

**Zeitschrift:** Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern  
**Herausgeber:** Geographische Gesellschaft Bern  
**Band:** 61 (2003)

**Artikel:** Hochwasser und Wald : das forsthydrologische Paradigma  
**Autor:** Germann, Peter / Weingartner, Rolf  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-960319>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

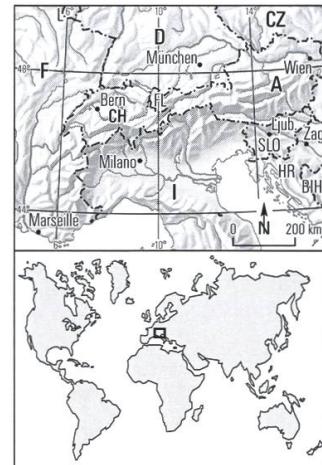
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Hochwasser und Wald – das forsthydrologische Paradigma

PETER GERMANN, ROLF WEINGARTNER



Das forsthydrologische Paradigma, wonach Wälder, insbesondere Aufforstungen, die Spitzen von Hochwassern in steilen alpinen Einzugsgebieten dämpfen sollen, wird vorgestellt sowie an Fallbeispielen erläutert.

## 1 Die Karriere des forsthydrologischen Paradigmas

### 1.1 Das forsthydrologische Paradigma und die eidgenössische Gesetzgebung

Die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen und Steinschlag ist seit langem bekannt, wie sogar SCHILLER (1804) festhielt: «*So ists, und die Lawinen hätten längst den Flecken Altorf unter ihrer Last verschüttet, wenn der Wald dort oben nicht als eine Landwehr sich dagegen stellte.*»

Spätestens seit dem ausgehenden 18. Jahrhundert erkannte man, dass Baumwurzeln Hänge stabilisieren können. Zum Beispiel gründete die Notwendigkeit zur Korrektion der Linth darauf, «*dass der Anfang des Zeitraums dieser Verheerung mit der Einführung der Manufakturen und des Gewerbfleisses im Kanton Glaris zusammentrifft, durch die eine unvorsichtige Zerstörung der Waldbekleidung veranlasst ward, welche die steilen Berg-abhänge gegen Lauinen, Ausschwemmungen der Bergwasser und Erdschlipfe schützen*» (XXII CANTONE, 1821). Die erhöhte Geschiebefracht aus dem Glarnerland staute zeitweise den Abfluss aus dem Walensee, wodurch die am See gelegenen Ortschaften wie Weesen und Walenstadt mit zunehmender Häufigkeit überschwemmt wurden und sich die Malaria ausbreiten konnte.

Wesentlich schwieriger ist es, «*Die Wirkung des Waldes auf den Stand der Gewässer*» quantitativ aufzuzeigen, wie es ENGLER (1919) erstmals versuchte. Das in Englers Titel ange-deutete forsthydrologische Paradigma entwickelte sich im Laufe des 19. Jahrhunderts und durchlief eine interessante politische Laufbahn. Im Übergang vom 18. zum 19. Jahrhundert wandelte sich die unregelmässige Nutzung der Wälder durch «Berechtigte» zur betrieblich orientierten Forstwirtschaft – analog zur Ökonomisierung der agrarischen Bodennutzung. Dadurch sollten optimale und längerfristig gesicherte Erträge erzielt werden. In Deutschland wurden zudem erste Modelle zur nachhaltigen Forstwirtschaft entwickelt. Die betriebswirtschaftlich und zentralistisch orientierten Forstökonomen brauchten schlagkräftige Argumente, um den im Zuge der Liberalisierung entstandenen Einzelinteressen entgegenzutreten.

Demokratisierung und Privatisierung befreiten die Bodeneigentümer vom Flurzwang und führten so zu einer Ertragssteigerung in der Landwirtschaft. Auch die Wälder gingen ins Privateigentum über oder wurden in kleine Korporationswaldungen aufgeteilt. Die Verbesserungen im Transportwesen erleichterten den Import von Getreide, wodurch sich die Milchwirtschaft in den ehemals dem Ackerbau vorbehaltenen Gebieten der tieferen Lagen der Schweiz stark entwickelte. Im Berggebiet versuchte man in der Folge, den wirtschaftlichen Einbruch bei der nun konkurrierten Käsewirtschaft durch Steigerung der land- und forstwirtschaftlichen Produktion aufzufangen. Im Weiteren versprach man sich von der Ausweitung der Weidegebiete in die Wälder und den massiven Holzverkäufen in die aufstrebenden Industriegebiete ebenso Linderung in der wirtschaftlich angespannten Lage wie vom Schneiteln der grünen Baumzweige zur Viehfütterung und dem Zusammenrechnen der Waldstreu und des Waldhumus zur Düngung der Mähwiesen (STUBER & BÜRGI, 2001, 2002). Gegen den sich ausbreitenden Raubbau an den Wäldern setzten sich die Forstökonomien zur Wehr.

Besorgte und fortschrittlich denkende Forstleute suchten anfangs des 19. Jahrhunderts nach Argumenten, die unübersichtliche, zur Plünderung neigende Nutzung der aufgeteilten Wälder langfristig und grossräumig möglichst einheitlich zu regeln und die Waldfläche wenn immer möglich sogar auszudehnen. Überzeugende Argumente lieferten ihnen die Kollegen aus Frankreich. Distriktingenieure empfahlen im ausgehenden 18. Jahrhundert, Hänge in hydrologischen Einzugsgebieten der Westalpen und der Pyrenäen durch Aufforstungen zu stabilisieren (BAVIER, 1949, PFISTER und BRÄNDLI, 1999). Eine erste deutsche Übersetzung der forstlichen Empfehlungen erschien 1828, in welcher die französischen Forstleute zeigten, wie mit Aufforstungen zudem dem Holzmangel zu begegnen sei und wie damit auch die Hochwasserspitzen gebrochen werden könnten.

Namentlich in den Bergregionen entzweite sich im 19. Jahrhundert die zentralistisch orientierte Forstwirtschaft von der auf Familie und lokaler Genossenschaft basierenden Landwirtschaft (PFISTER und BRÄNDLI, 1999).

In der Periode von 1825 bis 1875 traten grossräumige Überschwemmungen mit bisher nicht bekannter Häufigkeit auf (PFISTER, 1999). Die katastrophale Überschwemmung der Emme vom 13. August 1837 wird in Kapitel 2.2 ausführlicher behandelt. Neben den forstwirtschaftlichen Anliegen und den seit langem anerkannten Schutzfunktionen der Wälder gegen Rutschungen und Steinschlag wurden nun diese katastrophalen Ereignisse zur politischen Durchsetzung des forsthydrologischen Paradigmas herangezogen. So forderte das erste eidgenössische Forstpolizeigesetz von 1876 kategorisch die Aufforstung von ansehnlichen Flächen im Perimeter der Bach- und Hangverbauungen. Die Grundeigentümer konnten gezwungen werden, dazu ihr Land zur Verfügung zu stellen sowie die Aufforstungen zu pflegen und gegen die Beweidung zu schützen. Als Entgelt sprachen die Verwaltungen des Bundes und der Kantone Subventionen; zudem wurde der spätere Nutzen an den Aufforstungen den Grundeigentümern übertragen.

