

Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Konzepte und erste Ergebnisse aus Untersuchungen in den Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee) und Spissibach (Leissigen)

Rolf Weingartner, Hans Kienholz

Abstract

Sensitivity of torrent systems. Concepts and first results of investigations in two Swiss test areas

Torrents are very sensitive to changes in climatic and environmental conditions. In this paper, the background and the basis of a project which analyses the hydrological and geomorphological processes in this type of watersheds are discussed. The two test areas, Spissibach at Leissigen (Berne) and Rotenbach at Schwarzsee (Freiburg), are described and first results of the hydrological and geomorphological investigations are presented: The significance of the storage conditions for flood generation are studied with the BROOK-model. The so-called topindex of the TOPMODEL allows a physically significant spatial differentiation of the contribution areas.

Keywords: torrents, climate change, hydrological and geomorphological processes, models

1 Einleitung

Hans M. Keller führte uns, eine Gruppe des Geographischen Instituts der Universität Bern, am 14. September 1992 in «sein» Testgebiet Erlenbach im schwyzerischen Alptal. Die Exkursion bildete den Auftakt zu unserer Projektzusammenarbeit im Rahmen des NFP-31-Projektes «Sensitivität von Wildbachsystemen». Dank des anhaltenden Regens, dem wir durch die engagierte und humorvolle Leitung von Hans Keller mit Leichtigkeit trotzten, gewannen wir interessante Einblicke in die ablaufenden hydrologischen und geomorphologischen Prozesse; es zeigte sich einmal mehr, dass Hydrologie und Geomorphologie vor allem im Gelände stattfinden, dass Geländebeobachtungen von unschätzbarem Wert sind. Am Tag nach der Exkursion schick-

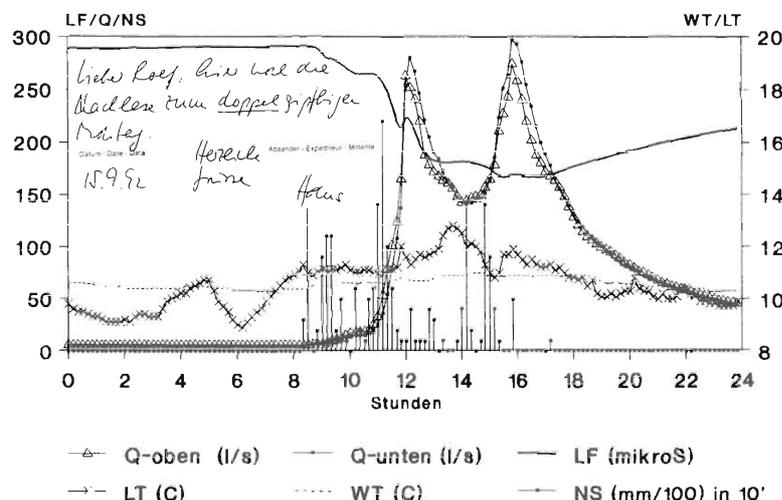


Abb. 1. Ein zweigipfliges Hochwasserereignis im Erlenbach (Alptal).

Q Abflussmenge
 LF elektrische Leitfähigkeit
 LT Lufttemperatur
 WT Wassertemperatur
 NS Niederschlag

te uns Hans Keller bereits die Messergebnisse des verregneten Exkursionstages mit der zweigipfligen Hochwasserwelle: Abbildung 1 verdeutlicht die Bedeutung eines umfassenden Monitorings für ein vertieftes Prozessverständnis. Beobachtungen im Gelände und langfristige Messungen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sind die Grundvoraussetzungen, um ein hydrologisch-geomorphologisches System zu verstehen und zu modellieren. Hans Keller hat uns mit seinen Untersuchungen den Weg dazu aufgezeigt!

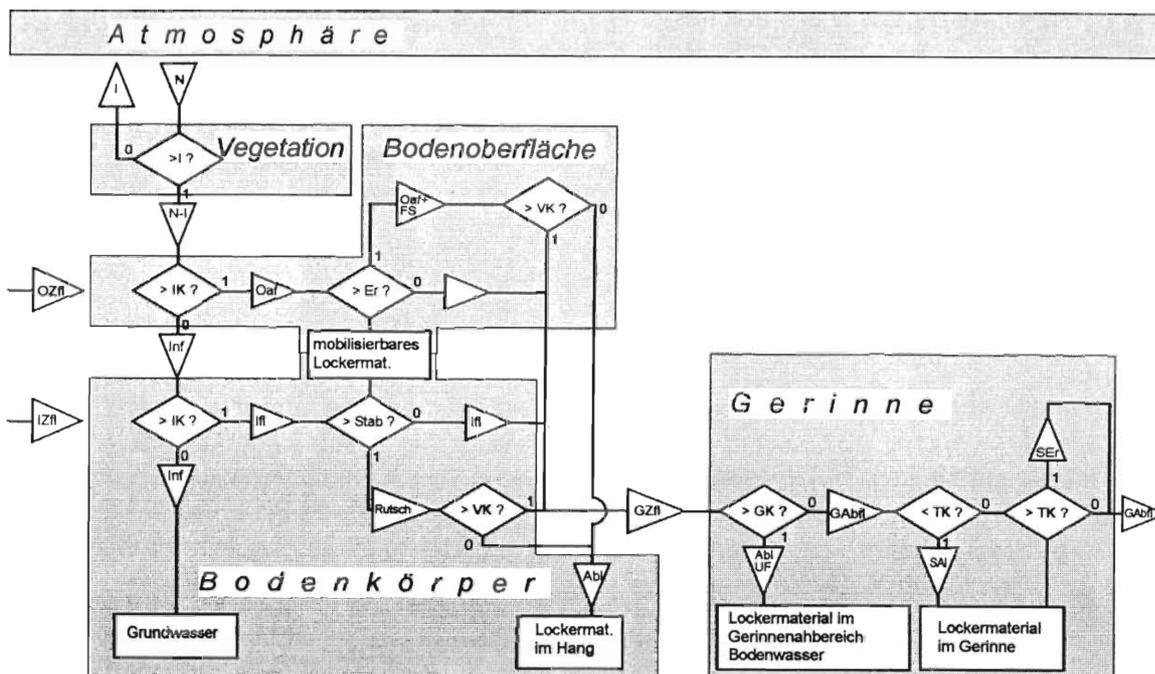
2 Das Projekt «Sensitivität von Wildbachsystemen»

«Wildbäche sind oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung» (DIN 19663 S.3). Hinter dieser knappen Definition verbirgt sich die Tatsache, dass der Charakter von Wildbächen durch Einflussfaktoren wie Relief, Geologie, Hydrogeologie, Bodenverhältnisse, Vegetation und Niederschlag bestimmt wird, und dass sich hier unterschiedliche Einzelprozesse in zeitlichem und räumlichem Wechsel abspielen. Beispielsweise kann bei den Prozessen in Gerinnen grob zwischen Reinwasserabfluss, Abfluss mit Geschiebeführung und Murgängen unterschieden werden (vgl. GHO 1982).

Jüngste Katastrophen wie im Puschlav (Val Varuna, 1987) oder in Brig (Saltina, 1993) zeigen, dass Wildbäche eine wesentliche Bedrohung des menschlichen Lebensraumes darstellen können. Wildbäche bildeten schon immer eine grosse Gefährdung der menschlichen Existenz in den Alpentälern, wie zahlreiche historische Dokumente, Beschreibungen und Sagen belegen. Umfassend und aufschlussreich ist der Bericht von CULMANN (1864) «...an den Hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweizerischen Wildbäche». In dieser Studie wurden die wichtigsten Wildbäche und Gebirgsflüsse inventarisiert und Massnahmen zu ihrer Verbauung vorgeschlagen. Sie zeigt, dass den Risiken, die von Wildbächen ausgehen, schon im letzten Jahrhundert grosse Beachtung geschenkt wurde.

Über den Stand der Wildbachforschung orientiert eine Vorstudie zum Nationalen Forschungsprogramm 31 (KIENHOLZ und HEGG 1992): Die Wildbachforschung ist stark auf die Fachpraxis ausgerichtet, die mit der Prävention und Bekämpfung von Naturgefahren betraut ist. Sie konzentriert sich in vielen Fällen nur auf wichtige Teilaspekte. Dies führt zu einem unterschiedlichen Wissensstand in den verschiedenen für den Charakter eines Wildbaches massgeblichen Bereichen. Eher selten sind Arbeiten, die Wildbachsysteme als Ganzes behandeln. Die Vernachlässigung der Wildbachsysteme in der hydrologischen und geomorphologischen Forschung hängt nicht zuletzt mit den Schwierigkeiten bei der Messung der relevanten Prozesse zusammen. Instrumentierungen sind wegen der ausgeprägten Hochwasserspitzen («flash floods»), des abschnittsweise schiessenden Abflusses, des extrem instationären Geschiebetransports, der Murgänge und Bettumlagerungen aufwendig und kostspielig.

Die komplexen und oft nicht-linearen Vorgänge in Wildbächen sind modellmässig bisher nur in Ansätzen erfassbar. Effiziente Prävention und ökologisch angepasste Strategien zur Schadensminderung erfordern deshalb ein besseres Verständnis der Prozesse. Neben der Analyse möglicher Prozessabläufe sind auch vertiefte Kenntnisse der entscheidenden Kausalketten notwendig. Auch wenn sich die Kausalketten nach einer Katastrophe jeweils teilweise rekonstruieren lassen, so werden viele Prozesse nur zum Teil verstanden. Bei einer genauen Analyse stösst man immer wieder auf nicht-lineare Übergänge, auf stochastische Prozesse und auf Schwellenwerte, deren Überschreitung zu einem oftmals sprunghaften Verhalten des Systems oder zu positiven Rückkoppelungsmechanismen führen kann. Allgemein kann festgestellt werden, dass während eines Hochwasserereignisses die abflussvermehrenden und abflussbeschleunigenden Mechanismen zunehmen (GUTKNECHT 1994) und dass damit die Vorgänge der Erosion, der Geschiebeverlagerung verstärkt werden und auch Übergänge von fluvialen Geschiebetransport in Murgänge zu beobachten sind.



Flüsse

- N: Niederschlag
- I: Interzeption
- N-I: Niederschlag-Interzeption
- Inf: Infiltration
- Oaf: Oberflächenabfluss
- lff: Interflow
- Oaf+FS: Oberflächenabfluss mit Feststoff (Erosion durch Spülung)
- Rutsch: Rutschungsprozesse
- Abl: Ablagerung
- Gzfl: Gerinnezufluss aus der Fläche
- Abl UF: Ablagerung und Überflutung

- Gabfl: Abfluss im Gerinne
- SER: Sohlenerosion
- SAI: Ablagerung im Gerinne (Auflandung)

Regler

- I: Interzeption
- IK: Infiltrationskapazität
- Er: Erodierbarkeit
- Stab: Stabilität des Lockermaterials
- VK: Verlagerungskapazität im Hang (Hangneigung, Rauigkeit)
- GK: Gerinnekapazität (Durchflusskapazität)
- TK: Transportkapazität im Gerinne

Abb. 2. Prozess-System Wildbach: ein Gesamtmodell als Leitlinie für Forschungsarbeiten (Entwurf: P. Mani, R. Weingartner, H. Kienholz).

Tab. 1. Hydrologische Kennwerte des Rotenbachs.

| Kenngrösse | Wert | Quelle |
|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| mittlerer Jahresabfluss (1971–1979) | 85 l/s | LHG |
| mittlere Jahresabflusshöhe (1971–1979) | 1617 mm | LHG |
| Gebietsniederschlag, unkor. (1971–1979) | 1841 mm | LHG |
| Verdunstung | 224 mm | Wasserbilanz |
| jährlicher Abflusskoeffizient | 0,88 | Wasserbilanz |
| Abflussregime | nival de transition | ASCHWANDEN UND WEINGARTNER (1992) |
| HQ2,33 | ~4,8 m³/s; ~2,9 m³/s km² | LHG (1991) |
| HQ50 | ~11,5 m³/s; ~6,9 m³/s km² | LHG (1991) |
| HQ100 | ~14 m³/s; ~8,4 m³/s km² | LHG (1991) |
| Niederschlagsintensität 1 Std., 2,33 Jahre | 21 mm/h | GEIGER et al. (1992) |
| Niederschlagsintensität 1 Std., 100 Jahre | 46 mm/h | GEIGER et al. (1992) |
| Niederschlagsintensität 24 Std., 2,33 Jahre | 2,3 mm/h | GEIGER et al. (1992) |
| Niederschlagsintensität 24 Std., 100 Jahre | 5,5 mm/h | GEIGER et al. (1992) |

Kleinste Störungen können in Wildbächen überproportionale Wirkungen hervorrufen und wiederholte Störungen können sich potenzieren, wie ÜBLÄGGER (1988) darlegt: «Die nichtlineare Dynamik ... mahnt uns zu besonderer Vorsicht. Bei ihr entscheidet nicht nur das Ausmass der Störung über ihre Wirkung, sondern mehr noch Ort und Zeitpunkt ihres Angriffes auf das Beziehungsgefüge. Auch die kleinste Ursache kann durch Aufschaukelung zum Zusammenbruch des Systems führen.» Wildbäche reagieren also besonders empfindlich auf Klima- und Umweltveränderungen. Deshalb steht für die Autoren die folgende übergeordnete Frage im Vordergrund: Wie reagieren hydrologische und geomorphologische Prozesse in Wildbacheinzugsgebieten auf Umwelt- und Klimaveränderungen? Das heisst:

- Wie reagieren die Prozesse der Abflussbildung unter verschiedenen Vorbedingungen auf Veränderungen im Niederschlagsgeschehen und in der Gebietsausstattung?
- Wie reagieren die Prozesse der Feststoffmobilisierung und der Feststofflieferung vom Hang *ins* Gerinne und des Feststofftransportes *im* Gerinne in charakteristischen Hangsystemen auf Veränderungen im Niederschlagsgeschehen und in der Gebietsausstattung?

Weil sich auch Umwelt- und Klimaveränderungen angesichts unseres kurzen Erfahrungszeitraumes nur schwer und zum Teil nur indirekt fassen lassen (Modellrechnungen, Proxidata), ist es unmöglich, bereits heute präzise Aussagen über die Auswirkungen solcher Umwelt- und Klimaveränderungen auf Wildbachsysteme zu machen. Hingegen scheint es möglich, geeignete Teilmodelle zu entwickeln und diese so zu verknüpfen, dass sich Aussagen zur Sensitivität von Wildbachsystemen ableiten lassen. Voraussetzungen dazu sind

- a) ein hypothetisches Gesamtmodell, das gezielt auf eine synoptische Betrachtung der Wasser- und Feststoffflüsse ausgerichtet ist und als Leitlinie für die Forschungsarbeiten dient (Abb. 2) und
- b) umfassende Beobachtungen und Messungen der einzelnen Vorgänge: Im Rahmen der von den Autoren dieses Aufsatzes betreuten Untersuchungen werden einerseits bestehende langjährige Datengrundlagen aus dem WSL-Testeinzugsgebiet Rotenbach (Schwarzsee, Kanton Freiburg) ausgewertet. Andererseits soll mit intensiven Feldforschungen im Spissibach (Leissigen, Kanton Bern) das Prozessverständnis erweitert und vertieft werden, um schliesslich zur Entwicklung und Anwendung von Modellen überzugehen, welche es erlauben, die Wasser- und Feststoffflüsse zu beschreiben. Neben zahlreichen methodischen Detailproblemen ist im besonderen die Schwierigkeit zu erwähnen, dass Modelle selten unter extremen Bedingungen, für die sie letztlich gedacht sind, überprüft werden können. Allein schon dies zeigt, dass solche Untersuchungen grundsätzlich langfristig anzulegen sind.

3 Die Testgebiete Rotenbach und Spissibach

Die Teileinzugsgebiete des Rotenbachs und des Spissibachs sind naturräumlich wie nutzungsmässig unterschiedlich beschaffen und bieten sich deshalb an, hydrologisch-geomorphologische Prozesse unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu studieren. Wie alle hydrologischen Systeme weisen sie den entscheidenden Vorteil auf, dass die Systemantwort am Ausgang räumlich integral erfasst werden kann. Aus der schematischen Darstellung des Messkonzeptes in Abbildung 3 geht hervor, dass die Prozesse in verschiedenen Massstabsebenen untersucht werden. Auf der untersten Ebene der Raumeinheiten werden die Prozesse in repräsentativen Kleinstzeugsgebieten studiert. Hier sind detaillierte Analysen im Sinne der Abbildung 2 möglich.

