Oberflächenabflussraten auftreten, abhängig vom Ausmaß der Tritt- und -/oder Fahrverdichtungen.

Noch stärkerer Oberflächenabfluss kann auf Ackerflächen entstehen. Doch gibt es große Unterschiede zwischen verschiedenen Kulturen und deren Entwicklungsstadien. Der höchste Oberflächenabfluss wird kurz nach der Ernte bei durch Befahren verdichteten Böden beobachtet.

1.2 Boden

Der Einfluss des Bodens auf die Hochwasserentstehung wird oft erheblich unterschätzt. *Die Größenordnung des Bodenspeichers liegt zwischen 100 mm und 300 mm Niederschlag, je nach Bodentyp und -art.* Nur wenn der Bodenspeicher durch Vorregen aufgefüllt ist, besteht das Risiko großer Hochwasser.

Eine der wesentlichen hochwasserreduzierenden Prozesse im Boden wird durch die Verdunstung insbesondere durch die Transpirationsleistung der Pflanzen bewirkt. Das sommerliche Bodenwasserdefizit führt dazu, dass auch größere Mengen an Niederschlag aufgenommen und gegen die Schwerkraft gespeichert werden können. Das Risiko von Sommerhochwassern wird damit minimiert.

Entscheidend für die Ausnutzung des Bodenspeichers ist, ob der Niederschlag in den Boden eindringen kann, oder ob es sehr schnell zu Oberflächenabfluss kommt. Unter Wald ist auf Grund der optimalen Bedingungen für die **Infiltration** kaum mit Oberflächenabfluss zu rechnen. Hingegen ist auf versiegelten Flächen im Grundsatz nur Oberflächenabfluss zu erwarten. Landwirtschaftlich genutzte Flächen nehmen eine Zwischenstellung ein.

Insbesondere grobe Bodenporen beschleunigen die Infiltration, was auch für die Absickerung aus dem Wurzelraum von besonderer Bedeutung sein kann. In hängigen Lagen (Mittelgebirge) kann die Weiterleitung des infiltrierten Wassers durch laterales Fließen erheblich zur beschleunigten Hochwasserbildung beitragen. Die Fließgeschwindigkeiten sind jedoch um Zehnerpotenzen geringer als bei reinem Oberflächenabfluss.

Ackerflächen sind bzgl. Infiltration besonders labil. Ein wesentlicher Faktor, der auf Ackerflächen die Infiltrationsfähigkeit und damit den Oberflächenabfluss bestimmt, ist die **Gefügestabilität**. Eine hohe Gefügestabilität verhindert eine Verschlämmung und Zerstörung der Grobporen im Oberboden. Sie ist u.a. vom Humusgehalt abhängig. So üben die Unterschiede der Gefügestabilität einen stärkeren Einfluss auf die Oberflächenabflusswerte aus als Vorfeuchte oder Pflanzenbestand.

Frost wirkt in der Regel bzgl. des Abflussverhaltens von Böden "oberflächenversiegelnd". Dagegen infiltriert selbst bei hohen Bodenfeuchten (gesättigter Zustand) Wasser über das Makro- und Mikroporensystem in den Boden. Es erfolgt eine Weiterleitung und Speicherung in den Makroporen. Weiterhin kann Niederschlag in Schneedecken zwischengespeichert sein, der dann bei Tauwetter maßgeblich zur Entstehung von Hochwasser beiträgt.

1.3 Gelände

Die Wirkung der Retention durch das Gelände entspricht insbesondere den Einflussfaktoren Bewuchs und Boden bei der Übertragung auf die Fläche. *Das flächenhaft in kleinen und kleinsten Geländevertiefungen und Geländemulden zurückgehaltene Wasser wird auf eine Größenordnung von etwa 10 mm geschätzt.* Sicher erscheint, dass die Werte nutzungsbedingt eine große Variabilität aufweisen.

Sofern **nutzungsbedingte Einflüsse** auf den Hochwasserabfluss isoliert darstellbar sind, lassen sich folgende benennen:

- Nutzungsstruktur einer Landschaft, d.h. Anteile und Verteilung von Kulturarten wie Forst, Grünland, Acker
- Zuschnitt von landwirtschaftlichen Nutzflächen, z.T. von Wege- und Grabensystemen vorgegeben oder zusammen mit deren Anlage vorgenommen
- Lage von Nutzflächen zum Gewässer
- Erschließung der Landschaft durch (insbesondere befestigte und versiegelte) Wege
- Grabendichte und Verlauf von Gräben im Hinblick auf deren Funktion beim Weitertransport von Oberflächenabfluss.