Grossflächige Projekte waren vor allem dort willkommen, wo Kantone das aufzuforstende Land erwarben, wie Beispiele in den Quellgebieten der Gürbe im Kanton Bern (KÜCHLI, 1990) und der Sense im Kanton Freiburg (MÜLLER, 1990) belegen. Die Bundes-

und Kantonssubventionen brachten den entlegenen und wirtschaftlich wenig entwickelten Bergregionen willkommene Einkünfte.

Das forstpolizeiliche Vorgehen wurde aber von zahlreichen Algenossenschaften als funktionelle Enteignung ihres kollektiven Grundbesitzes empfunden. Der Anteil der Aufforstungen bei Verbauungsprojekten war daher oft Gegenstand jahrzehntelanger Rechtshändel zwischen den Grundbesitzern und den kantonalen Behörden einerseits, den kantonalen und den eidgenössischen Behörden andererseits, wie MICHEL (1998) am Projekt Traubach ob Habkern und GERTSCH (2000) am Projekt Abbach, Gemeinde Grindelwald, zeigen konnten. Nach einer Schätzung von HUNZIKER (2000) waren etwa 40% der zwischen 1890 und 1950 im Kanton Bern realisierten Aufforstungsprojekte wegen mangelnder Einsicht und Kooperation der «Begünstigten» in administrative Auseinandersetzungen verwickelt, die darin gipfeln konnten, dass der Kanton Bern bereits gesprochene Subventionen an die Eidgenossenschaft zurückzahlen musste.

Als Starthilfe für die anzupflanzenden Bäume wurden vernässte Gley- und Pseudogleyböden, die unter anderen auch etwa die Hälfte der voralpinen Flyschzone einnehmen, flächenhaft entwässert. Die Entwässerungsgräben wurden oft in Abständen von weniger als 10 m gezogen; BURGER (1937) empfahl sogar Abstände von nur 5 m. Seine kritische Äusserung über den Einfluss der Entwässerung auf den Abfluss, «*Man muss sich aber klar sein, dass eine Entwässerung in den ersten 2-3 Jahren die Raschheit des Wasserabflusses eher begünstigt*», relativierte er sogleich mit dem folgenden Satz: «*Man darf diese Wirkung auf das gesamte Einzugsgebiet zwar auch nicht überschätzen, da ja meistens von einem Jahr zum anderen nur kleine Flächen entwässert werden können.*» Bis jetzt konnten wir keine weiteren kritischen Bemerkungen zur Entwässerung von aufzuforstenden Flächen finden. Dies deutet darauf hin, dass dieser Bereich ausschliesslich und unbestritten in den Händen des Forstdienstes lag. Hingegen stritten sich Forstleute mit Geologen über den Nutzen von Aufforstungen zur Stabilisierung von Hangrutschungen (KÖLBING, 1998).

Zur naturwissenschaftlichen Untermauerung des forsthydrologischen Paradigmas wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts in zwei Massstabsbereichen neue Wege beschritten. Einerseits wurden die hydrologischen Verhältnisse unterschiedlich bewaldeter Kleineinzugsgebiete verglichen (vgl. Kap. 1.2). Andererseits wurden bodenphysikalische Methoden bereitgestellt, mit denen die Infiltrationsfähigkeit und die Grobporenanteile von Bodenhorizonten bestimmt werden konnten (vgl. Kap. 1.3).

## 1.2 Untersuchungen an Kleineinzugsgebieten

Im Jahr 1903 liess Engler Abflussmessstellen an den Ausgängen der beiden steilen Einzugsgebiete des Sperbel- und des Rappengrabens errichten (ENGLER, 1919). Die beiden etwa 4 km voneinander entfernten Einzugsgebiete liegen im Molassegebiet der emmentalischen Voralpen und öffnen sich nach Südwesten. Der zu 97% bewaldete Sperbelgraben liegt zwischen 912 bis 1204 m ü.M. und umfasst eine Fläche von 55.8 ha. Sein Hauptgerinne weist ein mittleres Gefälle von 20.2% auf. Demgegenüber ist der Rappengraben nur zu 35% bewaldet; er liegt zwischen 983 bis 1261 m ü.M. und weist eine Fläche von 69.7 ha auf. Das mittlere Gefälle des Hauptgerinnes beträgt hier 17.5%.

BURGER (1934) fasste die Ergebnisse der 11-jährigen Messperiode von 1915/16 bis 1926/27, die auch Winterbeobachtungen mit einschloss, in zwölf Punkten zusammen, von denen die beiden folgenden von besonderem Interesse sind:

*«5. Bei ausserordentlich hohen Niederschlägen nach Trockenperioden können im Boden unserer Einzugsgebiete vorübergehend 60-80 mm [...] gespeichert werden, im Sperbelgraben fast immer 10-20 mm mehr als im Rappengraben.»*

*«11. In der Schweiz lassen sich die Hochwasser der grossen Flüsse durch Aufforstungen allein nicht bekämpfen, weil ein sehr grosser Teil der obersten Einzugsgebiete über der Waldgrenze liegt.»*

Auch die Schlussbemerkung verdient Beachtung: *«Der Wald wirkt nach allen bis jetzt bekannten Untersuchungen ausserordentlich günstig auf die Milderung der Hochwassergefahr und auf die Verminderung der Geschiebeführung. Man darf aber von ihm nicht mehr verlangen, als er nach den in einem Einzugsgebiet gegebenen Verhältnissen billigerweise leisten kann. Sollen die Hochwasserschäden unserer Bäche und Flüsse auf ein Minimum reduziert werden, so müssen Ingenieure, Land- und Forstwirte einträchtig zusammenarbeiten.»*

In den Jahren 1943 und 1954 fasste Burger die Ergebnisse der Beobachtungen von 1927/28 bis 1941/42 respektive von 1942/43 bis 1951/52 zusammen, die im wesentlichen die früheren Feststellungen bestätigten (BURGER, 1943 und 1954).

BURGER (1945 und 1955) berichtete auch über hydrologische Messungen im südalpinen Einzugsgebiet der Valle Melera. In einer 20-jährigen Messreihe konnte BURGER (1955) aber keinen Einfluss der älter gewordenen Aufforstungen auf den Abfluss feststellen. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch GERBER (1989) für das obere Einzugsgebiet der Emme. Auch sie konnte für die Periode von 1860 bis 1980 keine Reduktion der Abflussspitzen nachweisen, obwohl in dieser Zeitspanne die Waldfläche um 20% zunahm.

Die hier dargestellte Methode der paarweisen Untersuchung von Kleineinzugsgebieten wurde weltweit angewandt (vgl. auch Kap. 2.1). Eine wesentliche Dämpfung der Hochwasserspitzen durch Erhöhung des Waldanteils konnte jedoch nirgends eindeutig nachgewiesen werden.