Rotenbach: Für das Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs liegen Abfluss- und Niederschlagsmessreihen seit Mitte der 1950er Jahre vor. Das Einzugsgebiet mit einer Fläche von 1,66 km² und einer mittleren Höhe von 1455 m über Meer liegt im Wildflysch der Gurnigelzone.

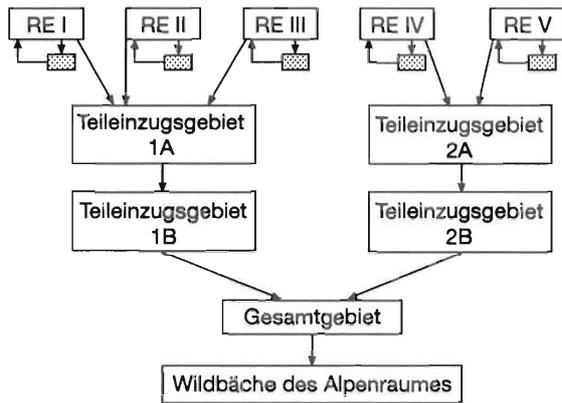


Abb. 3. Räumliches Messkonzept im Spissibach (RE: Raumeinheit).

Der Rotenbach gehört zu den nordalpinen Einzugsgebieten mit den höchsten Hochwasserspenden (ASF 1974). Auffallend ist die nach der Wasserbilanz berechnete sehr kleine Gebietsverdunstung von nur 224 mm. Auch unter Berücksichtigung des systematischen Niederschlagsmessfehlers, der nach SEVRUK und KIRCHHOFER (1992) hier 10 bis 15% beträgt, ist der Verdunstungswert im Vergleich mit anderen Gebieten nach wie vor sehr klein. Er unterstreicht die sehr hohe Abflussbereitschaft des Gebietes (vgl. Abflusskoeffizient in Tab. 1).

Spissibach: Mit dem Untersuchungsgebiet des Geographischen Instituts der Universität Bern in Leissigen wird ein messtechnisch sehr schwieriges, geologisch heterogenes und geomorphologisch instabiles Gelände erschlossen (KIENHOLZ *et al.* 1994). Der grössere Teil des Spissibach-Einzugsgebietes umfasst eozäne Globigerinenmergel (süd- bis ultrahelvetische Zone), die sich anhand der darin enthaltenen Sandstein- und Kalkeinlagerungen in einzelne Schuppen oder Gesteinspakete unterteilen lassen (HUNZIKER 1992). Das dichte Gerinne- und Runsennetz weist auf generell eher schlecht durchlässige Böden und grossen Oberflächenabfluss hin. Dieser Eindruck wird durch die zahlreichen vernässten Flächen und durch die Drainagen in den alpwirtschaftlich genutzten Gebieten gestützt. Die konvektiven Starkniederschläge, die hier im Übergangsbereich zu den Hochalpen häufig auftreten, sowie die Nordexposition des Einzugsgebietes, das direkt den aus NW anströmenden Luftmassen ausgesetzt ist, verstärken die abflussfördernden Faktoren des Einzugsgebietes (vgl. Tab. 2).

Tab. 2. Gebietskennwerte des Spissibachs.

| Kenngrösse | Wert | Quelle |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| Höhenlage: Morgenberghorn Leissigen (Thunersee) | 2249 m 558 m | |
| mittlere Neigung | 28° | |
| Fläche | 2,6 km ² | |
| Bodenbedeckung: Wald Weide, Wiese | 45 % 43 % | |
| Gerinnedichte | 2,2 km/km ² | PERLIK (1993) |
| Jahresniederschlag Interlaken | 1213 mm | SMA |
| Starkniederschlag: 2,33 a, 1 Std. Dauer 2,33 a, 24 Std. Dauer 100 a, 1 Std. Dauer 100 a, 24 Std. Dauer | 21 mm/h 2,4 mm/h 56 mm/h 5,1 mm/h | GEIGER <i>et al.</i> (1992) |

4 Ergebnisse

4.1 Input-Output-Analysen bei grossen Hochwasserereignissen im Rotenbach

In einer ersten Annäherung an die Problemstellung «Sensitivität» untersuchte BARBEN (1993) im Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs bei Schwarzsee (Kanton Freiburg), ob die grössten Hochwasser mit den verfügbaren Daten zum hydrologischen Gebietszustand und zum auslösenden Niederschlag differenziert werden können. Im Zusammenhang mit Fragen der Klimaänderung sind solche Analysen von grundlegender Bedeutung, denn Klimaänderungen wirken sich nicht nur direkt – etwa durch eine Veränderung der Niederschlagscharakteristik – auf das Hochwassergeschehen aus, sondern auch indirekt über den hydrologischen Gebietszustand, der von der Vorgeschichte eines Ereignisses entscheidend beeinflusst wird.

Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wurden nur Hochwasserereignisse der Periode 1974 bis 1991 berücksichtigt. Als grosse Ereignisse werden hier Hochwasserabflüsse mit Abflussspitzen grösser 3000 l/s (1800 l/s km², Wiederkehrperiode $\geq 0,5$ Jahre) verstanden. Um den komplexen Einfluss der Schneeschmelze auf den Hochwasserabfluss auszuschliessen, wurden nur Hochwasser aus dem Zeitraum Juni bis Oktober analysiert. Jedes Ereignis wird mit verschiedenen Kenngrössen zum Gebietszustand, zum auslösenden Niederschlag und zur Hochwasserganglinie beschrieben:

Abfluss: Abflussspitze [Q_{\max}], Anstiegszeit der Ganglinie bis Q_{\max} [t_a], Schwerpunkt der Abflussganglinie [t_{AS}], Abflussbeiwert [α],

Niederschlag: maximale Niederschlagsintensität [I_{\max}], Zeit vom Regenbeginn bis I_{\max} [t_{int}], Schwerpunkt der Niederschlagsganglinie [t_{NS}], Dauer des Niederschlagsereignisses [t_d],

Gebietszustand: Vorregenindex [VN_{30}], Basisabfluss [Q_{bas}].

Wie STREIT (1973) zeigt, kann eine eingipflige Hochwasserganglinie mit der Pearson-III-Verteilung unter Verwendung der Parameter Q_{\max} , t_a und t_{AS} genügend genau beschrieben werden. Diese drei Kennwerte wurden deshalb verwendet, um die rund fünfzig grössten Hochwasserereignisse des Rotenbachs mittels einer Cluster-Analyse zu klassieren (Abb. 4).

Abfluss Q [m³/s]

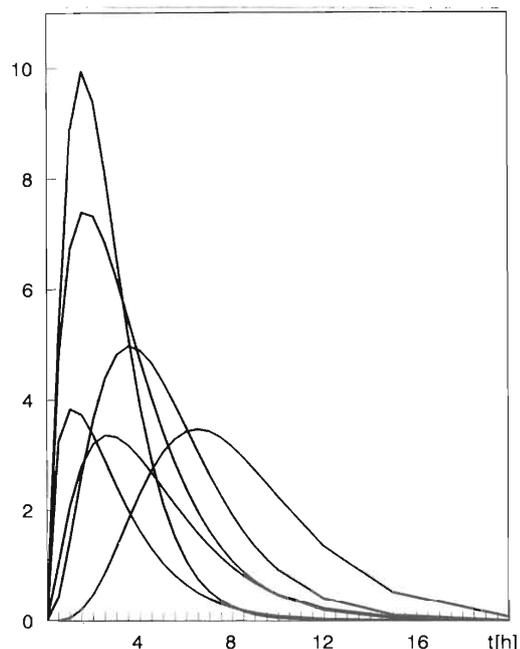


Abb. 4. Charakteristische Ganglinien der grössten Hochwasserereignisse im Rotenbach (aus BARBEN 1993).

Zur Aufdeckung signifikanter Zusammenhänge zwischen den hydrologischen Kenngrössen wurde die Korrelationsanalyse eingesetzt:

- *Niederschlag/Abfluss*: Einzig zwischen den Schwerpunkten der Niederschlags- und der Abflussganglinie konnten signifikante positive Zusammenhänge gefunden werden. Das heisst, dass sich nur der Schwerpunkt der Hochwasserganglinie aus den Niederschlagsdaten abschätzen lässt. Dieser Schwerpunkt ist zwar für die Charakterisierung einer Abflussganglinie sehr wichtig; er genügt aber nicht, um ein Ereignis befriedigend zu beschreiben.
- Zwischen *Vorregenindex und Hochwasserabfluss* wurden keine signifikanten Abhängigkeiten festgestellt. Der Vorregenindex genügt als Indexgrösse zur Beschreibung des Gebietszustandes nicht; er widerspiegelt nur die Niederschlagsverhältnisse in den Tagen vor dem Hochwasserereignis; die Bodenfeuchteverhältnisse hingegen, die für die Abflussbildung von entscheidender Bedeutung sind, werden nur ungenügend erfasst. So können zu einem gleichen Vorregenindex im Frühjahr und im Sommer grundsätzlich verschiedene Bodenfeuchtebedingungen gehören.

Deutliche *saisonale Schwankungen* zeigen beim Abfluss der Parameter t_{AS} (Schwerpunkt), beim Niederschlag die Parameter t_{NS} (Schwerpunkt) und t_{int} (Zeit bis zur maximalen Niederschlagsintensität). Die Variationen dieser Parameter können mit der zeitlichen Häufigkeit einzelner Wetterlagen gut erklärt werden. Beim Niederschlagsgeschehen dominieren im Frühling und Herbst die advektiven, im Sommer die konvektiven Lagen (SCHÜEPP 1979). Im Hochsommer sind die Niederschläge deshalb in der Regel kürzer; hohe Niederschlagsintensitäten werden schneller erreicht. Entsprechend unterscheiden sich die sommerlichen Schwerpunktzeiten der Niederschlags- und der Abflussganglinie.

Diese Ergebnisse decken sich weitgehend mit den Resultaten anderer Untersuchungen (z.B. NAEF *et al.* 1985). Sie verdeutlichen, dass die konventionell verfügbaren Daten zum Verständnis der Hochwasserprozesse nicht genügen, und dass die traditionellen Ansätze der Hochwassermodellierung auch in Wildbacheinzugsgebieten weitgehend revidiert werden müssen (vgl. LEFORT und MEUNIER 1993; NAEF 1992). So meint VISCHER (zit. in NAEF 1992): «Vor 20 Jahren wusste ich besser, was ein 100jähriges Hochwasser ist.» Ansätze wie das Hortonsche Infiltrationsschema oder die Linearität der Niederschlags-Abfluss-Beziehung sind zwar physikalisch begründet, erweisen sich aber als zu stark vereinfachend. Untersuchungen zur räumlich-zeitlichen Variabilität des Abflussbeiwertes zeigen, dass wir entscheidende hydrologische Prozesse nicht verstehen; eine Aussage wie «Es stellt sich deshalb die Frage, ob der Abflusskoeffizient bei der Abflussschätzung nicht als Zufallszahl mit einer gewissen Verteilung behandelt werden muss» (NAEF 1993) verdeutlicht, dass detaillierte Prozessforschungen im Gelände dringend notwendig sind.

4.2 Analyse der hochwasserrelevanten Speicher im Rotenbach mit Hilfe des BROOK-Modells

Neben der Prozessforschung im Spissibach wird die Frage der (hydrologischen) Sensitivität – vorerst am Beispiel des Rotenbachs – auch modellmässig angegangen:

- Mit Hilfe des BROOK-Modells (FEDERER und LASH 1983) sollen die hochwasserrelevanten Speicher und damit der hydrologische Gebietszustand in ihrer Bedeutung für den Hochwasserabfluss räumlich-zeitlich differenziert betrachtet werden, um in einem Folgeschritt szenarienhaft zu untersuchen, wie sich Klima- und Umweltveränderungen auf diese Speicher und damit auch auf das Hochwassergeschehen auswirken könnten (BARBEN 1994).
- Mit dem TOPMODEL (BEVEN *et al.* 1994) lassen sich Hochwasserereignisse in hoher zeitlicher Auflösung modellieren und die Auswirkungen von Veränderungen im Niederschlagsinput und/oder in den Bodeneigenschaften simulieren (MANI 1993, vgl. Kap. 4.3).

Mit dem konzeptionellen Wasserhaushalts-Simulationsmodell BROOK werden die wichtigsten hydrologischen Prozesse im Tagesschritt physikalisch nachvollziehbar abgebildet. Tagesniederschläge und Tagesmitteltemperaturen bilden den Modellinput. Das Gebiet wurde durch eine Reihe physikalisch begründeter Gebietskenngrößen parametrisiert. Für den Rotenbach liegt ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 5 m und eine detaillierte Bodenkarte vor. Darauf basierend wurden mit den Kriterien «Bodentyp», «Exposition» und «Wald/Weide» dreizehn «homogene» Raumtypen unterschieden. Jeder Raumtyp besteht in der Regel aus mehreren räumlich nicht zusammenhängenden Einheiten. Die täglichen Bilanzwerte des Rotenbachs werden flächengewichtet aus den Bilanzen dieser Einheiten berechnet.

Die Erfahrungen in anderen schweizerischen Einzugsgebieten zeigen, dass die relevanten Speicher – Schneedecke, Wurzelzone, ungesättigte Bodenzone unterhalb der Wurzelzone und Grundwasser – mit dem BROOK-Modell gut modelliert werden können (FORSTER 1992). Im Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten mittleren Tagesabflüssen in Abbildung 5 kann die Tauglichkeit des Modells für das Wildbacheinzugsgebiet Rotenbach grundsätzlich demonstriert werden.

Wie ein erstes Auswertungsbeispiel verdeutlicht, verhalten sich die einzelnen hochwasserrelevanten Speicher völlig verschieden: Die grössten Schwankungen treten im Bereich der Wurzelzone auf, die bis in eine Tiefe von 30 bis 50 cm reicht. Sie werden durch den Niederschlag und durch die Evapotranspiration verursacht. In der ungesättigten Bodenzone unterhalb der Wurzelzone treten unwesentliche Variationen auf. Diese Ergebnisse der Modellberechnungen decken sich mit Beobachtungen an Lysimetern (GERMANN 1981). Bei einer abschliessenden Beurteilung der Schwankungen müssten auch die Durchlässigkeiten der Böden mitberücksichtigt werden.

Aus dem Wassergehalt bzw. dem Wassersättigungsdefizit der Wurzelzone lässt sich das Hochwassergeschehen besser beurteilen. Im «Hochwasserjahr 1987» überschritten die Niederschlagssummen der Monate März, Mai, Juni und Juli die langjährigen Mittel zum Teil beträchtlich und führten nur zu geringen Wassersättigungsdefiziten (BARBEN 1994). Häufige und grosse Hochwasser waren die Folge (Abb. 5). Typische Tagesbilanzen aus dieser Periode enthält Tabelle 3. Sie zeigen gemäss den Modellrechnungen, dass im Tagesschritt der Anteil des Niederschlags am Abfluss sehr hoch ist. Unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen, eine kleine Zahl von Tagen mit Niederschlägen und die (spät-)sommerliche Evapotranspiration liessen das Wassersättigungsdefizit in der Folge stark anwachsen, so dass beispielsweise die

Tab. 3. Charakteristische mit dem BROOK-Modell berechnete Tagesbilanzen im Rotenbach. $P = R + ET \pm \delta\text{Wurzel} \pm \delta\text{Unt. Bo} \pm \delta\text{GW}$. P: Niederschlag [mm]; R: Abfluss [mm]; ET: Evapotranspiration [mm]; δWurzel : Veränderung der Wasserspeicherung in der Wurzelzone [mm]; $\delta\text{Unt. Bo}$: Veränderung der Wasserspeicherung in der ungesättigten Bodenzone unterhalb der Wurzelzone [mm]; δGW : Veränderung der Wasserspeicherung in der Grundwasserzone [mm]; S Wurzel: modellierte Wasserspeicherung in der Wurzelzone [mm]; R/P: Quotient aus Niederschlag und Abfluss.

| Datum | P | R | ET | δWurzel | $\delta\text{Unt. Bo}$ | δGW | S Wurzel | R/P |
|-------------|------|-------|------|-----------------------|------------------------|-------------------|----------|------|
| 5. 6. 1987 | 0 | 6,32 | 1,29 | -4,67 | -2,80 | -0,14 | 197,59 | - |
| 6. 6. 1987 | 3,5 | 3,87 | 2,41 | -1,84 | +0,07 | -1,01 | 195,75 | 1,11 |
| 7. 6. 1987 | 32,5 | 21,86 | 2,22 | +4,86 | +2,93 | +0,63 | 200,61 | 0,67 |
| 8. 6. 1987 | 16,0 | 15,67 | 1,63 | -0,73 | -1,22 | +0,65 | 199,88 | 0,98 |
| 9. 6. 1987 | 3,5 | 6,19 | 1,50 | -2,96 | -0,73 | -0,50 | 196,92 | 1,77 |
| 22. 9. 1987 | 0 | 0,17 | 1,41 | -1,42 | -0,09 | -0,07 | 155,22 | - |
| 23. 9. 1987 | 25,0 | 4,75 | 2,09 | +18,27 | -0,04 | -0,07 | 173,49 | 0,19 |
| 24. 9. 1987 | 32,5 | 9,91 | 1,54 | +18,21 | +2,70 | +0,14 | 191,70 | 0,30 |
| 25. 9. 1987 | 1,5 | 2,97 | 1,58 | -3,51 | -0,08 | +0,54 | 188,19 | 1,98 |
| 26. 9. 1987 | 39,0 | 23,88 | 1,68 | +7,30 | +3,79 | +2,35 | 195,49 | 0,61 |

Niederschläge Ende September keine grossen Hochwasser verursachten (Abb. 5): Aus dem Anstieg des Wassergehaltes in der Wurzelzone wird ersichtlich, dass ein beachtlicher Anteil des Niederschlags in der Wurzelzone aufgenommen und zwischengespeichert wurde (Tab. 3).

