Zur Schutzwirkung des Waldes gegen Hochwasser

Christoph Hegg, Alexandre Badoux, Peter Lüscher, Jonas Witzig
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
christoph.hegg@wsl.ch, alexandre.badoux@wsl.ch, peter.luescher@wsl.ch, jonas.witzig@wsl.ch

Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Schweiz von mehreren schweren Hochwasserereignissen heimgesucht. Sowohl die Fachwelt als auch die Öffentlichkeit sahen dabei einen ursächlichen Zusammenhang zwischen dem schlechten Zustand des Gebirgswaldes und dem Ausmass der Hochwasser. Diese Feststellung war ein wichtiger Anstoss für das Forstgesetz von 1876. In seiner wegweisenden Publikation von 1919 belegte Engler diese Feststellung teilweise indem er aufzeigte, dass Wälder vor allem bei kurzen und intensiven Starkniederschlägen eine massgebende Dämpfung einer Hochwasserwelle bewirken. Engler zeigte allerdings auch, dass diese dämpfende Wirkung mit zunehmendem Niederschlagsvolumen mehr und mehr abnimmt, weil dann der Bodenspeicher sowohl in Gebieten mit als auch ohne Wald gefüllt ist. In den letzten Jahren haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass nicht jeder Wald in der Lage ist, Hochwasserspitzen massgeblich zu dämpfen. Nachfolgend werden diese Ergebnisse kurz erläutert und auf ein mögliches Vorgehen zur differenzierten Beurteilung der Schutzwirkung eines Waldes gegen Hochwasser hingewiesen.

1 Die Anfänge

Als die Schweiz im 19. Jahrhundert von einer Vielzahl von grossen Hochwasserereignissen (u. a. 1834 und 1868) heimgesucht wurde, war sowohl für grosse Teile der Fachwelt als auch für die Öffentlichkeit rasch klar, dass der schlechte Zustand der Gebirgswälder ursächlich damit verbunden war (Schmid 2001). Die Waldfläche in der Schweiz hatte stark abgenommen, zusätzlich waren viele Wälder übernutzt. Allerdings fehlten trotz der verbreiteten Einigkeit die wissenschaftlichen Grundlagen dieser These. Diese waren aber nötig, um das einsetzende Subventionswesen auf eine fundierte Grundlage zu stellen. Deshalb wurde die 1885 gegründete damalige Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, die heutige WSL, im Parlamentsbeschluss zu ihrer Gründung unter anderem damit beauftragt, «… und zur Lösung wichtiger forstlich-meteorologischer Fragen beizutragen» (Wullschleger 1985, S. 50). Unter forstlich-meteorologischen Fragen wurde in der damaligen Zeit etwa das verstanden, was heute unter den Begriff Forsthydrologie fällt.

Nach einigen vorbereitenden Arbeiten begannen die eigentlichen forsthydrologischen Untersuchungen am 8. April 1903, als gleichzeitig im Sperbel- und Rappengraben im Emmental die kontinuierliche Messung von Niederschlag und Abfluss aufgenommen wurde. Der Sperbelgraben ist praktisch vollständig bewaldet, der Rappengraben dagegen war damals nur zu knapp einem Drittel mit Wald bedeckt und wurde sonst landwirtschaftlich genutzt. Engler (1919) publizierte auf über 600 Seiten die erste umfassende, auf Messungen beruhende wissenschaftliche Untersuchung zum Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer.

In Bezug auf die Schutzwirkung des Waldes gegen Hochwasser äussert sich Engler (1919, S. 614) dabei klar:

a) «Bei allen intensiven Niederschlägen von kürzerer Dauer (Gewitterregen, Wolkenbrüche) erweist sich das Retentionsvermögen des Waldes als sehr gross. Die maximalen sekundlichen Abflussmengen des Sperbelgrabens betragen bei gleicher Intensität und Menge des Niederschlages nur $^1/_3$ bis $^1/_2$ von denjenigen des Rappengrabens und der Gesamtabfluss des erstern ist gewöhnlich nur halb so gross als der des letztern…»
b) «…Bei Landregen ist das Retentionsvermögen des Waldes je nach der vorangegangenen Witterung, bezw. je nach dem Wassergehalt des Bodens und dem Verlauf des Regens, sehr verschieden. Ist der Wassergehalt des Bodens gross, so ist der Wald wirkungslos, und es fliesst im Wald dieselbe Wassermenge ab wie im Freien…»

Seine Nachfolger (Burger 1934, 1943, 1954; Casparis 1959) vertieften diese Untersuchungen und ergänzten sie insbesondere mit Untersuchungen zur Wasserbilanz der beiden Einzugsgebiete. Während Engler für seine Arbeiten keine Wintermessungen zur Verfügung standen und seine Analysen vorwiegend aus dem Vergleich von Einzelereignissen bestand, werteten seine Nachfolger ganzjährige Messreihen aus. Sie zeigten damit, dass im Sperbelgraben im Mittel 10 % weniger des in einem Jahr gefallenen Niederschlages zum Abfluss kommen als im wenig bewaldeten Rappengraben, weil der Wald mehr Wasser verbraucht als eine Freilandvegetation.

Allerdings haben sowohl Burger wie auch Casparis die klare Unterscheidung zwischen kurzen und lang anhaltenden Niederschlägen mehr und mehr zu Gunsten einer generellen Hochwasserschutzwirkung des Waldes aufgegeben. Deshalb wird z. B. in der umfassenden Geschichte der Forsthydrologie von McCulloch und Robinson (1993) nicht darauf hingewiesen, dass schon Engler Grenzen der Waldwirkung aufzeigte.

Generell war sich Engler der Grenzen der möglichen Aussagen anhand seiner Grundlagen sehr wohl bewusst. So beschliesst er seine wissenschaftliche Zusammenfassung mit dem drin-

genden Wunsch, ähnliche Parallelversuche wie im Emmental auch in Regionen mit anderen geologischen und klimatologischen Verhältnissen durchzuführen. Dass es in der Schweiz beinahe bis zum Ende des Jahrhunderts dauern würde, bis sein Wunsch in Erfüllung ging, und dass bei diesen Untersuchungen im Alptal seine Annahme widerlegt würde, Aufforstungen auf tonreichen und schlecht durchlässigen Böden seien besonders wirksam, konnte er sich wahrscheinlich kaum vorstellen.

2 Die Untersuchungen im Alptal

Nach mehreren fehlgeschlagenen, unvollständigen oder an den geologischen Rahmenbedingungen gescheiterten Versuchen (z. B. in der Melera TI oder im Roten- und Schwändlibach FR), ein ähnliches Untersuchungsgebiet unter anderen geologischen Bedingungen zu installieren (KELLER 1985), wendete sich die Forsthydrologie dem Alptal zu. Hier wurden in einem ersten Anlauf ab 1967 über zehn Einzugsgebiete mit einfachen Messstationen ausgerüstet, welche allerdings beim ersten grösseren Hochwasser zerstört wurden. Aufgrund der vorliegenden Messungen wurden drei besonders geeignete Einzugsgebiete ausgewählt und mit teilweise aufwendig konstruierten Stationen ausgestattet, welche auch grosse Hochwasser schadlos und zuverlässig erfassen können. Die wichtigsten Kennzahlen dieser drei Gebiete Vogelbach, Lümpenenbach und Erlenbach sind in Tabelle 1 angegeben. Einen vollständigen Überblick über die Untersuchungsgebiete im Alptal vermittelt BURCH (1994).

An der Ausstattung der Stationen zeigt sich auch, dass sich die forsthydrologische Forschung längst nicht mehr nur auf den Einfluss des Waldes auf den Abfluss konzentriert. Alle Stationen erlauben Untersuchungen zur Wasserqualität. Die drei Alptaler Gebiete sind deshalb seit kurzem Teil des NADUF («Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer») Messnetzes, das von BUWAL, BWG, EAWAG und WSL gemeinsam betrieben wird. Des Weiteren erlauben die Stationen Erlenbach und neuerdings auch Vogelbach die zeitlich hoch aufgelöste Messung des Geschiebetransports (HEGG und RICKENMANN 2002). Sie liefern damit die Grundlage für ein vertieftes Verständnis dieses Prozesses. Ebenfalls im Einzugsgebiet des Erlenbachs wurden an drei künstlich abgegrenzten Kleineinzugsgebieten von je knapp 2 ha Fläche detaillierte Analysen zu den Auswirkungen erhöhter Stickstoffeinträge durchgeführt (SCHLEPPI *et al.* 2004). Diese drei Gebiete N1, N2 und N3 sind ebenfalls in Tabelle 1 beschrieben.

BURCH *et al.* (1996) stellten die Ergebnisse zur Frage der Waldwirkung auf den Abfluss unter den im Alptal herrschenden Bedingungen dar. Auch hier ist wie in den meisten Gebieten der Welt (vgl. z. B. BOSCH und HEWLETT 1982; MCCULLOCH und ROBINSON 1993 oder CALDER *et al.* 2004) der mittlere Jahresabfluss aus einem mehrheitlich bewaldeten Einzugsgebiet kleiner als aus einem wenig bewaldeten. Ein ähnlicher Zusammenhang ist aber sowohl bei lang anhaltenden als auch bei kurzen intensiven Niederschlägen nicht gegeben (vgl. Abb. 1). Ihre Analyse der Messungen aus den je drei Einzugsgebieten und Kleineinzugsgebieten zeigen eindeutig, dass kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Bewaldungsgrad und Hochwasserabflussspitzen besteht. Als Hauptgrund für diesen Unterschied zu den Beobachtungen von Engler vermuten BURCH *et al.* (1996) die wenig speicherfähigen Böden im Alptal.

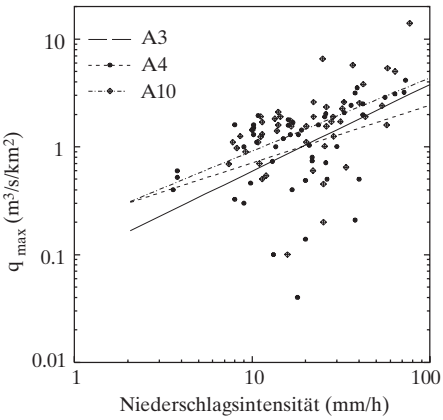


Abb. 1. Abflussspitzen q_{max} in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität über eine Dauer von 30 min in den drei Einzugsgebieten Vogelbach (A3), Lümpenenbach (A4) und Erlenbach (A10) im Alptal in den Jahren 1987–1995 (BURCH *et al.* 1996: 166)

Tab. 1. Kennwerte der hydrologischen Untersuchungsgebiete im Alptal, welche BURCH *et al.* (1996) für ihre Analysen verwendet haben.

Gebiets-Nummer Gebiets-Name		A3 Vogelbach	A4 Lümpenen-bach	A10 Erlenbach	N1 Nitrex-1 (Wald)	N2 Nitrex-2 (Wald)	N3 Nitrex-3 (Wiese)
Fläche	ha	155	93	70	0,167	0,145	0,168
Exposition		ESE	ESE	W	W	W	W
Drainagedichte	km/km^2	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		1.01.87	1.01.87	1.01.87	1.02.94	1.02.94	1.07.94
Auswertung bis		31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95	31.12.95
Messintervall	min	10	10	10	10	10	10
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

3 Grundsätzliche Überlegungen zum Einfluss des Waldes auf die Abflussbildung

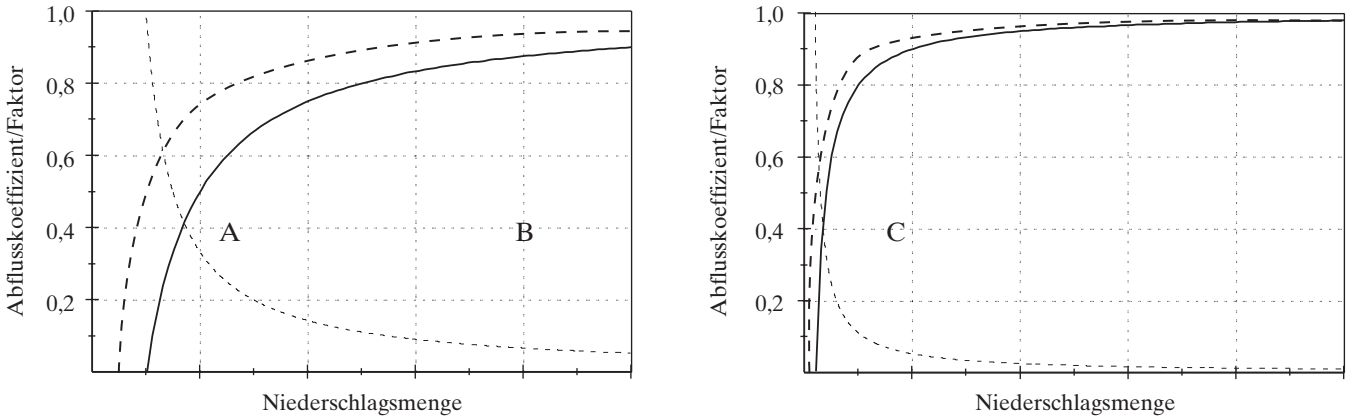
Diese auf den ersten Blick widersprüchlichen Ergebnisse aus dem Emmental und dem Alptal sind die Folge der Art und Weise, wie der Wald und dabei vor allem der Waldboden die Abflussbildung beeinflusst. Welcher Anteil eines Niederschlags während einem Hochwasser zum Abfluss kommt, hängt vor allem davon ab, wie viel Wasser im Boden gespeichert werden kann. Grundsätzlich ähnlich, allerdings in viel kleinerem Ausmass, wirkt die Interzeption. Waldböden weisen in der Regel bei einem einsetzenden Niederschlagsereignis eine grössere Wasseraufnahmekapazität auf als Freilandböden. Dies einerseits, weil sie in der Regel eine grössere Speicherkapazität aufweisen (generell besserer Bodenaufbau, wenig Verdichtung aufgrund geringerer Bewirtschaftungsintensität). Andererseits auch, weil die Waldvegetation mehr Wasser verdunstet und damit dem Boden rascher und aufgrund der oft tiefreichenden Wurzeln bis in grössere Tiefen Wasser entzieht.

Wie in BADOUX *et al.* (2004a) im Detail erläutert, lässt sich die Wirkung des Waldes auf den Abfluss stark vereinfacht und schematisch anhand der Abbildung 2 erläutern. Die punktierten Linien zeigen für einen unbewaldeten Standort, wie mit zunehmendem Niederschlag zuerst der gesamte Niederschlag gespeichert wird, dann aber ein immer grösserer Teil des gesamten Niederschlags zum Abfluss kommt. Dargestellt ist der sogenannte Abflusskoeffizient, welcher das Verhältnis zwischen gefallenem Niederschlag und dem Abfluss angibt. Für einen unbewaldeten Standort folgt er unter den für diese Figur angenommenen Bedingungen mit zunehmendem Niederschlag der punktierten Linie. Für einen bewaldeten Standort, der im Vergleich zum unbewaldeten Standort aus den erwähnten Gründen über zusätzliche Speicherkapazität verfügt, folgt der Abflusskoeffizient den ausgezogenen Kurven.

Der Abflusskoeffizient des bewaldeten Standorts liegt bei gleichem Niederschlag stets unterhalb jenem des unbewaldeten Standorts. Allerdings nimmt die Differenz mit zunehmendem Niederschlag immer mehr ab. Die gestrichelten Linien zeigen, um welchen Faktor die angenommene zusätzliche Speicherkapazität des Waldbodens den Abfluss reduziert. Der Faktor nimmt rasch ab und nähert sich asymptotisch dem Wert Null an.

Wie gross der Abfluss bei einem gegebenen Niederschlag ist, hängt von der generellen Speicherkapazität des Bodens inklusive einer allfälligen Waldwirkung ab (zusätzliche Speicherkapazität des Bodens und Interzeptionsspeicher). Ist die Speicherkapazität des Bodens klein, braucht es deutlich weniger Niederschlag, damit eine allfällige Waldwirkung nicht mehr feststellbar ist, als wenn die Kapazität gross ist. So hat der Wald z. B. im Bereich von Buchstabe «A» im linken Bild in Abbildung 2 eine beträchtliche Wirkung auf den Abfluss. In diesem Diagramm werden schematisch die Verhältnisse dargestellt, die in einem Wald erwartet werden können, der auf einem Boden mit einem erheblichen Speichervolumen stockt. Erst bei einer Niederschlagsmenge im Bereich des Buchstabens «B» wird die Waldwirkung tendenziell unbedeutend. Im Gegensatz dazu ist bei einem Wald auf Böden mit geringen Speicherkapazitäten (Abb. 2, rechts) schon im Bereich von Buchstabe «C» keine massgebende Waldwirkung mehr vorhanden. Bei gleichen Niederschlagsverhältnissen kann somit der Wald, je nach Bodenbedingungen, eine Schutzwirkung haben oder nicht.

Da der Wald auf den Hochwasserabfluss je nach Ausgangsbedingungen sehr unterschiedlich wirkt, muss dies differenziert und standortspezifisch beurteilt werden. Als Grundlage für diese Betrachtung war es daher naheliegend, die Waldstandortskarten einzusetzen (vgl. BURGER *et al.* 1996), wobei der dort verwendete Schlüssel zur Ansprache der hydrologischen Eigenschaften ursprünglich gutachterlich festgelegt und nicht mit Messungen im Feld überprüft wurde.



– – Abflusskoeffizient ohne zusätzliche Speicherkapazität durch Wald

—— Abflusskoeffizient mit zusätzlicher Speicherkapazität durch Wald

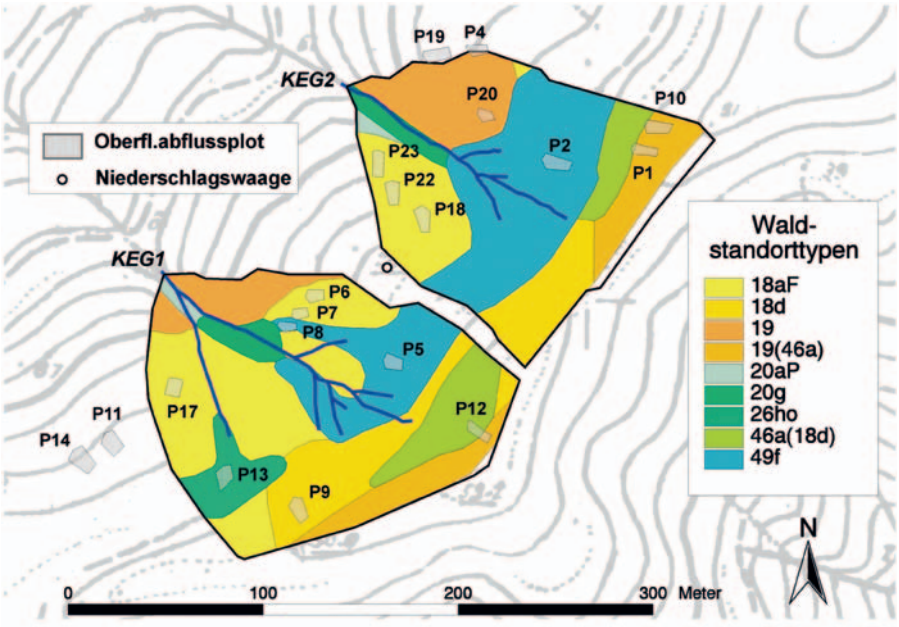
···· Faktor um den der Abflusskoeffizient durch die zusätzliche Speicherkapazität reduziert wird

Abb. 2. Schematische Darstellung der Waldwirkung auf den Abfluss. In beiden Grafiken wird angenommen, dass der Wald zu einer Verdoppelung der Speicherkapazität führe. Rechts ist die Speicherkapazität des Bodens (ohne Berücksichtigung des Waldeinflusses) fünf Mal kleiner als links. Weitere Erläuterungen vgl. Text.

4 Nach 100 Jahren wieder im Sperbelgraben

Eine gute Gelegenheit, diese differenzierte Betrachtung im Feld zu überprüfen, ergab sich nach dem Sturm «Lothar» vom Dezember 1999. Der Sturm hatte unter anderem im Sperbelgraben seine Spuren hinterlassen und dabei neben den angerichteten Schäden auch eine für die Forschung geeignete Ausgangslage geschaffen. Zwei unmittelbar benachbarte Kleineinzugsgebiete von je etwa 2 ha Fläche wiesen nach dem 26. Dezember 1999 einen sehr unterschiedlichen Schädigungsgrad auf. Während im stark beschädigten Kleineinzugsgebiet über 60 % der Bäume geworfen oder gebrochen waren, wiesen im wenig beschädigten Gebiet nur etwa 20 % der Bäume entsprechende Schäden auf. Der Vergleich der unmittelbar benachbarten weitgehend bewaldeten bzw. stark entwaldeten Flächen versprach sowohl Informationen über die Auswirkungen der Sturmschäden als auch einen vertieften Einblick in die generelle Wirkung des Waldes auf den Wasserkreislauf. Weil gleichzeitig in beiden Kleineinzugsgebieten sowohl stark vernässte gleyige Böden mit gehemmter Durchlässigkeit als auch normal bis stark durchlässige Braunerden vorkommen, konnte ein breites Spektrum an hydrologischen Bodeneigenschaften untersucht werden (vgl. Abb. 3).

Im Rahmen des Projektes «Lothar und Wildbach» wurde deshalb der Sperbelgraben waldstandortlich im Massstab 1:5000 kartiert, die zwei erwähnten Kleineinzugsgebiete mit je einer Abflussmessstation ausgestattet (vgl. Abb. 4) sowie 19 sogenannte Oberflächenabflussplots installiert. Diese Plots umfassen eine Fläche zwischen 50 und 110 m^2 und messen den Abfluss an der Oberfläche und in den obersten etwa 10 cm



18aF Typischer Tannen-Buchenwald, mit Wald-Schwingel
18d Tannen-Buchenwald mit Etagenmoos
19 Tannen-Buchenwald mit Hainsimse
20aP Farnreicher Tannen-Buchenwald, Ausbildung mit Pestwurz
20g Farnreicher Tannen-Buchenwald, Ausbildung mit Bärlauch
26ho Ahorn-Eschenwald mit Alpendost
46a Typischer Heidelbeer-Fichten-Tannenwald
49f Schachtelhalm-Tannenmischwald, Ausbildung mit Esche

Abb. 3. Übersicht der beiden Kleineinzugsgebiete und deren Waldstandorttypen sowie der Oberflächenabflussplot- und Niederschlagsmessstandorte.



Abb. 4. Abflussmessstation im beschädigten Kleineinzugsgebiet KEG 1.



Abb. 5. Oberflächenabflussplot P9 im wenig beschädigten Kleineinzugsgebiet.

des Profils (vgl. Abb. 5). Zudem wurden jeweils in unmittelbarer Nähe und repräsentativ für die Plots total 18 Bodenprofile gegraben und angesprochen. Die hydrologischen Eigenschaften dieser Profile wurden mit Beregnungsversuchen auf einer 1 m^2 grossen Fläche unmittelbar oberhalb des Profils erfasst. Eine umfassende Beschreibung des Projektes «Lothar und Wildbach» findet sich in HEGG *et al.* (2004).

Sowohl die Analysen der Beregnungsversuche (WITZIG *et al.* 2004) als auch die Messungen auf den Oberflächenabflussplots (BADOUX *et al.* 2004b) zeigten je zwei unterschiedliche Muster der Abflussbildung. Diese waren auf beiden betrachteten Skalenniveaus jeweils ähnlich und liessen sich mit Hilfe der Waldstandortskarte den verschiedenen Standorttypen klar zuordnen. Auf den gleyigen Böden des Ahorn-Eschenwaldes (26ho) und des Schachtelhalm-Tannenmischwaldes (49f) tritt relativ rasch Sättigung ein, und ein grosser Teil des Niederschlags bildet Oberflächenabfluss. Die Verhältnisse auf diesen Flächen sind grundsätzlich mit jenen im Alptal vergleichbar.

Auf den Braunerden der Tannen-Buchenwälder (Standorte 18af, 18d, 19) und des Heidelbeer-Fichten-Tannenwaldes (46a) dagegen infiltriert der grösste Teil des Wassers in den Boden. Einzig zu Beginn eines Niederschlages wurde auf einigen Flächen teilweise Oberflächenabfluss festgestellt. Dieser wird durch die organische Auflage verursacht, welche wasserabstossend wirkt, wenn sie trocken ist. Sobald sie angefeuchtet ist, wird sie durchlässig und das Wasser kann in den Boden infiltrieren. Im Boden wird ein Teil des Wassers gespeichert. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Untergrundes versickert aber ein Grossteil des Wassers rasch in grössere Tiefen, in der Regel lange bevor Bodensättigung erreicht ist.

Die Abflussreaktion auf der nächsthöheren Skalenebene, den Kleineinzugsgebieten, konnte mit den zwei erläuterten, im Hang festgestellten Mustern der Abflussbildung nur teilweise erklärt werden (vgl. HEGG *et al.* 2004).

Ein Einfluss der Sturmschäden auf die Abflussbildung wurde in den Vergleichen von Oberflächenabflussplots mit gleichen bodenkundlichen Eigenschaften aber unterschiedlichem Schädigungsgrad nur teilweise und wenn dann nur schwach ausgeprägt festgestellt. Ein Grund dafür ist, dass der Sturm zwar oberflächlich grosse Schäden verursacht hat, der Boden selber aber nur punktuell betroffen wurde und sich deshalb seine Eigenschaften kurzfristig kaum änderten. Ausserdem kam sehr rasch eine Sekundärvegetation auf, welche die weggefallene Interzeption und Verdunstung der Bäume teilweise ersetzen konnte.

5 Der aktuelle Stand des Wissens und offene Fragen

Die Untersuchungen im Sperbelgraben haben die Notwendigkeit bestätigt und verstärkt, die Hochwasserschutzwirkung des Waldes differenziert zu betrachten. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass, zumindest unter den im Sperbelgraben angetroffenen Bedingungen, eine Beurteilung der möglichen Waldwirkung anhand einer Standortskarte gemacht werden kann. Deshalb baut die Anleitung «NAIS» (BUWAL 2005) auf diesem Konzept auf und macht Vorschläge, wie unterschiedliche Standorte in Bezug auf ihre hydrologische Wirkung zu bewerten sind. Ein Grossteil dieser Vorschläge basiert im Moment noch auf gutachterlichen Einschätzungen. Ein Mehr an Sicherheit in der Beurteilung lässt sich hier nur mittels zusätzlicher Felduntersuchungen mit Plots und Profilen analog den Untersuchungen im Sperbelgraben erreichen. Für entsprechende Arbeiten stehen Standorte im Vordergrund, welche einen Horizont mit deutlich reduzierter Durchlässigkeit in einer Tiefe zwischen etwa 20 bis 60 cm aufweisen. Erst aufgrund derartiger Untersuchungen wird es möglich sein, quantitativ zu beurteilen, wie gross die Hochwasserschutzwirkung ist, wenn ein derartiger Standort, auf dem nach heutigem Kenntnisstand am ehesten eine Wirkung des Waldes zu erwarten ist, aufgeforstet oder ein ungünstiger Waldzustand mittels gezielter Pflegemassnahmen in einen besseren überführt wird.

Mit dieser Beurteilung der Waldwirkung im Hang ist allerdings erst ein Schritt in Richtung einer korrekten Bewertung der Waldwirkung für ein ganzes Einzugsgebiet getan. Wie erwähnt, kann nur ein Teil der Abflussreaktion der Kleineinzugsgebiete durch die Abflussbildung auf den Plots erklärt werden. Offensichtlich sind hier, wie BADOUX *et al.* (2004b) erläutern, noch andere Faktoren von Bedeutung. Die dabei entscheidende Frage, wie das Wasser vom Hang ins Gerinne gelangt, ist erst ansatzweise verstanden.

Zu beantworten sind dabei sicher auch die Fragen wann und wie stark sich die generell hohe Infiltration in bewaldeten Gebieten effektiv hochwasserdämpfend auswirkt. Aus heutiger Sicht ist einzig klar, dass dies vor allem bei kurzen und intensiven Niederschlägen auf tiefgründig gut durchlässigen Böden von Bedeutung ist. Auf grundnassen Böden ist die Infiltration durch die rasch erreichte Sättigung des Bodens und nicht durch dessen Infiltrationskapazität beschränkt, und bei lang anhaltenden Niederschlägen wird irgendwann auch der langsamere unterirdische Abfluss hochwasserwirksam. Einzig jenes Wasser, das im Boden gespeichert wird und später wieder verdunstet, oder das in grosse Tiefen infiltriert und erst nach langen Zeiträumen wieder an die Oberfläche gelangt, trägt unter keinen Umständen zu einem Hochwasser bei.

Zusammenfassend kann deshalb gesagt werden, dass heute die Schutzwirkung des Waldes vor Hochwasser grundsätzlich differenziert angegangen werden muss. Insbesondere können jene Waldstandorte ausgeschieden werden, wo aufgrund der naturräumlichen Voraussetzungen grundsätzlich eine Wirkung erwartet werden kann. Es ist allerdings noch nicht möglich, diese in der Fläche eines Einzugsgebiets erzielte Wirkung genau zu quantifizieren oder gar ihre Schutzwirkung für eine Siedlung, z. B. auf dem Schwemmkegel eines Wildbaches, zu bestimmen.

6 Literatur

Badoux, A.; Hegg, C.: Witzig, J.; Lüscher, P., 2004a: Studies on the runoff generation in two neighbouring sub-catchments with and without storm damage. Hydrological Processes. (Manuskript eingereicht)

Badoux, A.; Jeisy, M.; Witzig, J.; Kienholz, H.; Lüscher, P.; Weingartner, R.; Hegg, C., 2004b: Impact of storm Lothar damage on runoff – results from a comparative study in two small torrent catchments. European Journal of Forestry Research. (Manuskript in Vorbreitung)

Bosch, J.M.; Hewlett, J.D., 1982: A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. J. Hydrol. 55: 3–23.

Burch, H., 1994: Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. Beitr. Hydrol. Schweiz 35: 18–33.

Burch, H.; Forster, F.; Schleppi, P., 1996: Zum Einfluss des Waldes auf die Hydrologie der Flysch-Einzugsgebiete des Alptals. Schweiz. Z. Forstwes. 147, 12: 925–937.

Burger, H., 1934: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilung 2: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1915/16 bis 1926/27. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 18, 2: 311–416.

Burger, H., 1943: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilung 3: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1927/28 bis 1941/42. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 23, 1: 167–222.

Burger, H., 1954: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilung 5: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1942/43 bis 1951/52. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 31, 1: 9–58.

Burger, T.; Danner, E.; Kaufmann, P.; Lüscher, P; Stocker, R., 1996: Standortkundlicher Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg. Kommentar und Anwenderschlüssel. Solothurn, Lenzburg, Birmensdorf; ARGE Kaufmann + Partner/Burger + Stocker und Forstliche Bodenkunde WSL.

BUWAL, 2005: Nachhaltigkeit im Schutzwald und Erfolgskontrolle. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. (in Vorbereitung)

Calder, I.; Amezaga, J.; Aylward, B.; Bosch, J.; Fuller, L.; Gallop, K.; Gosain, A.; Hope, R.; Jewitt, G.; Miranda, M.; Porrass, I.; Wilson, V., 2004: Forest and Water Policies. The need to reconcile public and science perceptions. Geologica Acta 2, 2: 157–166.

Casparis, E., 1959: 30 Jahre Wassermessstationen im Emmental. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 35, 1: 179–224.

Engler, A., 1919: Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 12: 1–626.

Hegg, C.; Rickenmann, D., 2002: Geschiebetransport in Wildbächen – Erfahrungen aus 15 Jahren zeitlich hochaufgelösten Messungen. In: Proc. Internationales Symposium 2002, Zürich. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau. 39–48.

Hegg, C.; Thormann, J.-J.; Böll, A.; Germann, P.; Kienholz, H.; Lüscher, P.; Weingartner, R. (Hrsg.) 2004: Lothar und Wildbäche. Schlussbericht eines Projektes im Rahmen des Programms «Lothar Evaluations- und Grundlagenprojekte». Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 79 S.

Keller, H.M., 1985: Die hydrologische Forschung an der EAFV seit 1889. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 61, 2: 886–904.

McCulloch, J.S.G.; Robinson, M., 1993: History of forest hydrology. J. Hydrol. 150: 189–216.

Schleppi, P.; Hagedorn, F.; Providoli, I., 2004: Nitrate leaching from a mountain forest ecosystem with gleysols subjected to experimentally increased N deposition. Water Air Soil Pollut. Focus 4: 453–467.

Schmid, F.S., 2001: Politische Konsequenzen aus dem Umwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwasserschutzes. Schweiz. Z. Forstwes. 152, 12: 521–526.

Witzig, J.; Badoux, A.; Hegg, C.; Lüscher, P., 2004: Waldwirkung und Hochwasserschutz – eine standörtlich differenzierte Betrachtung. Forst und Holz. (Manuskript eingereicht)

Wullschleger, E., 1985: 100 Jahre Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen 1885–1985. Teil 1: Die Geschichte der EAFV. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers.wes. 61, 1: 3–630.