

Zum Einfluss des Waldes auf die Hydrologie der Flysch-Einzugsgebiete des Alptals

Von Hans Burch, Felix Forster und Patrick Schlepfi

Keywords: Peak discharge; forest effects on hydrology; forest cover; runoff coefficient.

FDK: 116:114.1: (494.11): UDK 551. 263. 23

1. Einleitung

1.1 Einfluss von Wald auf Hochwasser

Die Frage der Waldwirkung auf das Abflussverhalten in verschiedenartigsten Einzugsgebieten beschäftigt die Forsthydrologie schon seit Generationen. Zwar gab bereits *Engler* (1919) in einer der ersten bedeutenden Arbeiten zu diesem Thema eine klare Antwort. Seine Aussagen, wonach der Wald die Hochwasser massgeblich dämpft, und zwar sowohl bezüglich Abflussvolumen als auch in bezug auf die Abflussspitze, beruhten auf Vergleichsmessungen in zwei sehr unterschiedlich bewaldeten Einzugsgebieten im Emmental (Kanton Bern). Der zu praktisch 100% bewaldete Sperbelgraben bestand im wesentlichen aus plenterwaldartigen Mischbeständen (60% Tanne, 20% Fichte, 20% Buche). Im nur zu 30% bewaldeten Rappengraben mit vergleichbarer Baumartenzusammensetzung wurde 60% der Fläche als Grossviehweide genutzt. Die Resultate dieser bemerkenswerten Untersuchungen prägten das forsthydrologische Denken für Jahrzehnte.

Weil sich zwei unterschiedlich bewaldete Einzugsgebiete eben auch in anderen hydrologisch bedeutsamen Parametern unterscheiden können als nur gerade in der Vegetationsbedeckung, versuchten amerikanische Forschergruppen im Anschluss an diese Untersuchungen im Emmental mit einem neuen Experimentalansatz weiterzukommen (*McCulloch, Robinson, 1993*). Im Wagon Wheel Gap Experiment wurde 1919/20 nach einer mehrjährigen Beobachtungszeit (Eichperiode) zweier benachbarter Einzugsgebiete das eine

der beiden bewaldeten Gebiete kahlgeschlagen und das andere unverändert belassen. Damit konnten die hydrologischen Auswirkungen des Kahlschlages quantifiziert werden, ohne dass dabei unterschiedliche Einzugsgebiets- bzw. Witterungsverhältnisse die Interpretation erschwert hätten. Der gegenüber dem Kontrollgebiet erhöhte Jahresabfluss im kahlgeschlagenen Gebiet kam einerseits durch grössere Schmelzabflüsse im Frühling und durch erhöhten Trockenwetterabfluss im Sommer zustande. Die Zuverlässigkeit der Aussage hängt von einer genügend langen und hydrologisch abwechslungsreichen Eichperiode ab.

In einer geographisch und pedologisch breit abgestützten Untersuchung werteten *Bosch und Hewlett (1982)* die Wasserbilanzen einer grossen Anzahl von experimentellen Einzugsgebietsstudien aus, die alle das Ziel der hydrologischen Quantifizierung des Waldeinflusses verfolgten. Die Zunahme der jährlichen Evapotranspiration mit steigendem Bewaldungsanteil war über alle Gebiete deutlich erkennbar, obwohl sich z.T. sehr grosse Streuungen ergaben. Dabei dürften die unterschiedlichen Klima-, Boden- und Waldverhältnisse eine zentrale Rolle gespielt haben. Das Abflussverhalten während einzelner Niederschlagsereignisse wurde in dieser Untersuchung nicht kommentiert.

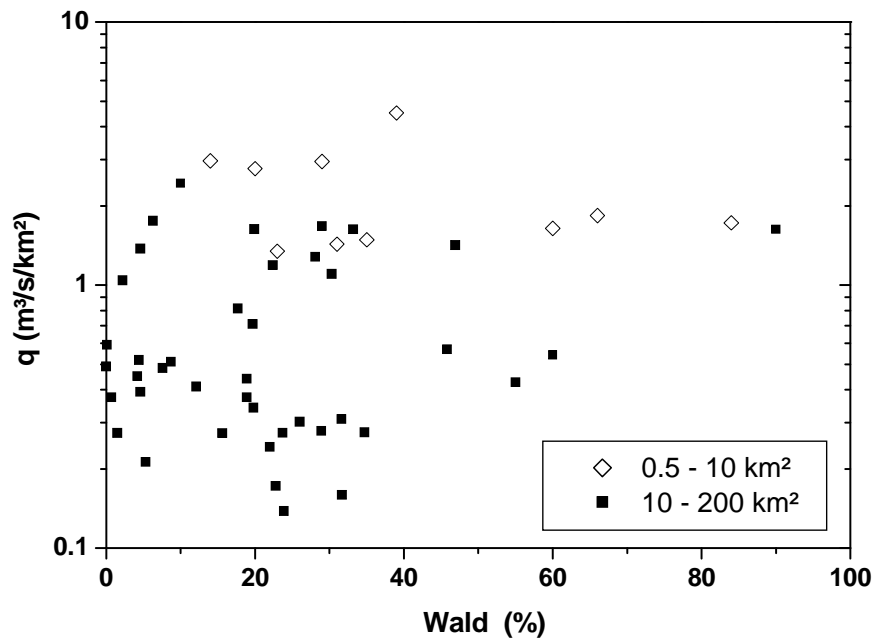


Abbildung 1. Das mittlere jährliche Hochwasser in Abhängigkeit vom Bewaldungsprozent für zwei Klassen von Einzugsgebietsgrössen.