Bei einer Beurteilung des Hochwasserrisikos kommt – neben dem Starkniederschlagsgeschehen im Sommer – den Schnee- und Niederschlagsverhältnissen im Spätwinter bzw.

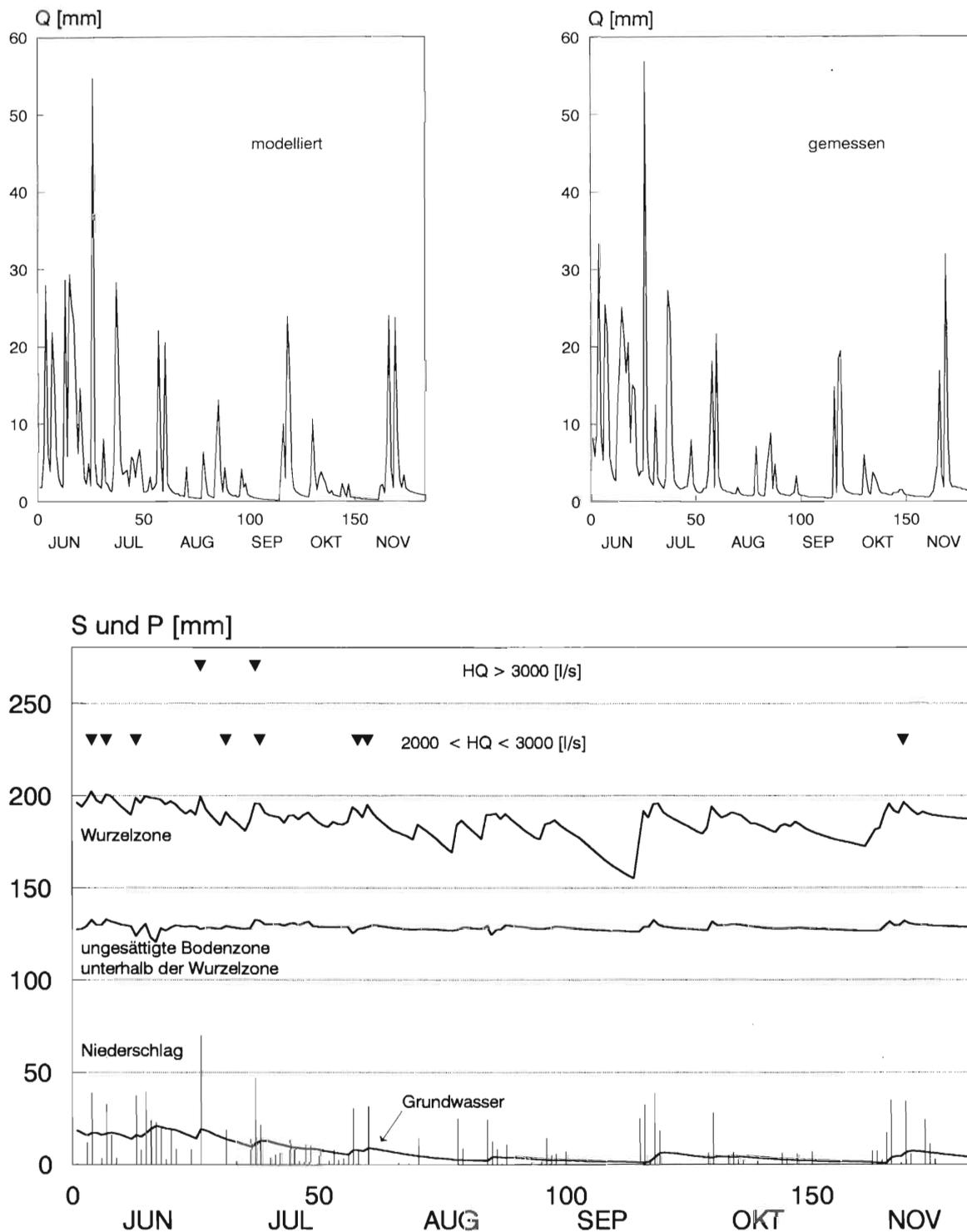


Abb. 5. Modellierung der hydrologischen Verhältnisse im Jahr 1987 im Rottenbach mit Hilfe des BROOK-Modells (S: Wasserspeicherung, P: Niederschlag, ▼: Auftreten eines grossen Hochwasserereignisses).

Frühling eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund der Speicherungsverhältnisse ist anzunehmen, dass die witterungsbedingte Vorgeschichte in Einzugsgebieten wie dem Rotenbach bezüglich des Abflussverhaltens wichtiger ist als der Einfluss einer möglichen Vegetations- und/oder Nutzungsänderung. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangte FORSTER (1992) bei seinen Untersuchungen im Urseren-Tal.

4.3 Räumlich detaillierte Hochwasseranalyse im Rotenbach mit dem TOPMODEL

Das TOPMODEL ist ein zeitlich hochauflösendes Simulationsmodell, welches auf dem Konzept der variablen beitragenden Fläche beruht. Der sogenannte Topindex bildet die Grundlage zur Abbildung dieser räumlichen Dynamik. Dabei handelt es sich um einen topographischen Index, welcher für jede Rasterzelle i eines digitalen Höhenmodells berechnet wird. In die Berechnung gehen die Fläche, die in die i -te Rasterzelle entwässert (a_i) und die Hangneigung der lokalen Rasterzelle (β_i) ein:

$$\text{Topindex}_i = \ln \frac{a_i}{\tan(\beta_i)} \quad [1]$$

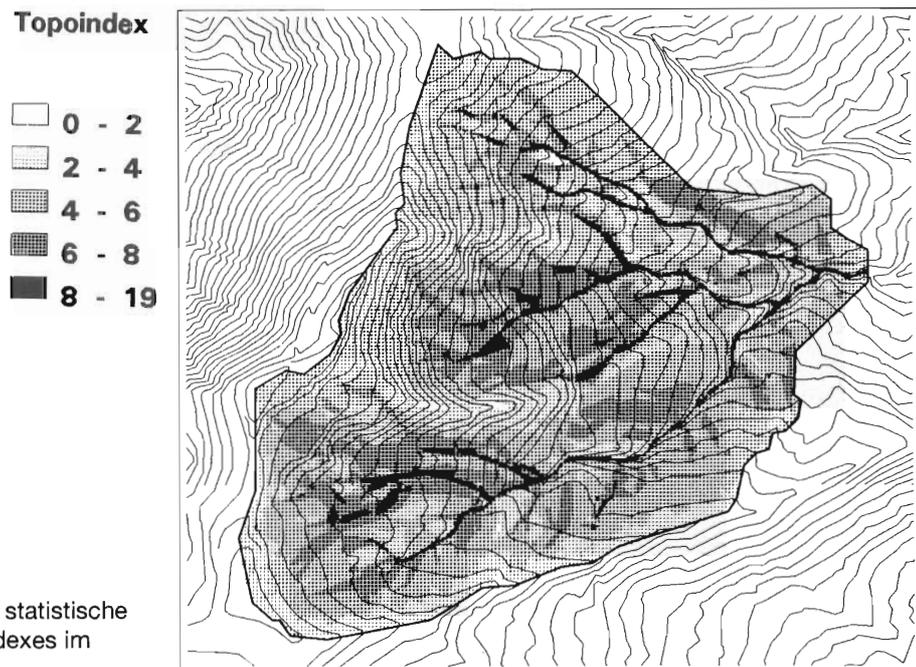
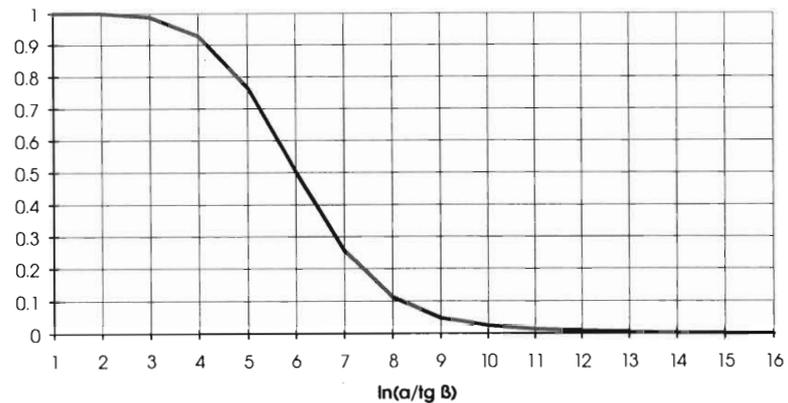


Abb. 6. Räumliche und statistische Verteilung des Topindex im Rotenbach.

Der Topindex beschreibt die Sättigungsbereitschaft der einzelnen Rasterzellen und erlaubt damit, die Abflussbildung räumlich differenziert zu analysieren. Sofern die entsprechenden Daten verfügbar sind, kann auch die Transmissivität des Bodens bei der Berechnung mitberücksichtigt werden.

Die Abbildung 6 zeigt die räumliche und statistische Verteilung des nach Formel [1] berechneten Topindex im Rotenbach. Flächen mit einem grossen Indexwert weisen eine hohe Bereitschaft zur Sättigung auf, Flächen mit einem niedrigen Wert eine geringe. Ein mittels einer Kontingenztabelle vorgenommener Vergleich zwischen dem Topindex und den Bodentypen (nach BURREN 1988) ergibt einen signifikanten Zusammenhang: Hohe Topindex-Werte fallen mit Böden mit deutlichen Nässezeigern (Hanggleye ohne Oxydationsflecken) zusammen, niedrige Topindex-Werte mit weniger nassen Böden (verbraunte Hanggleye). In den stark vom Relief geprägten Wildbacheinzugsgebieten eignet sich demnach der Topindex ausgezeichnet zur räumlichen Modellierung der variabel beitragenden Flächen. Damit erhält er eine Bedeutung, die weit über das TOPMODEL hinausgeht. So könnte er – in Weiterentwicklung des Ansatzes von DÜSTER und WEINGARTNER (1993) – einen Beitrag zu einer prozessorientierten Gewinnung von Gebietskenngrössen leisten. In der Form der Verteilungsfunktion des Topindex sind die Hochwasserdisposition und die Heterogenität eines Einzugsgebietes summarisch abgebildet. Im Rahmen der Analysen wollen wir deshalb diese Verteilungsfunktion auch zum Vergleich von Einzugsgebieten nutzen.

Für die Abfluss-Simulation wird die Verteilungsfunktion der Topindex-Werte verwendet (Abb. 6), wobei die Indexwerte klassiert werden. Das Modell geht von der Annahme aus, dass sich Flächen mit gleichem Topindex im Hochwasserfall ähnlich verhalten. Für jede Topindex-Klasse werden die vertikalen Wasserflüsse einzeln berechnet. Bei ihrer Modellierung werden drei Speicher berücksichtigt: Gravitationswasserspeicher, Wurzelzone, gesättigte Zone. Mit einer Schnittstelle zum BROOK-Modell soll die Modellierung dieser Speicher optimiert werden. Die lateralen Wasserflüsse, der Abfluss aus der gesättigten Zone sowie der gesättigte Oberflächenabfluss werden – basierend auf der Verteilungsfunktion der Index-Werte – räumlich integral («lumped») berechnet.

In einer geplanten Sensitivitätsanalyse sollen die simulierten Hochwasserereignisse mit anderen Rahmenbedingungen nachgerechnet werden: veränderte Vorgeschichte, veränderte Bodeneigenschaften bzw. Transmissivitäten, veränderte Niederschlagscharakteristik usw.

4.4 Feststoffaustrag aus einer Runse im Gebiet Teufenegg am Spissibach

Im Gebiet Teufenegg mündet auf etwa 1180 m Höhe der Fulwasserbach, ein Seitenzubringer, in den Spissibach. Hier wurden vor kurzem sowohl der Spissibach wie auch der Fulwasserbach mit einer Abfluss- und Feststoff-Messstelle ausgerüstet.

Der Fulwasserbach hat sich in dem ca. 100 m langen Abschnitt oberhalb seiner Mündung bis auf den Fels eingetieft. Die grossen Durchmesser des im Bachbett liegenden Geschiebes sind Ausdruck der zeitweise grossen Wasserführung des Baches. Die Bachsohle weist eine Step-and-Pool-Charakteristik auf, die durch Wildholz und sich dahinter ablagerndes Geschiebe verstärkt wird. Verschiedene Runsen münden in diesen Gerinneabschnitt. Das aus den Runsen gelieferte Geschiebe bildet im Hauptgerinne kleine Schuttkegel, die bei stärkerer Wasserführung jeweils wieder abgetragen werden.

Diese Vorgänge, die sich in kurzen Zeitintervallen beobachten lassen, sind typisch für Wildbäche und sind ein Hinweis für die Dynamik der Feststoffmobilisierung im Hang und der Feststoffverlagerung vom Hang ins Gerinne und im Gerinne selbst. Entsprechend Abbildung 2 interessieren in den Hängen die Regler «Erodierbarkeit» [Er] im Bereich der Bodenoberfläche, «Stabilität» [Stab] gegen (flachgründige) Rutschungen im Bereich des Bodenkörpers und

schliesslich die «Feststoff-Verlagerungskapazität» [VK] an der Bodenoberfläche und im Bodenkörper selbst sowie der Feststoffeintrag in das Gerinne (= Teil des Prozesses «Gerinnezufluss» [Gzfl]).

Zur quantitativen Erfassung der Vorgänge bieten sich verschiedene Ansätze an:

- direkte Beobachtung der Prozesse (Registrierung mit Videokamera) anlässlich der aktiven Phasen (Gewitter, Schneeschmelze)
- Modellrechnung bezüglich Hangstabilität gegen flachgründige Rutschungen
- Messung der Feststoffmobilisierung in einzelnen Hängen mittels Auffangvorrichtungen an deren unteren Rändern bzw. Ausgängen, so
 - durch Messung des Feststoffaustrags aus interessierenden Hangsegmenten und
 - durch Messung der aus dem zu beobachtenden Hang verlagerten und sich in einer Runse sammelnden Feststoffe
- Bilanzierungen durch Erfassen von Volumenveränderungen (in Erosions- und Ablagerungsbereichen) mittels Vergleich der digitalisierten Mikro-Topographien zu verschiedenen Zeitschnitten

Eine Runse und der dazugehörige Hangbereich (Fläche = 504 m²) am obenerwähnten Gerinneabschnitt wird gegenwärtig unter Anwendung dieser Ansätze bearbeitet. So erfolgte 1993 eine detaillierte, zentimetergenaue terrestrische Vermessung mittels elektronischem Theodoliten mit Infrarotlaser-Entfernungsmessung (BLANK *et al.* 1994; FUGAZZA und ROMANG 1994). Photogrammetrische Verfahren (aus der Luft und terrestrisch) fallen wegen der Bewaldung und der zum Teil dichten Vegetation weitgehend ausser Betracht. Die Messdaten wurden in ein digitales Geländemodell umgesetzt. Wiederholte Vermessungen, die nächste bereits im Sommer 1994, werden durch Vergleich der Topographien Aussagen zu Volumenveränderungen in den Erosions- und Ablagerungsbereichen und damit gesamthaft zur Bilanzierung der Feststofflieferung vom Hang über die Runse ins Gerinne erlauben.