### 1.3 Burgers bodenhydrologische Untersuchungen

BURGER (1922) stellte eine Methode zur Beurteilung der Infiltration vor. Stahlzylinder von einem Liter Inhalt, 10 cm Höhe und einem Durchmesser von 11.3 cm, heute noch als «Burgerzylinder» bezeichnet, werden vollständig in den Boden getrieben und mit einem Netz bedeckt. Ein zweiter Zylinder von derselben Grösse wird dicht auf den ersten aufgesetzt und vollständig mit Wasser gefüllt. Anschliessend wird die Zeit für die Einsickerung der 10 cm hohen Wassersäule gemessen. Pro Standort werden 5 bis 10 Infiltrationsmessungen durchgeführt. An zahlreichen Messorten wurden mit denselben Zylindern Bodenproben entnommen, im Labor in einem Becken von unten her langsam mit Wasser vollständig gesättigt, gewogen, auf einem vorgeschriebenen Sandbett bis zur Gewichtskonstanz drainiert und nochmals gewogen. Burger bezeichnete das Volumen des

drainierten Wassers als Luftkapazität der Bodenprobe. Mit ihr und der Einsickerungszeit konnte er hydraulische Unterschiede zwischen Acker-, Weide-, Wiesen- und Waldböden zeigen (BURGER, 1929). Auch die Wirkung von Bodenverdichtungen auf die Infiltration, hervorgerufen beispielsweise durch die Benutzer eines Zeltplatzes oder durch Erholungssuchende im Wald, stellte BURGER (1929, 1940) eindrücklich dar. Die Messorte wurden so ausgewählt, dass die unbeeinträchtigten Waldböden bezüglich der hydraulischen Eigenschaften in der Regel oben aus schwangen. Hingegen ist ihm der Nachweis einer Verbesserung der bodenhydraulischen Parameter durch Aufforstungen oder gar Durchforstungen nur teilweise gelungen (BURGER, 1927).

Burgers Infiltrationstest ging in der seit den 1930er Jahren erfolgten Entwicklung in der Boden- und Grundwasserhydrologie unter, wie früher gezeigt wurde (GERMANN, 1994). Wegen der undefinierbaren Randbedingungen und der unberücksichtigten Anfangsbedingungen lässt sich die Methode physikalisch nicht abstützen. Auch wurde die Methode zur Bestimmung der Luftkapazität nicht mehr angewandt, obwohl sie nach unseren Erkenntnissen zur Beurteilung der Makroporosität herangezogen werden kann (GERMANN und BEVEN, 1981).

Kam in Burgers Aussagen noch die Spannung zwischen wissenschaftlicher Objektivität und forstpolitischer Opportunität zum Ausdruck, so wurden seine Ergebnisse in der Folgeliteratur politisch missbraucht. Es wurde etwa behauptet, dass sich ein gehemmt durchlässiger Gleyboden im Laufe der Entwicklung einer etwa 50-jährigen Aufforstung in einen stark durchlässigen Podsol verwandelt habe (JUNGO, 1941). Die geringe Wahrscheinlichkeit des Zutreffens dieser Behauptung geht schon daraus hervor, dass die Bildung eines Podsolprofils mindestens 500 bis 1000 Jahre in Anspruch nimmt.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde es um das forsthydrologische Paradigma still, da kaum mehr grossflächig aufgeforstet wurde. Die auf dem ersten Forstpolizeigesetz von 1876 beruhenden Aufforstungen erreichten in der Schweiz eine respektable Fläche von etwa 40'000 ha (PFISTER et al., 1987). Allerdings wies das zweite Landesforstinventar von 1995 eine Zunahme der Waldfläche seit 1985 um etwa 50'000 ha aus – dies als Folge der Extensivierung der Landwirtschaft (BRASSEL & BRÄNDLI, 1999). Der im 19. Jahrhundert entstandene Gegensatz zwischen der damals liberalisierten Landwirtschaft und der zentralistischen Forstwirtschaft scheint sich gerade in den Bergregionen mit atemberaubender Geschwindigkeit aufzulösen.

Das eidgenössische Waldgesetz von 1991 und die entsprechenden kantonalen Gesetze verlangen von der heute überwiegend defizitären Forstwirtschaft einen Nachweis der zu subventionierenden Schutzfunktionen der Wälder. Damit rückt das forsthydrologische Paradigma im neuen politischen Umfeld wieder in den Vordergrund. Wurde es bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts vorwiegend als Mitgrund für Aufforstungen ausserhalb des bestehenden Waldareals aufgeführt, so müssen heutzutage die als hydrologisch wirksam erachteten Waldflächen ausgeschieden und ihre Wirkung nachgewiesen werden, damit die Kosten einer auf hydrologischen Schutz ausgerichteten Waldflege subventioniert werden können.

Eine differenzierte hydrologische Waldbeurteilung ist also gefragt; trotzdem spielt die undifferenzierte, dem forsthydrologischen Paradigma verpflichtete Betrachtungsweise in der öffentlichen Diskussion nach wie vor eine wichtige Rolle, wie das Fallbeispiel zu den Hochwassern in Bangladesch in Kap. 2.3 belegt.

#### 1.4 Neuere bodenhydrologische Beurteilung von Waldstandorten

Die wegweisenden Untersuchungen von BURGER (1922, ff.) ergaben eine erhebliche Zunahme der Infiltrationsrate, wenn die Luftkapazität der Bodenproben eine Schwelle von etwa 5% des Bodenvolumens übertrifft, wie BENGUEREL (1998) aus einer erneuten Interpretation von Burgers Daten schliessen konnte. Interessanterweise fand bereits KOPEZKY (1914) anhand von Topfversuchen mit Sonnenblumen denselben Schwellenwert für den volumetrischen Luftgehalt eines Bodens, der für einen ausreichenden Gasaustausch im Wurzelraum nötig ist. FLÜHLER (1973) bestätigte diesen ungefähren Schwellenwert mit zahlreichen Messungen der Sauerstoffleitfähigkeit. Offenbar finden Wasser- und Gastransport in einem verhältnismässig kleinen Anteil von Grobporen statt, die untereinander genügend verbunden sind, wenn ihr Anteil den Schwellenwert überschreitet.

Wenn man vereinfachend davon ausgeht, dass in der Schweiz der Wald unterhalb der oberen Waldgrenze überall dort stockt, wo der Boden landwirtschaftlich nicht genutzt wurde, dann müssen Wälder auch auf Böden mit weniger günstigen hydrologischen Eigenschaften vorkommen. Zu den landwirtschaftlich ungünstigen Böden gehören im wesentlichen die Gleye und Pseudogleye wegen der dauernden oder häufigen Verwässerung, die stark sauren Böden wegen der geringen Nährstoffversorgung sowie steinige und flachgründige Böden. Die einen sind extrem undurchlässig, währenddem die anderen extrem durchlässig sind.

Die forstliche Planung braucht Angaben über Böden, die einerseits im gegenwärtigen Zustand von forsthydrologischer Bedeutung sind und in denen andererseits mit forstlichen Massnahmen wie Baumartenwahl, Humuspfllege und Bestandesaufbau die hydrologisch entscheidenden Bodeneigenschaften gefördert werden können. In der Schweiz wird der naturnahe Waldbau angestrebt, den man als kostengünstig und risikoarm beurteilt. Die pflanzensoziologischen Standorteinheiten in Anlehnung an ELLENBERG und KLÖTZLI (1972) werden dabei zur Planung herangezogen. Mit zunehmender Verfeinerung können den pflanzensoziologischen Standorteinheiten durch laufende Feld- und Laboruntersuchungen Bodenmerkmale wie Humusform, Mächtigkeit und Abfolge der Horizonte, Lagerungsdichte und Tiefe der Durchwurzelung zugeordnet werden (LÜSCHER, 2002).

