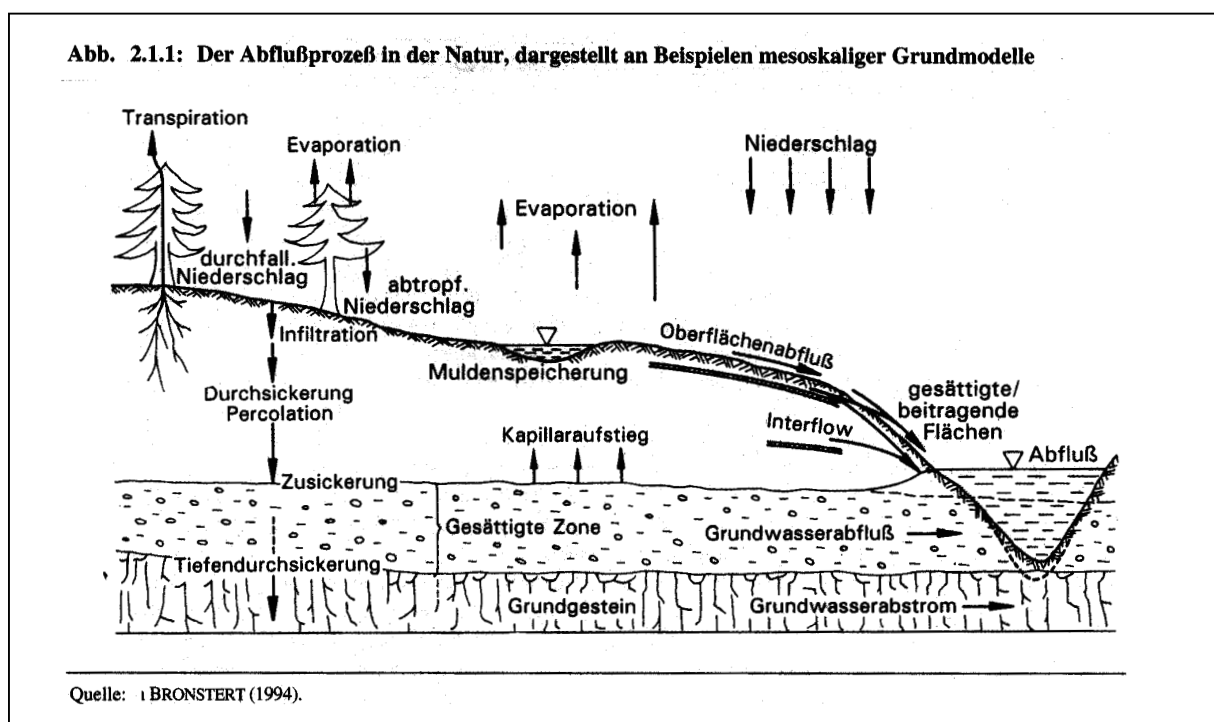


### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Hydrologische Grundlagen (Ergebnisse der Literaturrecherche)

Der Wasserabfluss und damit auch das Hochwasser ist eine Komponente des natürlichen terrestrischen Wasserkreislaufs (Abbildung 2). Eine überaus umfang- und detailreiche, aktuelle wie historisch umfassende Übersicht zum Stand des Wissens und der Fachliteratur zum Wasserabfluss, insbesondere auch zu Abfluss und Abflussbildung in bewaldeten Einzugsgebieten und zur Hochwasserminderung durch Wald gibt MENDEL (2000). Ein guter Überblick zum Stand des hydrologischen Wissens bis 1990 findet sich auch bei BAUMGARTNER und LIEBSCHER (1990).



**Abb. 3:** Abfluss als Komponente des terrestrischen Wasserkreislaufs (verändert aus MENDEL 2000)

##### 3.1.1 Hydrologie des Wasserabflusses

Als Abfluss wird allgemein die Bewegung des Wassers auf (Oberflächenabfluss) oder unter der Landoberfläche (Zwischenabfluss aus der ungesättigten, Grundwasserabfluss aus der wassergesättigten Bodenzone) unter dem Einfluss der Schwerkraft definiert (MENDEL 2002). Unter Hochwasser versteht man nach DIN 4049 den Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss einen bestimmten Schwellenwert überschreitet (BMU 2003). Solche Ereignisse hat es zu allen Zeiten gegeben (BMU 2003). Je nach Höhe des Wasserstandes und dem Grad der Anpassung der Nutzung können diese für Bevölkerung, Wirtschaft und Infra-

struktur erhebliche Folgen haben (Hochwasserschäden). Auslöser von Hochwasser sind im Regelfall Stark- oder Dauerniederschläge, wobei Schneeschmelze verstärkend hinzukommen kann. Demnach unterscheidet man zwei Haupttypen von Hochwasserereignissen (KRON 2002):

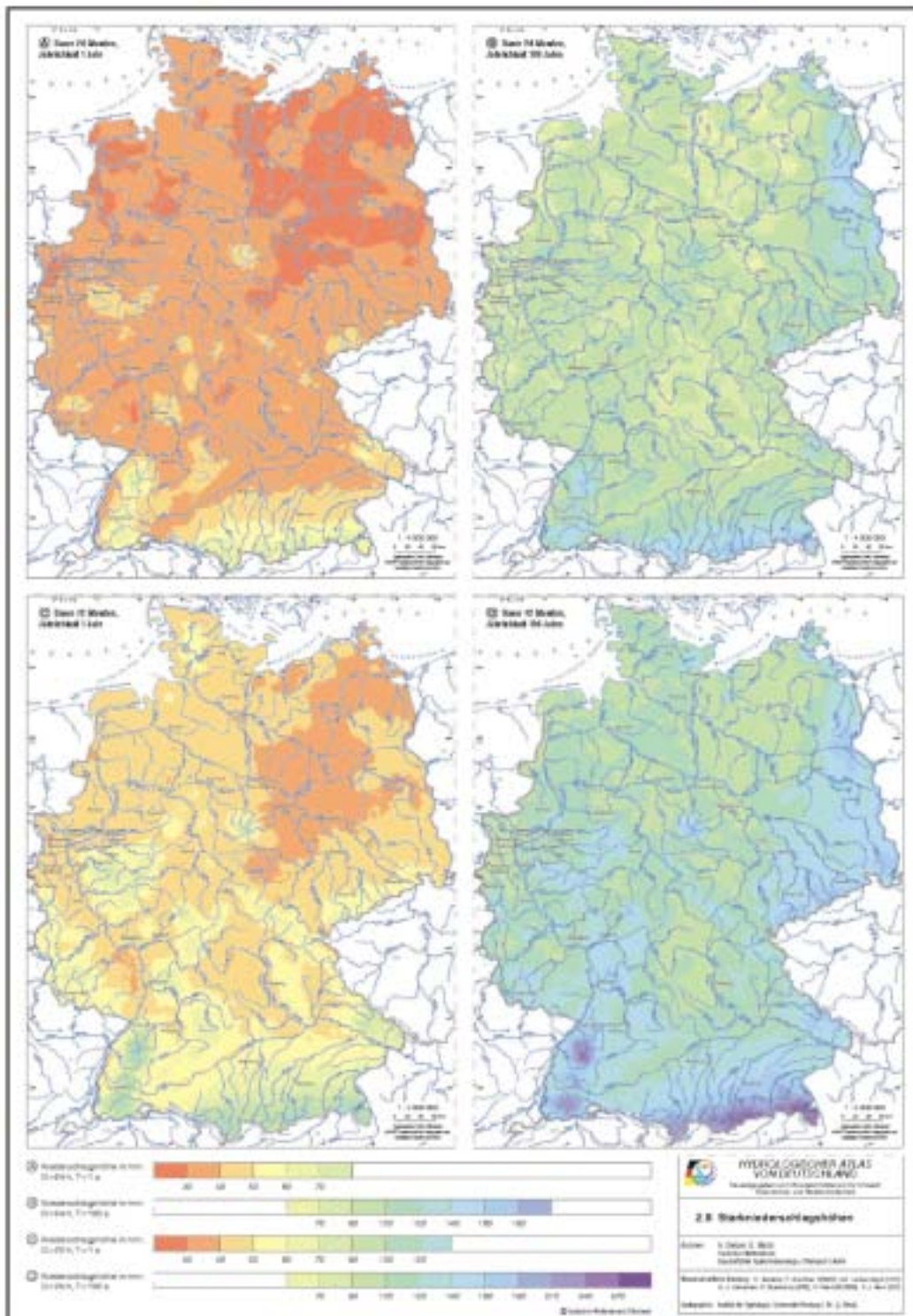
- **Sturzfluten**

werden ausgelöst von intensiven, zumeist räumlich und zeitlich begrenzten Starkniederschlagsereignissen („Wolkenbruch“), typischerweise Gewitter. Dabei überschreitet die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der Böden („Infiltrationsüberschuss“). Dies führt (auch bei nicht wassergesättigten Böden) zu Oberflächenabfluss und schneller Konzentration des Abflusses im Gewässer. Folge ist eine rasch ansteigende Hochwasserwelle typischerweise in kleineren Einzugsgebieten (z. B. Wildbacheinzugsgebiet) mit sehr kurzen Vorwarnzeiten im Bereich von zum Teil nur Minuten.

- **Flussüberschwemmungen**

sind das Ergebnis ausgiebiger, oft tagelang anhaltender, zumeist großräumiger Niederschläge („Landregen“), typischerweise im Zusammenhang mit Tiefdruckfronten, teilweise auch in Zusammenwirken mit Schneeschmelze. Dabei können die Böden je nach Ausgangswassergehalt nach Erreichen der Wassersättigung kein weiteres Wasser mehr aufnehmen. Weiterer Niederschlag fließt, weitgehend unabhängig von der Bodenbedeckung, als oberflächen(naher) Sättigungsflächenabfluss ins Gewässer ab. Dadurch baut sich typischerweise in großen Tiefland-Flusseinzugsgebieten über teilweise mehrere Tage hin eine das Flusstal durchlaufende Hochwasserwelle auf.

Niederschlagshöhen für diese beiden idealtypischen Ereignisse für bestimmte Gebiete können dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2003) als 24- bzw. 72-Stundenniederschlagssummen mit verschiedenen hohen Auftretenswahrscheinlichkeiten (Jährlichkeiten) entnommen werden (Abbildung 4). Dabei dienen insbesondere die Niederschlagshöhen mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (d.h. im statistischen Mittel tritt dieses Ereignis an einem Ort etwa einmal in 100 Jahren auf) als Bemessungsniederschlag für die Ermittlung von Bemessungsabflüssen der Jährlichkeit 100 Jahre. Diese werden in der wasserwirtschaftlichen Praxis als Bemessungsabflüsse zur Dimensionierung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen zu Grunde gelegt.



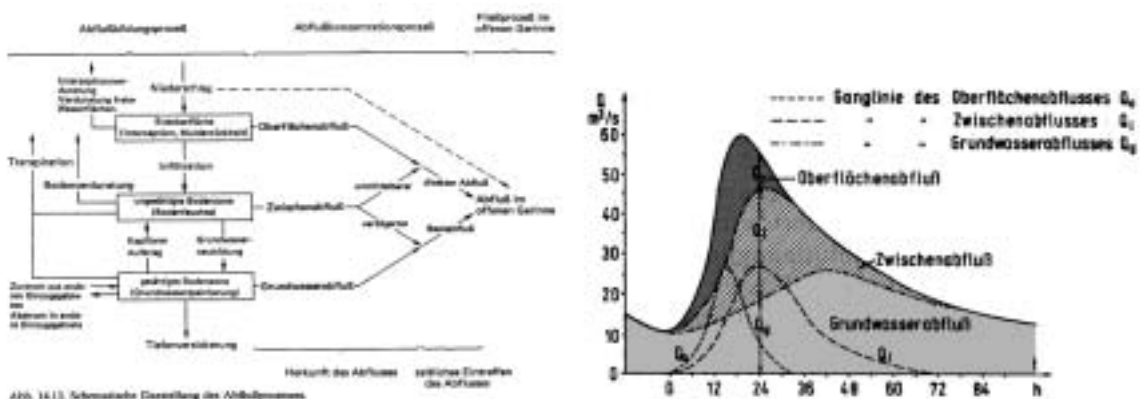
**Abb. 4:** Starkniederschlagshöhen für 24 Stunden (oben) bzw. Dauerniederschlagshöhen für 72 Stunden (unten) mit Jährlichkeit 1 Jahr (links) und Jährlichkeit 100 Jahre (rechts) (aus BMU 2003)

Für Bayern ist demnach auf Basis der Zahlen des Hydrologischen Atlases für Deutschland (Bezugszeitraum 1961-1990) mit folgenden Stark- oder Dauerniederschlagsereignissen als Auslöser für Hochwasserabfluss zu rechnen:

**Tab. 4:** Rahmenwerte für Stark- bzw. Dauerregenereignisse in Bayern (in Anhalt an BMU 2003)

Region	Starkniederschlagshöhe in 24 Stunden		Dauerniederschlagshöhe in 72 Stunden	
	Jährlichkeit 1 Jahr	Jährlichkeit 100 Jahre	Jährlichkeit 1 Jahr	Jährlichkeit 100 Jahre
	mm bzw. l/m <sup>2</sup>			
Flachland nördl. Donau	unter 30 - 40	70 - 100	unter 30 - 70	70 - 120
Mittelgebirge	40 - 60	80 - 140	50 - 100	80 - 210
Flachland südl. Donau	30 - 60	80 - 140	40 - 100	80 - 180
Bayerische Alpen	50 - über 70	120 - über 180	80 - über 120	160 - über 270

Damit aus einem Niederschlagsereignis ein Hochwasserabfluss entsteht, wirken die Prozesse der Abflussbildung als der Übergang von vertikaler zu lateraler Wasserbewegung an der Bodenoberfläche oder im Boden, die Abflusskonzentration als lateraler, dem Oberflächenrelief folgender Fließprozess und schließlich der Abfluss im Gerinne zusammen (Abbildung 5). Sie bilden schließlich in komplexer Weise die Hochwasserabflusswelle als „Systemantwort“ des Wassereinzugsgebietes.