Mit den seit dem Frühjahr 1994 laufenden Feststoffmessungen konnten bereits in den ersten Monaten Untersuchungen zum Feststoffaustrag durchgeführt werden. Der mit einer Auffangvorrichtung in der Runse gemessene Feststoffaustrag zeichnet den Witterungsverlauf im Frühjahr 1994 nach (Abb. 7); die Schwebstoffe, die separat gemessen werden, sind hier nicht berücksichtigt. Nach einem ersten fast vollständigen Ausapern brachte der April noch einmal eine grössere Menge Schnee. Der Boden im Einzugsgebiet der Runse konnte vor dem zweiten Einschneien nur sehr oberflächlich auftauen. Die Effekte der Schneeschmelze wurden so bis in den Mai verzögert und fielen mit den ausserordentlich grossen Niederschlagsmengen dieses Monats zusammen. Dies erklärt die grosse Feststoffmobilisierung im Zeitraum Mai bis Anfang Juni.

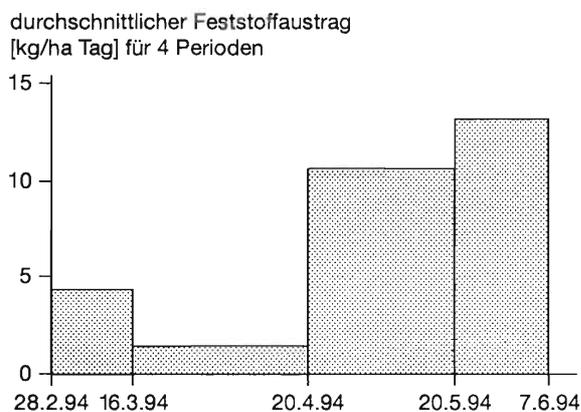


Abb. 7 Runse Teufenegg: Ausgetragene Feststoffe im Frühjahr 1994.

5 Abschliessende Bemerkungen

Zweifellos nehmen sich die hier vorgestellten ersten Ergebnisse angesichts des ambitionierten Projektes «Sensitivität von Wildbachsystemen» noch sehr bescheiden aus. Wie dies im vorangehenden Kapitel mehrfach angetönt wurde, kämpfen die Autoren, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit zum Teil altbekannten Problemen der Messanordnung und Messtechnik, mit den Schwierigkeiten des Geländes und mit der Tatsache, dass zwar laufend Daten über «normale» Situationen (Basisabfluss, kleine Hochwasser) erhoben werden, dass aber Daten über die letztlich interessierenden Extremereignisse naturgemäss nur selten anfallen.

Mit Daten aus dem Testgebiet Rotenbach lassen sich – zumindest im hydrologischen Bereich – bereits interessante Aussagen zum Niederschlags-Abflussgeschehen, zum Speicherverhalten des Einzugsgebietes, zum Einfluss der Topographie und zur Bedeutung des hydrologischen Gebietszustandes machen. Im Bereich der Feststoffverlagerung – insbesondere bei sehr steilen Einzugsgebieten mit grossem Gefälle der Gerinne – wird etwas mehr Geduld erforderlich sein, um zu vergleichbaren Aussagen zu gelangen. Deshalb sind möglichst viele Beobachtungen während Extremereignissen und in deren zeitlichem Umfeld durchzuführen.

Wildbachforschung ist ein interdisziplinäres Forschungsfeld; eine intensive Zusammenarbeit mit anderen Institutionen und der Praxis ist deshalb äusserst wichtig. Mit dem Testgebiet Spissibach besteht die Möglichkeit, die für das Verständnis des Systems Wildbach wichtigen Prozesse eingehend und langfristig zu studieren. Dabei sind auch Verbesserungen im Bereich der Messtechnik notwendig. Das Testgebiet leistet aber auch einen Beitrag zur praxisnahen Ausbildung künftiger Erdwissenschaftlerinnen und Erdwissenschaftler.

6 Literatur

- ASCHWANDEN, H.; WEINGARTNER, R., 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bern, Landeshydrologie und -geologie. Tafel 5.2.
- ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) 1974: Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern, EDMZ.
- BARBEN, M., 1993: Analyse extremer Hochwasser-Ereignisse im Rotenbach (Schwarzsee). Unveröffentlichte Seminararbeit. Bern, Geographischen Institut der Universität Bern.
- BARBEN, M., 1994: Dynamische Bilanzierung eines Wildbacheinzugsgebietes mit Hilfe des BROOK-Modells. Unveröffentlichter Zwischenbericht zur Diplomarbeit. Bern, Geographischen Institut der Universität Bern.
- BEVEN, K.J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J., 1994: TOPMODEL. In: SINGH, V.P. (Hrsg.) Computer Models of Watershed Hydrology. (im Druck).
- BISIG, M.; GUTBUB, M., 1994: Boden- und Substratuntersuchungen im Einzugsgebiet des Spissibaches Leissigen. Unveröffentlichte Seminararbeit. Bern, Geographischen Institut der Universität Bern.
- BLANK, B.; MANSER, S.; MIHAJLOVIC, D., 1994: Terrestrische Vermessung in Leissigen. Unveröffentlichte Seminararbeit. Bern, Geographischen Institut der Universität Bern.
- BURREN, C., 1988: Bodenkarte Rotenbach. Kreisforstamt II, Plaffeien. Unveröffentlicht.
- CULMANN, K., 1864: Bericht an den Hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweizerischen Wildbäche vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863. Zürich, Zürcher und Furrer.
- DÜSTER, H.; WEINGARTNER, R., 1993: Prozessorientierte Gewinnung von Gebietskenngrössen zur hydrologischen Charakterisierung von Einzugsgebieten. Koblenz, Dtsch. gewässerkd. Mitt. 37, 5/6: 122–126.
- FEDERER, A.; LASH, D., 1983: BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. Water resour. res. 19.
- FORSTER, F., 1992: Anwenderhandbuch für das Wasserhaushalts-Simulationsmodell BROOK. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Interner Bericht B 349.1.
- FUGAZZA, D.; ROMANG, H., 1994: Gelände- und Höhenmessungen im Gebiet Spissibach–Leissigen. Unveröffentlichte Seminararbeit. Bern, Geographischen Institut der Universität Bern.
- GEIGER, H.; RÖTHLISBERGER, G.; STEHLI, A.; ZELLER, J., 1992: Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bern, Landeshydrologie und -geologie. Tafel 2.4.
- GERMANN, P., 1981: Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 51.

- GHO, 1982: Verzeichnis hydrologischer Fachausdrücke mit Begriffserklärung. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie. Landeshydrolog. -geol., Mitt. 2.
- GUTKNECHT, D., 1994: Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. Österr. Wasser- Abfallwirtsch. 46, 3/4: 50–57.
- HUNZIKER, G., 1992: Zur Geologie im Gebiet Leissigen–Morgenberghorn (Berner Oberland). Unveröffentlichte Diplomarbeit. Bern, Geologischen Institut der Universität Bern.
- KIENHOLZ, H.; HEGG, C., 1992: Wildbäche. Vorstudie Nationales Forschungsprogramm 31: «Klimaänderungen und Naturkatastrophen». Bern, Sigmaphan.
- KIENHOLZ, H.; WEINGARTNER, R.; HEGG, C.; HUNZIKER, G., 1994: Spissibach (Leissigen am Thunersee) – ein Testgebiet der Wildbachforschung. In: Nouvelles der Landeshydrologie und -geologie 1: 19–20.
- LEFORT, P.; MEUNIER, M., 1993: Connaissance physique des phénomènes. In: Crues et laves torrentielles – Prévention et gestion. Paris, Ministère de l'environnement.
- MANI, P., 1993: Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit dem TOPMODEL-Konzept. Interner Bericht. Bern, Geographischen Instituts der Universität Bern.
- NAEF, F., 1992: Wie gross ist das 100jährige Hochwasser? Wasser energ. luft 84, 11/12: 343–345.
- NAEF, F., 1992: Hochwasser. Vorstudie Nationales Forschungsprogramm 31: «Klimaänderungen und Naturkatastrophen», Zürich.
- NAEF, F., 1993: Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch? Zür. Geogr. Schr. 53: 193–199.
- NAEF, F.; ZUIDEMA, P.; KOELLA, E., 1985: Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. Beitr. Geol. Schweiz: Hydrol. 33: 195–233.
- PERLIK, M., 1993: Hydrologisch – geomorphologische Untersuchungen eines Wildbacheinzugsgebiets. Spissibach bei Leissigen, Berner Oberland (Schweiz). Unveröffentlichte Diplomarbeit im Fachbereich Geographie der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt.
- SCHÜEPP, M., 1979: Witterungsklimatologie. Ann. Schweiz. meteorol. Anst., Beih.
- SEVRUK, B.; KIRCHHOFER, W., 1992: Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bern, Landeshydrologie und -geologie. Tafel 2.3.
- STREIT, U., 1973: Ein mathematisches Modell zur Simulation von Abflussganglinien. Giess. Geogr. Schr. 27: 1–97.
- ÜBLAGGER, G., 1988: Das systemare Verständnis der Gebirgsgewässer. Interpraevent, Klagenfurt 1: 345–383.

Dank

Die zur Zeit laufenden Arbeiten werden von Doktoranden, Diplomandinnen und Diplomanden getragen und durch folgende Institutionen (Firmen) begleitet und unterstützt:

- Universität Bern
- Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
- Lotteriefonds des Kantons Bern (SEVA-Stiftung)
- Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich
- Geo7, Bern
- Landeshydrologie und -geologie
- Bundesamt für Wasserwirtschaft

Die Ausarbeitung dieses Aufsatzes haben folgende Personen mit Beiträgen aus ihren Dissertationen und Diplomarbeiten unterstützt: M. Barben, D. Fugazza, C. Hegg, P. Mani.

Adresse der Autoren:

Dr. Rolf Weingartner

PD Hans Kienholz

Geographisches Institut der Universität Bern

Hallerstrasse 12

CH-3012 Bern

Messung des Feststofftransportes im Erlenbach

Dieter Rickenmann, Philippe Dupasquier

Abstract

Sediment transport measurement in the Erlenbach stream

In a steep mountain stream with a catchment area of 0.7 km², bedload transport has been continuously monitored by an indirect measuring method for seven years. Limitations and potentials of this method are discussed. The main factors influencing the total sediment yield during a single flood event are shown to be the flood water volume, the peak flow and the threshold discharge at the beginning of bedload motion. A prediction equation for the total sediment yield per flood event is proposed. A comparison is made with a bedload transport formula developed from experiments in the hydraulic laboratory.

Keywords: bedload measurement, bedload transport, mountain stream, sediment transport, sediment yield, sediment prediction, threshold of transport

1 Einleitung

Schwerer Geschiebetransport mit oft katastrophalen Folgen gehört zu den Risiken, mit denen sich der Mensch auseinandersetzen muss. Gerade in Wildbachgebieten ist bei Unwetterereignissen häufig das Geschiebe das grössere Problem als der grosse Wasserabfluss. Es gehört zum Charakter von Wildbächen, dass sie in unregelmässigen Abständen sowohl kleinere als auch grössere Geschiebemengen zu Tal befördern. Dabei sind vor allem Siedlungen und Verkehrswege gefährdet, und für die Planung von wasserbaulichen Schutzmassnahmen sind Kenntnisse des Geschiebetransport-Prozesses und der zu erwartenden Feststofffrachten von grosser Bedeutung.

In den letzten 20 Jahren wurde die Erforschung des Geschiebetransportes in Wildbächen sowie der Murgänge intensiv vorangetrieben (ZELLER 1985; MEUNIER 1991; Rickenmann, Manuskript für Schweizer Ingenieur und Architekt: Beurteilung von Murgängen). Trotz vieler neuer Erkenntnisse – verschiedene Zusammenhänge wurden in hydraulischen Laborversuchen erkannt – sind die Kenntnisse über das Verhalten der steilen Bäche «in der Natur» immer noch ungenügend. Die Übertragung der im Labor gefundenen Erkenntnisse auf die Verhältnisse in der Natur ist nicht ohne weiteres möglich, da die Randbedingungen in Wildbächen viel komplexer sind, vor allem was die Gerinnegeometrie und die Geschiebeverfügbarkeit betrifft. Messungen in der Natur sind daher unerlässlich.

In diesem Zusammenhang stehen auch die Untersuchungen im Rahmen des Projektes «EROSLOPE» (Instability, erosion and solid transport on steep mountain slopes: combined laboratory and field investigations), Teil eines EU-Forschungsprogrammes über Klima und Naturgefahren, an welchem sich die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL, Birmensdorf) beteiligt. Messungen mittels Geschiebesensoren (Hydrophonen) und die Interpretation der Ergebnisse bilden einen wichtigen Teil dieses Forschungsprojektes. Hans M. Keller, der Begründer der forsthydrologischen Forschung der WSL im Alptal, hat auch die Bedeutung des Feststofftransportes erkannt und neue Arbeiten wie das EROSLOPE-Projekt stark unterstützt. In diesem Artikel werden die mess- und interpretationstechnischen Probleme der Feststoffbeobachtung im Erlenbach dargelegt sowie die wichtigsten Resultate vorgestellt.

2 Messanlage und Messmethode

Im Alptal (Kt. SZ), einem voralpinen Gebiet in der Zentralschweiz, hat die WSL mehrere hydrologische Versuchseinzugsgebiete instrumentiert (vgl. Burch 1994). Bei der Abflussmessstation im Erlenbach ist zusätzlich eine Geschiebemesseinrichtung vorhanden (Abb. 1). Das Einzugsgebiet des Erlenbachs liegt vollständig im Flysch und weist eine Grösse von rund 0,7 km² auf. Das mittlere Gefälle des Hauptgerinnes beträgt 17%. Der höchste Punkt des Einzugsgebietes liegt auf 1655 m ü.M., der niedrigste auf 1110 m ü.M. (Höhe der Messstation). Mit über 2000 mm Niederschlag (pro Jahr) liegen die Niederschlagsmengen im Alptal über dem schweizerischen Durchschnitt von 1500 mm/Jahr. Der grösste beobachtete Spitzenabfluss (12 m³/s) im Erlenbach wurde während des Hochwassers vom 25. Juli 1984 gemessen. Dies entspricht einer Wiederkehrperiode von etwa 70 bis 100 Jahren. Die Feststofffracht bei diesem Ereignis wurde auf mindestens 2000 m³ geschätzt.

Neben der kontinuierlichen Messung des Abflusses und des Niederschlages wird bei der Messstation Erlenbach auch der momentane Geschiebetransport beobachtet. Zu diesem Zweck sind seit Ende 1986 Geschiebesensoren (Hydrophone) installiert. Der Aufbau der Geschiebemesseinrichtung ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Mit Hilfe der Hydrophonmessanlage werden Beginn, Dauer und Intensität des Geschiebe- bzw. Feststofftransports im Erlenbach kontinuierlich festgestellt und aufgezeichnet.

Das Herzstück des eigentlichen Hydrophon-Sensors ist ein piezoelektrischer Kristall. Dieser ist an der Unterseite einer Stahlplatte angebracht, die in einer Sperre eingebaut ist. Im piezoelektrischen Kristall baut sich eine elektrische Spannung auf, wenn er verformt wird. Rollt bei einem Hochwasser ein Geschiebekorn über die Stahlplatte, werden durch die Schläge der Steine Schwingungen erzeugt, welche auf den Kristall übertragen werden. Die dadurch hervorgerufene Verformung des Kristalls erzeugt eine Spannung, die verstärkt und gemessen wird. Jedesmal, wenn die Spannung einen Grenzwert (Schwellenwert) überschreitet, wird ein Impuls registriert. Die pro Zeiteinheit gemessene Anzahl Impulse ist ein Mass für die Intensität des über den Messquerschnitt erfolgten Geschiebetransportes. Die Anzahl Impulse pro Minute für jeden der neun Sensoren wird zusammen mit weiteren interessierenden Daten (Zeit, Datum, Abfluss, Niederschlagsintensität) aufgezeichnet.