Die Infiltrationsfähigkeit von Standorten wird an der Abteilung Bodenkunde des Geographischen Instituts mit Beregnung einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> zusammen mit Messungen der Wassergehalte im darunterliegenden Boden ermittelt (GERMANN 1999). Aus den im 5-Minuten Takt erhobenen Wassergehaltsänderungen wird auf die Tiefe des zusammenhängenden, für die Infiltration massgebenden Systems von Grobporen geschlossen. Aus Wasserbilanzrechnungen können zudem der Fluss und das gespeicherte Wasservolumen ermittelt werden. Eine Beregnung dauert typischerweise eine Stunde und ihre Intensität entspricht dem 10-jährlichen Stundenmaximum. Bis anhin wurden mehr als 30 landwirtschaftliche und ebenso viele forstliche Standorte untersucht. WIGGER (2002) hat einen

losen Zusammenhang zwischen den Hauptbodentypen und der Infiltrationsfähigkeit aufzeigen können. Hingegen ist es CARIZZONI (2002) aus der Sicht Infiltrationseigenschaften nicht gelungen, die Überlegenheit einer etwa 20-jährigen Fichtenaufforstung gegenüber der Hochstaudenflur zu zeigen. Eher infiltrationshemmend wirkte sich die anfängliche Hydrophobizität des Nadelteppichs im L- und F-Horizont des Waldbodens aus. Das Spektrum der Infiltrationsfähigkeit von Waldstandorten ist erwartungsgemäss sowohl bei den hohen wie bei den tiefen Raten wesentlich breiter als jenes landwirtschaftlich genutzter Böden (BRETSCHER, 2002; DOBMANN, 2002; GERMANN und BÜRGI, 1996; GERMANN et al., 2002; JÄGGI, 2001; NIGGLI, 1998; SCHÜTZ, 2000; ZIMMERMANN, 2001). Ausserdem konnten HELBLING (2002) und SIEBER (2002) die anfänglich für die kurzfristige Wasserspeicherung als wesentlich erachtete Wirkung der organischen Auflage zahlreicher Waldböden nicht in allen Fällen nachweisen.

## 1.5 Fazit

Gleichzeitig mit der Modernisierung der Landwirtschaft und des Rechtswesens zu Beginn des 19. Jahrhunderts wandelte sich die Waldnutzung zur geregelten Forstwirtschaft. Diese Entwicklung war aber nur dank obrigkeitlicher Anreize und Vorschriften möglich, die teilweise mit der hydrologischen Wirkung von Wäldern, insbesondere von geordneten Forsten, auf den Abfluss in steilen Einzugsgebieten begründet wurden, also mit dem forst-hydrologischen Paradigma.

Mit einer Verzögerung von etwa 100 Jahren erhielt die forsthydrologische Forschung den Auftrag, die Grundlagen zum Paradigma zu beschaffen. Aus den hier vorgestellten Gründen konnten die Ergebnisse das Paradigma nicht generell untermauern.

Die grossflächigen Aufforstungsprojekte förderten die lokale Wirtschaft entlegener Berggebiete und wurden daher als forstpolitischer Erfolg betrachtet, in den die angeblichen hydrologischen Verbesserungen gleich mit einbezogen wurden.

Aufgrund der in den 1990er Jahren in Kraft getretenen eidgenössischen und kantonalen Forstgesetze werden durch Naturereignisse beschädigte Wälder nur noch dort in Stand gestellt, wo ihnen eine Schutzfunktion oder sonst eine durch die Interessenten abzugeltende Funktion nachgewiesen werden kann. Hievon ausgenommen sind in der Regel die eigentlichen Wirtschaftswälder, die das Schadensrisiko selbst tragen sollten. Durch die strikter gehandhabte flächige Zuordnung der spezifischen Waldfunktionen, im Wesentlichen durch das neuartige System der Subventionierung bedingt, ist nicht auszuschliessen, dass mit der rapiden Zunahme des Einsatzes von Erntemaschinen die hydrologisch wirksame Bodenstruktur grösserflächig beeinträchtigt wird. Damit könnte durchaus ein neuer Zyklus der Diskussion um das forsthydrologische Paradigma in Gang gesetzt werden.

## 2 Beispiele von Untersuchungen zur hydrologischen Waldwirkung in verschiedenen Raum- und Zeitskalen

### 2.1 Prozessuntersuchung zur Abflussbildung in sturmgeschädigten Wäldern

Am 26. Dezember 1999 richtete der Sturm «Lothar» in der Schweiz (Alpennordseite) gewaltige Schäden an. So war nach Angaben der Eidg. Forstdirektion eine Waldfläche von rund 46'000 ha betroffen und es fiel eine Sturmholzmenge von über 13 Mio. m<sup>3</sup> an. Aufgrund der immensen Grösse der betroffenen Fläche stellte sich die Frage, welchen Einfluss die Sturmschäden auf das hydrologische und geomorphologische Prozessgeschehen ausüben könnten. Genau an diesem Punkt setzt das Projekt «Lothar und Wildbach» ein, das gemeinsam von der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und dem Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) durchgeführt und von der Eidg. Forstdirektion (BUWAL) finanziert wird.

Als Untersuchungsgebiet wurde das bekannte forsthydrologische Untersuchungsgebiet des Sperbelgrabens gewählt (s. Kap. 1.2). Mit dem Lothar-Projekt erlebt der Sperbelgraben insofern eine Neubelebung, als das langfristige Beobachtungsmessnetz (100-jährige Abflussmessreihe!) durch Messeinrichtungen zur gezielten Untersuchung der Abflussbildungsprozesse ergänzt wurde. Im Sperbelgraben konnten zwei naturräumlich ähnliche Kleinsteinzeugsgebiete mit einer Fläche von je ca. 2 ha identifiziert werden, die sich in Bezug auf die durch den Lothar-Sturm beschädigten Bäume signifikant unterscheiden. Diese Zwillingseinzeugsgebiete wurden mit je einer Abflussmessstation ausgerüstet. Zur räumlich-zeitlich detaillierten Erfassung des Niederschlags stehen insgesamt fünf Niederschlagsstationen in Betrieb.

#### 2.1.1 Skalierungsidee

Die Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem Schädigungsgrad des Waldes und den Abflussbildungsprozessen laufen auf verschiedenen räumlichen Ebenen ab:

- Mit detaillierten bodenkundlichen Aufnahmen und Beregnungsversuchen auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> werden die dominanten Abflussbildungsprozesse «in-situ» studiert (vgl. Kap. 1.4).
- 19 Testplots mit einer Fläche von durchschnittlich 80 m<sup>2</sup> bilden die nächst höhere Untersuchungsebene. Hier wird der Oberflächenabfluss unter natürlichen Niederschlagsbedingungen erfasst. Die grosse Zahl und die Grösse der Testplots erlauben es, die Parameter Bestandestyp, Bodentyp, Schadenstyp und Neigung in der Bandbreite ihres Auftretens im Gebiet abzudecken und deren Auswirkungen auf das Abflussverhalten zu untersuchen.
- Um auch die Entwicklung der Abflussbildungsprozesse über längere Hangpartien mitverfolgen zu können, wurden sog. Kaskaden angelegt, die je aus drei in der Vertikalen aufeinanderfolgenden Testplots bestehen.
- Auf der nächsten Skalierungsstufe, den Zwillingseinzeugsgebieten, können über die Abflussganglinie die Abflussbildungsprozesse im beschädigten und unbeschädigten Gebiet als Gesamtes erfasst und verglichen werden.

- Welche Auswirkungen der Sturm Lothar langfristig haben wird, sollen schliesslich die Abflussdaten der übergeordneten Hauptstation des Sperbelgrabens (Fläche: 0.5 km<sup>2</sup>) zeigen.