Im Kartenblatt 5.6 des *Hydrologischen Atlas der Schweiz* (1995) ist unter anderem die Abhängigkeit des mittleren jährlichen Hochwassers von verschiedenen Parametern für 38 Einzugsgebiete untersucht und dargestellt worden. Dabei wurde das Bewaldungsprozent ebenfalls als Einflussgrösse untersucht. Es handelt sich dabei um Gebiete mit Flächen zwischen 10 und 200 km². Eine Abhängigkeit zwischen Bewaldungsprozent und mittlerem jährlichen Hochwasser lässt sich nicht erkennen, wobei der grösste Bewaldungsanteil bei 55% lag. In *Abbildung 1* haben wir die Darstellung durch 10 weitere Gebiete mit Flächen zwischen 0,5 und 10 km², aus geologisch unterschiedlichen Regionen ergänzt. Die Darstellung deutet für die kleinen Gebiete auf eine geringfügige Abnahme des mittleren jährlichen Hochwassers mit zunehmendem Waldprozent hin. Diese Abnahme ist aber statistisch nicht signifikant.

Aufgrund von mehrjährigen Datenreihen für drei natürliche Einzugsgebiete und drei kleinere, künstliche Versuchsflächen soll die Frage des Waldinflusses auf das Abflussverhalten während grösserer Hochwasserereignisse am konkreten Beispiel des Alptals untersucht werden. Dabei soll auch der Einfluss allfälliger weiterer massgebender Faktoren diskutiert werden.

2. Standorte und Messdaten

Die hydrologischen Untersuchungsgebiete des Alptals (Kanton Schwyz) gehören zur voralpinen Zone der Schweiz und liegen zwischen 900 und 1500 m ü. M. (Burch, 1994). Das Alptal, mit einem Jahresniederschlag von meist mehr als 2000 mm, liegt deutlich über dem schweizerischen Durchschnitt von 1500 mm. Die Kessellage des Alptals verstärkt die talaufwärts zunehmende Tendenz sowohl der Jahresniederschläge als auch der Starkniederschläge, welche häufig mittlere und grosse Hochwasser auslösen können. Die Seitenbäche der Alp weisen oft steile Einhänge und tief eingeschnittene Bachsohlen auf und sind ausnahmslos richtige Wildbäche mit Hangneigungen bis zu 64%.

Die Flyschböden der Alptaler Einzugsgebiete sind schwer und weisen eine stark gehemmte Durchlässigkeit auf. Der extensiv genutzte, mehrstufige Fichtenwald mit 10-15% Weisstannenanteil stockt im Erlenbachgebiet auf tonreichen, gehemmt durchlässigen, z.T. sauren Hangleyböden mit unterschiedlich mächtiger Oxidationszone. Im Lämpenen- und im Vogelbachgebiet steht der Wald mehrheitlich auf tiefgründigeren, etwas weniger tonreichen, skeletthaltigeren und generell durchlässigeren Böden. Je nach Vernässungsgrad des Oberbodens variiert die Humusform von Rohhumus bis Anmoor. Ausserhalb des Waldes treten vor allem Weiden, Sumpfwiesen und Hangmoore auf (*Tabelle 1*). Im Verlaufe der letzten 35 Jahre sind auch grössere Nutzungsänderungen zu verzeichnen. So wurden Streuwiesen nicht mehr gemäht und der Waldanteil vergrösserte sich durch künstliche und natürliche Aufforstung. Die

extensive Beweidung des gesamten Erlenbachgebietes (inklusive Wald) fand 1976 ein Ende, mit Ausnahme einer Weide von rund 10 ha an der oberen Einzugsgebietsgrenze.

Zur Verfügung stehen Daten mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten für Niederschlag, Abfluss und Grundwasserpegel in unterschiedlich bewaldeten Wildbacheinzugsgebieten des Alptals. Die Flächen N1, N2 und N3 (Tabelle 1) wurden durch Gräben künstlich begrenzt. Diese Versuchsflächen liegen innerhalb des Gebietes A10 und sind Teil des europäischen Projektes NITREX, das den Einfluss von Stickstoffeinträgen auf Waldökosysteme untersucht. Die resultierende zweijährige Messperiode kann den langfristigen Untersuchungen in den grösseren Referenzgebieten A3, A4 und A10 gegenübergestellt werden. Für Skalenbetrachtungen können das Gebiet A10 und dessen Teileinzugsgebiete N1, N2, N3 verwendet werden.