Eine periodische Vermessung des Geschiebesammlers ermöglicht es, die Aufzeichnungen der Geschiebesensoren mit den während der Hochwasserereignisse transportierten Feststofffrachten zu vergleichen. So kann diese indirekte Geschiebemesmethode gewissermassen geeicht werden.

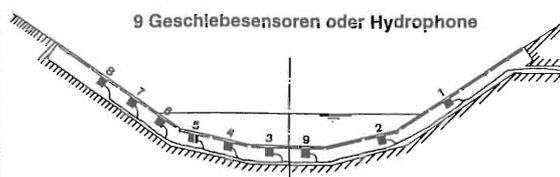
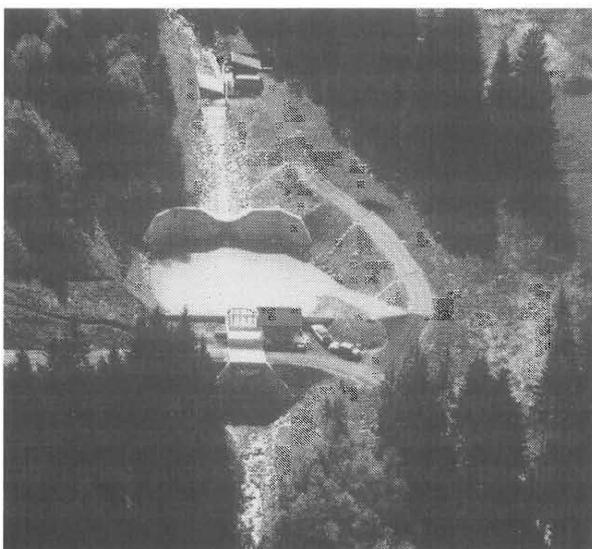


Abb. 2. Verteilung der Hydrophon-Sensoren über den Messquerschnitt, Blickrichtung bachaufwärts.

Abb. 1. Messanlage am Erlenbach. Die Geschiebesensoren (Hydrophone) sind an der Unterseite von Metallplatten in der Sperre oberhalb des Geschiebesammlers angebracht.

Bevor die gesamten Daten ausgewertet werden können, müssen sie aufbereitet werden. Es gilt, diejenigen Aufzeichnungen, welche durch Hagelschlag, Blitz, spielende Kinder usw. ausgelöst wurden, aus der Datensammlung zu entfernen. In der Periode vom 20. Oktober 1986 bis zum 21. Dezember 1993 wurden etwa 150 geschiebeführende Hochwasserereignisse registriert. Ein solches Ereignis weist in den meisten Fällen nur eine Abflussspitze auf und zeichnet sich durch eine mehr oder weniger ununterbrochene Hydrophonaktivität aus. Das grösste Hochwasser in der bisherigen Untersuchungsperiode hatte einen Spitzenabfluss von 3,5 m³/s und eine Wiederkehrperiode von etwa 4 Jahren.

3 Umrechnung der Sensorimpulse

3.1 Analyse der Sensorsignale über den Messquerschnitt

Im Messquerschnitt, am unteren Ende der Schussrinne, sind insgesamt 9 Geschiebesensoren installiert (Abb. 2). Für die Daten-Aufzeichnung sind beim Hydrophon Nr. 9 total 4 verschiedene Schwellenwerte eingegeben, so dass von der Anlage insgesamt 12 verschiedene Impulszählungen pro Minute vorgenommen werden. Bei den verschiedenen Hydrophon-Sensoren (H1–H9) bzw. Aufzeichnungskanälen (H10–H12) sind die folgenden Schwellenwerte eingestellt: H1 bis H9: 200 mV; H10: 100 mV; H11: 150 mV; H12: 300 mV.

Um die Impulszahlen der verschiedenen Sensoren bzw. Kanäle miteinander zu vergleichen, wurde der Mittelwert über jedes Hochwasserereignis, MHi, gebildet, wobei i die Nummer des Sensors bzw. Aufzeichnungskanals bezeichnet. Mit den Impulszahlen H9 bis H12 soll die Empfindlichkeit der verschiedenen Schwellenwerte auf die Anzahl Impulse untersucht werden.

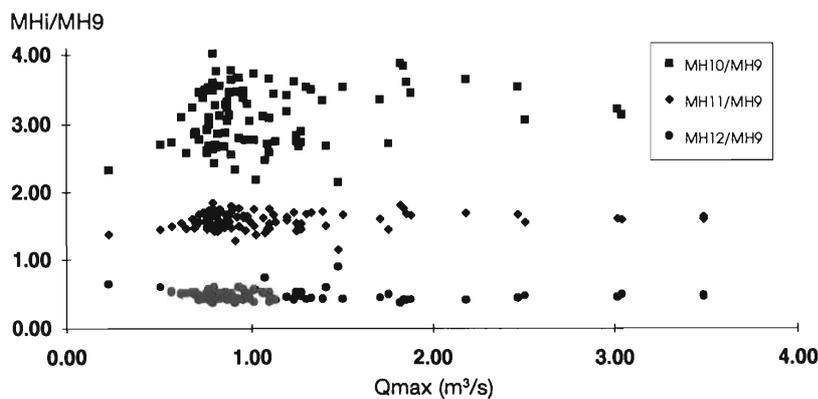


Abb. 3. Relativer Anteil an Sensorimpulsen des Hydrophons Nr. 9 für verschiedene Schwellenwerte bei der Signalauswertung, dargestellt in Funktion des Spitzenabflusses Q_{max} ; die Datenpunkte entsprechen einzelnen Hochwasserereignissen. (Für die Definition von MHi/MH9 und Details zu den Schwellenwerten siehe Text.)

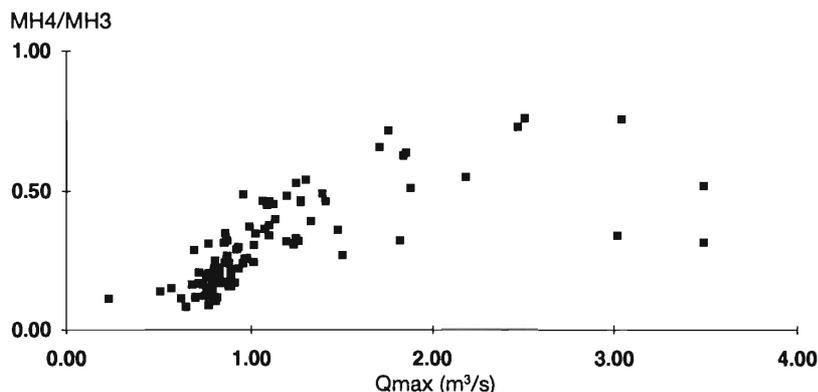


Abb. 4. Verhältnis der Anzahl Sensorimpulse zwischen Hydrophon Nr. 4 und Hydrophon Nr. 3, dargestellt in Funktion des Spitzenabflusses Q_{max} ; die Datenpunkte entsprechen einzelnen Hochwasserereignissen. (Für die Definition von MH4/MH3 siehe Text.)

Die graphische Darstellung von MH10/MH9, MH11/MH9 und MH12/MH9 ist in Abbildung 3 in Funktion des Spitzenabflusses Q_{\max} für die 90 grössten Hochwasserereignisse dargestellt.

Die Verhältnisse MH11/MH9 und MH12/MH9 sind relativ konstant, während der Wert MH10/MH9 grössere Schwankungen zeigt. Der Grund liegt darin, dass beim Kanal H10 der tiefste Schwellenwert (100 mV) eingestellt ist, welcher offenbar in der Nähe des Ausschlagens (nach einem Schlag auf die Platte) liegt und damit je nach Schlagstärke (bzw. Intensität des Ereignisses) im Vergleich zu Sensor H9 unterschiedlich reagiert. Diese Analyse der Schwankungen der relativen Impulsanteile der Kanäle H9 bis H12 zeigt, dass der bei den Sensoren H1 bis H9 eingestellte Schwellenwert von 200 mV sinnvoll ist.

Infolge der Querneigung der Sohle bei der oberen Abflussmessstation (Abb. 1) entsteht in der Schussrinne ein pendelnder, asymmetrischer Abfluss. Beim Hydrophon-Messquerschnitt wird der Abfluss gegen die orographisch rechte Seite hin abgelenkt. Bei den geschiefbeführenden Hochwassern führt dies zu einem Pendeln des Geschiebestromes mit je nach Abfluss unterschiedlich starker Ablenkung. Dadurch schwanken bei der gegebenen Anordnung der Stahlplatten im Messquerschnitt (Abb. 2) die Anteile der bei den verschiedenen Sensoren registrierten Impulse je nach Ereignisgrösse. Dies wird durch Abbildung 4 illustriert, wo das Verhältnis MH4/MH3 in Funktion des Spitzenabflusses Q_{\max} eine deutliche Variation zeigt.

Eine weitere Folge des asymmetrischen Abflusses im Messquerschnitt ist, dass der Sensor H3 insgesamt am meisten Impulse liefert, und dass der Sensor H4 mehr Impulse registriert als H9, was bei symmetrischem Abfluss nicht zu erwarten wäre. Dies ist aus Abbildung 5 ersichtlich, wo der Anteil der einzelnen Hydrophone an der gesamten Anzahl Impulse für die 90 grössten Hochwasserereignisse dargestellt ist. Die Sensoren H3, H4, H9 registrierten total 90% der gesamten Impulszahl; nimmt man noch den Sensor H5 dazu, beträgt der Anteil am Total sogar 97%. Die restlichen drei Prozente verteilen sich auf die Sensoren H1, H2, H6, H7 und H8, die eigentlich zu hoch auf der Abflusssektion installiert sind, um Signale infolge direkter Schlagwirkung von Geschiebekörnern zu erhalten. Es ist anzunehmen, dass die bei den äusseren Sensoren registrierten Impulse durch ein «Übersprechen» der Schwingungen von benachbarten Metallplatten stammen. Aufgrund der Verteilung der Impuls-Anteile über den Messquerschnitt (Abb. 5) und anhand von Untersuchungen bei anderen Hydrophon-Installationen wird das «Übersprechen» von einer Platte auf eine benachbarte auf maximal 10% bis 20% geschätzt, wobei dieser Wert bei schwachem Geschiebetransport eher kleiner sein dürfte.

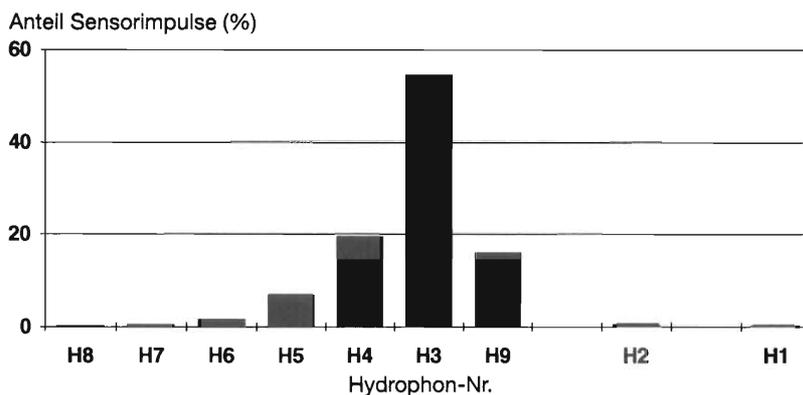


Abb. 5. Anteil der einzelnen Hydrophone an der gesamten Anzahl Impulse während der Messperiode vom 20. 10. 1986 bis zum 21. 12. 1993. (Die Anordnung der Hydrophone über den Messquerschnitt ist in Abb. 2 dargestellt.)

3.2 Eichbeziehung

Eine Eichbeziehung kann durch den Vergleich der im Geschiebesammler gemessenen Feststofffrachten, F_G , mit den aufsummierten Hydrophonimpulsen bestimmt werden. Abbildung 6 zeigt die Summe der Hydrophonimpulse für den Sensor H3, $S(H3)$, in Abhängigkeit von F_G in der Darstellung einer Doppelsummenkurve. Wird statt der Summe $S(H3)$ die Summe der Sen-

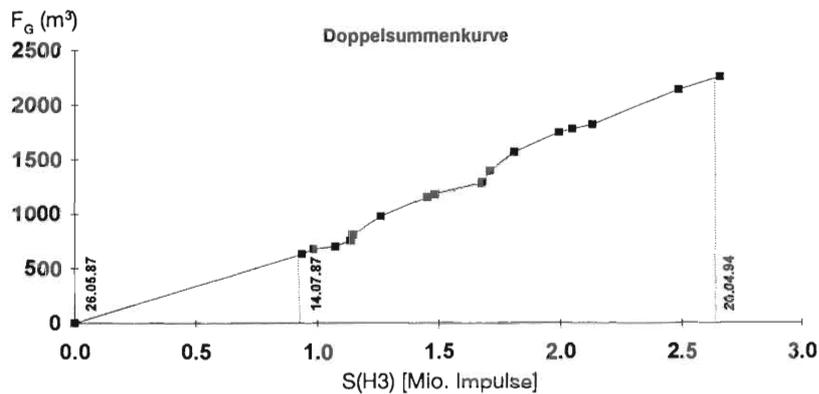


Abb. 6. Doppelsummenkurve der Hydrophonimpulse, $S(H3)$, in Funktion der Feststofffracht im Geschiebesammler, F_G . In der ersten Messperiode vom 26. 5. 1987–14. 7. 1987 wurden überdurchschnittlich viele Impulse registriert, was auf zwei Hochwasser mit grossen Spitzenabflüssen (Q_{max} von 3,5 und 3,0 m^3/s) zurückzuführen sein dürfte.

soren H3, H4, H5 und H9 verwendet, ergibt sich ein ähnliches Bild. (Wegen Lücken in der Datenaufzeichnung werden hier die Daten des Sensors H3 als repräsentativ für den gesamten Feststofftransport über den Messquerschnitt betrachtet.) Die Steigung zwischen den einzelnen Datenpunkten gibt den Eichfaktor an. In den Messperioden nach dem 14. 7. 87 schwanken die Eichfaktoren zwischen den einzelnen Erhebungsperioden, die Schwankungen scheinen sich aber im Durchschnitt auszugleichen. In der ersten Messperiode (26. 5. 1987–14. 7. 1987) wurden überdurchschnittlich viele Impulse registriert; zwei Hochwasser mit den bisher grössten Spitzenabflüssen (Q_{max} von 3,5 und 3,0 m^3/s) haben zu diesem Umstand beigetragen. Für die folgenden Untersuchungen wurden für die Umrechnung der Hydrophonimpulse in eine Feststofffracht F in [m^3] zwei Eichbeziehungen verwendet:

$$F = S(H3)/1500 \quad \text{für die Periode 26. 5. 1987–14. 7. 1987} \quad (1a)$$

$$F = S(H3)/1100 \quad \text{für die Periode 14. 7. 1987–20. 4. 1994} \quad (1b)$$

Dabei wurden die pro Hochwasserereignis aufsummierten Hydrophonimpulse in eine Feststofffracht pro Hochwasserereignis, F_E , umgerechnet. In wenigen Fällen konnte die Geschiebefracht einzelner Hochwasser vermessen werden; dabei zeigen sich nur geringe Abweichungen von den F -Werten gemäss Umrechnungsbeziehung (1b). Die über die ganze Periode aufsummierten F_E -Werte und die aufsummierte Feststofffracht F_G im Geschiebesammler liegen innerhalb einer Abweichung von 2%, was die Gültigkeit der Umrechnungsbeziehungen im Mittel bestätigt.

Bei der Umrechnung ist zu berücksichtigen, dass sich im Geschiebesammler nicht nur Kies und grössere Steine bis über 30 cm Durchmesser, sondern auch Sand, Silt und tonhaltiges Feinmaterial ablagert. Durch die Hydrophonsensoren werden jedoch nur Schläge von den gröbereren, schwereren Körnern registriert, welche als Geschiebe und nicht als Schwebstoffe transportiert werden. Das Grenzkorn, das gerade noch zu Hydrophonimpulsen führt, wird auf etwa 1 cm geschätzt (mit zunehmendem Abfluss wird das Grenzkorn eher noch grösser). Für die Umrechnung wird also in erster Näherung angenommen, dass das Verhältnis zwischen Geschiebe- und Schwebstofffracht zwischen den verschiedenen Hochwasserereignissen konstant ist. Für die Ablagerungen im Geschiebesammler wird dieses Verhältnis auf etwa 0,45 geschätzt. (Im Vergleich dazu machen die Ablagerungen, welche gröber als 3 cm sind, etwa einen Anteil von 0,30 an der gesamten Feststofffracht im Geschiebesammler aus.) Dabei ist zu beachten, dass ein weiterer Teil an noch feineren Schwebstoffen während der Hochwasser durch den Sammler hindurchtransportiert wird.