### 2.1.2 Erste Ergebnisse

Eine erste Analyse der Abflussdaten des Jahres 2001 verfolgte das Ziel, Einflüsse der Lothar-Schädigungen auf das Abflussverhalten der Zwillingsgebiete zu identifizieren (MARTI, 2002). Betrachtet man Abflussmittelwerte grösserer Zeitspannen (Monat, Saison), so zeigt sich – ganz dem forsthydrologischen Paradigma entsprechend –, dass im unbeschädigten Einzugsgebiet weniger Wasser abfliesst als im sturmgeschädigten. Dies ist vor allem auf die höhere Transpiration im Wald zurückzuführen.

Ganz andere Resultate ergeben sich bei den Tagesabflüssen und bei den Hochwassereignissen. So sind im unbeschädigten Gebiet (!) bei Starkregenereignissen die Anstiegszeiten der Hochwasserwellen tendenziell kürzer und die Abflussspitzen ausgeprägter als im beschädigten Gebiet. Die Waldwirkung scheint hier also nicht zu spielen, vielmehr macht sich wahrscheinlich der Unterschied in der Gerinnendichte (höhere Dichte im unbeschädigten Einzugsgebiet) bemerkbar. Damit zeigt es sich einmal mehr, dass es bei Zwillingseinzugsgebieten schwierig ist, einen einzelnen Parameter (hier: Schädigungsgrad der Bäume) vollumfänglich zu isolieren, um dessen Einfluss auf das hydrologische Verhalten zu ermitteln. Deshalb ist es aus methodischer Sicht für das Gesamtprojekt sehr wichtig, dass der Einfluss der Lothar-Schädigungen auf den oben erwähnten verschiedenen räumlichen Skalenniveaus verfolgt wird. Nur so kann letztlich ein umfassendes Gesamtbild zum Zusammenhang zwischen Lothar-Schäden und hydrologischen Prozessabläufen entstehen.

## 2.2 Zur Rolle des Waldes beim Extremhochwasser von 1837 im Einzugsgebiet der Emme

Kaum eine hydrologische Arbeit zum Emmental kommt ohne einen Bezug zur Erzählung «Die Wassernot im Emmental» (GOTTHELF, 1838) aus. Der Pfarrer und Bauerndichter Jeremias Gotthelf beschreibt darin Vorgeschichte, Entstehung, Ablauf und Folgen des Hochwassers, welches den Talgrund des Rötenbachs und der oberen Emme am 13. August 1837 verwüstet hat. Es handelt sich um das grösste in den letzten 200 Jahren im Emmental abgelaufene Hochwasser. Gotthelfs Aussagen wurden bisher jedoch lediglich zur Illustration und nicht als naturwissenschaftliche Informationsquelle verwendet. In der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern wurde deshalb versucht, zu einer detaillierten naturwissenschaftlichen Beschreibung dieses historischen Hochwassers zu gelangen (REIST et al., 2002). Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf das von Gotthelf bezeichnete Ursprungsgebiet des Extremhochwassers, das Einzugsgebiet des Rötenbachs mit einer Fläche von 53 km<sup>2</sup> (Fig. 1).

### 2.2.1 Rekonstruktion der Abflussspitze

Der zeitliche Ablauf des 1837er Hochwassers wird in den historischen Quellen ausführlich beschrieben. Mit diesen Angaben lassen sich Abflussquerprofile rekonstruieren, für die nach Manning-Strickler die mittlere Fliessgeschwindigkeit geschätzt wurde. Aufgrund dieser hydraulischen Berechnungen kann für den Rötenbach ein Spitzenabfluss von rund

300 m<sup>3</sup>/s (5700 l/(s·km<sup>2</sup>)) angenommen werden. Dieser Wert liegt im Bereich der grössten bislang beobachteten Abflüsse schweizerischer Einzugsgebiete. Er ist somit plausibel, auch wenn er – methodisch bedingt – mit einigen Unsicherheiten behaftet ist.

### 2.2.2 Rekonstruktion der Hochwasserwelle

Um zu einer quantitativen und möglichst objektiven Rekonstruktion des Hochwassereignisses vom 13. August 1837 zu gelangen, wurde das deterministische, räumlich-zeitlich hochauflösende Modell WaSim-ETH (SCHULLA, 1997) eingesetzt. In der «Modellversion aktuell» berechnet das Modell die Abflussreaktion des heutigen Einzugsgebietes auf gemessene meteorologische Einflüsse. Die Modellkalibrierung und -validierung erfolgte mit Hilfe von Abflussdaten, die seit den 1990er Jahren zur Verfügung stehen. Die «Modellversion aktuell» bildet die Grundlage zur «Modellversion 1837». Dazu wurden aus historischen Quellen die Vorgeschichte und die Veränderungen der Modellparameter hergeleitet. So war der Bewaldungsgrad im Röthenbach-Einzugsgebiet in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts um rund 10% kleiner als heute. Mit der «Modellversion 1837» wurde berechnet, welche Niederschlagsmengen für die Erzeugung des rekonstruierten Spitzenabflusses von 300 m<sup>3</sup>/s nötig waren. Dazu wurden verschiedene Annahmen bezüglich des Systemzustandes (Szenarien) angenommen. Durch den Vergleich der pro Szenario gefundenen, räumlich differenzierten Niederschlagsmengen mit empirischen Niederschlagsgrenzwerten (GREBNER und ROESCH, 1998) konnten unwahrscheinliche oder gar unmögliche Szenarien ausgeschieden werden.

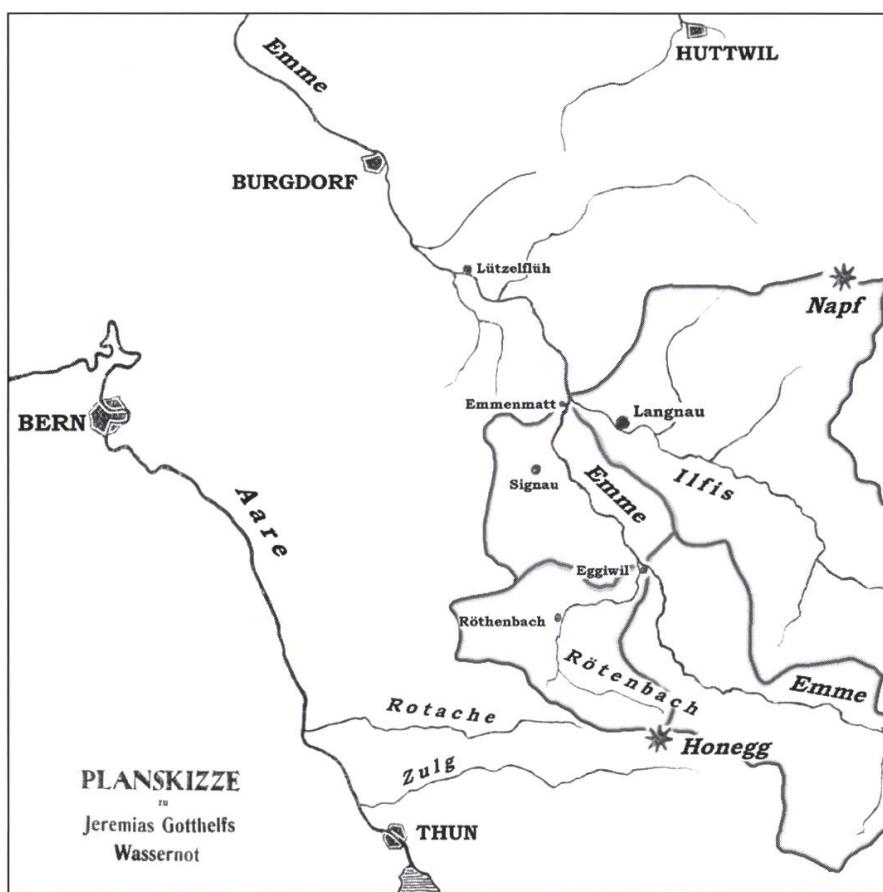


Fig. 1: Übersichtsskizze zur «Wassernot» (aus HUNZIKER et al., 1925, verändert)