Tabelle 1. Kennwerte der hydrologischen Untersuchungsgebiete im Alptal.

Gebietsnummer		A3	A4	A10	N1	N2	N3
Gebietsname		Vogel- bach	Lümpenen- bach	Erlen- bach	Nitrex-1 (Wald)	Nitrex-2 (Wald)	Nitrex-3 (Wiese)
Fläche	ha	155	93	70	0,167	0,145	0,168
Exposition		ESE	ESE	W	W	W	W
Drainagedichte	km ⁻¹	ca. 8	15	27	26	28	28
Waldanteil	%	63	19	39	100	100	0
Nassflächen	%	25	24	61			100
Weideanteil	%	12	57	0	0	0	0
Auswertung von		1.1.87	1.1.87	1.1.87	1.2.94	1.2.94	1.7.94
Auswertung bis		31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95
Niederschlag/Jahr (1987-95)	mm	2200	2340	2320	–	–	–
Abflusskoeffizient (1994/95)		0,73	0,94	0,83	0,76	0,76	0,87

Neben automatischen Niederschlagswippen sind in den Gebieten A3, A4 und A10 noch Niederschlagswaagen und Totalisatoren im Betrieb. Alle Abflussmessstationen sind mit einer automatischen Pegelerfassung ausgerüstet. Für die Kalibrierung der Eichkurven existieren systematische Eichmessungen, Resultate aus hydraulischen Laborversuchen sowie Messungen mit einer automatischen Hochwassermessanlage (Burch, Fritschi, 1994). Die Daten werden automatisch erfasst und täglich plausibilisiert.

3. Methoden

Der Einfluss des Waldes auf Hochwasser soll mit Hilfe der folgenden zwei Hochwasser-Kennwerte beurteilt werden. Der Volumenabflusskoeffizient Ψ_v wird als Quotient aus Dircktabflussvolumen und Niederschlagssumme wäh-

rend eines Ereignisses bestimmt. Als Direktabfluss wird die Differenz zwischen Gesamt- und Basisabfluss berücksichtigt. Als spezifischer Spitzenabfluss q_{\max} wird der grösste spezifische Abflusswert [$l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$] während eines Ereignisses verwendet.

Als Niederschlagsereignisse wurden sowohl kurze Gewitterereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten als auch länger dauernde Landregen mit kleinen Intensitäten berücksichtigt. Dabei wurde insbesondere auch darauf geachtet, dass Ereignisse mit unterschiedlicher Niederschlags-Vorgeschichte in die Auswertung einfließen.

Die statistische Auswertung erfolgt mit einem generellen linearen Modell (*general linear model*), das erlaubt, die Einflüsse von erklärenden Variablen (Regressoren) und die Einflüsse der Einzugsgebiete (Klassen) gemeinsam zu schätzen und zu testen.

4. Resultate und Diskussion

4.1 Einfluss des Waldes auf die langfristige Wasserbilanz

Die Betrachtung der Alptaler Wasserbilanzen (*Abbildung 2*) über mehrere Jahre hinweg bestätigt die Aussagen von *Bosch* und *Hewlett* (1982), dass mit zunehmender Bewaldung die Evapotranspiration in vergleichbaren Einzugsgebieten steigt, wobei sich im Gebiet A3 diesbezüglich auch die etwas tiefergründigeren und durchlässigeren Böden positiv auswirken.

Insbesondere kann der immergrüne Nadelwald selbst bei geschlossener Schneedecke über die Interzeptionsverluste und, bei entsprechenden klimatischen Bedingungen, auch über die Transpiration den Abfluss gegenüber Freiflächen mindern.

Die aus der Wasserbilanz für den Erlenbach ermittelte Evapotranspiration für das hydrologische Jahr 1994/95 lässt sich erstaunlich gut aus den entsprechend ermittelten Evapotranspirationswerten der Teilflächen N2 und N3 hochrechnen. Die beiden bewaldeten Flächen N1 und N2 verhalten sich sehr ähnlich. Die jährlichen Volumenabflusskoeffizienten sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Der Wald ist hydrologisch gesehen diejenige Vegetationsbedeckung, welche pro Jahr am meisten Wasser verbraucht.

4.2 Schneeschmelzphase 1995

In einer weiteren Gegenüberstellung soll der Waldeinfluss während einer mittelfristigen Periode, nämlich während einer Winter- bzw. Schmelzphase