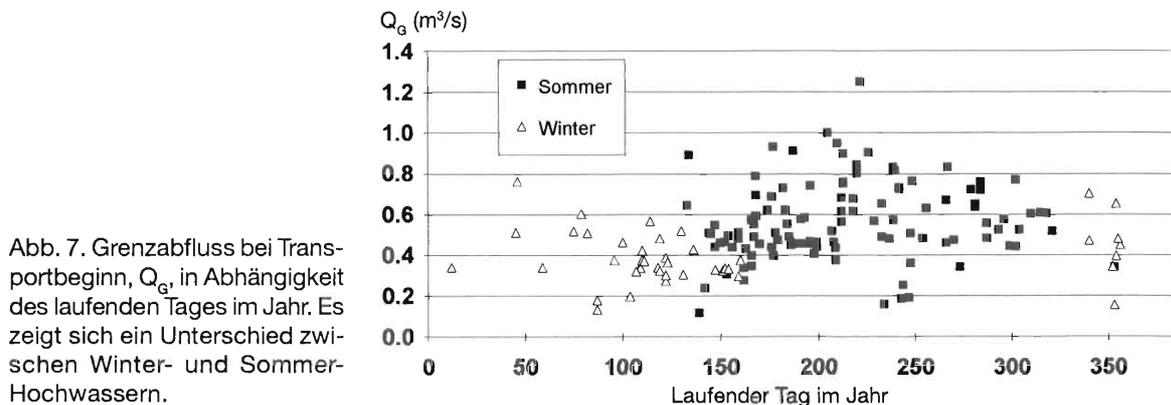
4 Hochwasser und Feststofftransport

4.1 Charakteristik der geschiebeführenden Hochwasser

Die geschiebeführenden Hochwasser im Erlenbach sind in den Sommermonaten vor allem durch Gewitterniederschläge bedingt. Sie dauern im Durchschnitt etwa 100 Minuten, weisen einen mittleren Spitzenabfluss von etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, und der Grenzabfluss bei Beginn des Geschiebetransportes schwankt in den meisten Fällen zwischen $0,4$ und $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 7). Im Frühling treten während der Schneeschmelze ebenfalls geschiebeführende Hochwasser auf, die jedoch in der Regel einen kleineren Spitzenabfluss haben und länger andauern als die sommerlichen (Gewitter-)Hochwasser. Seit Inbetriebnahme der Hydrophonmessungen Ende 1986 wurden zwei Hochwasser mit Spitzenabflüssen von $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und weitere 9 Hochwasser mit Spitzenabflüssen über $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert.

Es zeigt sich, dass bei den sogenannten Winter-Hochwassern (in der Regel Schneeschmelz-Abflüsse, manchmal auch Starkniederschläge auf gefrorenen Boden) bei gleicher Wasserfracht weniger Geschiebe transportiert wird als bei den sommerlichen Gewitter-Hochwassern (RICKENMANN 1994). Ein saisonaler Einfluss kann auch für den Grenzabfluss bei Transportbeginn, Q_G , festgestellt werden: Während winterlichen Bedingungen ist Q_G im Mittel kleiner als im Sommer und auch der Schwankungsbereich ist kleiner (Abb. 7).

Betrachtet man einzelne Hochwasserereignisse, so zeigt sich deutlich, dass die Ganglinie des Geschiebetransportes nicht parallel zur Abflussganglinie verläuft. Eine Darstellung der minutlichen Impulszahl in Funktion des Abflusses, Q , zeigt keinen deutlichen Zusammenhang (BÄNZIGER und BURCH 1991). Das Geschiebe wird in einzelnen Schüben transportiert, wobei der intensivste Schub in der Regel nicht zeitgleich mit dem maximalen Abfluss, sondern vorher oder nachher auftritt. Werden die Geschiebetransportintensitäten über eine Zeitdauer von einigen Minuten gemittelt und gegen den momentanen Abfluss aufgetragen, so zeigt sich ein Trend zu einem Hysterese-Verhalten, wobei bei zunehmendem Abfluss tendenziell grössere Transportintensitäten auftreten als bei abnehmendem Abfluss (RICKENMANN 1994).



4.2 Feststofffrachten und Abflussparameter

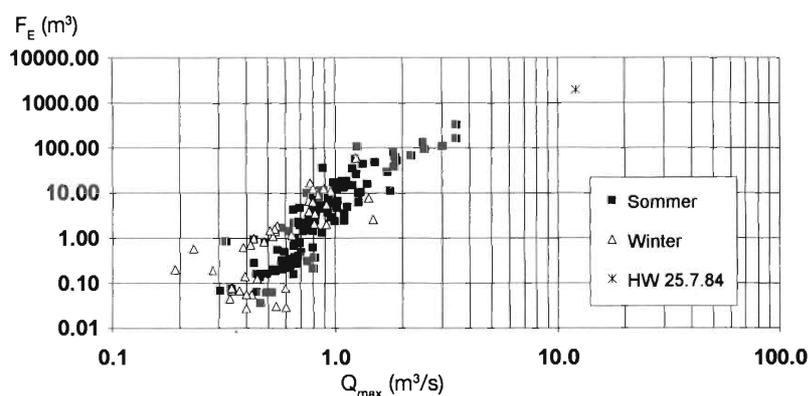
Betrachtet man die Feststofffracht pro Hochwasserereignis, F_E , so erkennt man eine Abhängigkeit von der totalen Wasserfracht während des Hochwassers, V_W (RICKENMANN 1994). Aufgrund von Geschiebetransportformeln, welche mit Hilfe von hydraulischen Laborversuchen hergeleitet wurden, hat auch der Grenzabfluss bei Transportbeginn, Q_G , einen Einfluss auf die transportierte Geschiebefracht (RICKENMANN 1990). Demnach ist die Geschiebetransportrate im wesentlichen eine Funktion des Bachgefälles und der Differenz $(Q - Q_G)$. Dies wird durch die Hydrophon-

Messungen bestätigt (RICKENMANN 1994): Im Vergleich zur Abhängigkeit F_E von V_W zeigt F_E eine noch bessere Korrelation mit der geschieberelevanten Wasserfracht V_{WG} , welche die Integration der Abflüsse ($Q-Q_G$) während der geschiebeführenden Zeit des Hochwassers darstellt.

Eine weitere Einflussgrösse bildet der Spitzenabfluss Q_{max} während eines Hochwassers. So zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des F_E -Wertes (bzw. der Anzahl Hydrophonimpulse pro Hochwasser) vom Spitzenabfluss Q_{max} (Abb. 8). Interessanterweise ergibt sich eine ähnliche Abhängigkeit für die maximale Geschiebetransportintensität vom Wert Q_{max} ; die maximale minütliche Anzahl Impulse bei einem Ereignis ist offenbar auch ein Mass für die gesamte Feststofffracht pro Ereignis. In beiden Fällen kann ein Knick in der Abhängigkeit bei einem Wert von Q_{max} um etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ festgestellt werden, wobei der Einfluss von Q_{max} im Bereich über diesem Grenzwert kleiner ist.

Der Knick in dieser Abhängigkeit bei Q_{max} von etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dürfte mit dem Schwankungsbereich des Grenzabflusses im Bereich $0,4$ bis $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (für Sommer-Hochwasser) zusammenhängen. Es ist anzunehmen, dass in diesem Abflussbereich ein Grossteil aller Korngrössen in Bewegung gesetzt wird, welche bei Hochwassern der bisher beobachteten Grösse überhaupt transportiert werden. Bis zu einem Abfluss von etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ nimmt also der Anteil der bereits bewegten Körner an der schliesslich transportierten Gesamtfracht stark zu. Bei Abflüssen über $1 \text{ m}^3/\text{s}$ werden zwar weitere, noch grössere Körner in Bewegung gesetzt, deren Anteil an der Gesamtfracht dürfte jedoch nicht mehr so stark ins Gewicht fallen wie bei denjenigen Korngrössen, welche im Abflussbereich um Q_G in Bewegung geraten.

Abb. 8. Feststofffracht pro Hochwasserereignis, F_E , in Abhängigkeit des Spitzenabflusses Q_{max} während des Hochwassers.



4.3 Berechnung der Feststofffrachten

Wie oben beschrieben, besteht eine Abhängigkeit der Feststofffracht pro Hochwasserereignis, F_E , von der geschieberelevanten Wasserfracht, V_{WG} , und vom Spitzenabfluss, Q_{max} . Eine Regressionsberechnung von F_E mit diesen Parametern für alle untersuchten 150 Hochwasserereignisse sowie das Extrem-Hochwasser vom Juli 1984 ergibt die folgende Gleichung:

$$F_E = 0,0114 (V_{WG})^{0,72} (Q_{max}/Q_G)^{1,50} \quad (2)$$

Dabei ist V_{WG} in $[\text{m}^3]$ einzusetzen, F_E weist ebenfalls die Dimension $[\text{m}^3]$ auf. Für den Vergleich zwischen berechneten und «gemessenen» Feststofffrachten resultieren die folgenden statistischen Parameter: Der Korrelationskoeffizient r beträgt $0,94$ und der Standardfehler s_o ist 93% . (Der Standardfehler entspricht dem Quotienten zwischen Standardabweichung und mittlerem Messwert.) Der Spitzenabfluss Q_{max} wurde hier für die Regressionsberechnungen mit einem mittleren Wert von $Q_G = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ normalisiert. Führt man die Regressionsberechnung mit der Summe der Hydrophonimpulse pro Hochwasserereignis (anstelle von F_E) und ohne das Hochwasser von 1984 (wofür keine Hydrophondaten vorhanden sind) durch, so ergibt

sich eine Gleichung mit ähnlichen Exponenten und praktisch dem gleichen r . Dies zeigt, dass die Umrechnung der Hydrophonimpulse in Ereignisfrachten keinen wesentlichen Einfluss auf die Regression hat.

Durch die Verwendung von logarithmischen Werten bei der Regressionsberechnung werden alle Datenpunkte gleich stark gewichtet. Aus der Sicht der Praxis ist jedoch vor allem eine einigermaßen zuverlässige Abschätzung von Geschiebefrachten grösserer Hochwasserereignisse von Bedeutung. Mit Gleichung (2) wird das Extrem-Hochwasser vom Juli 1984 um einen Faktor 1,8 überschätzt. Daher wurde in einem zweiten Schritt die Regressionsberechnung nur für Hochwasserereignisse mit Q_{\max} grösser als $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (49 Hochwasserereignisse) durchgeführt. Die Wahl dieses Wertes hängt damit zusammen, dass F_E bei der Abhängigkeit von Q_{\max} einen Knick bei etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Einen leichten Knick kann man auch in der Beziehung zwischen F_E und V_{WG} bei einem Wert von V_{WG} von etwa 1000 m^3 feststellen. Es zeigte sich ausserdem, dass der Exponent von V_{WG} zu 1,0 gesetzt werden kann, ohne wesentliche Einbusse bezüglich der Korrelation. Somit ergibt sich die folgende Regressionsgleichung:

$$F_E = 0,0021(V_{\text{WG}}) (Q_{\max}/Q_G)^{0,84} \quad (3)$$

Für den Vergleich zwischen berechneten und «gemessenen» Feststofffrachten resultieren die folgenden statistischen Parameter: Der Korrelationskoeffizient r für alle Ereignisse beträgt 0,91 und der Standardfehler s_e ist 121%. Gleichung (3) gibt für grössere Hochwasser eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und «gemessenen» Werten als Gleichung (2). Ein weiterer Vorteil von Gleichung (3) ist, dass sie dimensionsgerecht ist und somit eher eine allgemeinere Gültigkeit erwartet werden kann. Abbildung 9 zeigt den Vergleich zwischen den mit Gleichung (3) berechneten Feststofffrachten, F_{Eb} , und den «gemessenen» Feststofffrachten, F_E .

Betrachtet man das Verhältnis F_{Eb}/F_E in Funktion der geschieberelevanten Wasserfracht V_{WG} , so zeigt sich tendenziell eine Unterschätzung der Feststofffrachten für Werte V_{WG} kleiner als etwa 1000 m^3 . Wird das Verhältnis F_{Eb}/F_E in Funktion des Spitzenabflusses dargestellt, so lässt sich keine systematische Abweichung zwischen berechneten und «gemessenen» Werten feststellen. Für die insgesamt 150 untersuchten Hochwasserereignisse liegen bei 19 Ereignissen die berechneten Frachten mehr als 100% über den «gemessenen» F_E -Werten, während bei 26 Ereignissen die berechneten Frachten weniger als die Hälfte der F_E -Werte betragen. Bei mehr als zwei Dritteln der Ereignisse liegt also die Abweichung des berechneten Wertes F_{Eb} innerhalb eines Faktors 2 des «gemessenen» Wertes F_E (vgl. auch Abb. 9).

Im weiteren wurde der Einfluss der Grösse der vorherigen Feststofffracht auf das aktuelle Hochwasserereignis untersucht. Dabei konnte ein ganz schwacher Trend festgestellt werden, wonach nach einem grösseren Ereignis auch beim folgenden Hochwasser bei gleicher Wasserfracht eher höhere Feststoffkonzentrationen auftreten. Zudem wurde auch geprüft, inwiefern die Steilheit der Hochwasserganglinie, $Q_{\max}/\Delta t$, einen Einfluss auf die Feststofffracht haben könnte (Δt bezeichnet hier die Zeitdauer vom Beginn des Hochwassers bis zum Auftreten der

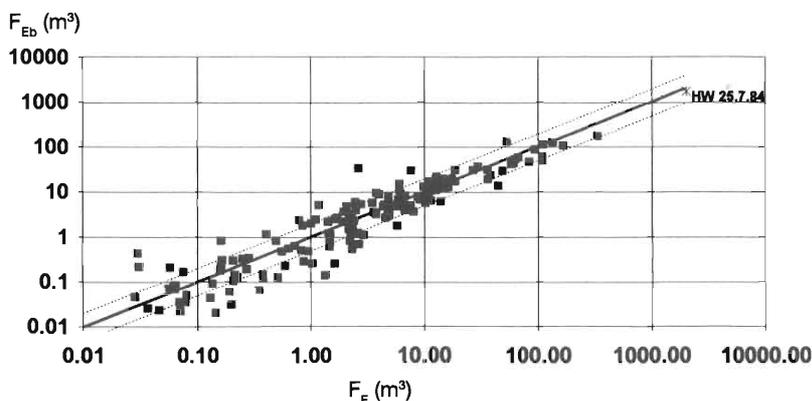


Abb. 9. Berechnete Geschiebefrachten pro Hochwasserereignis, F_{Eb} , in Vergleich zu den «gemessenen», d.h. mit der Eichbeziehung der Hydrophon-Messungen bestimmten Geschiebefrachten, F_E . Innerhalb der gestrichelten Linien sind die Abweichungen um einen Faktor 2 kleiner.

Abflussspitze). Berechnet man F_{Eb} mit Gleichung (2), so ergibt sich für das Verhältnis F_{Eb}/F_E in Funktion von $Q_{max}/\Delta t$ kein systematischer Trend. Wenn jedoch F_{Eb} mit Gleichung (3) berechnet wird, so kann für das Verhältnis F_{Eb}/F_E in Funktion von $Q_{max}/\Delta t$ eine leichte systematische Abweichung festgestellt werden. Die beiden Parameter Q_{max}/Q_G und $Q_{max}/\Delta t$ sind allerdings voneinander nicht unabhängig, weshalb keine weitere Regressionsberechnung durchgeführt wurde.