### 2.2.3 Szenario Entwaldung

Alle verfügbaren Quellen sprechen davon, dass der Kern der heftigen Gewitterniederschläge über der Honegg niederging. Die Honegg liegt im obersten Teil des betrachteten Einzugsgebiets und umfasst rund 20% der Gesamtfläche. Unter der einheimischen Bevölkerung ist auch heute noch die Meinung verbreitet, dass die Honegg 1837 nicht bewaldet und somit für das gewaltige Ausmass des Hochwassers verantwortlich war. Die Rekonstruktion von REIST (2002) zeigt aber, dass um 1850 rund 56% der Honegg mit Wald bedeckt waren (heute 71%). Das Argument einer vollständig waldlosen Honegg trifft also nicht zu. Trotzdem wurde in einem Szenario die vollständige Entwaldung der Honegg angenommen. Aus der Sicht der Modellierung bedeutet das, dass für dieses Gebiet gegenüber dem heutigen Zustand insbesondere mit kleineren Verdunstungswerten und einem kleineren Wasserspeicherungsvermögen des Bodens gerechnet wird.

Aufgrund der Ergebnisse der Modellrechnungen kann gezeigt werden, dass die virtuelle Rodung der Honegg keinen signifikanten Einfluss auf die Abflussspitze ausübt. Bei Extremniederschlägen ist demnach die Waldwirkung vernachlässigbar. Die möglicherweise vorhandenen Unterschiede im Speicherungsvermögen der Böden unter Wald und unter anderen Nutzungsarten sind bei Niederschlagsmengen von bis zu 200 mm/3h, wie sie an der Honegg aufgetreten sind, viel zu gering, um abflussrelevant zu sein.

Insgesamt dürfte also der beim 1837er Hochwasser gegenüber heute geringere Waldbedeckungsgrad keinen entscheidend verschärfenden Einfluss auf die Hochwassersituation ausgeübt haben.

### 2.2.4 Der rekonstruierte Ablauf des Hochwassers vom 13. August 1837

Am Morgen des 13. August 1837 zeigte das Einzugsgebiet des Rötenbachs deutliche Spuren der vorangegangenen Gewittertage. Der Boden war aussergewöhnlich stark wassergesättigt und der Abfluss, obwohl rückläufig, lag mit rund 9 m<sup>3</sup>/s noch immer 600% über dem Monatsmittel. In dieser kritischen Situation ging am Nachmittag ein Gewitter von sehr seltener Intensität hauptsächlich über dem südlichen Teil des Einzugsgebiets nieder. An der Honegg fielen innerhalb von drei Stunden bis 200 mm Niederschlag, im gesamten Einzugsgebiet während derselben Zeit um die 100 mm. Diese Werte entsprechen Wiederkehrperioden von mehreren 100 Jahren. Ein grosser Teil des Niederschlags konnte vom Boden nicht mehr aufgenommen werden, was zu einem sofortigen Anschwellen des Rötenbachs führte. Bereits drei Stunden nach Beginn der intensivsten Niederschläge hatten ca. 50 Prozent des gesamthaft gefallenen Niederschlagsvolumens das Einzugsgebiet bei Eggiwil verlassen und dabei mit 300 m<sup>3</sup>/s die höchste bekannte Abflussspitze im Rötenbach verursacht. Aufgrund der geologisch-geomorphologischen Situation kann vermutet werden, dass im Oberlauf des Rötenbachs während des Ereignisses auch Rutschungen aufgetreten sind. Dadurch wurde der Abfluss im Gerinne kurzfristig zurückgehalten und dann abrupt wieder freigesetzt, wobei es zu einer weiteren Erhöhung der Spitzenabflussmenge gekommen ist. Der grosse Feststoffanteil machte die Flut noch unberechenbarer und beeinflusste die Höhe des Wasserstandes massgeblich. Vier Stunden nach Einsetzen der Niederschläge waren die Abflüsse im ganzen Tal bereits wieder rückläufig; es handelte sich also um eine kurze, aber ausserordentlich scharfe Abflussreaktion.

## 2.3 Die hydrologischen Auswirkungen der Entwaldung im Himalaja im Lichte der unterschiedlichen räumlichen Skalen

### 2.3.1 Verschärft die Abholzung im Himalaja die Hochwassersituation?

Die Gebirgsseinzugsgebiete des Indus, Ganges und Brahmaputra im Himalaja wurden in den letzten Jahrzehnten wegen der gewaltigen Bevölkerungszunahme stark anthropogen verändert; insbesondere kann vielerorts eine dramatische Abnahme der Waldfläche beobachtet werden (SHAH et al., 1995). Deshalb ist es nicht weiter erstaunlich, dass in der Öffentlichkeit die Meinung vertreten wird, diese Abholzung habe zu einer Verschärfung der Hochwassersituation in den Tiefländern und hier insbesondere in Bangladesch geführt. Nun haben aber Studien am Geographischen Institut der Universität Bern (HOFER, 1998) gezeigt, dass die Wahrnehmung einer Hochwasserzunahme in Bangladesh datenmäßig nicht belegbar ist. HOFER (1998) konnte in einer Übersichtsanalyse über die letzten 120 Jahre zeigen, dass weder die Häufigkeit noch das Ausmass der Hochwasser signifikant zugenommen haben. Trotzdem ist es möglich oder gar wahrscheinlich, dass die von Hochwassern verursachten Schäden in den letzten Jahren wegen der immer grösser werdenden Bevölkerungs- und Siedlungsdichte stark zugenommen haben, so dass daraus auf eine Zunahme der Hochwasser geschlossen wird. Ein ähnliches Phänomen ist übrigens auch in der Schweiz zu beobachten (WEINGARTNER, 1999).

Keine signifikante Zunahme der Hochwasserhäufigkeit bedeutet nun aber nicht, dass die anthropogenen Verhältnisse im Himalaja keinen Einfluss auf die Hochwassersituation ausüben. Dies soll am Beispiel des sehr grossen Hochwasserereignisses vom 19./20. Juli 1993 kurz erläutert werden (HOFER, 1998): Ausserordentlich starke Niederschlagsmengen über den mittleren und östlichen Regionen Nepals führten in den betroffenen Gebieten zu einer katastrophalen Situation mit Überschwemmungen und Rutschungen. Hier dürften die anthropogenen Veränderungen der Einzugsgebiete eine wichtige Rolle gespielt haben. Durch den grossen Bevölkerungsdruck in den «Middle Hills» von Nepal sind in vielen Gebieten sogenannte Marginalisierungsprozesse zu beobachten (SCHREIER und WYMAN, 1996): Steile, für die Nutzung eher ungeeignete, oft waldbestandene Hangpartien mussten in die landwirtschaftliche Nutzung überführt werden, um den zunehmenden Nahrungsmittelbedarf zu decken. Damit wurde das System instabil und anfälliger bei extremen Ereignissen. Besonders kritisch ist die Situation jeweils zu Beginn der Monsun-Saison, wenn in diesen steilen Hangpartien, in denen Regenfeldbau betrieben wird, die schützende Vegetation fehlt. SCHREIER und WYMAN (1996) konnten am Beispiel des Jhikhu Khola, einem typischen Einzugsgebiet der nepalesischen Middle Hills zeigen, dass die ersten beiden grossen Niederschlagsereignisse, die kurz vor oder zu Beginn der eigentlichen Monsunszeit auftreten, rund 60-80% der Jahreserosion zur Folge haben!

Das Ereignis vom 19./20. Juli 1993 hatte also auf lokaler bis regionaler Ebene gewaltige Auswirkungen. Beim Abfluss des Ganges im Tiefland, aufgezeichnet in der Nähe der Grenze zwischen Indien und Bangladesch, führte es aber nur zu einer geringfügigen Abflusszunahme, da die Hochwasserwelle auf der langen Fließstrecke natürlicherweise – und vermutlich auch durch die Staustufen beeinflusst – stark abflachte. Bei der Diskussion der Auswirkungen von Waldflächenveränderungen oder allgemeiner von Landnutzungsänderungen sind also solche Skaleneffekte unbedingt zu berücksichtigen!

### 2.3.2 Schlüsselfaktoren der Hochwasser in Bangladesch

Die Abholzungen im Himalaja üben also keinen direkten Einfluss auf die Hochwassersituation in Bangladesch aus. Welche Faktoren sind nun aber dafür verantwortlich? Die Untersuchungen von HOFER (1998) haben gezeigt, dass vor allem die folgenden drei Schlüsselgrößen in Betracht zu ziehen sind:

1. der hohe (aber wie gezeigt nicht extreme) «Basisabfluss» des Ganges und des Brahmaputra während des Monsuns;
2. die extremen Niederschläge in den Meghalaya Hills, die nördlich an Bangladesch anschliessen und über das Flusssystem des Megna-Rivers mit Bangladesh verbunden sind. In den Meghalaya Hills liegt die berühmte Niederschlagsstation von Cherrapunji mit Niederschlägen von bis zu 18 m (!) in den vier Monsunmonaten (HERSCHY und FAIRBRIDGE, 1999). Erwähnenswert ist, dass dieses zu Indien gehörige Gebiet in den letzten 100 Jahren stark entwaldet wurde (HOFER et al., 1996);
3. die grossen monsunalen Niederschläge, von denen Bangladesch selber betroffen ist.

### Literatur

- BAVIER, J.B. 1949: Schöner Wald in treuer Hand. Verlag H.R. Sauerländer & Co., Aarau, 327 p.
- BENGUEREL, P. 1998: Burgers Daten. Bericht zu einem Forschungspraktikum, unveröffentlicht.
- BRASSEL, P., BRÄNDLI U.-B. 1999: Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnisse der Zweitenaufnahme 1993–1995. Hrsg. WSL und BUWAL, Verlag Paul Haupt, Bern, 442 p.
- BRETSCHER, I. 2002: Präferenzielles Fliessen in einem Pseudogley. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 99 p., unveröffentlicht.
- BURGER, H. 1922: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitt. Schweiz. Central-anst. forstl. Vers'wes. XIII. Band, 1. Heft: 3–221.
- BURGER, H. 1927: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. II. Mitteilung: Einfluss der Durchforstung auf die physikalischen Eigenschaften der Waldböden. Mitt. Schweiz. Centralanst. forstl. Vers'wes. XIV. Band, 2. Heft: 201–250.
- BURGER, H. 1929: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. III. Mitteilung: Aufforstungen, Eigenschaften der Böden und Hochwasser. Mitt. Schweiz. Centralanst. forstl. Vers'wes. XV. Band, 1. Heft: 51–104.
- BURGER, H. 1929: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. IV. Mitteilung: Ferienlager und Waldboden. Mitt. Schweiz. Centralanst. forstl. Vers'wes. XVII. Band, 2. Heft: 299–322.
- BURGER, H. 1934: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer, II. Mitteilung: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1915/16 bis 1926/27. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XVIII. Band, 2. Heft: 310–416.
- BURGER, H. 1937: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. V. Mitteilung: Entwässerungen und Aufforstungen. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XX. Band, 1. Heft: 5–100.
- BURGER, H. 1940: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. VI. Mitteilung: Der Wald als Erholungsstätte und der Waldboden. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XXI. Band, 2. Heft: 223–249.
- BURGER, H. 1943: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer, III. Mitteilung: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1927/28 bis 1941/42. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XXIII. Band, 1. Heft: 167–222.
- BURGER, H. 1945: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer, IV. Mitteilung: Der Wasserhaushalt im Valle di Melera von 1934/35 bis 1943/44. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XXIV. Band, 1. Heft: 133–218.

- BURGER, H. 1954: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer, V. Mitteilung: Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben von 1942/43 bis 1951/52. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XXXI. Band, 1. Heft: 9–58.
- BURGER, H. 1955: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer, VI. Mitteilung: Der Wasserhaushalt im Valle di Melera von 1944/45 bis 1953/54. Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. XXXI. Band, 2. Heft: 493–555.
- CARIZZONI, M. 2002: Bestimmung des Infiltrationsverhaltens und der Wasserspeicherkapazität der Böden einer Aufforstung und einer Grasfläche mittels TDR-Sonden. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 49 p., unveröffentlicht.
- DOBMANN, J. 2002: Untersuchungen der Abflussbildungsprozesse mittels Beregnungsversuchen im Baachli und Fulwasser, Spissibach, Leissigen. Diplomarbeit, Geographisches Institut (Publ. Gewässerkunde Nr. 279), 137 p., Bern.
- ELLENBERG, H., KLÖTZLI, F. 1972: Waldgesellschaften und Waldstandorte in der Schweiz. Mitt. eidg. Anst. forstl. Vers'wes. 48 (4): 589–930.
- ENGLER, A. 1919: Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitt. eidg. Anst. forstl. Vers'wes. XII. Band: 1–626.
- FLÜHLER, H. 1973: Sauerstoffdiffusion im Boden. Mitt. eidg. Anst. forstl. Vers'wes. 49(2): 125–250
- GERBER, B. 1989: Waldflächenveränderungen und Hochwasserbedrohungen im Einzugsgebiet der Emme. *Geographica Bernensia* G33, 99 p.
- GERMANN, P. 1994: Do forests control run-off? Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 35: 105–110
- GERMANN , P. 1999: Makroporen und präferenzielle Sickerung. Kapitel 2.7.1 In: H.-P. Blume, Felix-Henningsen, P., Fischer, W. R., Frede, H.-G., Horn, R., Stahr, K., Hrsg. Handbuch der Bodenkunde, 6. Ergänzungslieferung 7/99, ecomed, 1–14.
- GERMANN, P., BEVEN, K. 1981: Water flow in soil macropores. III. A statistical approach. *J. of Soil Sci.* 32:31–39.
- GERMANN, P., BÜRGI, T. 1996: Kinematischer Ansatz zur in-situ Erfassung des Makroporenflusses während Infiltrationen. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 37: 221–226.
- GERMANN, P., JÄGGI, E., NIGGLI, T. 2002: Rate, kinetic energy and momentum of preferential flow estimated from in-situ water content measurements. *Europ. J. Soil Sci.* 53 (4): 607–618.
- GERTSCH, E. 2000: Aufforstungsprojekt Abbach, Gemeinde Grindelwald. Bericht zum Seminar über Aufforstungen am Geographischen Institut der Universität Bern, unveröffentlicht.
- GOTTHELF, J. 1838: Die Wassernot im Emmental. In: Hunziker, R., Blösch H., Hrsg. 1925: Jeremias Gotthelf (Albert Bitzius). Sämtliche Werke in 24 Bänden, Bd. 15, Erlenbach-Zürich.
- GREBNER, D., ROESCH, T. 1998: Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte in der Schweiz. Geographisches Institut der ETH, Zürich.
- HELBLING, A. 2002: Infiltrationsverhalten, Speichervermögen und Grobporenanteil der Böden verschiedener Waldstandorte. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 55 p., unveröffentlicht.
- HERSCHY, R.W., FAIRBRIDGE, R.W. 1999: Encyclopedia of Hydrology and Water Resources. Dordrecht.
- HOFER, TH. 1998: Floods in Bangladesh – A Highland-Lowland Interaction? *Geographica Bernensia* G48, Bern.
- HOFER, TH., WEINGARTNER, R. et al. 1996: Zur Komplexität der Überschwemmungen in Bangladesh. In: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern, Bd. 59: 37–48, Bern.
- HUNZIKER, R., BLÖSCH, H., Hrsg. 1925: Jeremias Gotthelf (Albert Bitzius). Sämtliche Werke in 24 Bänden, Bd. 15, Erlenbach-Zürich.
- HUNZIKER, S. 2000: Aufforstungsprojekte. Bericht zum Seminar über Aufforstungen am Geographischen Institut der Universität Bern, unveröffentlicht.
- JÄGGI, E. 2001: Strukturverbesserung eines verdichteten Bodens mit Chinaschilf (*Mescanthus sinensis*). Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 77 p., unveröffentlicht.
- JUNGO, J. 1941: Fünfzig Jahre Aufforstungen in den Tälern der Aergera, des Höllbachs und der Sense. *Bulletin de la société fribourgeoise des sciences naturelles*, 35: 114–128.
- KÖLBLING, D. 1998: Aufforstungsprojekte Schattwald und Meierisligraben. Bericht zum Seminar über Aufforstungen am Geographischen Institut der Universität Bern, unveröffentlicht.
- KOPEZKY, J. 1914: Die physikalischen Eigenschaften des Bodens. 2. Auflage, 1914.
- KÜCHLI, CH. 1990: Geschichten aus dem Bernerwald. Forstdirektion des Kantons Bern, 40 p.
- LÜSCHER, P. 2002: Wald schützt nicht immer vor Hochwasser., Inf. Forsch.bereich Wald 9: 1–2.

- MARTI, P. 2002: Niederschlag und Abfluss im Sperbelgraben: Untersuchungen zum Einfluss der Lothar-Sturm-schäden auf den Wasserhaushalt. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (Publ. Gewässerkunde Nr. 278), 99 p., Bern.
- MICHEL, A. 1998: Aufforstungsprojekt Traubach, Kreisforstamt Interlaken, Habkern 1933. Bericht zum Seminar über Aufforstungen am Geographischen Institut der Universität Bern, unveröffentlicht.
- MÜLLER, U. 1990: Schutzwaldaufforstungen des Staates Freiburg im Senseoberland. Kantonsforstamt Freiburg, 258 p.
- NIGGLI, T. 1998: Vergleich des Porensystems unterschiedlich bewirtschafteter Landwirtschaftsböden. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 79 p., unveröffentlicht.
- PFISTER, CH. 1999: Wetternachhersage. Verlag Paul Haupt, Bern, 304 p.
- PFISTER, CH., BRÄNDLI, D. 1999: Rodungen im Gebirge – Überschwemmungen im Vorland: Ein Deutungs-muster macht Karriere. In: Sieferle R.P., Breuninger, H., Hrsg. Natur-Bilder – Wahrnehmungen von Natur und Umwelt in der Geschichte. Campus-Verlag, Frankfurt / New York, 297–323.
- PFISTER, F., WALTER, H., ERNI, V., CANDRIAN, M. 1987: Walderhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet. Bericht 294, Eidg. Anst. f.d. forstl. Vers'wes.
- REIST, T. 2002: «Die Emmenschlange ist losgebrochen [...]». Simulation des historischen Hochwassers vom 13. August 1837 im Rötenbach i. E. Diplomarbeit, Geographisches Institut (Publ. Gewässerkunde Nr. 271), 104 p., Bern.
- REIST, T., WEINGARTNER, R., GURTZ, J. 2002: Neue Wege bei der Beschreibung alter Hochwasser – «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». In: Wasser und Boden, 54. Jahrgang, Heft 10, Berlin.
- SCHILLER, F. 1804: Willhelm Tell. In: Deutsche Schillergesellschaft, Hrsg. 1959: Schiller – Dramen und Gedichte. E. Schreiber, Graphische Kunstanstalten, Stuttgart, 1228 p.
- SCHREIER, H., WYMAN, S. 1996: Understanding Himalayan Porcesses: Shedding Light on the Dilemma. In: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern, Bd. 59: 75–83, Bern.
- SCHULLA, J. 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, Heft 6, Zürich.
- SCHÜTZ, P. 2000: Erfassung der Grobporenstruktur in Ackerböden mittels horizontal und diagonal einge-bauter TDR-Sonden. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 62 p., unveröffentlicht.
- SHAH, P.B. et al. 1995: Decisions for the future – Addressing Resource Issues in the Middle Mountains of Nepal. CD-ROM, University of British Columbia, Vancouver.
- SIEBER, S. 2002: Beregnungsversuche im Sperbelgraben: Folgen des Sturms «Lothar» auf den Bodenwas-serhaushalt. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 62 p., unveröffentlicht.
- STUBER, M., BÜRGI, M. 2001: Agrarische Waldnutzungen in der Schweiz 1800–1950. Waldweide, Waldheu, Nadel- und Laubfutter. Schweiz. Z. Forstwes. 152(12): 490–508.
- STUBER, M., BÜRGI, M. 2002: Agrarische Waldnutzungen in der Schweiz 1800–1950. Nadel- und Laubstreue. Schweiz. Z. Forstwes. 153(10): 397–410.
- VIVIROLI, D. 2001: Zur hydrologischen Bedeutung der Gebirge. Diplomarbeit, Geographisches Institut (Publikation Gewässerkunde Nr. 265), 118 p., Bern.
- WEINGARTNER, R. 1999: Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz – Nr. 37, Bern.
- WIGGER, H. 2002: Typisierung von Infiltrationsdaten. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 81 p., unveröffentlicht.
- XXII CANTONE 1821: Das Linththal, wie es war, und wie es jetzt ist oder: Die Entsumpfung des Linththals, ein Denkmal schweizerischen Gemeinsinns und Vaterlandsliebe, Dritte Auflage. In: Hans Konrad Escher von der Linth-Gesellschaft, Hrsg. 1993: Das Linthwerk – ein Stück Schweiz. glarus satz und druck ag, Glarus, 145 p.
- ZIMMERMANN, M. 2001: Vergleich der Bodenstruktur unter Direktsaat und Pfluganbau mittels diagonal und horizontal eingebauten TDR-Sonden. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern, 121 p., unveröffentlicht.

#### Adresse der Autoren

Prof. Dr. Peter Germann, PD Dr. Rolf Weingartner, Geographisches Institut der Universität Bern,  
Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