Diese allgemein gehaltenen Einflüsse können für ackerbaulich und als Grünland genutzte Flächen wie folgt ergänzt werden:

- Lange abflusswirksame Hangflächen ohne abflussmindernde Zwischenstreifen
- Bewirtschaftung in Gefällrichtung
- Nutzung oder fehlerhafte Nutzung von hangabwärts geöffneten Mulden in denen Oberflächenabflüsse konvergieren können
- Stark beanspruchte Fahrspuren in Gefällrichtung
- Gefügezerstörende Art der Bodenbearbeitung, humusmindernde Bewirtschaftungsweise
- Bodenverdichtungen (Pflugsohlenverdichtungen, Fahrverdichtungen, Fahrspuren)
- Geringer Bedeckungsgrad durch Nutzpflanzen in niederschlagsreichen Perioden bzw. in Perioden mit hohen Niederschlagsintensitäten
- Überwinterung von Ackerflächen ohne Bearbeitung (= Schwarzbrache).

Auf Grünland

- Verdichtungen durch Tritt der Weidetiere
- Fahrverdichtungen (bei Düngung, Mahd, Heuwerbung etc.)
- Stark genutzte Grünlandeinfahrt an stärker geneigten Stellen.

Der Effekt der **Versiegelung** des Bodens durch Siedlungen und Verkehrswege lässt sich kaum mittels statistischer Analysen von Hochwasserabflüssen an den Pegeln quantifizieren. Beim Vergleich eines fiktiven Zustandes ganz ohne Siedlungsflächen mit dem Zustand von 1985 ergaben sich über Modellrechnungen folgende Erhöhungen der Scheitelabflüsse im Rhein: *Für Ereignisse mit einer Regendauer von 4 Tagen Erhöhungen um + 8 %, für Ereignisse mit einer Regendauer von einem Tag Erhöhungen um +12 %*. Für die Zeit von 1951 bis 1985 kann man näherungsweise die Hälfte der Erhöhungen annehmen, weil 1951 bereits etwa die Hälfte der Bebauung von 1985 vorhanden war. Die größten prozentualen Erhöhungen ergeben sich für die Ereignisse mit kleinen Hochwasserscheiteln im Rhein. Die Ballungsgebiete haben an diesen Erhöhungen nur einen relativ geringen Anteil (im Mittel 1,3 %), der überwiegende Anteil stammt von der im Gebiet verteilten Bebauung, die fast 80 % der Gesamtbebauung ausmacht.

Zu den Auswirkungen eines flächenhaften **Waldsterbens** auf die Hochwasserabflüsse gibt es kaum gesicherte Erkenntnisse. *Berechnungen mit einem Flussgebietsmodell ergaben bei vollständiger Entwaldung Erhöhungen der Scheitelabflüsse im Oberrhein (37 % Waldanteil) um im Mittel +17 % bei einer Regendauer von 4 Tagen, um im Mittel +28 % bei einer Regendauer von einem Tag.*

Die **Niederschlagswasserversickerung** ist Teil der Hochwasservorsorge. Ähnlich wie bei vielen Maßnahmen des natürlichen Rückhaltes ist hierbei die Unterstützung des natürlichen Wasserrückhaltes nicht als isoliertes Ziel des Hochwasserschutzes anzusehen, sondern als Teil eines fachübergreifenden Flächen- und Gewässermanagements zur Bewahrung und Verbesserung der Umwelt insgesamt. Die Realisierung der dezentralen Versickerung von Niederschlagswasser kann in kleinen, dichtbesiedelten Einzugsgebieten grundsätzlich wirkungsvoll sein, ist aber ein Langzeitprogramm. Bei Neubaugebieten sowie beim Ausbau überlasteter oder erneuerungsbedürftiger Anlagen könnte sie

jedoch unmittelbar zum Einsatz kommen. Die Anwendung von z.B. Mulden-Rigolen-Systemen kann nutzbare Speicherkapazität schaffen. Für große Hochwasser in großen Flussgebieten ist der abflussmindernde Effekt der Niederschlagsversickerung minimal.

1.4 Struktur des Gewässernetzes

Die **Form eines Einzugsgebietes** hat bei gleichzeitiger gleichmäßiger Beregnung einen Einfluss auf den Ablauf der Hochwasserwellen. So entstehen in langgestreckten Einzugsgebieten abgeflachte Hochwasser, da die Wellen der Teilgebiete nacheinander im Hauptgewässer eintreffen und ablaufen. Im Falle von mehr oder weniger runden Gebieten treffen die Teilwellen etwa gleichzeitig ein und addieren sich. Extrema ergeben sich bei Koinzidenz von Zugrichtung der Niederschlagsfront und Wellenablauf.

Die Speicherung im Gewässer oder Flussnetz wirkt in einem Flussabschnitt als Abflachung und Zeitverschiebung einer ablaufenden Hochwasserwelle. Ein dichtes **Flussnetz** bei hohem Gefälle bewirkt einen raschen Abfluss aus dem Einzugsgebiet. Umgekehrt kann bei geringem Gefälle der raschere Abfluss ausgeglichen werden durch die größere Speicherung in den Fließgerinnen. Flussbegradigungen führen zu einer Beschleunigung von Hochwasserwellen. Da in einem Einzugsgebiet die Hochwasserwellen der flussabwärts gelegenen Seiteneinzugsgebiete zuerst zum Abfluss kommen, bewirken flussbegradigende Maßnahmen im Oberlauf tendenziell eine Überlagerung der Hochwasserwellen und können damit zu einer Erhöhung der Welle führen. Unter bestimmten Bedingungen sind auch Entzerrungen (Ermäßigung der Scheitelabflüsse) möglich.

1.5 Hochwasserrückhaltungen

Hochwasserrückhaltungen in Seiteneinzugsgebieten des Hauptgewässers verzögern dessen Wellenablauf und können dadurch tendenziell die Hochwasserscheitel des Hauptflusses mindern oder auch erhöhen. Technische Rückhaltemaßnahmen zum Hochwasserschutz sind im allgemeinen auf bestimmte gefährdete Orte innerhalb dieser Einzugsgebiete ausgerichtet. Die für den Einsatz der Rückhaltesysteme maßgebenden Hochwasservorhersagezeiten sind wichtig, da an sie die technische Steuerung der Rückhalteräume gebunden ist. Das heißt vor allem für kleine Einzugsgebiete, dass nach einer Füllung der Rückhalteräume diese möglichst schnell wieder geleert werden müssen, da praktisch jederzeit mit einem erneuten schadensbringenden Hochwasserabfluss gerechnet werden muss.

Bedingt durch die Hochwassergenese in den Seiteneinzugsgebieten sind also die Auswirkungen auf die Unterliegerpegel im übergeordneten Flusssystem uneinheitlich. Berechnungen im Rheingebiet ergaben sowohl Reduzierungen der Hochwasserscheitel im Rhein als auch Abflussverschärfungen. Der Einsatz der Rückhaltungen zeigte in einigen Fällen aber auch keine Wirkungen im Scheitelbereich des Rheinabflusses.

Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich folgender allgemeiner Schluss ziehen:

Technische Rückhaltemaßnahmen wirken eindeutig hochwasserreduzierend, jedoch immer nur sektoral für das jeweilige vorgesehene Schutzziel. Auswirkungen im nächst übergeordneten Flusssystem sind zwar vorhanden, aber entsprechend dem im Verhältnis zur Fülle der Hochwasserwellen kleinen Rückhaltevolumen gering. Je nach Genese des Hochwassers kann der Einsatz der Rückhaltungen im übergeordneten System zu Scheitelabflusserhöhungen oder -reduzierungen führen oder wirkungslos bleiben.

1.6 Wirkung von Flusstauhaltungen

Es wird immer wieder auf Möglichkeiten hingewiesen, in **Flusstauhaltungen Wasser zurückzuhalten**. Immerhin umfassen die staugeregelten Strecken allein der Bundeswasserstraßen eine Gesamtlänge von rund 1.200 km. Die Forderungen sind dahingehend, die vorhandenen Wehre der Flusstauhaltungen vor Hochwasserbeginn abzusenken, die Stauhaltungen also zu entleeren und im Hochwasseranlauf die Wehre wieder aufzurichten. Das heißt, die Stauhaltungen als Auffangbecken zu benutzen.

Überschlägliche Ermittlungen im Rheingebiet ergeben vorgefüllte Volumina im Bereich des zwei- bis dreifachen Mittelwasserabflusses (MQ) für Neckar, Main und Mosel von je ca. 70 bis 80 Mio m³. Für Lahn und Saar werden 15 bis 20 Mio m³ erreicht. Die Verfügbarmachung dieser Stauräume würde alle Wellen in ihrer Anfangsphase in Abhängigkeit von den Anstiegsgradienten der Durchflüsse mehr oder weniger verlangsamen. Die Verlangsamung würde bis zu Abflüssen wirksam sein, bei denen auch im gegenwärtigen Zustand schon die Querschnitte vollständig freigegeben werden. Im Falle der Mosel würde die genannte Volumennutzung den Wellenanlauf je nach Größe des Abflusses am Wellenfuß und Steilheit des Wellenanstiegs um 12 bis 24 h verlangsamen. Bei Abflüssen >2.500 m³/s (schadensbringende Hochwasser) geht dieser Effekt auf Null zurück.

Um die genannten Wellenverlangsamungen Realität werden zu lassen, wären Entleerungen der Haltungen (Wehrabsenkungen) im Vorfeld von Hochwassern erforderlich. Sie müssten bei Erreichen der im statistischen Mittel gegebenen Hochwasser-Basisabflüsse abgeschlossen sein. Um sicher zu gehen, dass die Vorabsenkungen keine unzulässigen Wellenhöhen flußab erzeugen, müssten die Entleerungen mit relativ geringen Abflüssen erfolgen. Dies führt zu erheblichen Entleerungsdauern.

Eine Entleerung mit z.B. 100 m³/s würde in Neckar, Mosel oder Main 190 bis 220 h in Anspruch nehmen und durchlaufend Erhöhungen an den jeweiligen Flussmündungen von 20 bis 30 cm erzeugen. In solchen Zeitabschnitten sind die Abflüsse längst weit über die Bezugsgrößen angestiegen, d.h. die verfügbaren Volumina durch Zuflüsse schon teilweise wieder verbraucht. Weil sie damit nur reduziert verfügbar wären, verkürzte sich zwar auch die Entleerungszeit, sie läge trotzdem in der Größenordnung mehrerer Tage. Damit würden Vorentleerungen Vorhersagen erforderlich machen in der Größenordnung mehrerer Tage, was selbst für den Rhein zur Zeit nicht möglich ist.

Durch geänderte Stauregelungen in den Bundeswasserstraßen Neckar, Main, Lahn und Mosel kann somit i.d.R. kein zusätzlicher Hochwasserrückhalteraum bereitgestellt werden. Diese Ergebnisse sind grundsätzlich auf andere staugeregelte Flüsse übertragbar.

2. Retention am und im Hauptgewässer

Bei durch Deiche geschützten Flussniederungen können zur Verbesserung der Hochwassersituation **Erweiterungen der Flussretention** sowie **Rückhaltungen neben dem Fluss** beitragen. Die naturräumlichen Gegebenheiten begrenzen den Umfang der Maßnahmen. Die gesamte Flussstrecke ist auf Möglichkeiten der Retention zu überprüfen.

– gesteuerte Rückhaltungen

Technische (gesteuerte) Rückhaltungen werden immer mit ganz bestimmter Zielsetzung betrieben. Sie wirken damit sektoral auf bestimmte Orte. Die technischen Rückhaltungen am Oberrhein haben aber auch Wirkungen auf den Niederrhein. *Bei 200jährigen Ereignissen am Oberrhein sind für Hochwasser am Pegel Kaub maximale Abflussreduzierungen von 1.210 m³/s (ca. 100 cm), minimal 660 m³/s und im Mittel 890 m³/s möglich. Für den Niederrhein (Pegel Köln) ergeben sich geringere Werte. Die Abflussreduzierungen betragen maximal 1.000 m³/s, minimal 520 m³/s und im Mittel 800 m³/s. Dies entspricht maximalen Wasserstands-senkungen von ca. 60 cm in Köln und ca. 40 cm in Lobith (im Mittel 45 bzw. 30 cm).*

Der Einsatz temporärer Rückhaltungen bedeutet immer Abflussumverteilungen während des Hochwassers. Dies heißt, dass die zur Erzielung einer Abminderung des Hochwasserscheitels am Ort der Maßnahme zurückgehaltenen Volumina (möglichst frühzeitig) wieder abzugeben sind. In Einzelfällen wird zur Erhöhung der Effizienz solcher Maßnahmen auch Retentionsraum vorentleert. Alle Entleerungen führen zur Erhöhung der Wasserstände stromabwärts. Es besteht die Gefahr, dass diese Erhöhungen flussabwärts sensible Wasserstandsbereiche treffen.

– Wirkung von Sommerdeichen

An vielen größeren Gewässern existieren Sommerdeichsysteme. Am Oberrhein zwischen der Neckarmündung und Bingen umfassen diese einen geschätzten Rückhalteraum von 70 Mio. m³. Diese Sommerpolder können mittlere Hochwasser deutlich reduzieren.

Die Änderung der Scheitelabflüsse am Pegel Kaub infolge Aufgabe sämtlicher Sommerdeiche zugunsten natürlicher Ausuferungsflächen wurde anhand von 120 Modellhochwassern quantifiziert. Die Berechnungen machen deutlich, dass sich die *abflussreduzierende Wirkung der zwischen Worms und Bingen liegenden Sommerpolder auf einen weiten Bereich der Hochwasserscheitel auswirkt. Sie beginnt im Mittel bereits bei Hochwasserscheiteln mit einem Wiederkehrintervall am Pegel Kaub von etwa 10 Jahren, und das Optimum kann bei Wiederkehrintervallen des Scheitelabflusses von rund 20 bis 25 Jahren mit im Mittel rund 100 m³/s (ca. 10 cm) angegeben werden.*

– Maßnahmen des örtlichen Hochwasserschutzes

Generell lässt sich feststellen, dass, sofern die Hochwasser kleiner bzw. gleich dem gewählten Hochwasserschutz sind, sich allgemein eine Verschärfung des Abflusses einstellt. Übersteigen die Hochwasser den gewählten Hochwasserschutz, so ergibt sich eine Abminderung. Dies ist die Folge einer Verringerung der Retentionsräume bis zum Bemessungsziel. Bei Übersteigen des

Bemessungswasserstandes werden die dahinter liegenden Überflutungsflächen wieder geflutet mit Speicherwirkung bis zur Höhe des Bemessungszieles. Bei weiter ansteigendem Hochwasser gehen die Abflussdifferenzen wieder gegen Null. *Die Auswirkungen auf die extremen Hochwasserscheitel sind außerordentlich gering.* Dies bestätigen Untersuchungen an Mosel und Mittelrhein.

– **Reaktivierung ehemaliger Überschwemmungsgebiete**

(gesteuerte und ungesteuerte Retention)

Zur Wirkung der Reaktivierung ehemaliger Überschwemmungsgebiete wurden zahlreiche Modellberechnungen durchgeführt. Grundsätzlich gilt für **ungesteuerte Retention**, dass gegenüber **gesteuerter Rückhaltung** ein Vielfaches an Volumen (Fläche) für die Erzielung gleicher Wirkung auf den Scheitelabfluss erforderlich ist. Für die Wirkung im einzelnen sind verschiedene Gegebenheiten wie z.B. die Dynamik der Wellen entscheidend und die örtlichen Bedingungen. Für die Rückhaltungen am Oberrhein bis Worms wurde ein Faktor ermittelt, der zwischen 1 und 8 lag, im Mittel zwischen 3 und 4. In Einzelfällen wurden Faktoren ermittelt, die weit über 20 lagen. Berechnungen mit Poldern am Niederrhein führten zu gleichen Ergebnissen.

III. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der untersuchten Hochwasservorsorgemaßnahmen stellen eine Auswahl aus dem Spektrum der Möglichkeiten dar. Spezielle Maßnahmen (nach Prinzip und Ort) müssen gesondert auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Die hier zusammengestellten Ergebnisse werden sich jedoch in den Grundsätzen nicht ändern.

1. Je nach Flussgebiet können Hochwasser im gesamten Einzugsgebiet oder nur in Teilgebieten auftreten. Das Hochwasserregime großer Flussgebiete ist i.d.R. geprägt von außergewöhnlicher Heterogenität. Dies bedeutet, dass außergewöhnliche Hochwasser immer nur in Teilen des Einzugsgebietes auftreten.
2. Überlagerung der Scheitel des Hauptgewässers mit den Scheiteln der Nebengewässer: Dies ist für jedes Flussgebiet zu untersuchen. So laufen die Scheitel vieler Nebenflüsse den Hauptgewässerscheiteln in der Regel vorweg. Bei Verzögerung von Nebengewässerwellen kann es daher zu ungünstigen Überlagerungen mit der Hauptgewässerwelle kommen.
3. Maßnahmen, die Wasser während der gesamten Dauer eines Hochwassers längs des Gewässers zurückhalten (z.B. in Seen, Poldern), wirken abflussmindernd im Neben- und Hauptgewässer.
4. Maßnahmen im Einzugsgebiet (Bewuchs, Boden, Gelände, Gewässernetz) wirken abflussdämpfend und aus vielfältigen ökologischen Gründen positiv. Große Hochwasser bleiben jedoch insbesondere in übergeordneten Gewässern, vor allem bedingt durch Vorregen, unbeeinflusst (z.B. Mai-Hochwasser 1999 in Bayern).

5. Technische Rückhaltungen können hinsichtlich klar definierter Schutzziele Hochwasserscheitel besonders reduzieren. Ihre Wirkung verringert sich mit zunehmender Entfernung zum Schutzobjekt.
6. Dämpfungsmaßnahmen im Einzugsgebiet sind zumeist nur wirksam für das übergeordnete Flussgebiet, wenn am Ort der Maßnahme ebenfalls Hochwasser stattfindet.
7. Gezielte Entlastung in Überflutungsräume kann vor Katastrophenschäden bewahren.
8. Wenige örtlich begrenzte Hochwasserschutzmaßnahmen binden wenig Volumen und haben auf die Unterlieger im Mittel keine Auswirkung.
9. Lokale Erweiterungen der Durchflussquerschnitte wirken in diesem Bereich wasserspiegelsenkend. Sie haben keine Fernwirkung.
10. Eine einfache Wirkungsaddition von Hochwasserschutzmaßnahmen ist nicht möglich.

Eine kumulative Berücksichtigung aller hier genannten Möglichkeiten führt nach derzeitigem Kenntnisstand unter Beachtung aller Randbedingungen sowie unter der Annahme politischer Durchsetzbarkeit zu deutlichen Reduktionen auch extremer Wasserstände.

Beispielsweise wurde im Rahmen der Aufstellung des Hochwasseraktionsplans Rhein die Größenordnung der Hochwasserabminderung durch die Maßnahmen im Rheingebiet durch die IKSR folgendermaßen quantifiziert:

- **80 cm am Oberrhein**
- **100 cm ab der Mainmündung bis Lobith**

Eine qualitative Wirkungsabschätzung von Rückhaltung im Einzugsgebiet auf Hochwasser im Nahbereich und im Fernbereich der Maßnahme, differenziert nach kleinen und großen Hochwassern, enthält beiliegende Anlage, die aus dem Bericht der IKSR für den Rhein stammt.

Die Verbesserung des Wasserrückhaltes auf der Fläche durch Bodennutzungsänderungen, Versickerungen, Entsiegelungen usw. kann hinsichtlich seiner Wirkung auf den Hochwasserablauf bisher kaum quantifiziert werden.

Wirkungsabschätzung von Rückhaltung im Einzugsgebiet auf Hochwasser		Wirkung im															
		Nahbereich auf								Fernbereich (Hauptgewässer)							
Verbesserung der Hochwasser-situation		kleine				große				kleine				große			
		Hochwasser								Hochwasser							
Wirkung von:		Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer
Bewuchs	Wald/Brachland/Wiese																
	intensive Beweidung/Acker																
Boden	Versiegelte und verdichtete Flächen																
	Frost																
	ökol.Bewirtsch.																
Gelände	Besiedlung																
	Waldsterben (flächenhaft)																
	Entsiegelung/ Regenwasservers.																
Gewässer - netz	keine Rückhaltung																
	Renaturierung																
	örtl.HW-Schutz																
	Verbreiterung von Gewässerquerschnitten																
	Techn. Rückhaltung an Nebengewässern																
	Deichrückverlegung - Winterdeich - Sommerdeich																
	Sommerpolder																
	Techn. Rückhaltung (Wehre u. Rückhalteräume)																
	Tieferlegung von Buhnen																
	Entf. örtl. Engpässe Anlg.v.Nebenrinnen																
Vergr. d. Vorländer																	
Tieferl.d.Vorländer																	