4.4 Feststoffanteil und Geschiebetransportformeln

Mit der Feststofffracht pro Hochwasserereignis, F_E , und der gesamten Wasserfracht pro Hochwasserereignis, V_W , kann eine mittlere Feststoffkonzentration, C_m , bestimmt werden. Dieser Wert zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der geschieberelevanten Wasserfracht (Abb. 10). Wiederum ist ein deutlicher Unterschied zwischen Sommer- und Winter-Ereignissen festzustellen. Obschon in Abbildung 10 das Extrem-Hochwasser vom 25. 7. 1984 nur einen wenig grösseren C_m -Wert als andere Hochwasser kleinerer Jährlichkeit aufweist, sind die momentanen Feststoffkonzentrationen während der Zeit des Spitzenabflusses wesentlich höher gewesen. Unter der Annahme, dass während der abflussintensivsten Stunde die gesamte Feststoffmenge von 2000 m³ transportiert wurde, betrug die mittlere Feststoffkonzentration rund 7%. Die maximale momentane Feststoffkonzentration dürfte noch grösser gewesen sein. Zum Vergleich wies das seit Inbetriebnahme der Hydrophonmessungen bisher grösste Hochwasserereignis vom 9. 7. 1987, mit einem Spitzenabfluss von 3,5 m³/s, eine maximale minütliche Feststoffkonzentration von etwa 7% auf, bei einem C_m -Wert von 2,3 %.

Anhand von Geschiebetransportformeln, welche in Laborversuchen für steile Gerinne entwickelt worden sind, kann in Abhängigkeit des Bachgefälles, J , eine maximal mögliche Feststoffkonzentration C_{TK} abgeschätzt werden, welche bei gleichförmigem, stationärem Abfluss und voller Transportkapazität erreicht werden kann (RICKENMANN 1990):

$$C_{TK} = 6,4 J^{2,1} \quad (4)$$

Bei den Laborversuchen hatte das transportierte Material relativ einheitliche Korngrössen, welche bei ähnlichen Abflüssen in der Natur dem gröberen Teil des Sohlenmaterials entsprechen; feiner Sand und Silt, welche in der Natur in steilen Gerinnen als Schwebstoffe transportiert werden, wurden im Labor nicht nachgebildet. Bei den Versuchen war der Materialtransport allerdings so intensiv, dass die Bedingungen näherungsweise als repräsentativ für den gesamten Feststofftransport in steilen Naturgerinnen angesehen werden können.

Für den Erlenbach mit 17% Sohlengefälle oberhalb der Messstation ergibt Gleichung (4) eine maximale Feststoffkonzentration C_{TK} bei Erreichen der Transportkapazität von 15%. Die

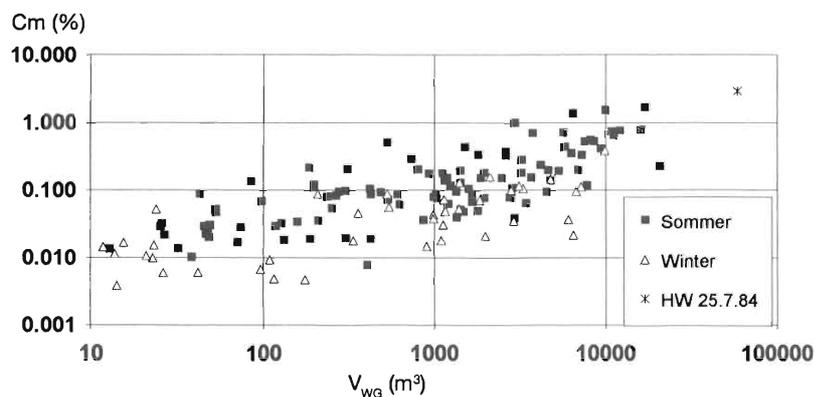


Abb. 10. Mittlere Feststoffkonzentration pro Hochwasserereignis, C_m , in Abhängigkeit der geschieberelevanten Wasserfracht, V_{WG} .

mittleren Feststoffkonzentrationen von 2 bis 3% der bisher grössten Hochwasser lagen also rund um einen Faktor 6 unter der maximal möglichen Feststoffkonzentration, während die grösste «gemessene» minütliche Konzentration von etwa 7% rund die Hälfte des C_{TK} -Wertes betrug. Der hauptsächliche Grund für diese Differenzen dürfte in der beschränkten Geschiebeverfügbarkeit im Gerinne des Erlenbaches liegen, wo die Sohle z.T. mit sehr groben Blöcken gepflastert ist, welche auch bei den bisher grössten Hochwassern kaum bewegt wurden. Bei den Laborversuchen, welche der Gleichung (4) zugrunde liegen, war im Gegensatz dazu die Sohle aus dem gleichen Material wie die transportierten Feststoffe, so dass im Prinzip alle Körner aus der Sohle erodiert und transportiert werden konnten. Ein weiterer Grund sind die im Naturgerinne grösseren Energieverluste wegen der unregelmässigen Gerinnegeometrie mit vielen Stufen im Längsprofil.

Wird C_m als Funktion von Q_{max} dargestellt, so zeigt sich ein leichter Knick in der Beziehung bei einem Q_{max} -Wert von etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Eine analoge Feststellung wurde in Abschnitt 4.2 auch für die Feststofffrachten gemacht; der Knick dürfte auch hier mit dem Einflussbereich des Grenzabflusses bei Transportbeginn zusammenhängen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Seit 1986 werden im Erlenbach mittels Geschiebesensoren Aufzeichnungen über den Geschiebetransport gemacht. Durch die Vermessung der Ablagerungen im Geschiebesammler können die mit den Sensoren registrierten Impulse in Feststofffrachten umgerechnet werden. Dabei wird angenommen, dass das Verhältnis zwischen Geschiebe- und Schwebstofffracht über die Ereignisse gemittelt einigermaßen konstant ist. Beim Erlenbach sind etwa 45% der abgelagerten Feststofffracht Körner mit einem Durchmesser über 1 cm und dürften somit vorwiegend in Form von Geschiebe transportiert worden sein.

Die Analyse der Daten zeigt, dass die Feststoff- bzw. Geschiebefracht einerseits von der Form der Hochwasserganglinie und andererseits vom Grenzabfluss bei Transportbeginn Q_G abhängt. Die Hochwasserganglinie bestimmt den Spitzenabfluss Q_{max} und zusammen mit dem Grenzabfluss Q_G auch die geschieberelevante Wasserfracht V_{WG} . Die Feststofffracht F_E des Hochwasserereignisses kann als Funktion der Parameter V_{WG} , Q_{max} und Q_G angegeben werden (Gleichung 3). In Anbetracht der stark schwankenden momentanen Geschiebeführung während eines Hochwassers ergibt Gleichung (3) eine bemerkenswert gute Übereinstimmung zwischen berechneten und «gemessenen» Werten von F_E .

Aufgrund von Laborversuchen über den Geschiebetransport ist zu erwarten, dass die gesamte Geschiebemenge von der Wasserfracht V_{WG} abhängt. Die Einflüsse des Spitzenabflusses und der breiten Kornverteilung in Wildbächen sind Faktoren, die in Zukunft sowohl in der Natur als auch im Labor genauer untersucht werden sollten. Die erforderliche Kenntnis der Hochwasserganglinie zeigt die Bedeutung von entsprechenden Simulationsprogrammen (FORSTER 1994), wenn Prognosen über die Geschiebe- oder Feststofffracht gefragt sind.

Von Interesse ist weiter die Frage, inwieweit die Beziehung (3) auch für andere Wildbachgebiete Gültigkeit hat. Eine erste Überprüfung dieser Frage mit den langjährigen Geschiebe- und Abflussmessreihen des Sperbel- und Rappengrabens im Emmental bestätigt die in Gleichung (3) formulierte Abhängigkeit. Dabei ist zu vermuten, dass die Konstante 0,0021 und möglicherweise auch der Exponent 0,84 beim Term Q_{max}/Q_G eine Funktion des Bachgefälles und der Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials sein könnten.

Die indirekte Geschiebemessmethode mit den Hydrophonen im Erlenbach ergibt interessante Erkenntnisse über den Prozess Hochwasser und Geschiebetransport. Zur Zeit laufen Untersuchungen bei einer Wasserfassung mit kontinuierlichen, direkten Geschiebemessungen. Hauptziel dabei ist, die Umrechnungsbeziehung zu verifizieren und deren Genauigkeit besser

einzugrenzen. In Laboruntersuchungen wird geprüft, welchen Einfluss verschiedene Korngrößen auf die Hydrophon-Messungen haben, und ob diesbezüglich auch bei operationellen Messungen weitere Aussagen gemacht werden können. In Zukunft könnte diese erfolgsversprechende und relativ günstige Messmethode auch von anderen Wildbachgerinnen wichtige Daten liefern.

6 Literatur

- BÄNZIGER, R.; BURCH, H., 1991: Geschiebetransport in Wildbächen. Schweiz. Ing. und Archit. 24: 576–579.
- BURCH, H., 1994: Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. Beitr. Geol. Schweiz: Hydrol. 35: 18–33.
- FORSTER, F., 1994: Wie vertrauenswürdig bildet das Simulationsmodell Brook massgebende hydrologische Prozesse ab? Beitr. Geol. Schweiz: Hydrol. 35: 195–208.
- MEUNIER, M., 1991: Eléments d'hydraulique torrentielle. Etudes Montagne, CEMAGREF, Grenoble. 1: 278 p.
- RICKENMANN, D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 103: 249 p.
- RICKENMANN, D., 1994: Bedload transport and discharge in the Erlenbach Stream. In: ERGENZINGER, P.; SCHMIDT, K.-H. (eds.): Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers. Lecture Notes in Earth Sciences 52: 53–66.
- ZELLER, J., 1985: Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser energ. luft 77, 7/8: 246–251.

Dank

Ein Dank geht an alle jetzigen und früheren Mitarbeiter der WSL, welche die Einrichtung und den Betrieb der Geschiebemessanlage im Erlenbach unterstützt haben. – Die Forschungsarbeiten wurden teilweise unterstützt von der Kommission der Europäischen Union, DG XII, Environment Programme, Climatology and Natural Hazards Unit, im Rahmen des Vertrages EV5V-CT92-0179, EROSLOPE.

Adresse der Autoren:
Dr. Dieter Rickenmann
Philippe Dupasquier
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf

Sintesi delle ricerche sull'idrologia e sul trasporto dei sedimenti nel bacino attrezzato del Rio Cordon

Sergio Fattorelli, Federico Cazorzi, Giancarlo Dalla Fontana, Mario Lenzi,
Alberto Luchetta, Renzo Scussel, Lorenzo Marchi

Abstract

Synthesis of investigations on hydrology and sediment transport in the instrumented basin of Rio Cordon

The paper reports, in short, the researches conducted in the instrumented basin of the Rio Cordon, a small catchment of the Dolomites (North-eastern Italy), which drains an area of 5 km². The physical conditions of the basin are shortly outlined and an analysis of morphometric and thematic characteristics carried out by means of a Geographical Information System is included. Based on the data collected during the early years of observation a description is given of the hydrological and sediment transport behaviour in the watershed. As to hydrology, runoff regime is characterised by high discharges in May and June, when snowmelt phenomena largely occur, and by significant flood events in summer and autumn months. The available bedload transport data, recorded during a few flood events, are analysed in relation to water discharges (runoff volume, entrainment and depositional critical discharges).

Keywords: Experimental watershed, Geographical Information System, Flood hydrograph, Solid transport, Bedload, Suspended load, Channel morphology

1 Introduzione

I processi di trasporto solido e di produzione di sedimento nei piccoli corsi d'acqua montani a forte pendenza differiscono in modo significativo da quelli che avvengono negli alvei alluvionali dei corsi d'acqua maggiori. Una accresciuta disponibilità di dati sperimentali è premessa necessaria allo sviluppo delle conoscenze sulla dinamica del sedimento nei piccoli bacini montani e, in particolare, in quelli di tipo alpino, nei quali molti aspetti fondamentali di questi processi risultano scarsamente conosciuti.

In anni recenti, diversi paesi alpini hanno visto l'avvio di iniziative di ricerca in piccoli bacini attrezzati per il monitoraggio del trasporto solido con soluzioni metodologiche e tecniche diversificate ed innovative. Si ricordano, a questo proposito, il torrente Erlenbach in Svizzera (BÄNZIGER e BURCH 1990; RICKENMANN 1994), facente parte di un complesso di sei piccole unità idrografiche già da tempo attrezzate per il monitoraggio dei processi idrologici e della qualità delle acque (KELLER e STROBEL 1982), il torrente Lainbach in Germania (SCHMIDT e ERGENZINGER 1992), il Rio della Gallina nell'Italia Nord Occidentale (Govi *et al.* 1993) ed i bacini attrezzati di Draix nella Francia Meridionale (CAMBON *et al.* 1990).

In questo contesto si inseriscono anche le ricerche avviate nel bacino del Rio Cordon (Italia Nord Orientale) per iniziativa dell'Università di Padova e del Centro Valanghe e Difesa Idrogeologica della Regione Veneto. La misura in continuo dei deflussi liquidi e solidi è affidata, nel bacino del Rio Cordon, ad una stazione di misura di nuova concezione alla cui ideazione ha dato il suo apporto determinante Hans Keller dell'Istituto Federale di Ricerca per la Foresta, la Neve e il Paesaggio (FNP) di Birmensdorf, CH (FATTORELLI *et al.* 1988).

Contestualmente al monitoraggio ed all'analisi dei fenomeni di trasporto del materiale solido, nel bacino del Rio Cordon vengono studiati i processi del ciclo idrologico sia per gli aspetti quantitativi che per quelli riguardanti la qualità delle acque di precipitazione e di deflusso.

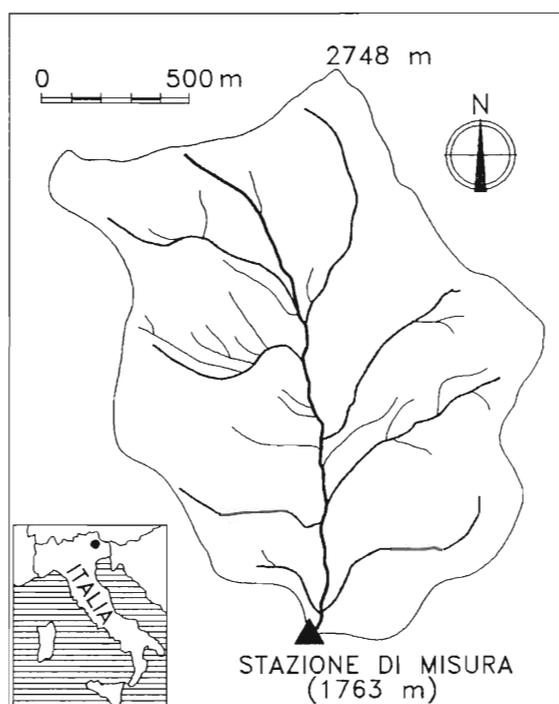
Questa nota presenta una breve sintesi dei risultati ottenuti nei primi anni di attività del bacino attrezzato del Rio Cordon, prendendo in esame sia l'analisi dei dati rilevati alla stazione di misura dei deflussi liquidi e solidi, sia gli studi condotti in campagna e mediante sistemi informativi geografici per la valutazione delle caratteristiche fisiche del bacino.

2 Caratterizzazione del bacino

Il Rio Cordon è un piccolo corso d'acqua delle Dolomiti (Alpi Orientali Italiane, fig. 1). Il bacino attrezzato drena una superficie di 5 km² e presenta un'altezza media di 2200 m s.l.m. Alcune delle principali caratteristiche del bacino sono riportate in tabella 1. I criteri che hanno portato alla scelta del Rio Cordon per l'installazione di una stazione sperimentale per la misura dei deflussi liquidi e solidi sono i seguenti:

- evidenze di campagna indicative di processi erosivi e di trasporto solido piuttosto attivi;
- assenza di insediamenti urbani e di opere sistematorie sui versanti e negli alvei;
- superficie relativamente limitata;
- facilità di accesso alla stazione di misura.

Allo scopo di ottenere una compiuta caratterizzazione del bacino, sono state sviluppate dettagliate ricerche sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, pedologiche e vegetazionali.



Tab. 1 Principali caratteristiche del bacino del Rio Cordon.

| | |
|------------------------------------|------|
| Area del bacino (km ²) | 5 |
| Quota media (m s.l.m.) | 2200 |
| Quota minima (m s.l.m.) | 1763 |
| Quota massima (m s.l.m.) | 2748 |
| Pendenza media (%) | 52 |
| Lunghezza collettore (km) | 2.84 |
| Pendenza collettore (%) | 17 |
| Precipitazione media annua (mm) | 1100 |
| Temperatura media annua (°C) | 2.0 |

Fig. 1. Corografia del bacino del Rio Cordon.

Le formazioni rocciose presenti sono costituite da Dolomie, che edificano i rilievi più elevati del bacino e da rocce del Gruppo di Wengen, qui costituite in prevalenza da conglomerati ad elementi vulcanici, jaloclastiti ed arenarie tufacee. Nella parte inferiore del bacino si ha anche una limitata presenza di rocce del Gruppo di Buchenstein, che comprendono diversi litotipi, in prevalenza di natura calcarea, calcareo-marnosa ed arenacea. Assai ampia è la presenza di depositi Quaternari, costituiti in prevalenza da materiali morenico detritici (FAIZ *et al.* 1992).

I suoli presenti nel bacino, generalmente superficiali, sono stati suddivisi in tre famiglie principali (CATTANEO e VIOLA 1992):

- litosuoli, presenti su versanti ad elevata pendenza e caratterizzati da copertura erbacea lacunosa e discontinua;
- suoli organici di tipo AC, con copertura vegetale più continua e consistente rispetto alla classe precedente;
- suoli con profilo differenziato in tre orizzonti, ascrivibili alle terre brune.

La copertura vegetale del bacino è costituita in prevalenza da cenosi erbacee, consistenti sia in praterie montane a copertura continua (43% della superficie del bacino), sia in cenosi lacunose (18%), presenti essenzialmente su litosuoli formati su detrito di falda di natura dolomitica. Piuttosto diffuse sono anche le cenosi arbustive (18% della superficie del bacino), mentre popolamenti forestali, edificati da abete rosso e da larice, sono presenti solo nella parte inferiore del bacino e occupano il 7% della superficie complessiva dell'unità idrografica. Il 14% della superficie del bacino, infine, è privo di copertura vegetale.

Le caratteristiche morfometriche del bacino, al pari di quelle tematiche ricavate dagli studi geologici, pedologici e vegetazionali cui si è fatto cenno sopra, sono state analizzate, in modo dettagliato e distribuito, tramite il software WODITEM, un sistema informativo geografico espressamente concepito per studi idrologici in bacini montani (CAZORZI 1992, 1993). WODITEM prevede una rappresentazione di tipo «raster», in cui la superficie del bacino viene suddivisa in una maglia di celle quadrate, ciascuna omogenea in tutte le sue caratteristiche. Il bacino del Rio Cordon è stato analizzato utilizzando «raster» di maglie quadrate aventi lato di 10 m o di 20 m, a seconda dei problemi analizzati. L'impiego di questo strumento di analisi ha portato ad una rappresentazione dettagliata e distribuita delle caratteristiche morfometriche e tematiche del bacino. La realizzazione del modello digitale del bacino ha consentito, inoltre, di porre le basi per ulteriori studi sui processi idrologici ed erosivi operanti nel bacino (modellazione dell'area variabile di contributo al deflusso, sintesi di indicatori idrologici, analisi delle aree sorgenti di sedimento, ecc.).

3 La stazione di misura

Il funzionamento della stazione per la misura dei deflussi liquidi e solidi installata nel bacino del Rio Cordon (fig. 2) si basa sostanzialmente sulla separazione del materiale solido grossolano trasportato al fondo dal sedimento fine e dai deflussi liquidi. Tale separazione è affidata a una griglia inclinata: il materiale grossolano, con dimensione minima superiore a 20 mm, scivola sopra la griglia e si accumula in una piazza di deposito. Il materiale solido che viene depositandosi nella piazza di deposito durante un evento di piena viene misurato per mezzo di sensori a ultrasuoni installati su un carro ponte. Questi sensori misurano la distanza fra carro ponte e l'accumulo che viene formandosi, il volume di sedimento grossolano trasportato al fondo può essere facilmente determinato sulla base di queste misure.

I deflussi liquidi e il sedimento fine che passano attraverso la griglia, vengono convogliati ad un canale di uscita in cui sono installati sensori per la misura dei livelli idrometrici e un torbidimetro per il rilievo della concentrazione del sedimento in sospensione. Altri sensori idrometrici e per il monitoraggio della qualità fisica delle acque (temperatura, pH e conducibilità elettrica)

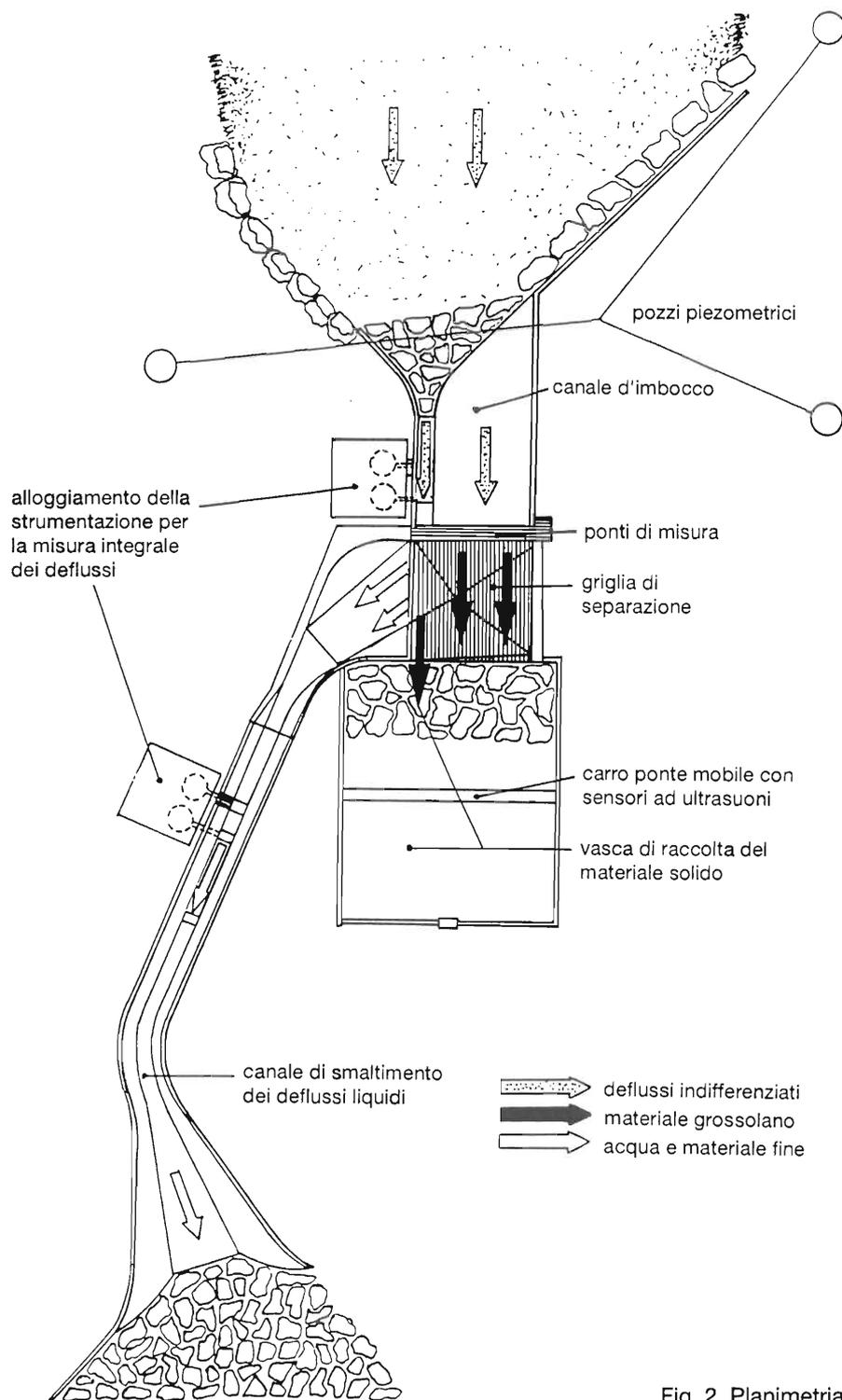


Fig. 2. Planimetria del dispositivo di misura.

sono installati nel canale di ingresso della stazione, dove opera inoltre un campionario automatico. I campioni, prelevati in modo proporzionale al volume dei deflussi, vengono utilizzati per l'analisi dei soluti.

La frazione più fine del trasporto al fondo (sabbia grossolana, ghiaia fine e media) sfugge alla misura della strumentazione descritta sopra. Allo scopo di poter misurare anche questa non trascurabile componente del trasporto solido, si è recentemente proceduto ad un adegua-

mento strutturale della stazione di misura consistente nella costruzione di una vasca di sedimentazione al termine del canale di uscita. E' stata anche prevista la possibilità di installare, sul fondo di questa vasca, un serie di celle di carico in grado di misurare la pressione esercitata dal materiale che si deposita nella vasca. In tal modo anche la misura del trasporto al fondo del materiale fine potrà avvenire in continuo al pari di quella del trasporto solido grossolano e del trasporto in sospensione.

L'esperienza dei primi anni di funzionamento della stazione ha suggerito un adeguamento della strumentazione installata per la misura del trasporto solido grossolano nella piazza di deposito: sarà aumentato il numero dei sensori a ultrasuoni, i quali anziché su un carro ponte saranno installati in postazioni fisse. Questo intervento, eliminando i tempi morti richiesti dagli spostamenti del carro ponte, consentirà di effettuare misure dell'accumulo ad intervalli ravvicinati (inferiori a 15-30 minuti).

Completano la dotazione strumentale della stazione tre piezometri che consentono la misura delle oscillazioni della falda freatica installati in altrettanti pozzi ubicati nei pressi del dispositivo di misura. La temperatura dell'aria e la precipitazione vengono rilevate sia presso la sezione di chiusura che in una stazione posta in posizione baricentrica nel bacino.

Il funzionamento dei sensori di misura e la raccolta dati è gestita in modo completamente automatico con registrazione in loco e possibilità di trasmissione via radio alla centrale di acquisizione presso la sede del Centro Valanghe della Regione Veneto.

4 Caratteri dell'idrologia e del trasporto solido

L'idrologia del bacino del Cordon è definita dall'interazione tra le caratteristiche del bacino (morfometria, pedologia, litologia, geologia e uso del suolo) e le variabili più tipicamente legate alle vicissitudini meteorologiche e idrologiche (tipo, intensità e distribuzione della pioggia, grado di saturazione degli invasi del bacino). Ambedue le categorie dei fattori citati presentano, per il bacino del Cordon, caratteristiche di complessità e variabilità spaziale tipiche dei bacini alpini e tali da conferire al comportamento del bacino caratteri fortemente dinamici.

L'analisi dei dati relativi alle precipitazioni e alle portate consente di individuare alcuni elementi caratteristici del regime idrologico del bacino (DALLA FONTANA 1992): gli elevati deflussi da fusione nivale in gran parte concentrati nei mesi di maggio-giugno e le piene estive in concomitanza con eventi meteorici di tipo temporalesco. Non mancano gli eventi di piena nel periodo autunnale, ma la collocazione altimetrica del bacino è tale che fin dall'autunno gran parte della precipitazione si verifica in forma solida e quindi senza conseguenze immediate sulle portate.

L'importanza dello stato idrico iniziale del bacino nel determinare l'entità degli eventi di piena è confermata dai dati sperimentali, tuttavia la correlazione con le piogge del periodo antecedente all'evento risulta poco significativa mentre la portata presente in alveo all'inizio dell'evento sembra offrire in questo senso maggiori garanzie.

L'esame dei pluviogrammi e dei relativi idrogrammi indica tempi di risposta del bacino dell'ordine di un'ora e anche meno il che rende importante un adeguato intervallo di registrazione delle osservazioni idrometriche e pluviometriche che, nel caso del Cordon, è stato fissato in 5 minuti.

Risultano finora disponibili dati sul trasporto al fondo rilevati in occasione di cinque eventi di piena. Gli andamenti degli idrogrammi di piena e del trasporto solido al fondo sono riportati in figura 3 per quattro di questi eventi; un quinto, avvenuto il 17 giugno 1991, non viene riportato, poiché la registrazione del trasporto al fondo non è risultata completa. I volumi di materiale solido rilevati alla stazione di misura sono piuttosto modesti e variano fra 9.3 m³ (5 ottobre 1992) e 85 m³ (3 luglio 1989). Il materiale trasportato, di pezzatura ghiaiosa e ciottolosa, pre-

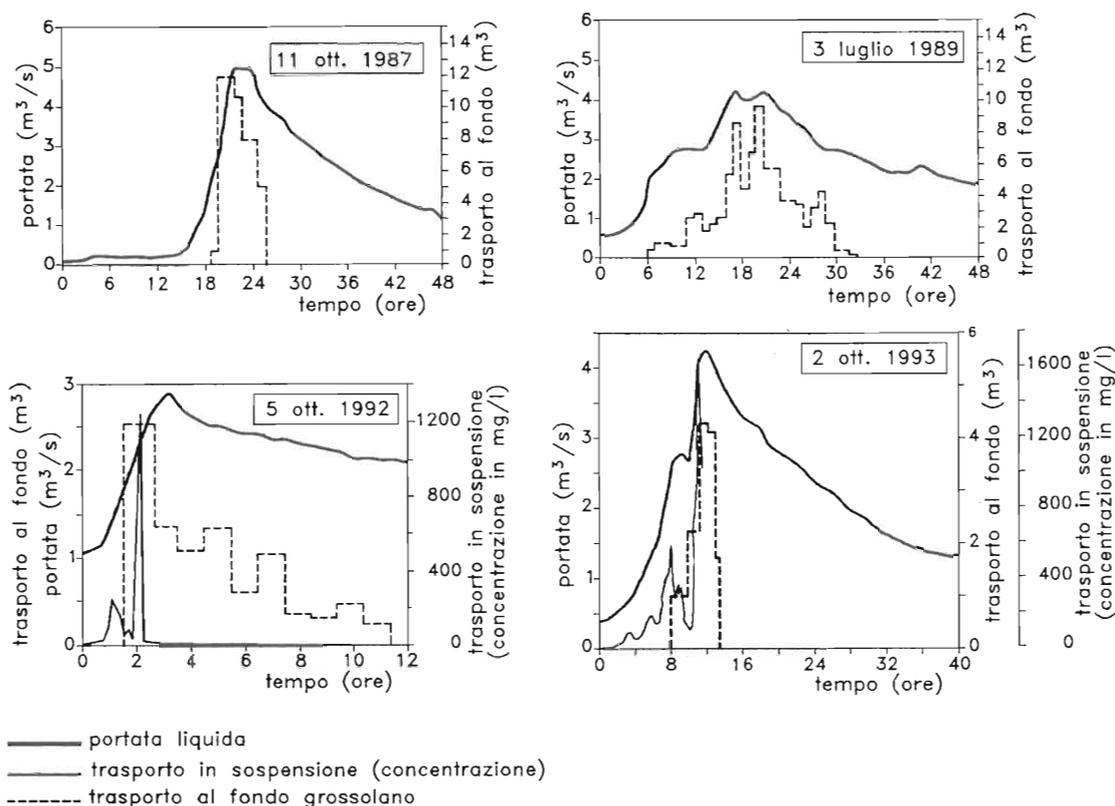


Fig. 3. Idrogrammi delle principali piene con trasporto solido.

senta valori mediani (D_{50}) varianti, nei diversi eventi, fra 31 e 83 mm; il valore più elevato caratterizza l'evento di maggiore entità (3 luglio 1989).

Come si nota in figura 3, i valori di portata corrispondenti alla cessazione del trasporto grossolano al fondo risultano costantemente più elevati di quelli rilevati all'inizio del trasporto. Questo risultato, senza dubbio meritevole di approfondimento, è in accordo con quanto emerge dagli studi sul trasporto solido al fondo condotti del bacino del torrente Erlenbach (Svizzera) da RICKENMANN (1994).

Dati relativi al trasporto solido in sospensione sono disponibili per le piene del 5 ottobre 1992 e del 2 ottobre 1993. Si osserva che i massimi valori della concentrazione del sedimento in sospensione si verificano circa un'ora prima del valore al colmo delle portate liquide. Altri dati sul trasporto in sospensione sono disponibili per i periodi di fusione del manto nevoso. A questo riguardo è possibile osservare una marcata variabilità fra anni, come il 1990, in cui il trasporto in sospensione associato ai deflussi nivali è responsabile di una cospicua produzione di sedimento (D'AGOSTINO *et al.* 1994) e anni in cui il trasporto in sospensione dei mesi primaverili risulta pressoché trascurabile: è il caso, ad esempio, del 1994. