



Einfluss des Waldes auf Hochwasser aus kleinen voralpinen Einzugsgebieten

Influence of forests on floods from small prealpine catchments

H. Burch, F. Forster, P. Schleppi, D. Stadler

Zusammenfassung

Für drei im voralpinen Flysch gelegene, natürliche und unterschiedlich bewaldete Einzugsgebiete (0.7-1.5 km²) wird die hydrologische Waldwirkung während Hochwasserereignissen für eine Messperiode zwischen 1987 und 1995 untersucht. Als Beurteilungsgrößen 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 und zwei vollständig bewaldet sind. 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. Während der untersuchten Hochwasserereignisse hingegen kann der Waldeinfluss für diese flachgründigen Flyschböden weder für die natürlichen Gebiete noch für 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.

Abstract

The influence of forest coverage on flood discharge is investigated by studying runoff coefficient and peak discharge in three wooded catchments between the years 1987 and 1995. The three catchments are located in the prealpine flysch region and vary in size (0.7-1.5 km²) and forest coverage. Measurements from these three natural catchments are analysed in addition to measurements made over two years on three smaller experimental plots (1500 m²) in the same region. On these shallow flysch soils, it is statistically impossible to demonstrate an overall effect of the forest on flood discharge, neither in the natural nor in the small artificial catchments. However, long-time analysis shows that evapotranspiration increases with forest coverage while snowmelt runoff decreases due to the canopy interception. Furthermore, the largest runoff coefficients have never been measured in the most forested catchment.

1. Einleitung

1.1 Einfluss von Wald auf Hochwasser in der Schweiz

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). Die Resultate dieser bemerkenswerten und eindrucksvollen Untersuchungen prägten das forsthydrologische Denken für Jahrzehnte.

Dass sich zwei unterschiedlich bewaldete Einzugsgebiete eben auch in anderen hydrologisch bedeutsamen Parametern unterscheiden können als nur gerade in der Vegetationsbedeckung, versuchten amerikanische Forschergruppen mit experimentellen Nutzungseingriffen (z.B. Kahlschlag) zu berücksichtigen (McCulloch & Robinson, 1993). Damit konnte die hydrologische Reaktion vor und nach dem Eingriff verglichen werden. Dabei dürfen aber weder der Einfluss eines solchen Nutzungseingriffes auf den Waldboden (z.B. Bodenverdichtung) noch die Tatsache, dass sich gewisse Witterungssituationen nie in gleicher Art wiederholen, ganz ausser acht gelassen werden.

In einer geographisch und pedologisch breit abgestützten Untersuchung werteten Bosch & 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.

Im Kartenblatt 5.6 des Hydrologischen Atlas der Schweiz (1995) ist u.a. 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. In Abb. 1 haben wir die Darstellung durch 10 weitere Gebiete mit Flächen zwischen 0.5 und 10 km², aus geologisch unterschiedlichen Regionen ergänzt. Eine statistisch signifikante Abhängigkeit ist aber auch für die kleinen Gebiete nicht gegeben, dennoch lässt die aufgrund einer Regression gerechnete Trendlinie eine tendenzielle Abnahme des mittleren jährlichen Hochwassers mit zunehmenden Waldprozent erkennen.

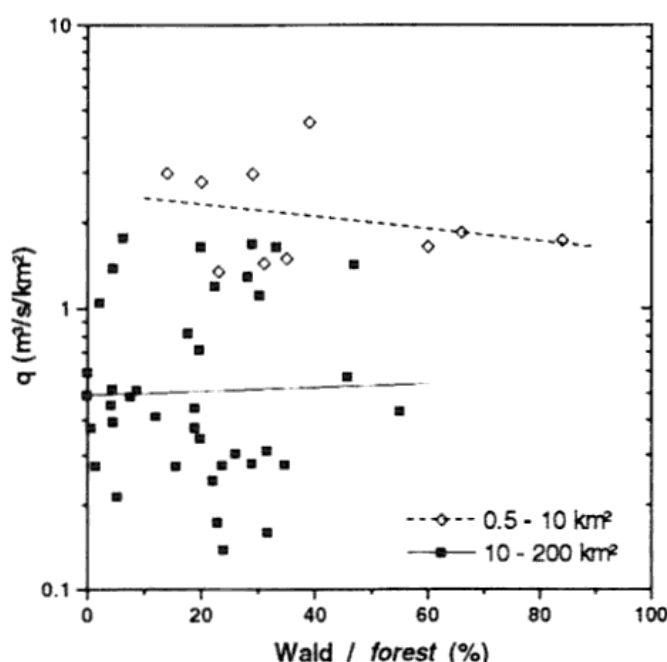


Abbildung 1: Das mittlere jährliche Hochwasser in Abhängigkeit vom Bewaldungsprozent für zwei Klassen von Einzugsgebietsgrössen

Figure 1: Relationship between the mean annual peak discharge and the forest coverage for two classes of catchment sizes

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

2. Standorte und Messdaten

Die hydrologischen Untersuchungsgebiete des Alptals (Kanton Schwyz) gehören zur vor-alpinen 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 tal-aufwärts 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 % Weiss-tannenanteil stockt auf tonreichen, gehemmt durchlässigen, z.T. sauren Hanggleyböden mit unterschiedlich mächtiger Oxidationszone. Je nach Vernässungsgrad des Oberbodens variiert die Humusform von Rohhumus bis Anmoor. Ausserhalb des Waldes treten vor allem Weiden, Sumpfwiesen und Hangmoore auf (Tab. 1).

Tabelle 1: Kennwerte der hydrologischen Untersuchungsgebiete im Alptal

Table 1: Main information about the hydrologic study sites in the Alptal valley

Gebiets-Nummer		A3	A4	A10	N1	N2	N3	P1
Gebiets-Name		Vogel-bach	Lümpen-bach	Erlen-bach	Nitrex-1 (Wald)	Nitrex-2 (Wald)	Nitrex-3 (Wiese)	Erlen-Plot
Fläche	ha	155	93	70	0.167	0.145	0.168	0.003
Exposition		ESE	ESE	W	W	W	W	W
Drainagedichte	km ⁻¹	ca. 8	15	27	26	28	28	-
Waldanteil	%	63	19	39	100	100	0	25
Nassflächen	%	25	24	61			100	75
Weideanteil	%	12	57	0	0	0	0	0
Auswertung von		1.01.87	1.01.87	1.01.87	1.02.94	1.02.94	1.07.94	1.01.94
Auswertung bis		31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.94
Messintervall	min	10	10	10	10	10	10	120
Niederschlag/Jahr (1987-95)	mm	2200	2340	2317	-	-	-	-
Abflusskoeffizient (1987-95)		0.73	0.87	0.79	-	-	-	-
Abflusskoeffizient (1994/95)		0.73	0.94	0.83	0.76	0.76	0.87	0.89
Niederschlag		Wippe-3	Wippe-4	Wippe-10	Wippe-1	Wippe-1	Wippe-1	Wippe-1

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 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 deren Teileinzugsgebiete N1, N2, N3 und P1 verwendet werden.

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 & Fritsch, 1994). Die Daten werden automatisch erfasst und täglich plausibilisiert.

3. Methoden

Der Einfluss des Waldes auf Hochwasser soll mit Hilfe von zwei verschiedenen Hochwasser-Kennwerten für die grössten Niederschlagsereignisse der jeweils betrachteten Zeitperiode beurteilt werden. 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.

Als Hochwasser-Kennwerte werden der Volumenabflusskoeffizient Ψ_v und der spezifische Spitzenabfluss q_{max} berücksichtigt. Ψ_v wird als Quotient aus Direktabflussvolumen und Niederschlagssumme während des Ereignisses bestimmt. Als Direktabfluss wird die Differenz zwischen Gesamt- und Basisabfluss berücksichtigt. Die Abtrennung vom Basisabfluss und parallel dazu die Festlegung der massgebenden Zeit zur Bestimmung des Ψ_v erfolgt mit Hilfe der halblogarithmischen Darstellung der Ganglinie oder in einzelnen Fällen gutachtlich. Als q_{max} wird der grösste spezifische Abflusswert (10 min-Wert) während des Ereignisses verwendet.

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 (Abb. 2) über hydrologische Jahre hinweg bestätigt die Aussagen von Bosch & Hewlett (1982), dass mit zunehmender Bewaldung die Evapotranspiration in vergleichbaren Einzugsgebieten steigt.

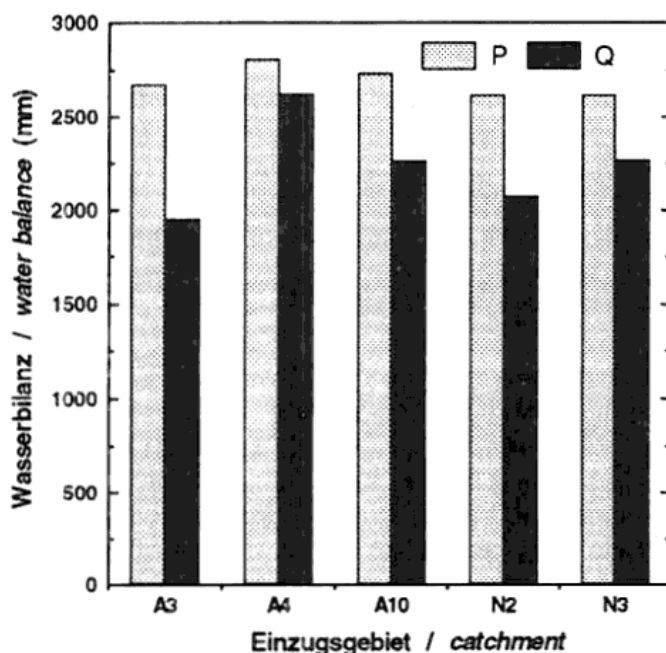


Abbildung 2: Wasserbilanzen der Untersuchungsgebiete im Alptal für das hydrologische Jahr 1994/95. P=Niederschlag, Q=Abfluss

Figure 2: The water balance of the Alptal catchments for the hydrologic year 1994/95. P=precipitation, Q=discharge

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 erstaunlicherweise gut aus den entsprechend ermittelten Evapotranspirationswerten der Teilflächen N2 und N3 zusammensetzen. Die beiden bewaldeten Flächen N1 und N2 verhalten sich sehr ähnlich. Die jährlichen Volumenabflusskoeffizienten sind in Tab. 1 zusammengestellt. Von diesen kann jedoch nicht direkt auf die während Hochwasserereignissen massgebenden Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v geschlossen werden.

Der Wald ist hydrologisch gesehen diejenige Vegetationbedeckung, 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 beurteilt werden. In Abb. 3 sind die Niederschlags- und Abflusssummenkurven 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 1.1.95 bis 31.5.95 dargestellt. Am 1. Januar 1995 lag im gesamten Alptal eine geringe, aber gleichmässige Schneedecke mit einem Schneewasseräquivalent von 30-40 mm, nachdem es kurz zuvor wieder eingeschneit hatte. Während der betrachteten Periode fiel im Gebiet A3 etwa 1180 mm Niederschlag und im Gebiet A4 etwa 1300 mm. Auch in den beiden Nitrex-Flächen N2 und N3 fiel etwa 1180 mm Niederschlag.

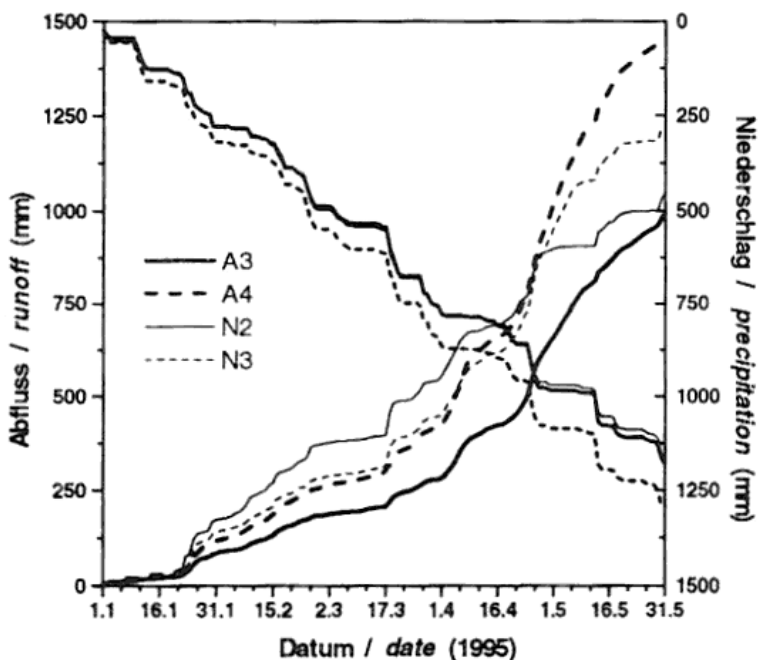


Abbildung 3: Niederschlags- und Abflusssummenkurve der Gebiete A3, A4, sowie der Flächen N2, und N3 zwischen 1. Jan. und 31. Mai 1995

Figure 3: Cumulative precipitation and discharge for the catchments A3, A4 and the areas N2, N3 between 1 Jan and 31 May 1995

Die Abflusssummenkurven 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 Gebiets A3. Mit Beginn der Hauptschmelze im April verläuft die Abflusskurve im Gebiet A4 etwas steiler. Über die fünf betrachteten Monate hinweg flossen im Gebiet A4 ca. 500 mm mehr ab als im Gebiet A3. Im Gebiet A4 fiel aber ca. 120 mm mehr Niederschlag; deshalb beträgt die vergleichbare Abflussdifferenz zwischen A4 und A3 nur ca. 380 mm.

Auf den Nitrex-Flächen ist die Situation anders, indem die Abflusskurve von der bewaldeten Fläche N2 interessanterweise bis zum Einsetzen der Hauptschmelze anfangs 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 ca. 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 Auswertung der Periode 1987-1995 für die natürlichen Einzugsgebiete

Im folgenden Schritt betrachten wir nur noch einzelne Hochwasserereignisse.

4.3.1 Beurteilung des Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v

Einfluss der verschiedenen Variablen

Die statistische Auswertung für Ψ_v , für welche ca. 50 Ereignisse analysiert wurden, weist eine signifikante Abhängigkeit von der Vorgeschichte, von der Niederschlagsmenge und vom Gebiet aus. Der Einfluss der Niederschlagsintensität auf Ψ_v hingegen ist nicht signifikant. Mit diesem Modell werden allerdings nur ca. 55% der Varianz erklärt. Der unerklärte Anteil könnte u.a. mit der ungleichen zeitlichen und räumlichen Niederschlagsverteilung in den drei Gebieten zusammenhängen.

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit von Ψ_v von der Vorgeschichte dargestellt. 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.

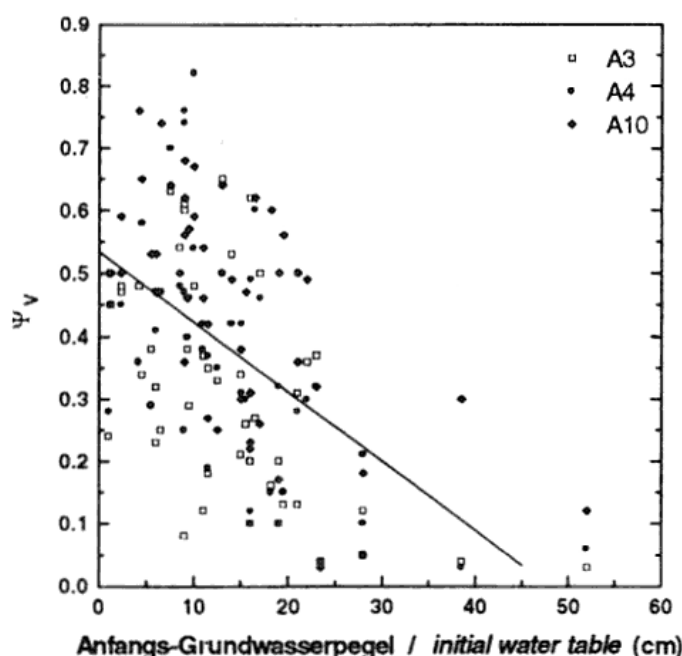


Abbildung 4: Der Volumenabflusskoeffizient Ψ_v in Abhängigkeit vom Anfangs-Grundwasserpegel

Figure 4: Relationship between runoff coefficient Ψ_v and initial depth of water table

Gebietsunterschiede

Die in der Abb. 5 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. Der Wald hat somit 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

als in den Gebieten A3 und A4, obwohl der Waldanteil in A10 grösser ist als in A4. Hier macht sich die grössere Drainagedichte in A10 bemerkbar.

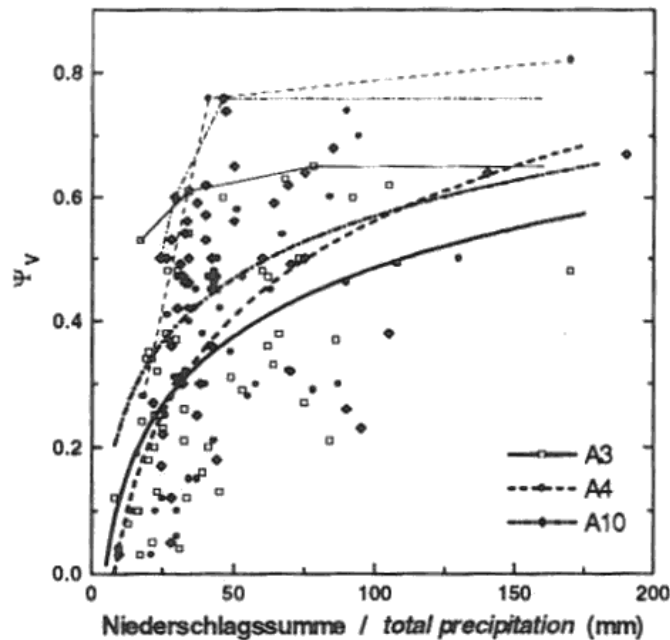


Abbildung 5: Der Volumenabflusskoeffizient Ψ_v in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme. Die fein eingetragenen Linien verbinden die maximal gemessenen Ψ_v -Werte pro Gebiet

Figure 5: Relationship between runoff coefficient Ψ_v and total precipitation. The fine drawn envelopes indicate the largest measured runoff coefficients Ψ_v for the different catchments

In Abb. 5 sind im weiteren die Hüllkurven der maximalen Ψ_v für die drei Gebiete eingezeichnet. 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.

Im Bezug auf die maximalen Ψ_v scheint sich die Waldwirkung doch etwas zu manifestieren.

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 ergibt eine signifikante Abhängigkeit für die Niederschlagsmenge (log), die Niederschlagsintensität (log), die Vorgeschichte und das Gebiet. Das entsprechende Modell erklärt ca. 66% der Varianz.

Gebietsunterschiede

In Abb. 6 ist die Abhängigkeit von $q_{\max}$ von der Niederschlagsintensität dargestellt. Der Vergleich der Trendlinien der drei Gebiete lässt darauf schliessen, dass der Waldeinfluss auf das $q_{\max}$ eher unbedeutend ausfällt, denn die Kurven von A3 und A4 liegen sehr nahe beieinander. Dies wird durch die statistische Analyse als ein nicht signifikanter Unterschied bestätigt.

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 maximalen Abflussspitzen $q_{\max}$ treten im Gebiet A10 auf, sie übertreffen jene in den

Gebieten A3 und A4 deutlich. Klar hebt sich wiederum das Gebiet A10 von den beiden anderen ab.

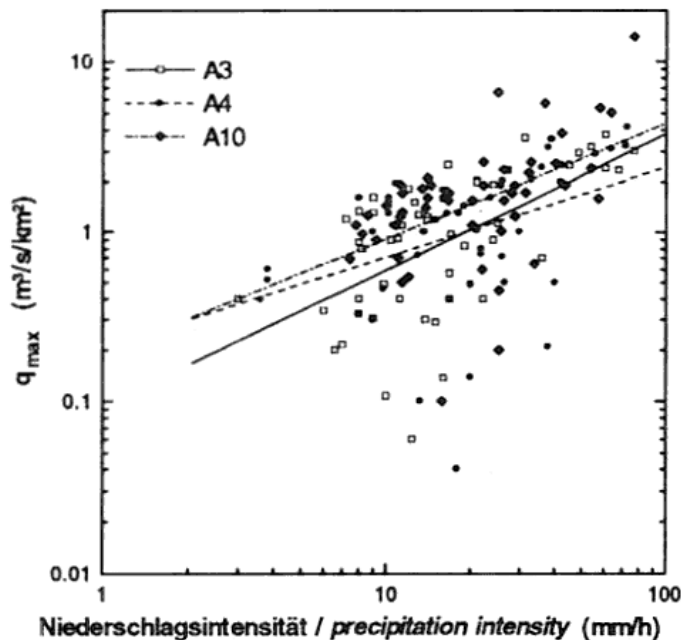


Abbildung 6: Die Abflußspitze $q_{\max}$ in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität über eine Dauer von 30 min

Figure 6: Relationship between peak discharge and precipitation intensity over 30 min

In den drei natürlichen Einzugsgebieten des Alptals ist der Waldeinfluss auf das Abflussgeschehen in Hochwassersituationen statistisch gesehen weder in Bezug auf den Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v noch in Bezug auf die Abflußspitzen $q_{\max}$ signifikant. Allerdings sind die maximalen Ψ_v -Werte im 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 ein grösseres Bewaldungsprozent aufweist als A4. Im vorliegenden Fall dürfte die grosse Drainagedichte im Gebiet A10 ein wichtiger Faktor sein.

4.4 Auswertung der Periode 1994-1995 für die künstlichen Nitrex-Flächen

4.4.1 Beurteilung des Volumenabflusskoeffizienten Ψ_v

Die statistische Auswertung umfasst 18 Hochwasserereignisse. In den drei 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. Das Modell erklärt 79% der Varianz.

Die Streuland-Fläche N3 unterscheidet sich nicht signifikant von den beiden Waldflächen N1 und N2. Auch die beiden Waldflächen lassen sich statistisch nicht signifikant unterscheiden. Dieses Resultat könnte dahingehend interpretiert werden, dass die Streuwiese den flachgründigen Bodenwasserspeicher 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 Niederschlags-

menge und -intensität sowie die Vorgeschichte als signifikant erweisen. Das Modell erklärt hier 80% der Varianz. Trotzdem bleibt eine grosse Reststreuung, da die gesamte Streuung sehr gross ist.

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.

4.5. Gegenüberstellung der natürlichen Einzugsgebiete Gebiete und der künstlichen Nitrex-Flächen N1, N2 und N3 sowie des Messplots P1

In Abbildung 7 ist für die Ψ_v und q_{max} ein Mittelwertsvergleich in den untersuchten Gebieten für die Periode 94/95 dargestellt. Die Mittelwerte wurden für jene 18 Ereignisse, für welche Messdaten in allen sechs Gebieten (A3, A4, A10, N1, N2 und N3) vorhanden waren, bestimmt.

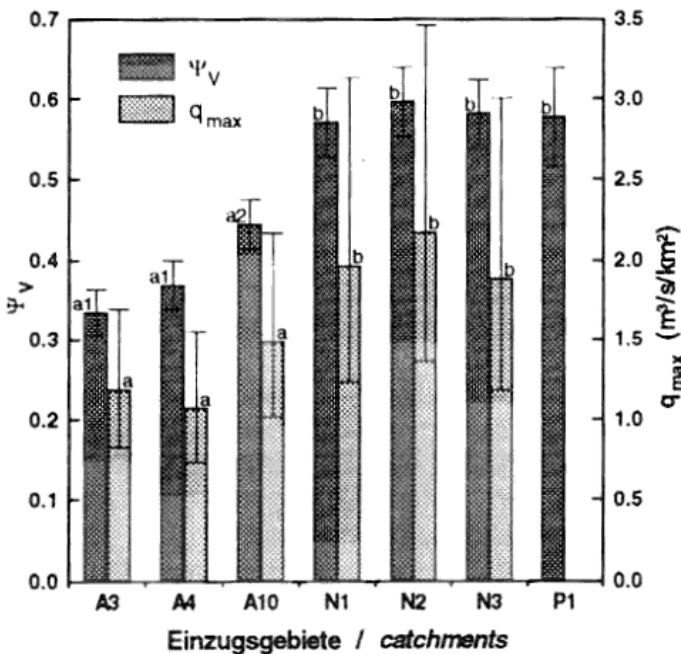


Abbildung 7: Volumenabflusskoeffizient Ψ_v und Spitzenabfluss q_{max} der untersuchten Einzugsgebiete. Mittelwerte $\pm$ Standardfehler (geometrisch für q_{max} , da log-normal verteilt) nach Normalisierung auf der Basis der Ereignisse von Gebiet A10. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikant unterschiedliche Gruppen nach F-Tests

Figure 7: Runoff coefficient Ψ_v and peak discharge q_{max} of the studied catchments. Means $\pm$ standard error (geometrical for q_{max} because of a log-normal distribution) after normalisation on A10. Different letters indicate contrasting groups according to F-tests

Die Ψ_v liegen in den kleinen künstlichen Einzugsgebieten um ca. 20 % höher als in den natürlichen Gebieten. Die Abflussspitzen q_{max} sind in den kleinen Flächen durchschnittlich um den Faktor 1.6 höher. Die Drainagedichten liegen in den Nitrex-Flächen etwa in der gleichen Grössenordnung wie im Gebiet A10. Wie weit wir es hier mit einem Skaleneffekt zu tun haben, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Bei den massiv höheren Abflussspitzen könnte es sich um einen solche Effekt handeln, da die Konzentrationszeit auf den kleinen Flächen deutlich kleiner ist als in den grossen Gebieten und die Niederschlagsintensität einen hochsignifikanten Einfluss auf q_{max} aufweist.

In der Periode zwischen Mai und September 1994 wurden auf dem Messplot P1, in unmittelbarer Nachbarschaft der Nitrex-Flächen, ebenfalls Abflussmessungen durchgeführt. Für 13 Ereignisse liess sich Ψ_v für P1 bestimmen und entsprechend statistisch mit den Nitrex-Flächen N1 und N2 vergleichen. Daraus ergab sich statistisch kein signifikanter Unterschied für die Ψ_v zwischen den Nitrex-Flächen und dem Plot P1, obwohl die massgebende Fläche von P1 ca. 50 mal kleiner ist, als jene der N-Flächen. Für P1 scheint der Anstieg von Ψ_v mit zunehmendem Niederschlag grösser als bei den Nitrex-Flächen, was z.B. mit einer Vergrösserung der Einzugsgebietsfläche von P1 mit zunehmender Bodensättigung erklärt werden könnte. Der Effekt ist aber statistisch gesehen nur als Tendenz nachweisbar.

Im Vergleich zu den natürlichen Gebieten A3, A4 und A10 kann für die künstlichen Flächen N1, N2, N3 und den Messplot P1 von einer gleichmässigen Beregnung ausgegangen werden, da sie in Luftlinie nicht weiter als 200 m voneinander entfernt sind. Innerhalb der natürlichen Einzugsgebiete (A3, A4, A10) variieren die Niederschlagsverhältnisse z.T. recht deutlich. Je höher die Niederschlagsintensitäten sind, desto grösser sind die möglichen Unterschiede in den verschiedenen Gebieten. Gewitterereignisse, die in allen sechs Gebieten bezüglich Niederschlagssumme und -intensität vergleichbar sind, sind sehr selten. Das wird durch die Niederschlagsmessungen in den verschiedenen Gebieten klar belegt. Dies bedeutet, dass die berechneten Ψ_v für die Gebiete A3, A4 und A10 bei Gewitterereignissen mit einem grösseren Fehler behaftet sind als die entsprechenden Werte aus den viel kleineren Flächen N1, N2, und N3 mit gleichmässigerer Beregnung.

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.

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 Böden lassen den Unterschied zwischen Wald und Streuland gar nicht zur Geltung kommen. Dies wird durch die Wasserbilanzen, die für diese beiden 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 den Hochwasserschutz klar zum Ausdruck (Leuppi & Forster, 1990).

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.

Bei der Frage der Übertragbarkeit dieser Alptaler Resultate auf andere Einzugsgebiete ist Vorsicht geboten. 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, 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.

6. Dank

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

7. Literaturverzeichnis

- 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.

Adresse der Verfasser

Hans Burch,	Sektion Forstliche Hydrologie, WSL, CH-8903 Birmensdorf
Felix Forster,	Sektion Forstliche Hydrologie, WSL, CH-8903 Birmensdorf
Dr. Patrick Schleppi,	Sektion Immissionsökologie, WSL, CH-8903 Birmensdorf
Daniel Stadler,	Institut für terrestrische Ökologie, ETHZ, CH-8952 Schlieren