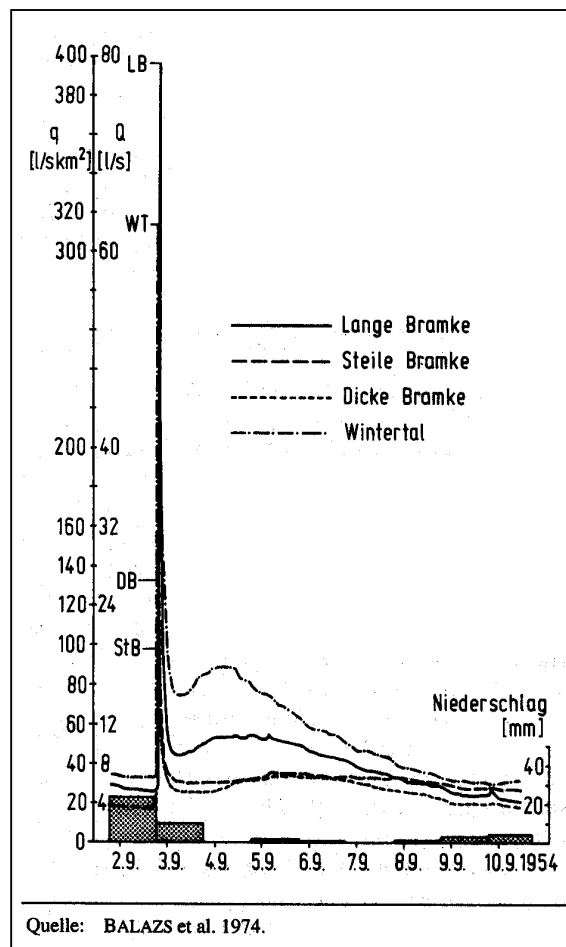


**Abb. 5:** Prozesse der Abflussbildung, Abflusskonzentration und des Abflusses im Gerinne (links) sowie Zusammensetzung des Abflusses aus Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss (rechts) (aus BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1990, verändert)

Dabei bestimmt überwiegend die am schnellsten reagierende Komponente des Oberflächenabflusses den Hochwasserabfluss bei Starkregen in kleinen Einzugsgebieten und bei hohen Regenintensitäten („Sturzflut“). Bei großräumigen Flussüberschwemmungen auf Grund lang anhaltenden Dauerregens dagegen trägt auch der etwas zeitverzögerte Zwischenabfluss signifikant zur Hochwasserspitze bei. Ein sicherlich extremes Beispiel für eine sehr intensive und von der nachfolgenden verzögerten Zwischenabflussreaktion zeitlich genau zu unterscheidende schnelle Oberflächenabflussreaktion von bewaldeten Mittelgebirgseinzugsgebieten im Harz zeigt Abbildung 6.

**Abb. 6:** Durch Starkregen hervorgerufene Hochwasserwelle mit Vorwelle aus Oberflächenabfluss und Hauptwelle vorwiegend aus Zwischenabfluss (aus MENDEL 2000)

Auf die Höhe des Abflusses eines Einzugsgebietes wirken verschiedene Faktoren ein. Neben Höhe, Intensität und räumlicher Verteilung des Niederschlagsereignisses, neben Größe und Geomorphologie des Einzugsgebietes, Morphologie des Gewässers sowie Jahreszeit bzw. Witterungsvorgeschichte (Füllungsgrad des Bodenwasserspeichers durch vorhergehende Niederschläge oder Vorhandensein einer schmelzbereiten, durchfeuchteten Schneedecke oder aber auch Bodenfrost) sind dies insbesondere die physikalischen Bodeneigenschaften (Wasserdurchlässigkeit, Wasserspeicherfähigkeit, Lage einer Stauschicht bzw. des Grundwasserspiegels) sowie die Art und Weise der Landnutzung. Die Hangneigung dagegen beeinflusst den Abflussbildungs-vorgang erst bei sehr hohem Neigungsgrad und gleichzeitig geringem Vegetationsdeckungsgrad nennenswert. Ihre Wirkung kommt vor allem bei der Dynamik der lateralen Fließvorgänge selbst, d.h. bei der Abflusskonzentration, zum Tragen.



### 3.1.2 Wasserabfluss aus Wäldern und anderen Landnutzungsarten

Die Frage ob (naturnaher) Wald Hochwasser mindernd wirken kann, wird angesichts der in der Regel hohen Versickerungs- und Speicherleistung in der Fachliteratur zumindest für kleinere Einzugsgebiete und kleinere Hochwasser fast durchgehend bejaht (MÖBMER, R. 2003b). Es gibt jedoch auch Untersuchungen, in denen für den Bewaldungsanteil neben dem dominierenden Faktor der Bodenbedingungen keine statistische Signifikanz gefunden werden konnte (MENDEL 2000). Dagegen sieht der Autor ein Nachweisproblem für den Einfluss des Waldes bei starken Hochwassern in großen Einzugsgebieten. Er schließt aber aus verschiedenen historischen und prähistorischen Indizien, dass vermehrte Sedimentation seit der Eisenzeit auf häufigere und stärkere Hochwasser in Folge von Waldrodungen zurückzuführen sei. Er vermutet dies auch für die Jahrtausendflut von 1342, die in einer Zeit sehr geringen Waldanteils von allenfalls 17 % stattfand (MENDEL 2000). Direkte wissenschaftliche Erkenntnisse zu Wirkungen unterschiedlicher

Vegetationsdecken oder Landnutzungsarten auf den Abfluss werden in erster Linie mit folgenden Methoden gewonnen:

- Infiltrationsexperimente auf kleinen Bodenflächen (bis wenige m<sup>2</sup>; für Wald erstmals 1897 von EBERMAYER; nach MENDEL 2000);
- Beregnungsexperimente auf größeren Flächen mit natürlichen Vegetationsdecken (typisch ca. 100 m<sup>2</sup>; KARL und TOLDRIAN 1973);
- forsthydrologische Vergleichsstudien in unterschiedlich bewaldeten kleinen Wassereinzugsgebieten (typisch ca. 10 bis 2.000 ha; erstmals seit 1903 im Sperbel- und Rappengraben von ENGLER; ENGLER 1919).

Die Ergebnisse werden üblicherweise als Abflussbeiwerte angegeben. Das ist der jeweilige Anteil der aufgebrachten oder gemessenen Niederschlagsmenge, der als Oberflächenabfluss (bei Beregnungsexperimenten) oder als Direktabfluss (bei Einzugsgebietsuntersuchungen) gemessen wird.

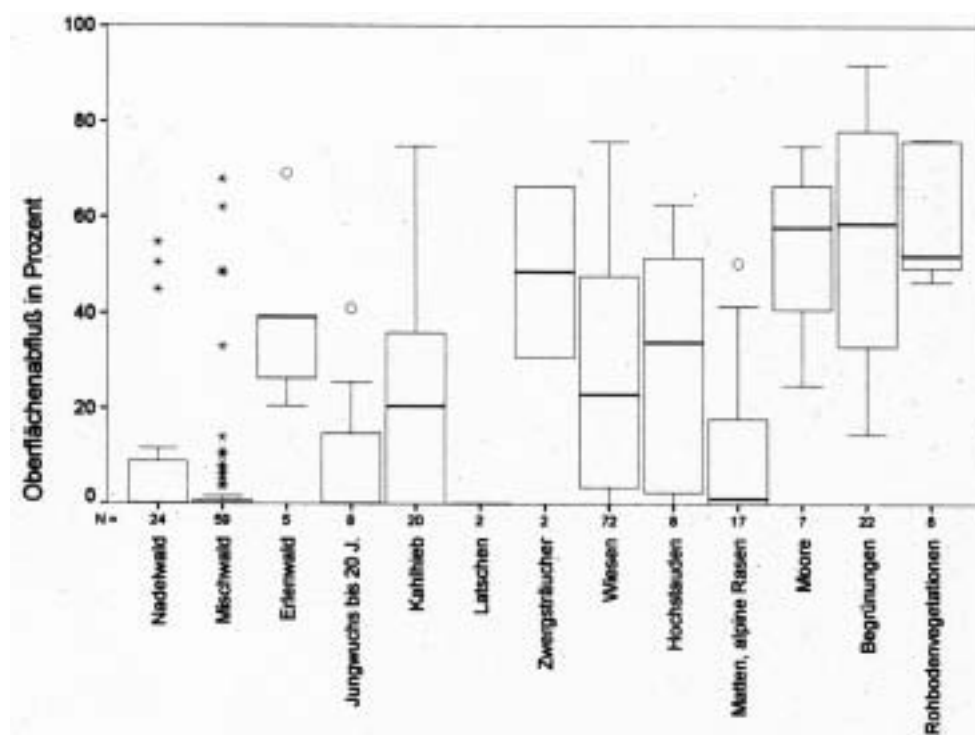
### **Schätzung des Oberflächenabflussbeiwerts auf Grundlage von Beregnungsexperimenten**

Beregnungsexperimente simulieren kurze, intensive Starkregen (typischerweise z. B. 100 mm innerhalb einer Stunde) und erfassen dabei den schnellen Oberflächenabfluss und allenfalls die oberflächennächsten Anteile des Zwischenabflusses. Ihre Aussagekraft beschränkt sich damit auf kleine Einzugsgebiete und kurze, intensive Starkregenereignisse, in denen die Abflussspitze vom schnellen Oberflächenabfluss geprägt ist. Die so ermittelten Abflussbeiwerte gelten nur für die zu Grunde gelegte Niederschlagshöhe. Allerdings erlauben Beregnungsexperimente eine differenzierte Abschätzung der Abflussbeiträge auf der räumlichen Skala von einzelnen Beständen. Ergebnisse von umfangreichen Beregnungsversuchen des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft im bayerischen Alpenraum zeigen einerseits die günstigen Abfluss dämpfenden Eigenschaften von Wald, die im alpinen Raum sonst nur noch von alpinen Matten und Rasen erreicht werden. Sie zeigen andererseits aber auch die starke Differenzierung bei unterschiedlichen Bodentypen, unterschiedlichen Feuchtestufen des Bodens sowie der Höhe des Vorniederschlags (BUNZA et al. 1996).

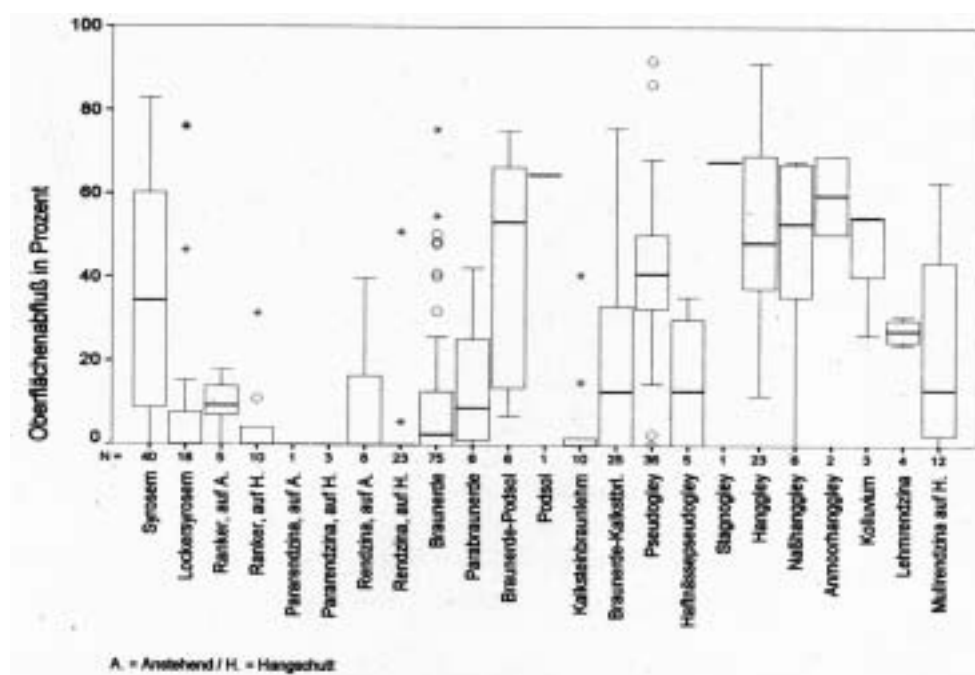


*Abb. 7: Beregnungsanlage des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft*

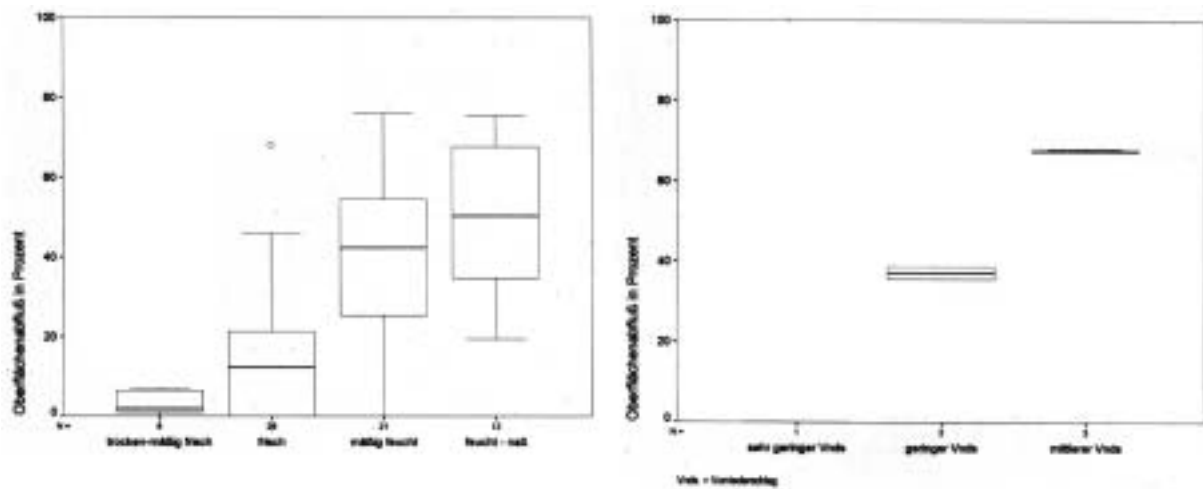




**Abb. 8:** Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von verschiedenen Vegetationstypen (aus BUNZA et al. 1996); statistische Maße: fetter, waagrechter Strich: Medianwert = 50 %-Quantil; Kasten: 25 %-75 %-Quantilsbereich; dünner Strich mit dünner Linie: Bereich zwischen größtem und kleinstem Wert; Kreise bzw. Sterne: „Ausreißer“ bzw. Extremwerte außerhalb des eigentlichen Wertebereiches; N = Zahl der untersuchten Fälle



**Abb. 9:** Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von verschiedenen Bodenarten (aus BUNZA et al. 1996) (statistische Maße: siehe Abbildung 8)



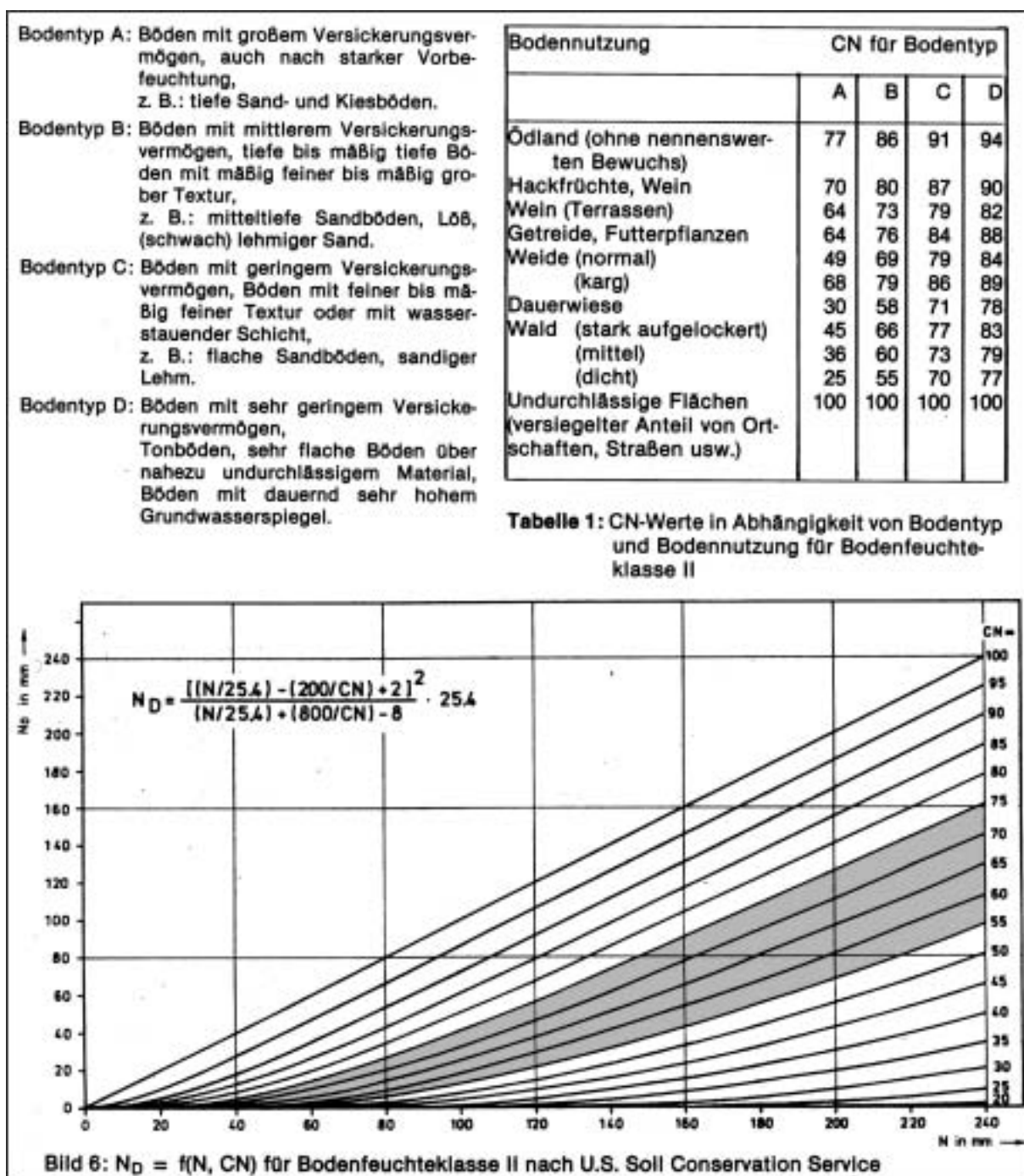
**Abb. 10:** Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von verschiedenen Feuchtstufen auf Wiesen und Weiden (links) bzw. vom Vorniederschlag auf Naßhanggleyen (rechts) (aus BUNZA et al. 1996) (statistische Maße: siehe Abbildung 8)

### Schätzung des Direktabflussbeiwertes mit dem SCS-Kurvennummern-Verfahren

Das „klassische“ Verfahren zur Abschätzung des Abflusses von verschiedenen Landoberflächen auf der räumlichen Skalenebene von größeren Einzugsgebieten zur Ermittlung hydrologischer Bemessungswerte für wasserbauliche Anlagen im Rahmen von Niederschlags-Abflussmodellen ist das in DVWK (1984) beschriebene „SCS-Kurvennummern-Verfahren“. Der U.S. Soil Conservation Service entwickelte es auf der Grundlage von Niederschlags- und Abflussmessungen in einer großen Zahl kleiner Einzugsgebiete in den USA. Es erfasst den gesamten Direktabfluss, d.h. neben dem Oberflächenabfluss auch den Zwischenabfluss, und deckt ein weites Spektrum von Niederschlagsmengen bis hin zu Extremereignissen von 240 mm ab.

Bezüglich unterschiedlicher Bodennutzungen erlaubt dieses Verfahren nur eine sehr grobe Einschätzung der Abflusseigenschaften für Wälder unterschiedlicher Dichte auf unterschiedlichen Böden im Vergleich zu anderen Landnutzungsarten auf Einzugsgebietsbasis. Abflussbeiwerte können für einen weiten Skalenbereich von Niederschlagsmengen abgeleitet werden. Abbildung 11 zeigt aber auch die große Bandbreite der möglichen Abflussreaktionen unterschiedlicher Waldstandorte und Bestockungen bei unterschiedlichen Niederschlagshöhen.





**Abb. 11:** SCS-Kurvennummern-Verfahren nach DVWK (1984); oben links: Ermittlung des Bodentyps; oben rechts: Ermittlung der Kurvennummer (CN) für Bodentyp und Bodennutzung; unten: Diagramm zur Ermittlung des Direktabflusses (ND) in Abhängigkeit von Niederschlagshöhe (N) und Kurvennummer (CN) für mittlere Bodenfeuchte durch Vorregenereignisse (Bodenfeuchteklasse II); Wertebereich für Wald auf mittleren Standorten (Bodentyp B und C) dunkel schattiert

Beide Methoden zeigen, dass die Abflussbildung von unterschiedlichen Flächen sehr differenziert zu betrachten ist. Sie hängt sehr stark von Art und Ausmaß des Niederschlagsereignisses, von den jeweiligen standörtlichen Gegebenheiten und von den Bestockungs- bzw. Landnutzungsverhältnissen ab. Der Anteil des abfließenden Wassers nimmt tendenziell mit der absoluten Höhe des Niederschlagsereignisses überproportional zu. Dagegen verliert die vor allem als Anfangsverlust wirksame Rückhaltewirkung der Flächen im Einzugsgebiet mit zunehmendem Ausmaß des Ereignisses an Bedeutung (Abbildung 12).

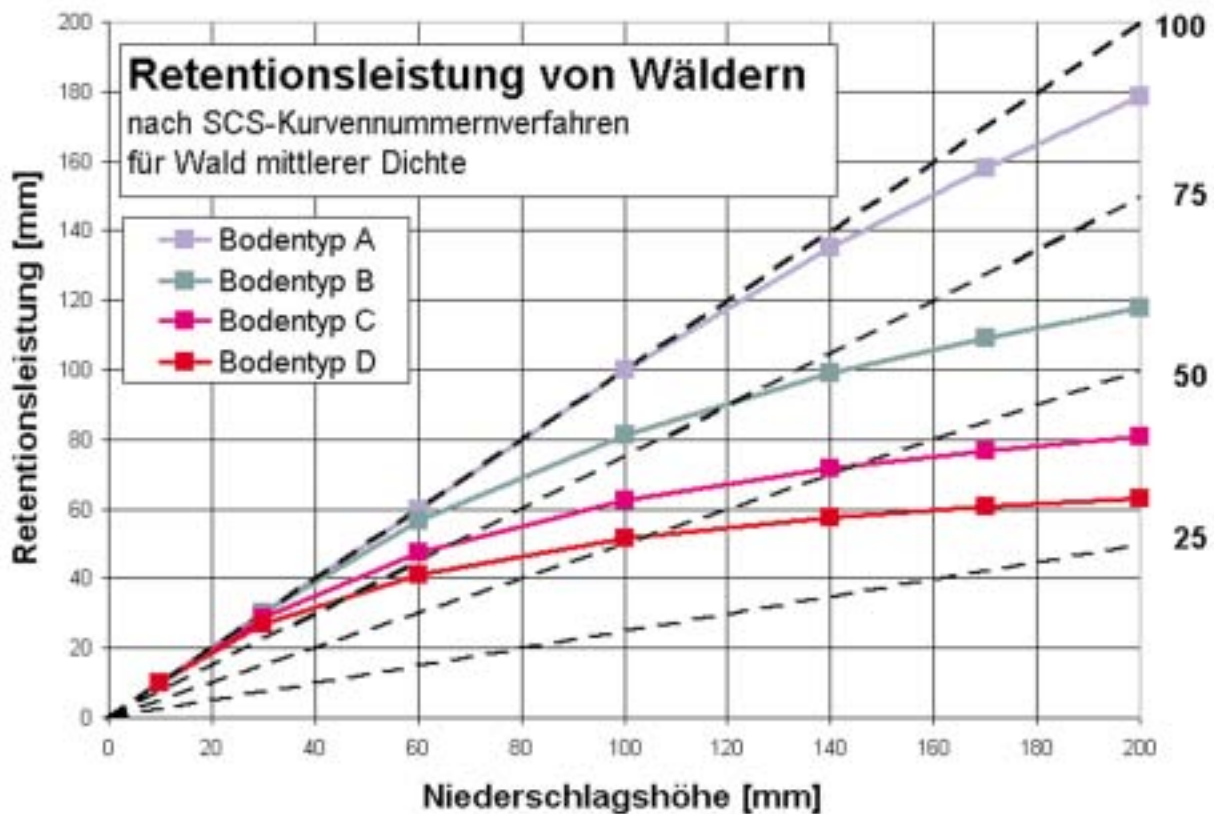


Abb. 12: Anteil des zurückgehaltenen Anteils am Niederschlag für den Vegetationstyp „Wald mittlerer Dichte“ und die Bodentypen „A“ bis „D“ nach dem SCS-Kurvennummernverfahren (DVWK 1984)

### 3.1.3 Einflussfaktoren des Hochwasserabflusses aus Waldgebieten

Forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen, aber auch Störungen des Waldzustandes können den Hochwasserabfluss aus Wäldern beeinflussen. Dabei sind folgende Prozesse und Einflussfaktoren zu berücksichtigen (MENDEL 2000):

- Interzeptionsverdunstung und Transpiration

Sie hängen von der Jahreszeit, von der Baumartenzusammensetzung und von der Bestandesdichte ab, sind bei geschlossenem Wald in der Regel höher als bei anderen Landnutzungsarten, haben aber begrenzte Kapazität (in der Summe etwa maximal 10 mm je Tag) und tragen bei Starkregenereignissen nur begrenzt zum Wasserrückhalt bei.

- Infiltration und Oberflächenabfluss

Oberflächenabfluss tritt unter ungestörtem Wald bei Infiltrationskapazitäten von typischerweise bis zu 80 mm/h nur auf extrem dichten oder verdichteten Substraten als „Infiltrationsüberschuss“ auf. Auf sehr flachgründigen oder von Natur aus bzw. nach Niederschlagsereignissen temporär wassergesättigten Standorten tritt er dagegen als „Sättigungsüberschuss“ auf. Er ist bis auf Extremfälle weitgehend unabhängig von der Hangneigung. Bodenverdichtung durch Waldweide oder unsachgemäße Befahrung wirkt Abfluss verschärfend.

- Oberflächenrauigkeit

Die Dynamik des lateralen Oberflächenabflusses (Abflusskonzentration) wird nach der Fließformel von MANNING-STRICKLER neben der Hangneigung vom Fließwiderstand bzw. von der Oberflächenrauigkeit bestimmt. Die hohe Oberflächenrauigkeit von Waldböden verzögert den Oberflächenabfluss und dämpft damit die Hochwasserspitze.

- Oberflächenrauigkeit und Hochwasserabfluss im Auwald

Ähnliches gilt auf ganz anderer räumlicher Skalenebene bei einer Wasserschichtdicke von Metern statt Milli- bzw. Zentimetern für den Hochwasserabfluss in Überflutungsbereichen der Talauen. Dort weist Auwaldbestockung ebenfalls eine wesentlich höhere Rauigkeit (STRICKLER-Beiwerte  $k_{\text{Wald}} = 10$  gegenüber  $k_{\text{Wiese}} = 25$  für Wiese oder Acker nach LANG und TÖNSMANN 2002) auf als unbestockte Flächen. Dies führt zu einer zusätzlichen Verzögerung des Abflusses und zu einem höheren Einstau im Bereich von bis zu mehreren Dezimetern. Nach der Formel von MANNING-STRICKLER gilt für das Verhältnis der Überflutungshöhen ( $h$ ) in etwa

$$h_{\text{Wald}} \approx \left( \frac{k_{\text{Wald}}}{k_{\text{Wiese}}} \right)^{3/5} \cdot h_{\text{Wiese}}$$

Bei einer angenommenen Überflutungshöhe von 0,8 m für Wiese erhält man für Wald bei gleicher Durchflussmenge eine Überflutungshöhe von etwa 1,40 m.

- Schneedecke

Sie kann bei Winterhochwasser durch Schmelze erheblich zum Hochwasserabfluss beitragen, die Schmelzrate unter Wald ist in der Regel geringer als auf der Freifläche.

- Humusauflage

Diese ist in der Lage, einerseits je nach Mächtigkeit bei 5 bis 10 cm Rohhumusauflage bis zu etwa 6 mm Niederschlag zu speichern (MENDEL 2000). Andererseits kann sie wegen ihrer hydrophoben Eigenschaften, insbesondere im trockenen Zustand, die Infiltration von Niederschlag erheblich hemmen und vor allem bei Fichtenreinbeständen zu Oberflächenabfluss führen.

- Bodenwasserspeicherung

Die Aufnahme, Verzögerung und Speicherung im Boden ist die Schlüsselgröße für die Abflussbildung im Einzugsgebiet. Sie differiert je nach Bodeneigenschaften und Vorsättigungsgrad des Bodens in weitem Rahmen zwischen 0 und maximal etwa 300 mm. In kleinen Einzugsgebieten und bei hohen Starkregenintensitäten trägt schon die Verzögerung des im Boden abfließenden Zwischenabflusses gegenüber dem rascheren Oberflächenabfluss zur Hochwasserdämpfung bei. Bei lang anhaltenden Niederschlagsereignissen trägt auch der Zwischenabfluss wesentlich zum Hochwasserabfluss bei. Die aktuelle Speicherkapazität im Boden hängt stark von der Anfangsbodenfeuchte ab und ist zudem als Anfangsverlust vorwiegend am Beginn des Ereignisses und nicht mehr beim die Hochwasserspitze bestimmenden Ereignishöhepunkt wirksam.

- Bodenverdichtung

Bodenverdichtung durch Viehtritt bei Waldweide oder durch unsachgemäße Befahrung mit hohem Bodendruck verringert die Infiltrationsfähigkeit des Oberbodens drastisch und oft lang andauernd. Dies kann den Oberflächenabfluss erheblich verschärfen, insbesondere wenn die Rückegasse in der Falllinie verläuft und das Wasser nicht mehr auf der ungestörten Waldfläche versickert.

- Forstwege

Der Abflussbeitrag von Forstwegen beruht nur zum (u. U. geringeren) Teil aus der Versiegelung der Wegefläche selbst, sondern insbesondere in Hanglagen darin, dass der flächenhafte Oberflächen- und vor allem der oberflächennähere Teil des Zwischenabflusses durch den hangseitigen Wegeeinschnitt zu linienhaftem Gerinneabfluss konzentriert werden. Die Abflusswirksamkeit hängt dann erheblich davon ab, ob das Wasser durch häufige Querentwässerung wieder auf der ungestörten Waldfläche versickern kann oder ob es weiter linear zum Vorfluter abfließt. Für landwirtschaftliche Feldwege nennt MANIAK (1993) die SCS-Kurvennummern 74 / 84 / 90 / 92 für Bodentypen A / B / C / D, nimmt also keineswegs völlige Versiegelung an (Kurve Nummer 100).

- Entwässerung

Entwässerung kann zwar einerseits den zur Niederschlagsaufnahme verfügbaren Luft gefüllten Porenraum erhöhen, in der Mehrzahl der Fälle verschärfen Dränrohre jedoch den Direktabfluss, da sie eine direkte hydraulische Anbindung an die Vorfluter schaffen (MENDEL 2000 für landwirtschaftliche Flächen).

- Bestockungsdichte

Sowohl das SCS-Kurvennummernverfahren als auch die auf Berechnungsversuchen beruhenden Verfahren beinhalten tendenziell erhöhte Abflussbeiwerte bei abnehmender Bestockungsdichte bis hin zur Kahlfläche, wobei erst bei deutlicher Absenkung der Bestockungsdichte mit zunehmend deutlicherer Reaktion zu rechnen ist. Verschiedentlich wurden Szenarien zur

Abschätzung der Auswirkungen eines möglichen Waldsterbens auf den Hochwasserabfluss berechnet. Dabei ist ausdrücklich auf die erheblichen Unsicherheiten solcher Abschätzungen hinzuweisen (ROSEMANN 1988).

**Tab. 5:** Ergebnisse von Szenario-Abschätzungen zu den Auswirkungen eines Waldsterbens auf den Hochwasserabfluss

Bezugsgebiet	Szenario	Bezugereignis	Auswirkung auf	
			Hochwasserscheitel	Abflussfülle
Dreisam Pegel Ebnet 257 km <sup>2</sup> (MÜLLER 1987 nach MENDEL 2000)	Totaler Waldverlust, keine Sekundärvegetation	Hochwasser Mai 1983	+ 100 %	
	Zusätzlich negative Veränderung der Bodenstruktur		+ 400 bis + 1000 %	
Röthenbach (Halblech) 7,5 km <sup>2</sup> (ROSEMANN 1988)	Totaler Waldverlust	Starkregen 50-jährlich	+ 75 %	+ 45 %
Tegernseer Berge Flysch 4,2 ha (MOESCHKE 1998)	40 % Kahlfächen	30-Min. Starkregen 17 mm (1-jährlich) 30 mm (10-jährlich) 43 mm (100-jährlich)	+ 30 %	+ 30 % + 9 % + 5 %
	100 % Kahlfächen	30-Min. Starkregen 17 mm (1-jährlich) 30 mm (10-jährlich) 43 mm (100-jährlich)		+ 77 % + 24 % + 11 %
Oberrhein (KOEHLER 1993 nach MENDEL 2000)	Totaler Verlust des Waldanteils von 37 %; Ersatzvegetation Wiese	80 mm an 1 Tag 160 mm an 1 Tag 100 mm in 4 Tagen 200 mm in 4 Tagen	+ 22 % + 43 % + 12 % + 24 %	

Die verschiedenen Abschätzungen weisen eine sehr hohe Spannweite der vorhergesagten Auswirkungen eines großflächigen Waldverlustes auf und beinhalten zum Teil extrem ungünstige Annahmen über die Folgevegetation. Bei Modellrechnungen, die nicht mit aussagekräftigen experimentellen Messwerten für das jeweilige Gebiet ausreichend abgesichert sind, besteht die Gefahr, dass die Ergebnisse weniger die (potentielle) Wirklichkeit als vielmehr die (unzulänglichen) Eigenschaften bzw. Eigenheiten des verwendeten Modellansatzes, beispielsweise der zugrunde gelegten SCS-Kurvennummern, beschreiben (MENDEL 2000). Dies ist stets zu berücksichtigen.

## 3.2 Versuch einer monetären Bewertung der Wirkungen des Waldes auf den Hochwasserabfluss

Natürliche Flusslandschaften kennen keinen Hochwasserschaden, wohl aber Hochwasser. Erst der Mensch mit seinen Nutzungen entlang der Gewässer schuf die Grundlage für Hochwasserschäden. In den letzten Jahrzehnten erhöhte sich das Schadenspotential auf Grund der baulichen und infrastrukturellen Erschließung von gewässernahen Bereichen deutlich (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGSGESELLSCHAFT 2003). Eine gesamtwirtschaftliche Kosten-Nutzen-Betrachtung darf als „Leistung“ oder „Wert des Waldes“ für den Hochwasserschutz je nach Fragestellung (z. B. Nutzen von Neuaufforstung, Nutzen von Waldpflege) nur die Mehrleistung im Vergleich zu regional plausiblen, alternativen Landnutzungsarten (z. B. Almweide im Bergland, Dauergrünland im Auenbereich) oder im Vergleich zu „nicht zielgemäßen“ Waldzuständen (z. B. wieder aufzuforstende Kahlfläche, Fehlbestockung) berücksichtigen. Bei der Fragestellung „Neuaufforstung“ (in gewissem Maß auch bei der Fragestellung „Mischwald statt Fichtenreinbestand“) muss von diesem gesamtwirtschaftlichen Mehrwert der Ertragsverzicht durch die Nutzungsänderung als Opportunitätskosten abgerechnet werden. Für eine volkswirtschaftliche Betrachtung sind dabei staatliche Transferleistungen wie Schutzwaldbeihilfen oder Ausgleichszulagen für die Almwirtschaft (ca. 200 €/ha/Jahr) außer Acht zu lassen. Für die einzelökonomische Entscheidung des Grundeigentümers dagegen können sie sehr wohl bestimmend sein. Die Hochwasser dämpfende Wirkung funktionsgerechter Wälder gegenüber alternativen Landnutzungsarten oder nicht funktionstauglichen bzw. gestörten Waldzuständen (z. B. stark verlichtete oder kahle Flächen infolge Sturmwurf, Borkenkäfer, Wildverbiss) kann wegen der schwierigen Quantifizierbarkeit der Reaktion natürlicher Flächen auf unterschiedliche Niederschlagsituationen grundsätzlich nur grob näherungsweise ermittelt werden (Kapitel 3.1). Der Charakter von Hochwasserereignissen und ihrer Schadensfolgen als statistisch nur bedingt berechenbare „seltene Ereignisse“ erschwert die monetäre Bewertung der Hochwasserschutzwirkung zusätzlich. Zur groben Abschätzung von monetären Werten der Hochwasserschutzwirkung von Wäldern wurden zwei Verfahren, ein Ersatzkostenansatz (GROTTKER 1999) sowie ein Produkt-Funktions-Ansatz verwendet.

### 3.2.1 Ersatzkostenansatz

Der Ersatzkostenansatz bewertet die höhere Rückhalteleistung von Wäldern anhand der (fiktiven) Ersparnis bzw. des (fiktiven) Mehrbedarfs von technischen Hochwasserrückhaltemaßnahmen, die bei einem Verlust des Waldes oder einer Nutzungsänderung (Rodung) einträten. Dies erfordert zunächst die Ermittlung eines Kostenrahmens für technische Hochwasserrückhaltemaßnahmen. Da weder aus der Fachliteratur noch mittels Recherche beim LfW gesicherte Werte ermittelt werden konnten, diente eine Internetrecherche als Ersatz. Daraus können grob geschätzte Rahmenwerte für die Hochwasserschutzwirkung von Wäldern abgeleitet werden. Für Fragestellungen der Aufforstung sind dem Mehrwert der Hochwasserschutzwirkung **Opportunitätskosten** gegenüber zu stellen, d.h. Minderwerte aus dem Ertragswertverzicht bei Nutzung als Wald.

Tab. 6: Abschätzung eines Kostenrahmens für technische Hochwasserrückhaltemaßnahmen

<p><b>Kostenrahmen für technischen Hochwasserrückhalt</b>  diverse Quellen: Internetrecherche:  Gersprenztal (Hessen) 24.2000 m<sup>3</sup> zu 3,4 Mio. DM = 7 €/m<sup>3</sup>  Wolterdingen (Baden-Württemberg) 4,5 Mio. m<sup>3</sup> zu 30 Mio. € = 7€/m<sup>3</sup>  Ottweiler (Saarland) 813.000 m<sup>3</sup> zu 7 Mio. € = 9 €/m<sup>3</sup>  10 kleine Becken im Auwald (Baden-Württemberg) 186.000 m<sup>3</sup> zu 5.3 Mio. € = 29 €/m<sup>3</sup>  Schwarzbach (Hess. Ried) 200.000 m<sup>3</sup> zu 17,3 Mio. DM = 44 €/m<sup>3</sup> (wurde vom Hessischen Rechnungshof gerügt!)  Im Wald:  Bad Orb (Hessen) 350 kleine Flutmulden entlang Forstwegen gesamt 3.000 m<sup>3</sup> zu 55.000 DM = 9 €/m<sup>3</sup>  nach StMLU (2003): Mittlere Isar: 10 Mio. m<sup>3</sup> für 66,5 Mio. € = 6,65 € je m<sup>3</sup> natürliches Rückhaltevolumen im Auenbereich</p>	ca. 6 bis 30 € je m <sup>3</sup> Wasser
<p><b>Daraus abgeleiteter Wertansatz für Wasserrückhalt im Wald</b> (geringer angesetzt, da die Rückhaltewirkung von technischen Anlagen, insbesondere von gesteuerten Poldern, die Hochwasserspitzen effizienter kappt als die Retention durch den Wald, die vornehmlich als Anfangsrückhalt zu Beginn des Ereignisses wirksam ist.)</p>	<b>ca. 5 € je m<sup>3</sup> Rückhalteleistung</b>

Tab. 7: Abschätzung des monetären Wertes der Leistungen von Wäldern für den Hochwasserrückhalt mit einem Ersatzkostenansatz

<p><b>Grobkalkulation Ersatzkostenansatz Bergwald</b>  Vergleichsnutzung: Weide bzw. Kahlfläche, d.h. vollständiger und dauerhafter Verlust der „Waldwirkung“  unterer Rahmenwert für dauerhaft nasse, Wasser undurchlässige oder unter jeglicher Landnutzung ideal durchlässige Standorte; (obere Rahmenwerte: nach ROSEMANN (1988) für Gebiet Halblech sowie Angaben in Kapitel 3.1 und Tabelle 15 in Kapitel 4.1)   Opportunitätskosten  (Nutzungsverzicht Grünland bei „marginalen Produktionsverhältnissen“ Mittelgebirge (Nordeifel) zugunsten Wald (Fi bzw. Bu-Fi) ohne Berücksichtigung von staatlichen Zuschüssen; Quelle: GROTTKER, Schriften zur Forstökonomie Bd. 19)</p>	<p><b>Mehrspeicherung Waldboden:</b>  ca. 0 - 40 mm = 0 - 400 m<sup>3</sup>/ha   <b>Mehrwert des Bergwalds für den Hochwasserschutz:</b>  Kapitalwert: ca. 0 bis +2.000 €/ha  jährliche Rente bei 3 %: ca. 0 bis 60 €/ha/Jahr   <b>Opportunitätskosten der Nutzung als Bergwald:</b>  Jährlicher Nutzungsentgang:  - 50 bis - 200 €/ha/Jahr  Kapitalwert (kapitalisiert zu 3 %):  - 1.650 bis - 6.600 €/ha</p>
<p><b>Grobkalkulation Ersatzkostenansatz Auwald</b>  Rückhaltevermögen durch Überstauung   Differenzhöhe der Überstauung gegenüber Grünland als Abfluss bremsende, Wasserstand erhöhende Wirkung als „Waldwirkung“ (siehe Formel Kapitel 3.1.3) konservativ mit 40 cm angesetzt  (unterer Rahmenwert „negativ“ dort, wo Abfluss hemmende Hindernisse kontraproduktiv auf die Schutzwirkung knapp dimensionierter technischer Schutzbauten wie Hochwasserschutzdeiche wirken)   Opportunitätskosten  (Nutzungsverzicht Grünland bei „mittleren Produktionsverhältnissen“ Mittelgebirge (Nordeifel) zugunsten Wald (Fi bzw. Bu-Fi) ohne Berücksichtigung von staatlichen Zuschüssen; Quelle: GROTTKER, Schriften zur Forstökonomie Bd. 19)</p>	<p><b>Differenz Wasserstandshöhe bei Überstauung Wald gegenüber Grünland:</b>  grob geschätzt ca. + 40 cm = + 4.000 m<sup>3</sup>/ha   <b>Mehrwert des Auwaldes für den Hochwasserschutz:</b>  Kapitalwert: ca. &lt; 0 bis +20.000 €/ha  jährliche Rente bei 3 %: ca. 0 bis 600 €/ha/Jahr   <b>Opportunitätskosten der Nutzung als Auwald:</b>  Jährlicher Nutzungsentgang:  - 400 bis - 600 €/ha/Jahr  Kapitalwert (kapitalisiert zu 3 %):  - 13.300 bis - 20.000 €/ha</p>



### 3.2.2 Produkt-Funktions-Ansatz

Der Produkt-Funktions-Ansatz zielt direkt auf die Funktion (Hochwasserschutzfunktion) eines Produktes (Wald bzw. Schutzwald). Vermiedene Hochwasserschäden werden direkt auf der Basis von flächenbezogenen Schadenserwartungswerten und den durch das Vorhandensein von Wald verringerten Auftretenswahrscheinlichkeiten von Ereignissen bestimmter Abflusshöhe abgeschätzt. Er ist nur mit hohem Aufwand und großen Unsicherheiten sowie gebietsspezifisch anwendbar. Zudem sind in der frei zugänglichen Literatur kaum Angaben flächenbezogener Schadenserwartungswerte zu finden. Auch beim LfW waren keine zu erfahren. Folgende Grobabschätzung ist deshalb mit äußerster Vorsicht zu betrachten.

**Tab. 8:** Abschätzung flächenbezogener Hochwasserschadenserwartungswerte

Flächenbezogene Hochwasserschadenserwartungswerte (Internetrecherche):	Moselgebiet: 17€ je ha Einzugsgebiet und Jahr Muotatal (Schweiz): 120€ je ha und Jahr
Gutachtlich angesetzte Schadenserwartungswerte	<b>Flachland: 10€ je ha Einzugsgebiet und Jahr</b> <b>Bergland: 40€ je ha Einzugsgebiet und Jahr</b>
Zusammenhang Höhe und Jährlichkeit von Hochwassern	Nach SCHUMANN (2002) hat ein Hochwasser mit doppelter Jährlichkeit im Bereich hoher Jährlichkeiten einen höchstens um 30 % höheren Spitzenabfluss; d.h. wenn eine Veränderung der Landnutzung den Hochwasserabfluss um 30 % erhöht, tritt ein gleich hohes Hochwasser mindestens doppelt so häufig auf.
Gutachtlich abgeleitete Änderung der Hochwasserwahrscheinlichkeit	Verdoppelung der Auftretenswahrscheinlichkeit bei Abflusserhöhung im Einzugsgebiet um 30 %

**Tab. 9:** Abschätzung des monetären Wertes der Leistungen von Wäldern für den Hochwasserrückhalt mit einem Produkt-Funktions-Ansatz

<b>Grobkalkulation Produkt-Funktions-Ansatz für „Wald“</b>	<b>Reduktion des Schadenserwartungswertes durch „Wald“</b>
Reduktion der Abflussspitzen durch „Wald“ gegenüber „Kahlfläche“ oder alternativer Nutzungsform „Weide/Grünland“ um ca. (0-)10-30 %	<b>Mehrwert des Waldes für den Hochwasserschutz</b> (Reduktion des Schadenserwartungswertes): jährl. Rente: ca. 0 bis 10€/ha/a „Hügelland“ jährl. Rente: ca. 0 bis 40€/ha/a „Bergwald“ Kapitalwert: ca. 0 bis + 330€/ha „Hügelland“ Kapitalwert: ca. 0 bis +1.300 /ha „Bergwald“
Erhöhung des Schadenserwartungswertes durch erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwasserabflusses bei totalem Waldverlust: ca. (0-)25 bis 100 % (unterer Rahmenwert für dauerhaft nasse, Wasser undurchlässige oder unter jeglicher Landnutzung ideal durchlässige Standorte)	<b>Opportunitätskosten der Nutzung als Bergwald:</b> Jährlicher Nutzungsentgang: - 50 bis - 200€/ha/Jahr Kapitalwert (kapitalisiert zu 3 %): - 1.650 bis -6.600€/ha
Opportunitätskosten (Nutzungsverzicht Grünland bei „marginalen Produktionsverhältnissen“ Mittelgebirge (Nordeifel) zugunsten Wald (Fi bzw. Bu-Fi) ohne Berücksichtigung von staatlichen Zuschüssen; Quelle: GROTTKER, Schriften zur Forstökonomie Bd. 19)	

### 3.2.3 Bewertung der Ergebnisse der monetären Abschätzungen

- Der flächenspezifische Mehrwert von Auwäldern für den Hochwasserschutz scheint mit grob geschätzt 0 bis 20.000 €/ha deutlich höher zu sein als der von Wäldern im Einzugsgebiet, auch von Bergwäldern (mit grob geschätzt 0 bis 2.000 €/ha).
- Investitionen in den Erhalt oder den Umbau hochwasserschutzfunktionsgerechter Bergwälder erscheinen je nach dem Grad des abzuwendenden Funktionsverlustes bzw. des zu erzielenden Funktionsgewinnes in gewissem Maß gesamtwirtschaftlich gerechtfertigt (bis zu ca. 60 €/ha/Jahr). Dabei wurden eventuelle Opportunitätskosten eines Waldumbaus (Ertragsminderung) nicht in Ansatz gebracht.
- Investitionen in den Erhalt bzw. in den funktionsgerechten Umbau von Auwäldern erscheinen ebenfalls gesamtwirtschaftlich gerechtfertigt (bis ca. 600 €/ha/Jahr) [wenngleich rein strömungsdynamisch auch ein standortsfremder Bestand Abfluss bremsende Wirkung aufweist].
- Bezüglich der Fragestellung „Neuaufforstung“ stehen dem gesamtwirtschaftlichen Mehrwert der Hochwasserschutzwirkung in beiden Beispielfällen erhebliche Opportunitätskosten für den Nutzungsentgang bei Nutzung als Wald statt Grünland gegenüber. [Zudem wäre hier der Investitionswert der Neuaufforstung auf ca. 50 % abzuzinsen (20 Jahre zu 3 %), da die volle Wirkung des Waldes erst etwa mit Bestandesschluss eintritt].
- In den Kalkulationsbeispielen wäre demnach aus gesamtwirtschaftlicher Sicht eine Investition in „Neuaufforstung im Einzugsgebiet aus Hochwasserschutzgründen“ gegenüber einer Investition in „Hochwasserrückhaltebecken“ bzw. gegenüber der erzielbaren Minderung des Schadenserwartungswertes ohne die Heranziehung weiterer nicht-monetärer Kriterien (im Bergland insbesondere Erosions- und Lawinenschutz, ansonsten Landschaftsbild, Erholungsnutzung, Lebensraum-Funktion oder ähnliches) bei Berücksichtigung des Nutzungswertes der landwirtschaftlichen Fläche nicht eindeutig zu rechtfertigen.
- Eine Investition in „Neuaufforstung im Überflutungsbereich von Flüssen“ erreicht dagegen die Größenordnung der Opportunitätskosten, wenn man für Grünland im Überflutungsbereich von Flüssen zusätzlich einen je nach Auftretenswahrscheinlichkeit von ernstschädlichem Hochwasser reduzierten Ertragswert (bzw. staatliche Transferleistungen als Entschädigungszahlungen in entsprechender Höhe an den Grundbesitzer) unterstellt.

Alle Komponenten dieser nur grob überschlägigen gesamtwirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Rechnungen weisen sehr erhebliche Unsicherheiten auf. Insbesondere fehlen auch räumlich besser passende Opportunitätskostenangaben bzw. Schadenserwartungswerte. Eine direkte Abschätzung eines Ersatzkostenansatzes lag nur für das Beispielsgebiet Bergwald vor (ROSEMANN 1988), der für das Halblecheinzugsgebiet für den Fall eines völligen Waldverlustes Ersatzkosten in Höhe von ca. 3.000 DM je Hektar Einzugsgebietsfläche abschätzte. Eine wirklich fundierte monetäre Bewertung der Hochwasserschutzwirkung liegt weit jenseits des in diesem Demonstrationsvorhaben methodisch Möglichen.

### 3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Hochwasserschutz im Wald

Die Abfluss regulierende und dämpfende Wirkung des Waldes ist Teil seiner Wasserschutzfunktion. Der Sicherung und Stärkung der Schutzfunktionen als hochrangigem waldgesetzlichem Ziel (Art. 1 BayWaldG) dienen zahlreiche Vorschriften des Waldgesetzes für Bayern, so zur Wald-funktionsplanung (Art. 6), zur forstlichen Fachplanung (Art. 5), zur Bewirtschaftung des Waldes im Allgemeinen (Art. 14) und des Staatswaldes (Art. 18) im Besonderen, zur Berücksichtigung der Funktionen bei Planungen und Vorhaben (Art. 7) sowie insbesondere auch das Rechtsinstitut des Schutzwaldes (Art. 10).

Waldgesetzliche Ziele hinsichtlich der Hochwasserschutzfunktion sind

- Sicherung und Stärkung der Funktionsfähigkeit;
- Erhalt bzw. Mehrung der Waldflächen (mit Schutzfunktion);
- Sachgemäße bzw. vorbildliche Bewirtschaftung.

Waldgesetzliche Instrumente zur Umsetzung der Ziele des Hochwasserschutzes sind

- Waldfunktionspläne (Art. 6);
- Forstbetriebspläne im Staatswald, Körperschaftswald (Art. 19) und Privatwald;
- Förderung der privaten und körperschaftlichen Waldwirtschaft (Art. 20).

Wasserrechtliche Grundlagen des Hochwasserschutzes sind die Vorschriften des Wasserhaus-haltsgesetzes von 2002 (WHG) und des Bayerischen Wassergesetzes von 1994 (BayWG) zur Bewirtschaftung und zum Ausbau oberirdischer Gewässer sowie zum Schutz vor Hochwasserge-fahren in Überschwemmungsgebieten.

Wasserrechtliche Bewirtschaftungsziele des WHG mit Relevanz für den Hochwasserschutz sind

- Vermeidung einer Vergrößerung und Beschleunigung des Wasserabflusses (§ 1a);
- Erhaltung oder Erreichung eines guten ökologischen Zustands oberirdischer Gewässer (§ 25a);
- Erhaltung oder Zurückführung ausgebauter Gewässer in einen naturnahen Zustand (§ 31);
- Erhaltung oder Verbesserung der ökologischen Strukturen der Gewässer und ihrer Über-flutungsflächen (§ 32);
- Erhaltung oder Rückgewinnung natürlicher Rückhalteflächen (§32).

Demgegenüber stellt das (ältere) BayWG Regelungen in Überschwemmungsgebieten in den Vordergrund, um

- den schadlosen Hochwasserabfluss sicherzustellen (Art. 62) bzw.

- den Wasserabfluss, die Höhe des Wasserstandes und die Wasserrückhaltung nicht nachteilig zu beeinflussen (Art. 61).

Wasserrechtliche Instrumente zur Umsetzung der Ziele des Hochwasserschutzes sind

- Maßnahmenprogramme für Flussgebietseinheiten (§ 36 WHG) bzw. wasserwirtschaftliche Rahmenpläne (Art. 71a BayWG);
- Bewirtschaftungspläne für Flussgebietseinheiten (§ 36b WHG bzw. Art. 71b BayWG).

### 3.4 Sicherung der Hochwasserschutzfunktion von Wäldern

Im Demonstrationsvorhaben wurden drei unterschiedliche Beispielsgebiete zur Analyse der Leistungen des Waldes für den Hochwasserschutz und zur Bewertung funktionssichernder oder verbessernder forstlicher Maßnahmen bzw. Programme genauer durchleuchtet.

#### 3.4.1 Wald im Wassereinzugsgebiet (speziell Bergwald)

##### Grundlagen

In den Mittelgebirgen und insbesondere im Alpenraum spielt die Hochwasserschutzfunktion des Waldes im Einzugsgebiet wegen der hohen zu erwartenden Starkniederschläge eine besonders wichtige Rolle. Mit 250.000 ha liegen etwa 10 % der bayerischen Wälder im Alpenraum. Davon dienen 147.000 ha als Schutzwald dem Schutz vor alpinen Naturgefahren wie Erosion, Lawinen und Hochwasser besonders. Von den Schutzwäldern sind wiederum etwa 12.600 ha (9 %) überaltert und verlichtet oder durch Sturmwurf bzw. Borkenkäfer geschädigt (BIERMAYER 2002). Als Beispiel für die Wälder im Einzugsgebiet wurde deshalb ein Bergwaldgebiet, das Einzugsgebiet des Halblechs im Naturschutzgebiet Ammergebirge, näher erforscht. Der Halblech ist einer der gefährlichsten Wildbäche Bayerns. Seit den 1960er Jahren erfolgen im Gebiet intensive technische (Wildbachverbauung) wie forstliche (Trennung von Wald und Weide, Verzicht auf Kahlschlagwirtschaft, Schutzwaldsanierung) Hochwasserschutzmaßnahmen. Die Gemeinde Halblech und die Waldkörperschaft Buching-Trauchgau als Waldbesitzer arbeiten dabei intensiv mit den Wasserwirtschafts- und Forstbehörden zusammen. Als Grundlagen für die Beurteilung der Hochwasserschutzwirkung wurden folgende Materialien mit einem geographischen Informationssystem aufbereitet:

- Forstliche Standortkartierung für den Wald der Gemeinde und der Waldkörperschaft, erstellt vom Verein für forstliche Standortserkundung im Privat- und Körperschaftswald (VfS 2001) nach einem gebirgsspezifischen Verfahren (Abbildung 13 sowie Anhang A-1a bis A-1c);
- topographische Karte, digitales Geländemodell;

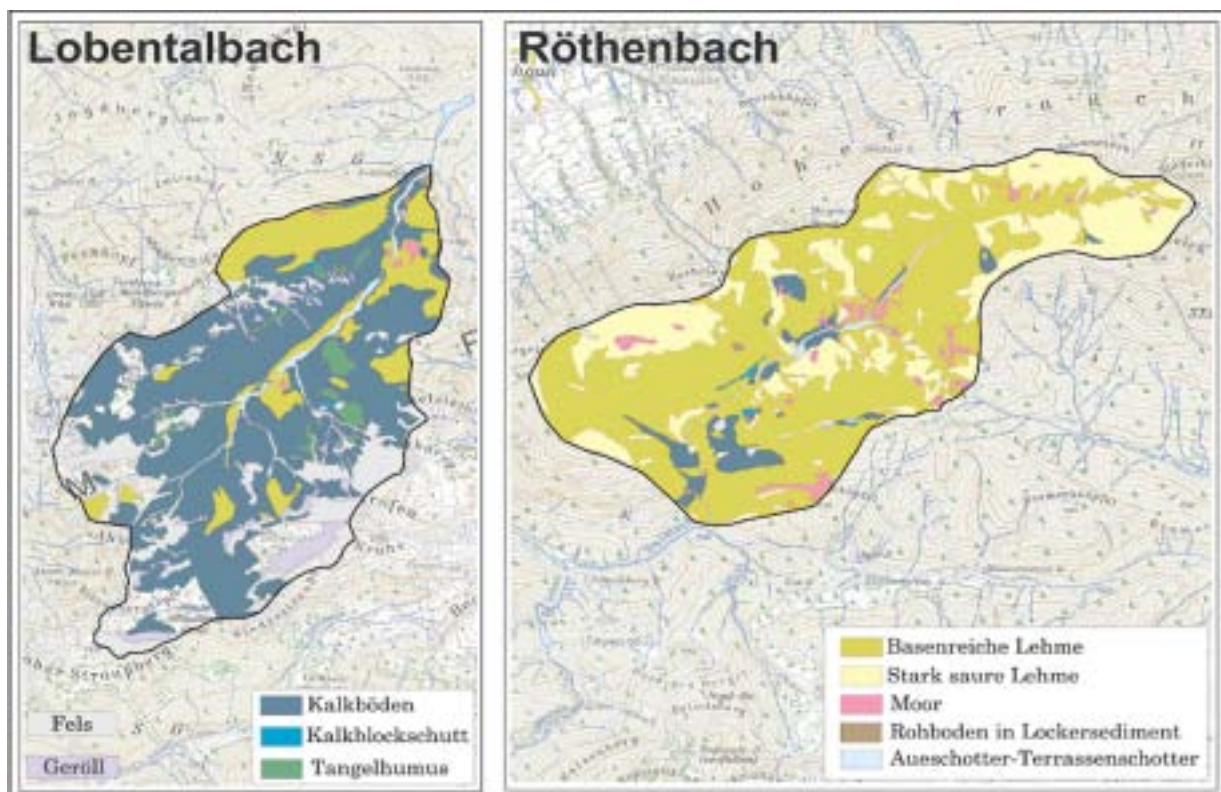
- geologische Karte (Anhang A-2a und A-2b);
- Luftaufnahmen und Farb-Infrarot-Luftbilder des Gebiets aus dem Jahr 1992;
- Planungskarte der Funktionsstelle für Schutzwaldsanierung.

Die Luftbildaufnahmen wurden zur Ermittlung von Baumartenzusammensetzung, Bestandesdichte und Altersphase der Waldbestände ausgewertet (Anhang A-3a bis A-3c) und erfassen die Schadflächen der Orkane von 1990 sowie der nachfolgenden Borkenkäfergradation.

Für die genauere Analyse der Hochwasserabflusseigenschaften wurden im Gesamtgebiet zwei kleinere Teileinzugsgebiete mit deutlich unterschiedlicher Geologie ausgewählt:

- Einzugsgebiet Röthenbach: 820 ha, Flyschzone, lehmig-tonige Böden;
- Einzugsgebiet Lobentalbach: 790 ha, Kalkalpine Zone, durchlässigere Kalkböden.

Zur Abschätzung der Oberflächenabflusseigenschaften wurde eine von MARKART et al. (2001) auf Grundlage der in Kapitel 3.1.2 dargestellten Beregnungsversuche im bayerischen und österreichischen Alpenraum entwickelte differenzierte Feldmethode zur Abschätzung der Abflusseigenschaften auf der Skalenebene einzelner Bestände speziell für alpine Boden- bzw. Vegetationseinheiten verwendet (Tabelle 10). Das Verfahren erfasst den Oberflächenabfluss sowie die sehr oberflächennahe Komponente des raschen Zwischenabflusses und bezieht sich auf einen Starkregen von 100 mm innerhalb einer Stunde als Bezugsniederschlag.



**Abb. 13:** Substratklassen nach der Standortkarte des VfS (2001) für die Teileinzugsgebiete Lobentalbach (links) und Röthenbach (rechts)

Die Autoren des Verfahrens am Institut für Lawinen- und Wildbachkunde des BFW in Innsbruck stufte die Standortseinheiten in die Abflussbeiwertklassen des Verfahrens ein (Anhang Tabelle A-4a bis A-4c). Dabei erwies sich die gebirgsspezifische Standortskarte als hervorragend geeignete Grundlage zur Anwendung des Verfahrens. Die Ergebnisse für die Abflussbeiwerte bezogen auf den Ist-Zustand der Bestände der beiden Einzugsgebiete gemäß den Luftbildern von 1992 zeigt Abbildung 14.

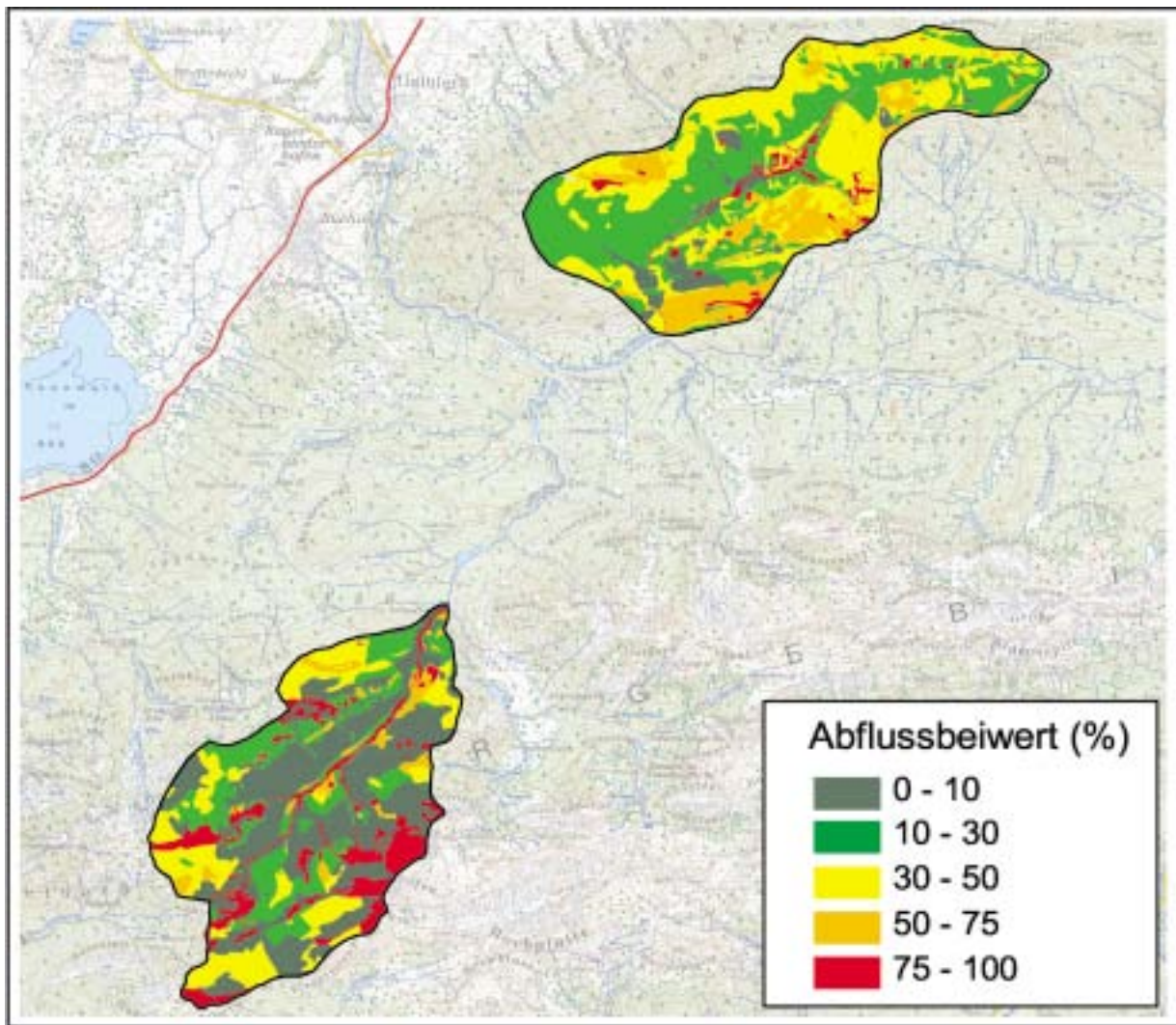
**Tab. 10:** Abflussbeiwertklassen für Starkregenereignisse nach der Methode des Instituts für Lawinen- und Wildbachforschung des Österreichischen Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald, Innsbruck (MARKART et al. 2001)

Oberflächenabfluss	Oberflächenabfluss in % des Niederschlags bezogen auf ein Starkregenereignis von 100 mm innerhalb von 1 Stunde
0	0 %
1	1 - 10 %
2	11 - 30 %
3	31 - 50 %
4	51 - 75 %
5	76 - 99 %
6	100 %

### Ergebnisse

Dabei zeigte sich, dass im Flyschgebiet Röthenbach (Abflussbeiwert 37 %) mit höheren Abflussbeiträgen zu rechnen ist als im kalkalpinen Gebiet Lobentalbach (Abflussbeiwert 30 %). Dies ist weitgehend auf die bekanntermaßen hydrologisch wesentlich problematischeren, weniger wasserundurchlässigen Flyschböden zurückzuführen. Der Unterschied der Gebiete fiele bezogen auf Waldstandorte noch deutlicher aus, wenn die im Gebiet Lobentalbach vorhandenen Felsflächen mit hohem Abflussbeiwert außer Betracht blieben.





**Abb. 14:** Abflussbeiwerte für definierten Starkregen von 100 mm in 1 Stunde nach MARKART et al. (2001) für die Einzugsgebiete Röthenbach (rechts oben) und Lobentalbach (links unten) bezogen auf den Zustand der Wälder gemäß den Luftbildern 1992

In einem zweiten Analyseschritt wurde die Empfindlichkeit der Abflussbeiwerte gegenüber verschiedenen Störungen der Waldbestände untersucht (Tabelle 11 und Anhänge A-5a bis A-5d). Auch gegenüber negativen Beeinträchtigungen der Bestände bzw. Böden ist das Flyschgebiet deutlich empfindlicher. Die dort für das Szenario „Kahlfläche“ ermittelte Erhöhung des Oberflächenabflusses bei Starkregen liegt mit 39 % in der gleichen Größenordnung wie die moderateren der in Tabelle 5 (Kapitel 3.1.3) angegebenen Werte für vergleichbare Szenarien.



**Tab. 11:** Mittlere Oberflächenabflussbeiwerte für Starkregenereignis 100 mm in 1 Stunde für die Einzugsgebiete Lobentalbach und Röthenbach bezogen auf die tatsächlichen Bestandesverhältnisse 1992 sowie relative Änderung der mittleren Abflussbeiwerte für verschiedene Szenarien des Waldzustandes (siehe auch Anhänge A-5a bis A-5d)

	Lobentalbach	Röthenbach
Oberflächenabflussbeiwerte für aktuellen Waldzustand 1992	<b>30 %</b>	<b>37 %</b>
Mittlerer Überschirmungsgrad der Waldflächen 1992	61 %	87 %

Relative Veränderungen des Abflussbeiwertes unter verschiedenen Szenarien bezogen auf den Istzustand als 100 %			
Idealzustand	Geschlossene Bestände der natürlichen Waldgesellschaft	- 12 %	- 13 %
Istzustand	Aktueller Waldzustand 1992	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>
Verlust der Mischbaumarten	Alle Bergmischwaldbestände durch Fichtenreinbestände ersetzt	+ 2 %	+ 13 %
Waldweide	Bodenverdichtung durch Waldweide auf allen Waldflächen	+ 12 %	+ 28 %
Kahlfläche	Alle Bestände durch Kahlflächen ersetzt	+ 14 %	+ 39 %

### Schlussfolgerungen

Nach den Ergebnissen der Literaturstudie und der Untersuchungen zur Sensitivität des Hochwasserabflusses mindern folgende forstliche Ziele und Maßnahmen den Hochwasserabfluss und sichern oder verbessern damit die vorbeugende Hochwasserschutzfunktion des Bergwaldes (Tabelle 12).

Die im Demonstrationsvorhaben angewandte Methode zur Abschätzung des Oberflächenabflusses und dessen Beeinflussbarkeit durch Maßnahmen oder Störungen ist als Feldmethode konzipiert. So kann sie ein geschulter Forstplaner - anders als im Projekt - mittels Erhebung der erforderlichen Boden-, Vegetations- und Bestandesmerkmale im Einzelbestand vor Ort verwenden. Damit stellt sie eine wissenschaftlich fundierte und zudem praxistaugliche Methode dar, um Handlungsbedarf sowie Prioritäten für forstliche Maßnahmenplanungen im Bergwald z. B. im Rahmen der Forstbetriebsplanung oder der Schutzwaldsanierungsplanung festzustellen. Ziel ist dabei, die verfügbaren Ressourcen, gerade im Schutzwald, gezielt auf die Flächen zu konzentrieren, auf denen die höchste Wirksamkeit für den vorbeugenden Hochwasserschutz zu erwarten ist.

**Tab. 12:** Ziele und Maßnahmen zur Sicherung und Verbesserung der vorbeugenden Hochwasserschutzfunktion der Wälder, insbesondere der Bergwälder (bestehende Maßnahmen; kursiv: Maßnahmen, deren Potential derzeit nicht ausgeschöpft wird)

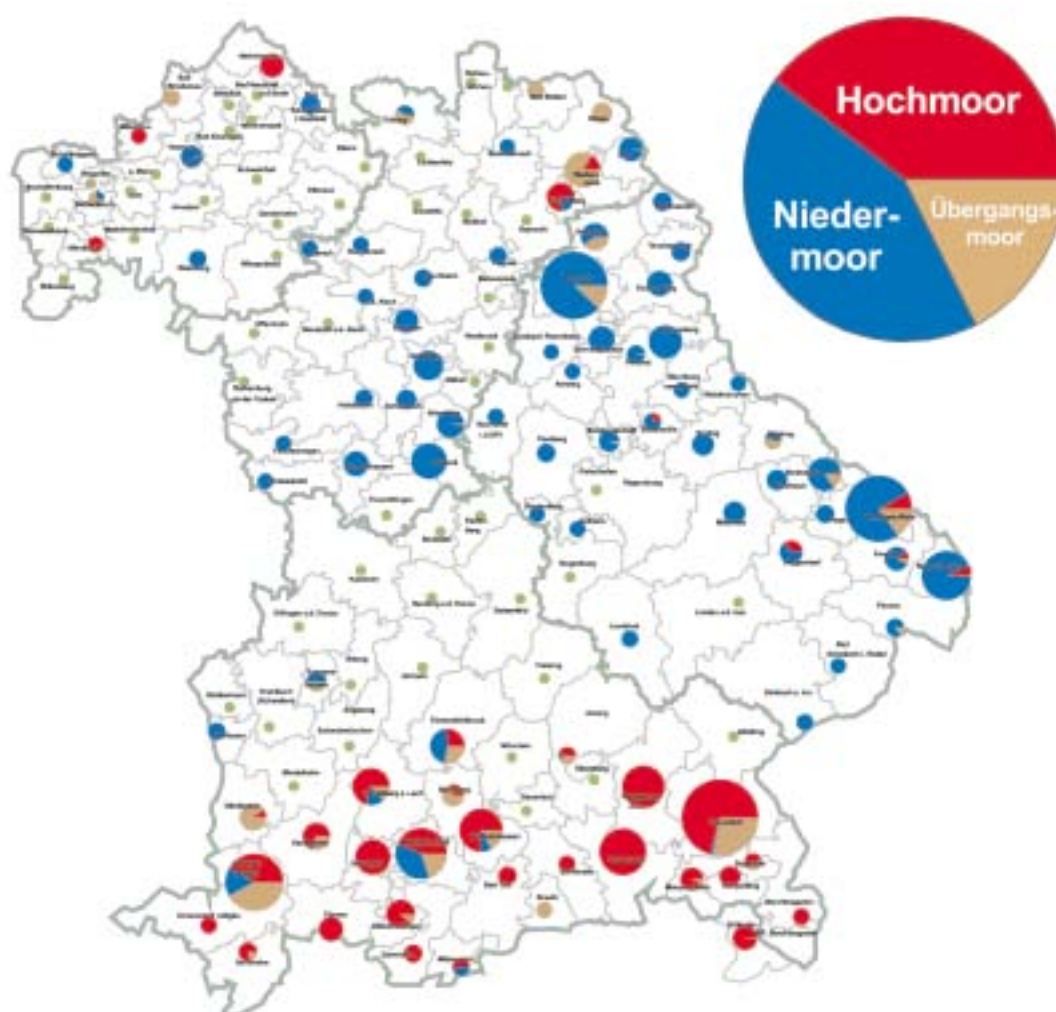
<p>1. Erhaltung und gegebenenfalls Mehrung des Waldanteils im Einzugsgebiet durch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutzwaldausweisung</li> <li>• <i>Aufforstung von Wiesen- und insbesondere Weidestandorten mit höherem Oberflächenabflussbeiwert als Bergwald</i></li> <li>• <i>Finanzielle Förderung der Aufforstung von schutzwirksamen Flächen</i></li> </ul>
<p>2. Sicherung einer schutzwirksamen, stabilen Waldbedeckung durch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• waldbauliche Pflege und Verjüngung des Bergwaldes (Stabilisierung gegen Sturm)</li> <li>• Vermeidung von Borkenkäferschäden (keine Kahlflächen)</li> <li>• Regulierung der Schalenwildbestände</li> <li>• Schutzwaldpflege, Schutzwaldbeihilfe</li> </ul>
<p>3. Bodenschutz, Vermeidung von Abfluss verschärfenden Maßnahmen oder Störungen durch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennung von Wald und Weide (keine Bodenverdichtung)</li> <li>• Sachgerechte Holzernte am Hang (keine Bodenverdichtung; siehe LWF 2002)</li> <li>• Sachgerechte Wegeerschließung (Querentwässerung; keine Unterbrechung des Zwischenabflusses am Hang)</li> </ul>
<p>4. Wiederherstellung einer schutzwirksamen, stabilen Waldbedeckung durch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutzwaldsanierung</li> <li>• Waldumbau (von nicht standortgemäßen Fichtenreinbeständen in Bergmischwaldbestände mit Buche und Tanne)</li> </ul>
<p>5. Minderung der Wildholzproblematik</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In Abstimmung mit den Wasserwirtschaftsbehörden ist gegebenenfalls Starkholz in steilen Wildbacheinhängen oder Erosionsanbrüchen zu entfernen *)</li> </ul>

\*) Anmerkung: Neuerdings finden sich zur Erosionsproblematik in Wildbacheinhängen auch Strategien, die dort die Erosion nicht bremsen, sondern im Interesse des Hochwasserschutzes „zur Förderung des Geschiebeeintrages ... die Erosion an Wildbacheinhängen gezielt zulassen“ wollen (BAYLFW und BAYLFU).

### 3.4.2 Feuchtstandorte im Wald (speziell Moore)

#### Grundlagen

Feuchtgebiete sind naturraumspezifische Lebensräume. Das Wasser und dessen ständiger oder zeitweiliger Überschuss prägen deren Landschaftsbild, Pflanzen- und Tierwelt wesentlich. Dazu zählen neben den Flussauen (Kapitel 4.3.3) Quellen, kleine Stillgewässer, Bachauen, Stauwasserstandorte und Moore (DVWK 1998). Die Bayerische Staatsforstverwaltung betreut 14.300 ha Moorland, das entspricht 9 % aller bayerischen Moorflächen. Vor dem Inkrafttreten des Bayerischen Naturschutzgesetzes war es seit über 200 Jahren erklärtes Ziel, Moore durch Entwässerung für den Torfabbau sowie für die nachfolgende land- oder forstwirtschaftliche Nutzung urbar zu machen. Deshalb befinden sich viele Moore in einem stark veränderten, naturfernen Zustand.



Niedermoore	6.631 ha	46 %
Übergangsmoore	2.357 ha	17 %
Hochmoore	5.273 ha	37 %
Gesamt	14.261 ha	100 %

Abb. 15: Moorflächen im Staatswald der Bayerischen Forstämter (ZOLLNER und CRONAUER 2003)

Das Schönramer Filz, das die LWF (ZOLLNER und CRONAUER 2003) näher erforschte, war ehemals ein offenes Latschenfilz mit bis zu 5 m mächtigem Torf. Im Zeitraum von 1900 bis 1993 wurde es großflächig abgetorft und entwässert. Nachfolgend wurde es vor allem mit Fichte und Kiefer aufgeforstet, zusätzlich flogen Pionierbaumarten, vor allem Birke, an. Abbildung 16 zeigt den stark veränderten Zustand des Moores im Jahr 1961, als kaum noch ungestörte offene Moorflächen vorhanden waren.

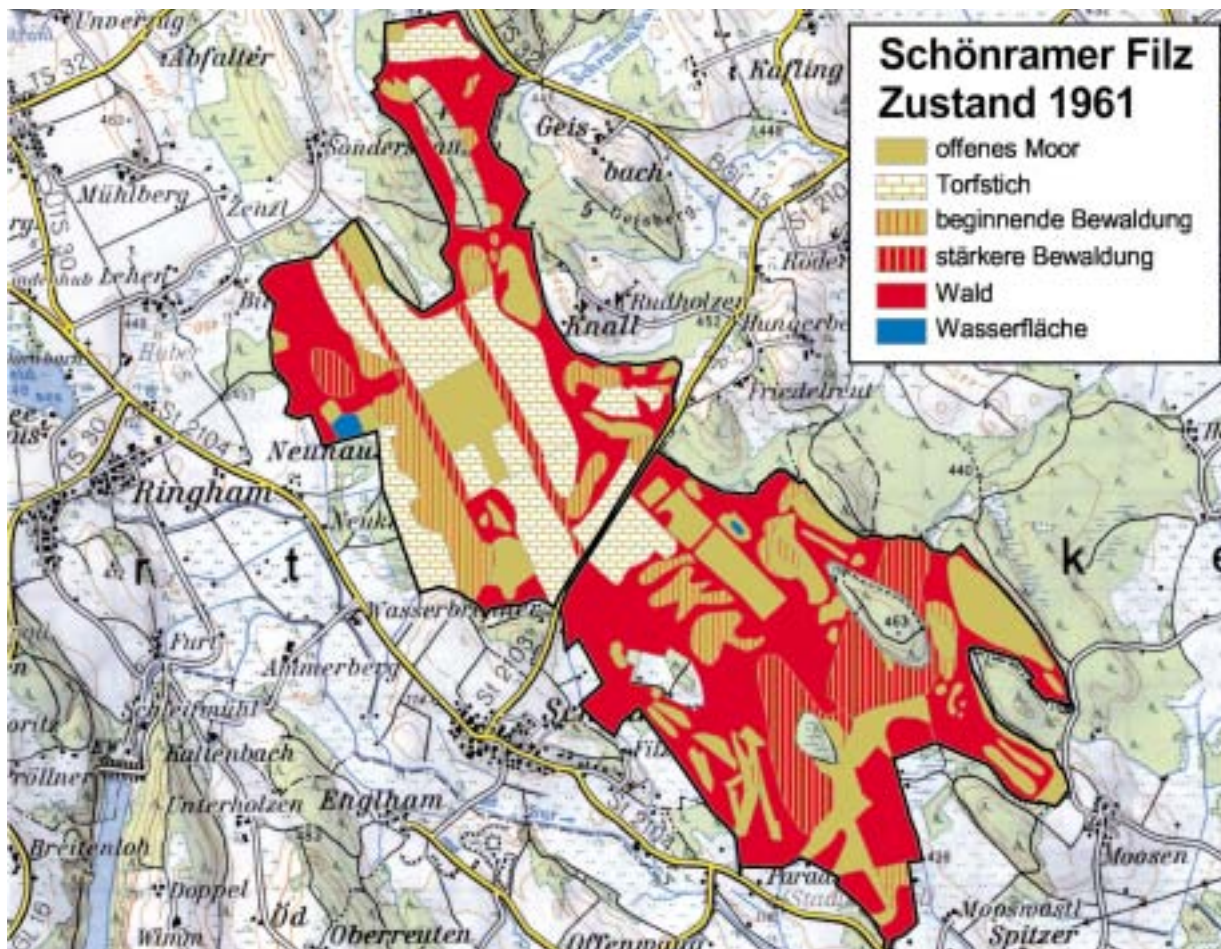


Abb. 16: Zustand des Schönramer Filzes im Jahr 1961

## Ergebnisse

Nach ZOLLNER und CRONAUER (2003) herrscht in der Literatur vielfach die Auffassung, entwässerte Hochmoore seien in Bezug auf das Abflussgeschehen günstiger zu beurteilen als naturnahe, ungestörte. Die Untersuchungen zum Abflussverhalten von ungestörten, entwässerten sowie aufgeforsteten Hochmoorflächen aus dem langjährigen moorhydrologischen Versuch der ehemaligen Landesanstalt für Bodenkunde und Pflanzenbau (LBP 1999) in den südlichen Chiemseemooren (1968-1999) belegen jedoch deutlich, dass eine Entwässerung den Hochwasserabfluss gegenüber der ungestörten Hochmoorfläche stark erhöhen kann (LBP 1999; ZOLLNER und CRONAUER 2003). Abbildung 17 zeigt, dass die entwässerte Moorwiese bei allen Ereignisgrößen deutlich höhere Spitzenabflüsse aufweist als die unberührte Hochmoorfläche. Die entwässerte und



aufgeforstete Versuchsfläche bildet bei kleinen bis mittleren Ereignissen ähnlich geringe Abflussspitzen wie die unberührte Moorfläche. Bei größeren Ereignissen übersteigen ihre Abflussspitzen die des unberührten Moores jedoch ebenfalls deutlich. Bei einem großen Starkregenereignis wie beispielsweise am 5.7.1997 (Abbildung 18) mit 100 mm innerhalb eines Tages zeigt das unberührte Hochmoor eindeutig die geringsten Abflussspitzen und eine insgesamt stark gedämpfte Abflussreaktion.

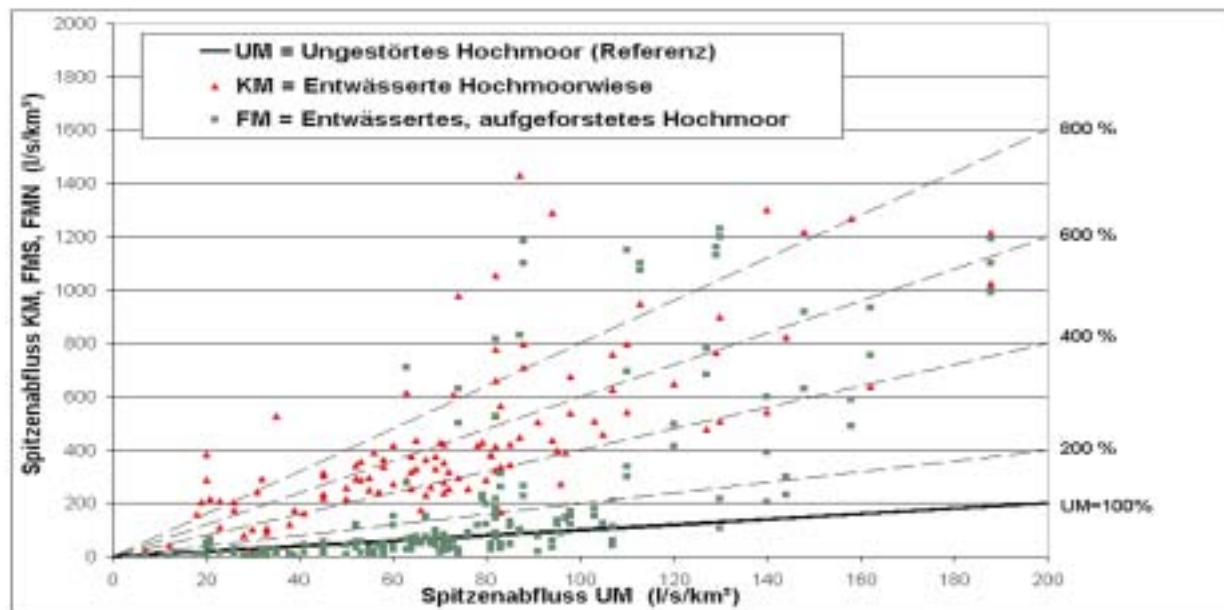


Abb. 17: Spitzenwerte der täglichen Wasserabflüsse der Varianten des Moorversuchs in den Chiemseemooren aus dem Zeitraum 1989-1999

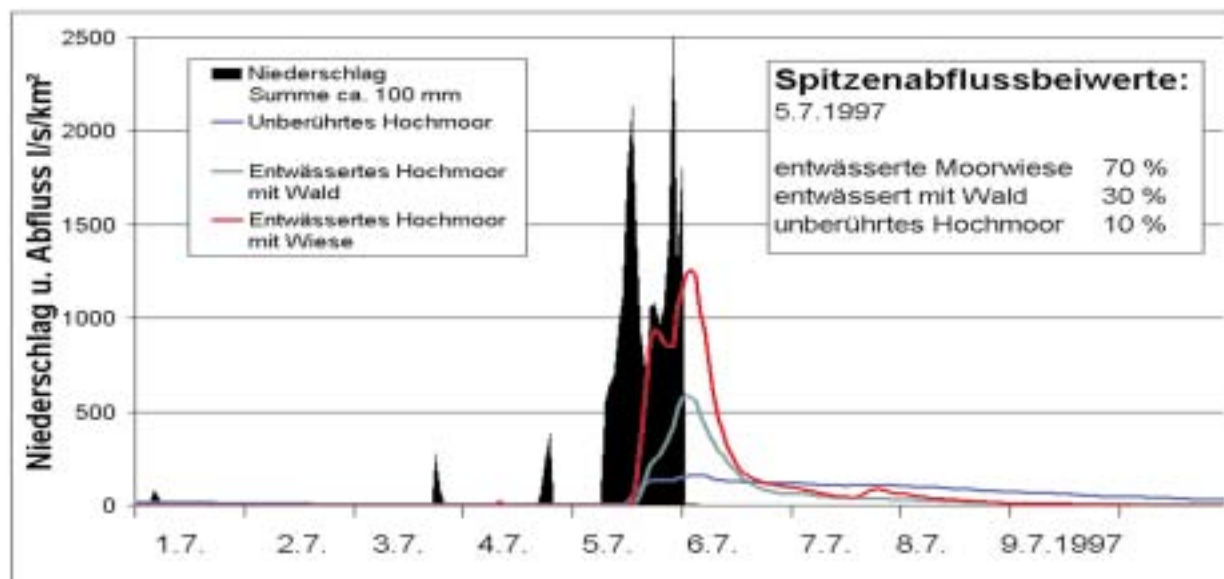


Abb. 18: Beispiel für die Abflussreaktion der Varianten des Moorversuchs in den Chiemseemooren bei einem Starkregenereignis (insgesamt etwa 100 mm am 5.7.1997)

Im Rahmen eines Forschungsprojektes (V32) der LWF wurde die Renaturierung des Schönramer Filzes wissenschaftlich begleitet und eine erste Erfolgskontrolle durchgeführt. Dabei erwies sich die Wiedervernässung, d.h. die Herstellung eines dauerhaft möglichst oberflächennahen Wasserspiegels mit Hilfe des Einstaus von Entwässerungsgräben als entscheidende Maßnahme, um das Wachstum der Torfmoose und damit eine neuerliche Hochmoortorfbildung in Gang zu setzen. Zusätzlich erwies sich die Auflichtung zu dichter Waldbestände als notwendig, um dem hohen Lichtbedarf der Torfmoose zu entsprechen. Bei maschinell abgebauten Mooren ist gegebenenfalls übergangsweise ein weiterer Abbau zweckmäßig, um eine für die flächige Wiedervernässung günstige möglichst ebene Oberfläche zu erzielen.

Diese Erkenntnisse aus den bisherigen Moorrenaturierungsprojekten der Staatsforstverwaltung fließen auch in die Leitfäden für die Hochmoor- bzw. Niedermoorrenaturierung in Bayern ein, die im Rahmen des Moorentwicklungskonzeptes Bayern des Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen erarbeitet werden.

### Schlussfolgerungen

Seit Erlass der Richtlinien für die mittel- und langfristige Forstbetriebsplanung 1982 steht für die Moore im Staatswald nicht mehr die Rohstoffgewinnung durch Torfabbau oder die forstliche Nutzung im Vordergrund, sondern die Erhaltung oder Wiederherstellung eines möglichst natürlichen Zustandes der Moore. Gesetzliche Grundlage hierfür ist das Bayerische Naturschutzgesetz. Die Renaturierung von Mooren hat die Wiederherstellung der Moore als Lebensräume spezieller Tier- und Pflanzenlebensgemeinschaften zum Ziel. Sie dient aber gleichzeitig der Sicherung und Verbesserung des Naturhaushaltes von Mooren und dabei insbesondere ihrer ausgleichenden Wirkung auf den Wasserhaushalt der Landschaft. Ähnliches gilt auch für die weiteren Feuchtflächen im Wald, etwa Quellfluren, Quellsümpfe und kleinere Waldbäche.

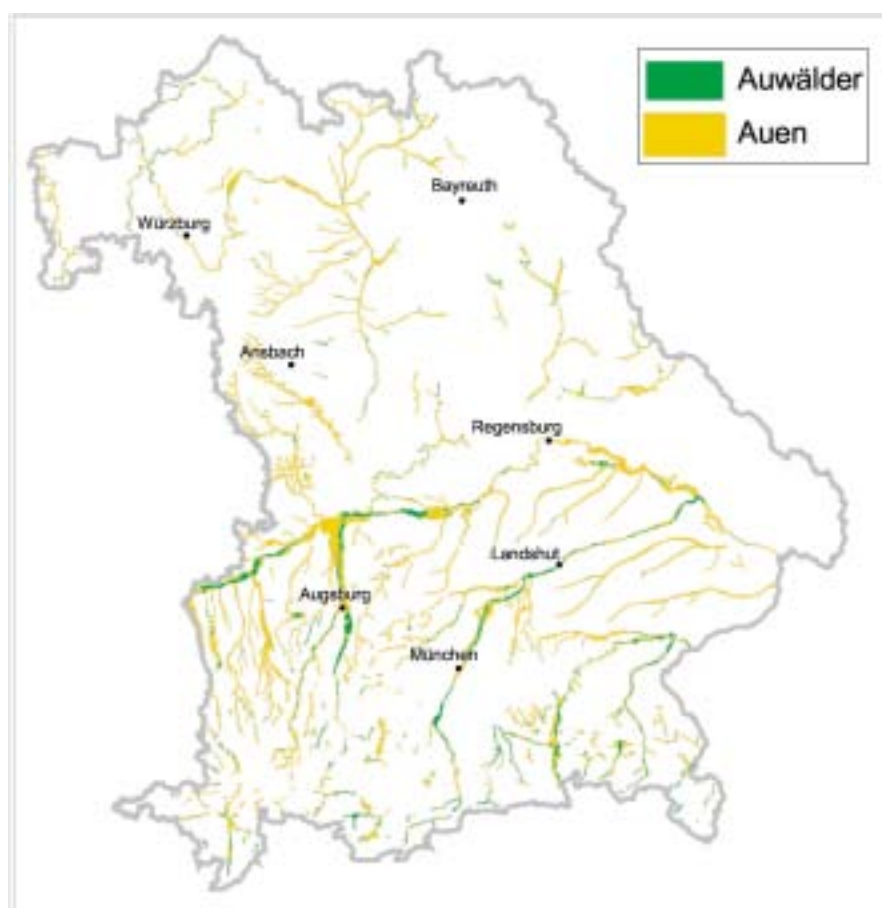
**Tab. 13:** Ziele und Maßnahmen zur Sicherung und Verbesserung des Naturhaushaltes von Mooren und anderen Feuchtflächen im Wald (bestehende Maßnahmen)

<p>1. Sicherung des naturnahen Zustandes von Mooren und Feuchtflächen im Wald</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorrang der Schutzfunktionen (Biotop- und Wasserschutz) vor Nutzfunktion im Rahmen der Forstbetriebsplanung; gegebenenfalls Nutzungsverzicht</li> <li>• Besondere Berücksichtigung der Schutzbedürftigkeit von Mooren und Feuchtflächen bei der Waldbewirtschaftung (Befahrung u. ä.)</li> </ul>
<p>2. Wiederherstellung des naturnahen Zustandes von Mooren und Feuchtflächen im Wald</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung und Umsetzung von Renaturierungsplanungen für alle gestörten Moore im Staatswald als Bestandteil der Forstbetriebsplanung</li> <li>• Umbau nicht standortgerechter Bestockungen an Waldbächen</li> </ul>

### 3.4.3 Auwälder

#### Grundlagen

Die Fläche der Flussauen Bayerns beträgt etwa 300.000 ha. Von Natur aus wären sie zu großen Teilen mit Auwäldern bedeckt. Mit zunehmender Besiedelung und landwirtschaftlicher Nutzung der Talräume wurden im 19. und 20. Jahrhundert viele Flüsse reguliert und eingedeicht mit dem Ziel der Hochwasserfreilegung. Im Zuge dieser Entwicklung wurde ein großer Teil der Auwälder zugunsten anderer Nutzungen gerodet, so dass es um 1980 nur noch etwas über 40.000 ha Auwald in Bayern - überwiegend in Südbayern - gab, davon etwa 9.000 ha im Staatswald (GULDER 1996). Die Flussauen sind also mit einem rechnerischen Bewaldungsanteil von etwa 13 % insgesamt sehr waldarme Bereiche. Die Ausweisung von Bannwald nach Inkrafttreten des Waldgesetzes 1975 konnte den weiteren Verlust an Auwäldern zumindest stoppen. Seither ist eine wenn auch geringfügige Flächenzunahme festzustellen (BIERMAYER 1999).



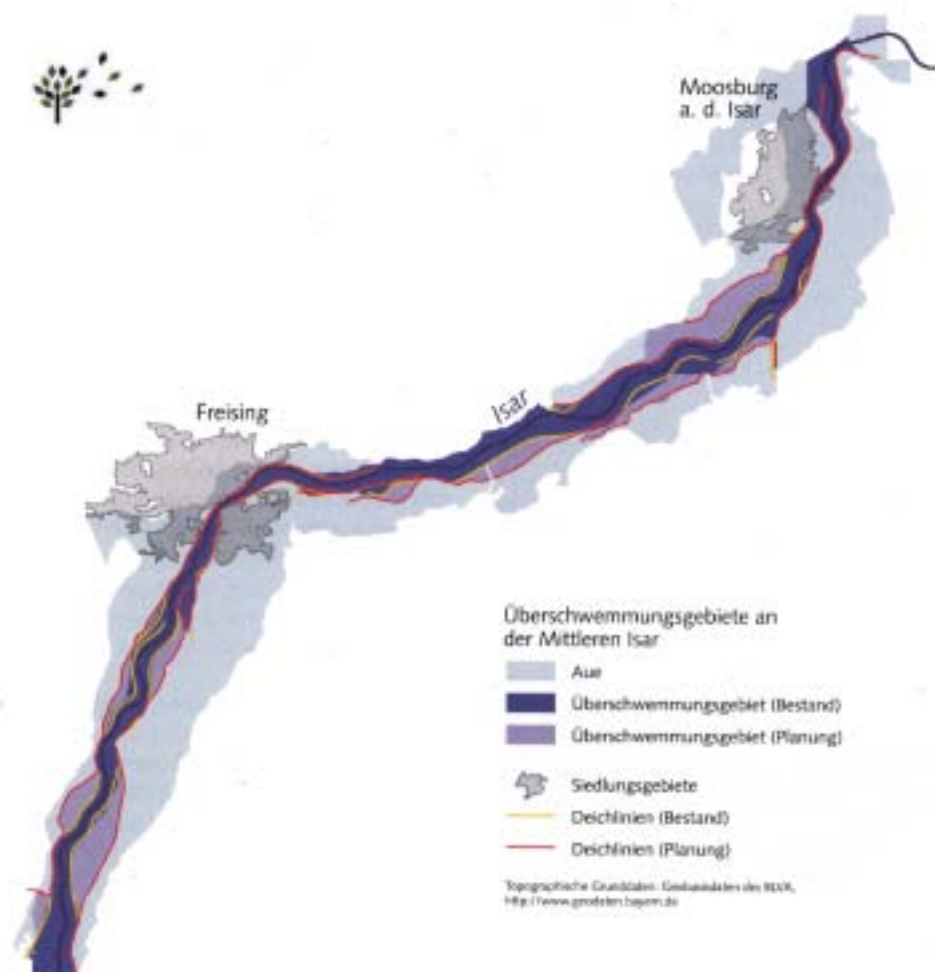
**Abb. 19:** Flussauen in Bayern (ockergelb) und darin derzeit vorhandene Auwälder (grün)

In Folge der Eindeichungen verloren zudem viele ehemalige Auenflächen ihren von periodischer Überflutung geprägten Auencharakter. Nur noch etwa 10 bis 15 % der verbliebenen Wälder in den Flusstälern werden noch episodisch überflutet und sind somit als Auenwälder im echten Sinne anzusehen (BIERMAYER 1999). Die Flussbegradigungen beschleunigten die Fließgeschwindig-



keit sowie die Eintiefung der Sohle um oft mehrere Meter, so z. B. die Isar bei Freising um bis zu 8 m (LfW und LfU 2002). Damit senkte sich auch der Grundwasserspiegel unter den Auwäldern vielfach so weit ab, dass er für den Standort bedeutungslos wurde. Auf den verbliebenen Waldflächen, auf denen die auwaldtypischen Standortfaktoren Überflutung und Grundwasser nicht mehr wirksam waren, wurden die ehemaligen Auwaldbestockungen vielerorts in Fichten-, Kiefern- oder Pappelbestände umgewandelt.

Im Demonstrationsvorhaben wurden die Auwälder entlang der Mittleren Isar im Bereich des Forstamtes Freising näher betrachtet. Es betreut mit etwa 2.900 ha die größten Auwaldflächen im Staatswald (LWF 2003).



**Abb. 20:** Bestehende und bis 2020 geplante Ausweitung der Überschwemmungsgebiete im Auenbereich der Mittleren Isar

## Ergebnisse

Der Gewässerentwicklungsplan und das Hochwasserschutzprogramm 2020 sehen für die Mittlere Isar eine erhebliche Ausweitung der Überflutungsflächen von derzeit 1.600 ha um ca. 1.000 ha mittels Rückverlegung bestehender flussnaher Hochwasserschutzdeiche vor, ohne allerdings auch nur annähernd die Ausdehnung der ursprünglichen Auen zu erreichen zu können (Abbildung 20). Auf diese Weise soll ein zusätzliches Rückhaltevolumen für Hochwasser von ca. 10 Mio. m<sup>3</sup> erzielt werden (StMLU 2003). Die Kosten für Hochwasserschutzmaßnahmen werden dabei für den Zeitraum vom Projektbeginn 1998 bis zum Jahr 2020 mit 66,5 Mio. € für den Hochwasserschutz und mit 22,3 Mio. € für die Gewässerentwicklung (Rückbau von Uferbefestigungen u. ä.) beziffert (StMLU 2003). Von den zusätzlichen Überflutungsflächen sind bereits etwa 700 ha Wald. Mittels Aufforstung der übrigen 300 ha ließe sich gemäß der in Kapitel 3.1.3 und 3.2 dargelegten Abschätzung der größeren Einstauhöhe von Wald gegenüber Flächen mit niedriger Vegetation langfristig (etwa nach Bestandesschluss) ein zusätzliches Retentionsvolumen von grob geschätzt bis zu etwa 1 Mio. m<sup>3</sup> aktivieren. Die Planungen der Wasserwirtschaft sehen in der Tat erhebliche Investitionen für den Ankauf landwirtschaftlicher Flächen im Überflutungsbereich und für die Entwicklung von Auwald auf diesen Flächen vor. Nachteilig wirkt sich die größere Einstauhöhe des Waldes dagegen in Bereichen aus, in denen der Fließquerschnitt zwischen flussnahen Deichen wegen dahinter liegender Bebauung nicht rückverlegt werden kann und damit bei knapp bemessener Deichkronenhöhe ein freier, ungestörter Durchflussquerschnitt erforderlich ist. Dies ist beispielsweise im Bereich Moosburg der Fall.

Das vom Forstamt Freising bereits mit der Forstbetriebsplanung 1991 eingeleitete Programm zum Umbau von nicht standortgerechten Fichten-, Kiefern- und Kulturpappelbeständen (Stand 1991 ca. 1.200 ha) in naturnahen Auwald nimmt damit bereits die wesentlichen forstlichen Maßnahmen für die Schaffung hochwassertoleranter, naturnaher Auwaldbestände in den zukünftigen Überflutungsbereichen vorweg (Abbildung 21). Bis zum Stand der Forstbetriebsinventur 2001 waren bereits 200 ha umgewandelt (Abbildung 22). Bis zum Jahr 2020 sollen sämtliche Bestände umgewandelt sein. Die Gewähr dafür, dass der Umbau zunehmend beschleunigt werden kann, bietet die Regulierung der Schalenwildbestände (insbesondere des Rotwildes) mit Hilfe eines konsequenten Jagdbetriebes. Hierdurch konnte sich inzwischen auf nahezu der gesamten noch umzubauenden Fläche bereits jetzt eine zielgemäße Vorausverjüngung aus standortgerechten Auwaldbaumarten entwickeln (Abbildung 22).

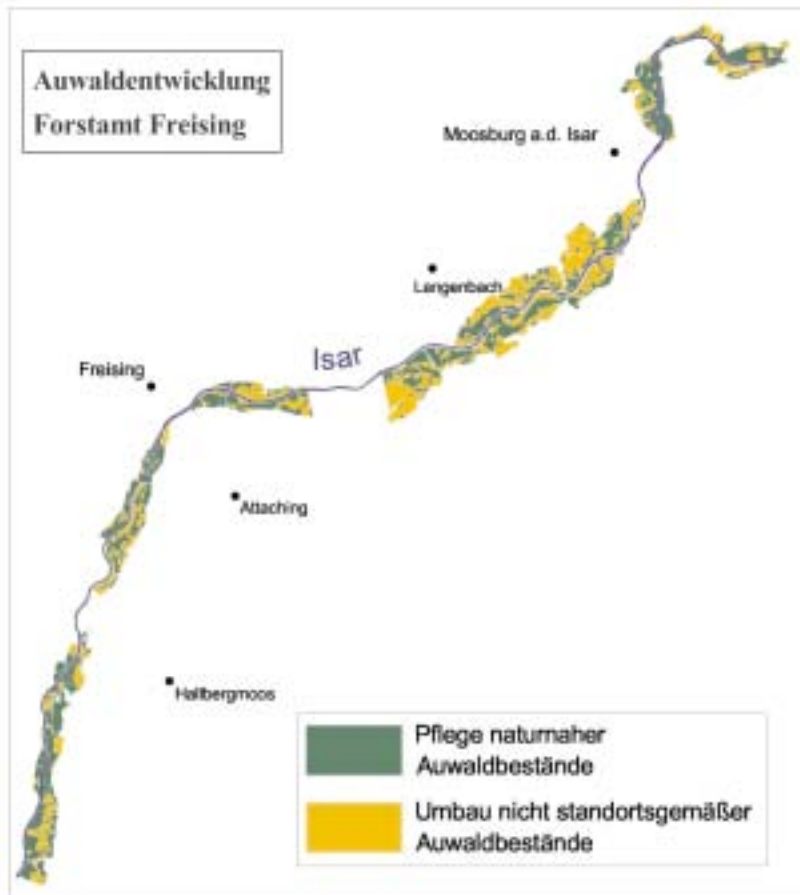


Abb. 21: Zu pflegende naturnahe bzw. umzubauende nicht standortsgemäße Auwaldbestände im Staatswald des Forstamtes Freising (Stand Forstinventur 1991)



Abb. 22: Anteil der Baumarten im Auwaldbereich des Forstamtes Freising am Gesamtbestand 1991 bzw. 2001 sowie an der nachwachsenden Verjüngung (LWF 2003)

## Schlussfolgerungen

Der naturnahe Auwald ist als natürliche Vegetation der Flussauen an die dort natürlicherweise herrschenden Standortverhältnisse mit episodischer Überflutung besser angepasst als alle anderen Landnutzungsarten. Er übersteht temporäre Überflutung ohne wesentliche Schäden. Zusätzlich verstärkt seine erhöhte Oberflächenrauigkeit zusätzlich das Hochwasserrückhaltevolumen und dient somit dem vorbeugenden Hochwasserschutz optimal.

**Tab. 14:** Ziele und Maßnahmen zur Sicherung und Verbesserung der vorbeugenden Hochwasserschutzfunktion der Auwälder (bestehende Maßnahmen; kursiv: Maßnahmen deren Potential derzeit nicht ausgeschöpft wird)

1. Erhaltung und Mehrung des Waldanteils in den Flussauen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bannwaldausweisung</li> <li>• <i>Aufforstung von Flächen vor allem in (neu gewonnenen) Überflutungsbereichen</i></li> <li>• <i>Finanzielle Förderung der Aufforstung</i></li> </ul>
2. Anpassung der Auwälder an reaktivierten Überflutungseinfluss
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umbau nicht standortgemäßer Bestockungen in naturnahen Auwald</li> </ul>
3. Erhaltung naturnaher, funktionsgerechter Auwälder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Waldbauliche Pflege und Verjüngung naturnaher Auwälder</li> </ul>