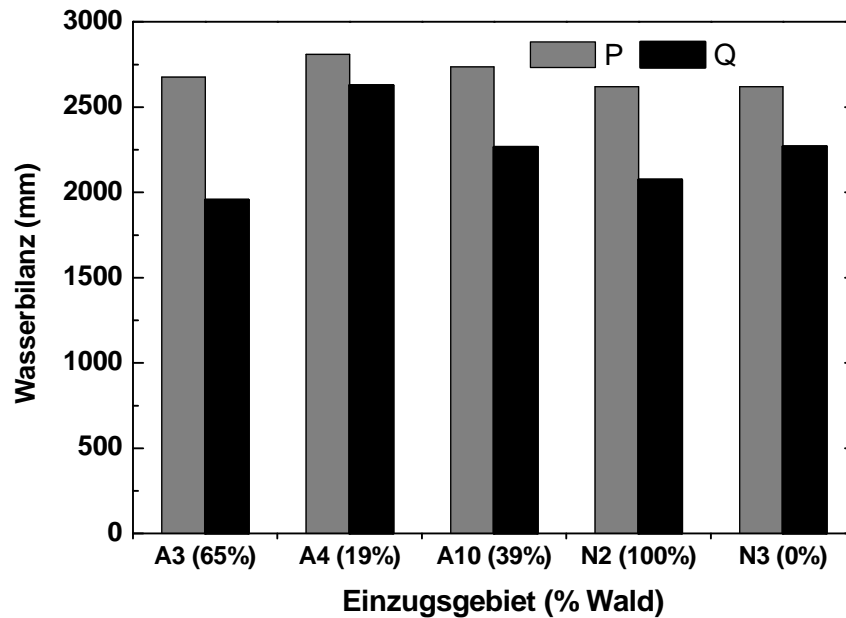


Abbildung 2. Wasserbilanzen der Untersuchungsgebiete im Alptal für das hydrologische Jahr 1994/95. P = Niederschlag, Q = Abfluss.

beurteilt werden. In *Abbildung 3* sind die Abflussummenkurven der natürlichen Einzugsgebiete A3 (viel Wald) und A4 (wenig Wald) sowie die entsprechenden Kurven der bewaldeten und der unbewaldeten Nitrex-Flächen für die Periode vom 1. Januar 1995 bis 31. Mai 1995 dargestellt. Am 1. Januar 1995 lag im gesamten Alptal eine geringe, aber gleichmässige Schneedecke mit einem Schneewasseräquivalent von nur 30 bis 40 mm, nachdem es kurz zuvor wieder eingeschneit hatte. Während der betrachteten Periode fiel im Gebiet A4 etwa 1300 mm Niederschlag und im Gebiet A3 etwa 1180 mm. Auch in den beiden Nitrex-Flächen N2 und N3 fiel etwa 1180 mm Niederschlag.

Die Abflussummenkurven der Gebiete A3 und A4 unterscheiden sich praktisch von Beginn der untersuchten Periode an. Die Kurve des wenig bewaldeten Gebietes A4 verläuft stets über derjenigen des stärker bewaldeten Gebietes A3. Mit Beginn der Hauptschmelze im April verläuft die Abflusskurve von A4 etwas steiler. Über die fünf betrachteten Monate hinweg flossen aus A4 rund 500 mm mehr ab als aus A3. Im Gebiet A4 fiel aber rund 120 mm mehr Niederschlag; deshalb beträgt die vergleichbare Abflussdifferenz zwischen A4 und A3 nur etwa 380 mm.

Auf den Nitrex-Flächen ist die Situation anders, indem die Abflusskurve von der bewaldeten Fläche N2 interessanterweise bis zum Einsetzen der

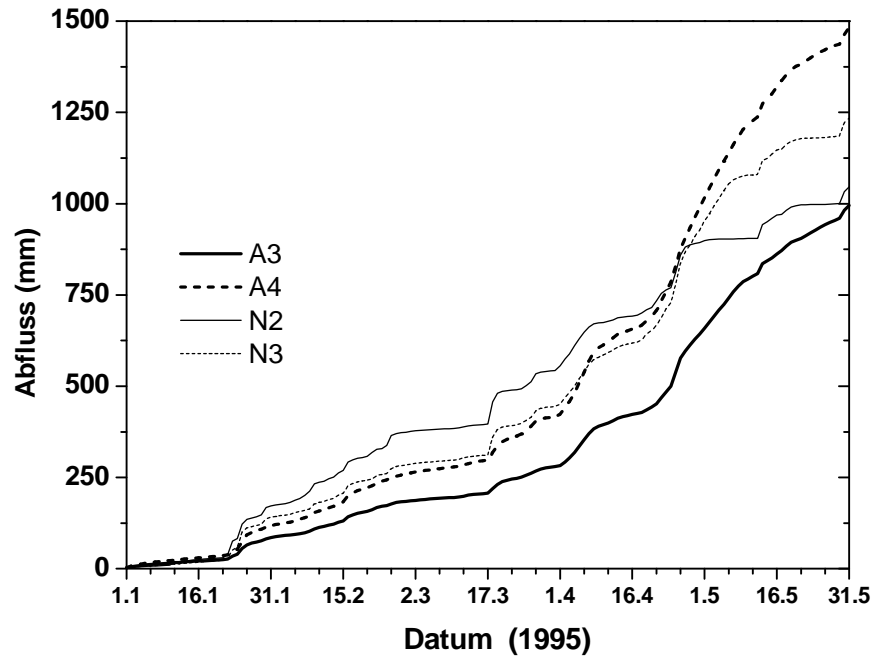


Abbildung 3. Abflusssummenkurve der Gebiete A3, A4 sowie der Flächen N2 und N3 zwischen 1. Januar und 31. Mai 1995.

Hauptschmelze Anfang April über derjenigen der Streuwiese N3 liegt. Dann verläuft die Abflusssumme auf der Streuwiese leicht steiler als im Wald. Erst gegen Ende April, wenn die Waldfläche ausgeapert ist, verläuft die Abflusskurve der Streuwiese deutlich über derjenigen der bewaldeten Fläche. Auf der unbewaldeten Fläche liegt bei ähnlicher Exposition länger Schnee, d.h. die Interzeptionswirkung des Waldes macht sich offensichtlich bemerkbar. Auf der Streuwiese N3 fließen bei gleichem Niederschlagsangebot etwa 200 mm mehr ab als auf der Waldfläche N2. Generell sind aus bewaldeten Gebieten während der Schmelzperioden die kleineren Ψ_v und auch die geringeren Abflüsse zu erwarten. Dies prägt die Wasserbilanzen von bewaldeten voralpinen Einzugsgebieten massgeblich.

4.3 Hochwasserauswertung für die natürlichen Einzugsgebiete

Im folgenden Schritt betrachten wir nur noch einzelne Hochwasserereignisse der Gebiete A3, A4, A10 der Periode 1987 bis 1995.

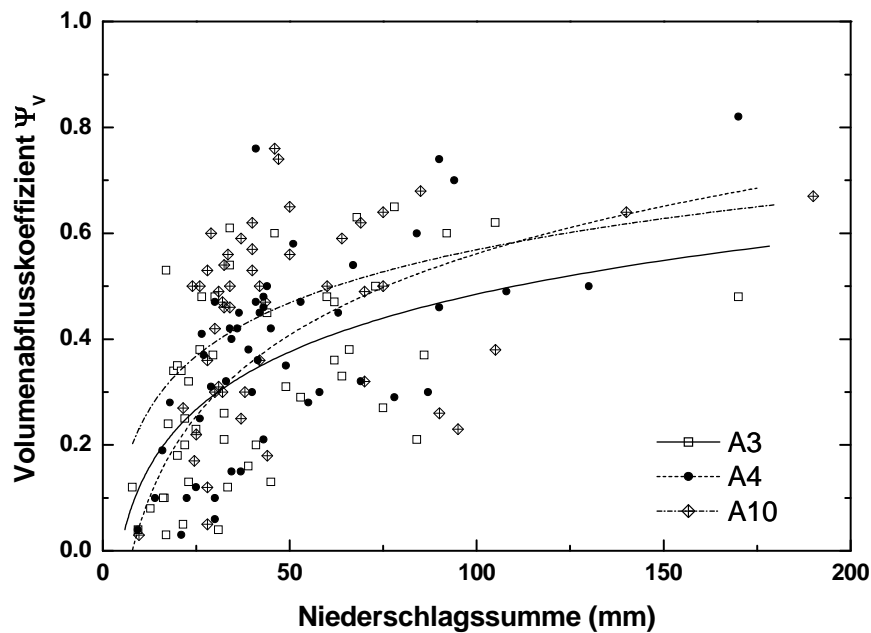


Abbildung 4. Der Volumenabflusskoeffizient Ψ_v in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme.

4.3.1 Beurteilung des Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v

Einfluss der verschiedenen Variablen

Die statistische Auswertung für Ψ_v , für welche rund 50 Ereignisse analysiert wurden, weist eine signifikante Abhängigkeit von der *Vorgeschichte*, von der *Niederschlagsmenge* und vom *Einzugsgebiet* aus. Der Einfluss der Niederschlagsintensität auf Ψ_v hingegen ist nicht signifikant.

Die Vorgeschichte ist repräsentiert durch den Abstand des Grundwasserpegels von der Bodenoberfläche. Ψ_v nimmt mit abnehmendem Grundwasserpegelstand zu: je näher der Grundwasserpegel der Bodenoberfläche ist, desto feuchter ist der Boden und desto weniger Niederschlag kann der Boden aufnehmen.

Gebietsunterschiede

Die in der *Abbildung 4* eingezeichneten Regressionslinien charakterisieren das mittlere Verhalten des jeweiligen Gebietes während eines Hochwassers.

Die statistische Auswertung für Ψ_v zeigt, dass sich das schwach bewaldete Gebiet A4 und das am stärksten bewaldete, vergleichbar exponierte Gebiet A3 in bezug auf Ψ_v nicht signifikant unterscheiden. Obwohl der Niederschlag

im stark bewaldeten Gebiet, dem Gradienten des Haupttals folgend, im Mittel etwa 10% kleiner ist, hat der Wald keinen statistisch signifikant nachweisbaren Effekt auf Ψ_v während Hochwasserereignissen. Signifikant hingegen unterscheiden sich die Ψ_v im Gebiet A10 von den beiden anderen. Im Gebiet A10 resultieren höhere Ψ_v -Werte, obwohl der Waldanteil grösser ist als in A4. Hier machen sich die grössere Drainagedichte und die generell flachgründigeren Böden in A10 bemerkbar. Die bis 1976 erfolgte extensive Beweidung dürfte dieses Resultat kaum beeinflusst haben.

In *Tabelle 2* sind die maximalen Ψ_v für die drei Gebiete eingetragen. Die maximalen Ψ_v treten im wenig bewaldeten Gebiet A4 und im Gebiet A10 auf. Die grössten Ψ_v im bewaldeten Gebiet A3 liegen deutlich unter den Maximalwerten in den Gebieten A4 und A10. Im Gebiet A10 wurden die Höchstwerte eher bei Gewittern mit grossen Niederschlagsintensitäten erreicht, wogegen in den Gebieten A3 und A4 grössere Landregen mit eher kleinen Intensitäten zu den grössten Ψ_v -Werten führten.

Für die praktische hydrologische Bedeutung scheint sich damit der positive Waldeinfluss in bezug auf die maximalen Ψ_v auszuwirken, auch wenn er statistisch nicht nachweisbar ist.

Tabelle 2. Die grössten Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v in den verschiedenen Gebieten.

<i>Gebiet A3</i>	<i>Gebiet A4</i>	<i>Gebiet A10</i>
0,65	0,82	0,76
0,63	0,76	0,74
0,62	0,74	0,68
0,61	0,70	0,67
0,60	0,60	0,65

4.3.2 Beurteilung der Abflussspitze q_{max}

Einfluss der verschiedenen Variablen

Da q_{max} klar keinen linearen Verlauf aufweist (es gibt hohe Werte, die mit einem linearen Modell nicht erklärt werden können), wurde diese Zielgrösse für die statistische Auswertung logarithmiert. Weil der Niederschlag und die Niederschlagsintensität physikalisch ähnliche Grössen wie der Abfluss darstellen, werden auch diese Parameter logarithmiert. Die statistische Auswertung für q_{max} zeigt eine signifikante Abhängigkeit von der *Niederschlagsmenge* (log), der *Niederschlagsintensität* (log), der *Vorgeschichte* und der *Gebiete*.

Gebietsunterschiede

Das Gebiet A10 unterscheidet sich auch hier von den beiden anderen. Die maximalen q_{max} -Werte im wenig bewaldeten Gebiet A4 unterscheiden sich nur geringfügig von jenen im bewaldeten Gebiet A3, d.h. aufgrund der Daten der

letzten 10 Jahre ist der Waldeinfluss auch auf die grössten Abflussspitzen in den drei Alptaler Gebieten nicht sichtbar. Die höchsten Abflussspitzen q_{\max} treten im Gebiet A10 auf; sie übertreffen jene in den Gebieten A3 und A4 deutlich.

4.4 Auswertung der Periode 1994-1995 für die künstlichen Nitrex-Flächen N1, N2, N3

4.4.1 Beurteilung des Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v

Die statistische Auswertung umfasst 18 Hochwasserereignisse. In den drei kleinen Nitrex-Flächen weist anders als in den natürlichen Gebieten neben Niederschlagsmenge, Vorgeschichte und Gebiet auch die Niederschlagsintensität einen signifikanten, aber im Vergleich zu den anderen Faktoren dennoch unwichtigen Einfluss auf Ψ_v auf.

Weder die beiden Waldflächen N1 und N2 noch die Streulandfläche N3 unterscheiden sich statistisch signifikant voneinander. Dieses Resultat könnte dahingehend interpretiert werden, dass die Streuwiese den flachgründigen Bodenspeicher ebenso wirksam bewirtschaftet wie der Wald und sich daher während der Vegetationszeit unter den vorherrschenden Bodenverhältnissen keine deutlichen Unterschiede in bezug auf das Abflussverhalten während Hochwasserereignissen ergeben.

4.4.2 Beurteilung der Abflussspitze q_{\max}

Für die statistische Analyse der Abflussspitze wurden q_{\max} und die beiden Niederschlagsparameter wiederum logarithmiert. Das Resultat ist mit jenem der natürlichen Gebiete vergleichbar, indem sich neben dem Einfluss des Gebietes auch wieder die Niederschlagsmenge und -intensität sowie die Vorgeschichte als signifikant erweisen.

Auch in bezug auf die Abflussspitze lässt sich die Streulandfläche N3 statistisch nicht von den beiden Waldflächen N1 und N2 unterscheiden. Damit kann der Waldeinfluss auf die Hochwasserabflussspitze auch für die Nitrex-Flächen statistisch nicht nachgewiesen werden.

5. Schlussfolgerungen

In den im voralpinen Flysch gelegenen natürlichen Untersuchungsgebieten und künstlichen Versuchsflächen ist die hydrologische Waldwirkung während Hochwasserereignissen weder in bezug auf das Abflussvolumen noch in bezug auf die Abflussspitze statistisch nachweisbar. Allerdings sind die maximalen Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v im stark bewaldeten Gebiet A3 kleiner als in den beiden anderen Gebieten. Neben den bestimmenden Klimaparametern gibt

es offensichtlich Gebietsparameter, welche das Abflussverhalten während Hochwasserereignissen stärker beeinflussen als der Wald. Nur so ist es erklärbar, dass sich das Gebiet A10 bezüglich Ψ_v und q_{\max} statistisch signifikant von den zwei anderen Gebieten unterscheidet, obwohl es in bezug auf den Waldanteil zwischen A3 und A4 liegt. Im vorliegenden Fall dürfte die grosse Drainagedichte und der generell flachgründige Boden im Gebiet A10 ein wichtiger Faktor sein.

Der quantitative Waldeinfluss auf das Abflussvolumen muss vor allem auch im Zusammenhang mit dem Wasserspeichervermögen des unter dem Wald vorhandenen Bodens betrachtet werden. Die flachgründigen Flyschböden lassen den Unterschied zwischen Wald und Streuland gar nicht zur Geltung kommen. Dies wird durch die Wasserbilanzen, die für die drei Nitrex-Flächen während der Vegetationsperiode 1995 sehr ähnlich ausfallen, bestätigt. Bei einem Wald mit grösserem Wasserspeichervermögen kann die Waldwirkung signifikant werden. Dies sollte mit einer vergleichbaren Studie auf einem tiefgründigeren Boden überprüft werden.

In einer hydrologischen Modellrechnung für das obere Reusstal, wo bedeutend tiefgründigere und durchlässigere Böden als im Alptal vorherrschen, kam der positive Einfluss des Waldes auf das Hochwasserverhalten klar zum Ausdruck (*Leuppi, Forster, 1990*), weil die Rohhumusböden der Bannwälder einen guten Speicher darstellen.

Während der Schneeschmelze ist aus Waldgebieten generell mit geringeren Abflussvolumen und auch mit einer Reduktion der Schmelzabflussspitze zu rechnen. Die Abflussdynamik während der Schmelze wird aber auch massgeblich durch die Höhenverteilung des Waldes und die generelle Verteilung der Expositionen beeinflusst.

Die langfristige hydrologische Wirkung des Waldes (*Bosch, Hewlett, 1982*) auf die Wasserbilanz konnte auch für die vorliegenden flachgründigen Böden bestätigt werden. Sowohl in den natürlichen Einzugsgebieten als auch auf den Nitrex-Flächen nahm die jährliche Evapotranspiration mit zunehmender Waldfläche deutlich zu. Die in bewaldeten Gebieten geringeren jährlichen Volumenabflusskoeffizienten lassen aber keinen Schluss auf die massgebenden Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v während Hochwasserereignissen zu.

Beim hydrologischen Vergleich von Wald- und Freilandflächen ist Vorsicht geboten. Zwischen den verschiedenen Arten von Freilandflächen muss klar differenziert werden. Eine Streuwiese verhält sich nicht wie eine Weide. Bei der Weide spielen die Beweidungsintensität und speziell auch der Bodentyp eine Rolle: je intensiver die Beweidung und je schwerer (tonhaltiger) der Boden und je dichter seine Struktur ist, desto abflussfreudiger wird das entsprechende Gebiet sein. Anders als die herkömmlich bewachsenen Freilandflächen reagieren Kahlschlag- und Windwurfflächen. Während Kahlschlagflächen meist oberflächlich stark verdichtet wurden, sind Windwurfflächen hydrologisch meist sehr empfindlich bezüglich Erosion und Hochwasserentstehung, weil die Bodenoberfläche durch umgekippte

Wurzelteller oftmals sehr gestört ist und sich bei Starkniederschlägen gerne Rinnen ausbilden.

Die Frage der Übertragbarkeit dieser Alptaler Resultate auf andere Einzugsgebiete ist ebenfalls vorsichtig anzugehen. Das Bewaldungsprozent allein lässt keinen direkten Schluss auf die hydrologischen Waldwirkungen zu. Dazu bedarf es einer differenzierteren Betrachtungsweise. Dabei gilt es auch andere Gebietsparameter wie Drainagedichte, Wasserspeichervermögen, Bewirtschaftung, Infiltrationsvermögen, Topographie und Exposition zu berücksichtigen.

Aufgrund der vorliegenden Daten kann aber abgeleitet werden, dass aus der Sicht des Hochwasserschutzes eine Umwandlung von flachgründigen Weiden und Nasswiesen in Wald nicht sinnvoll ist, insbesondere dann nicht, wenn die Aufforstung ein Netz von Drainagegräben bedingt, welche die Hochwassersituation in der Folge über Jahre verschärfen. Die erfolgversprechendste und wohl risikofreiste Umnutzung besteht in einer Aufforstung durch Naturverjüngung.

Zusammenfassung

Für drei im voralpinen Flysch gelegene, natürliche und unterschiedlich bewaldete Einzugsgebiete (0,7-1,5 km²) wird die hydrologische Waldwirkung für eine Messperiode zwischen 1987 und 1995 untersucht. Bei der Auswertung einer langjährigen Periode zeigt sich die hydrologische Waldwirkung in einer mit zunehmendem Bewaldungsgrad erhöhten Evapotranspiration und einem durch die Interzeptionswirkung von immergrünem Nadelwald gedämpften Abflussverhalten während der Schneeschmelze. Als Beurteilungsgrößen für Hochwasserereignisse werden der Volumenabflusskoeffizient und die Abflussspitze berücksichtigt. Die Resultate werden verglichen mit den Ergebnissen einer zweijährigen Messperiode auf drei kleinen, im gleichen Gebiet gelegenen, künstlichen Versuchsflächen (1500 m²), von denen eine unbewaldet ist und zwei vollständig bewaldet sind. Während der untersuchten Hochwasserereignisse kann der Waldeinfluss auf diesen flachgründigen Flyschböden weder für die natürlichen Gebiete noch für die künstlichen Versuchsflächen statistisch signifikant nachgewiesen werden. Die maximalen, während Hochwasserereignissen gemessenen Volumenabflusskoeffizienten sind im Gebiet mit dem grössten Waldanteil jedoch deutlich kleiner als in den beiden anderen Gebieten.

Résumé

Effets de la forêt sur l'hydrologie de bassins versants sur flysch, dans la vallée de l'Alptal

L'effet hydrologique de la forêt a été examiné en comparant trois bassins versants préalpins (0,7 à 1,5 km²). Sur un sous-sol de flysch, ces bassins se distinguent par leurs parts couvertes par la forêt. L'effet de la forêt se manifeste à plus long terme par une

évapotranspiration accrue. Les résineux à aiguilles persistantes agissent en particulier par interception de la neige et par évapotranspiration durant l'hiver. Au printemps, l'écoulement de fonte s'en trouve réduit. Les crues de la période de 1987 à 1995 ont été analysées quant à leur coefficient d'écoulement et à leur débit maximal. Les résultats ont aussi été comparés avec deux ans de mesures sur trois bassins expérimentaux de la même région. Ces derniers (1500 m²) avaient été délimités artificiellement, deux en forêt et le troisième en dehors. Dans cette contrée aux sols peu profonds, les crues n'ont laissé apparaître aucun effet statistiquement significatif de la couverture forestière, ni entre les bassins naturels, ni entre les bassins expérimentaux. La comparaison des valeurs extrêmes semble toutefois montrer une certaine limitation des coefficients d'écoulement dans le bassin où la forêt occupe la plus grande part de la superficie.

Summary

On the Influence of Forest Coverage on Hydrologic Behaviour of Catchments in the Flysch Region of the Alptal Valley

The influence of forest coverage on hydrologic behaviour is investigated in three wooded catchments for the period 1987 to 1995. The three catchments are located in the prealpine flysch region and vary in size (0,7-1,5 km²) and forest coverage. Long-term analysis shows that evapotranspiration increases with forest coverage while snowmelt runoff decreases due to the canopy interception. Flood discharge is judged by studying runoff coefficient and peak discharge. Measurements from the three natural catchments are analysed in addition to measurements made over two years on three smaller experimental plots (1500 m²) in the same region. For the studied shallow flysch soils, it is statistically impossible to demonstrate an overall effect of the forest coverage on flood discharge, neither in the natural nor in the small artificial catchments. However, the largest runoff coefficients have never been measured in the most forested catchment.

Literatur

- Bosch, J.M., Hewlett J.D.*, 1982: A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Burch, H., Fritschi B.*, 1994: Die automatische Hochwassermessanlage in Alptal. *Nouvelles der LHG/BUWAL*, 94 (1),11-13.
- Burch, H.*, 1994: Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, SGHL/WSL, 35,18-33.
- Engler, A.*, 1919: Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen, 12, Birmensdorf.
- Hydrologischer Atlas der Schweiz*, 1995: Blatt 5.6: Hochwasserabflüsse. Landeshydrologie und Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Leuppi, E., Forster F.*, 1990: Zur Frage der Wirksamkeit des Waldes für den Hochwasserschutz – ein Beispiel aus dem oberen Reusstal. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen, 141 (11), 943-954.
- McCulloch, J.S.G., Robinson M.*, 1993: History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, 150, 189-216.

Dank

An dieser Stelle möchten wir all jenen Mitarbeitern danken, welche uns geholfen haben, Messreihen über Jahre zuverlässig zu erheben und auszuwerten. Ohne ihren Einsatz, vor allem auch während widerlichen Witterungsverhältnissen, wären solche Untersuchungen gar nicht möglich.

Abbildungen gedruckt mit Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH8903 Birmensdorf.

Verfasser:

Hans Burch, dipl. Kult-Ing. ETH; Felix Forster, dipl. Bauing. ETH; Sektion Forstliche Hydrologie, WSL, CH-8903 Birmensdorf;

Dr. Patrick Schleppi, Sektion Immissionsökologie, WSL, CH-8903 Birmensdorf.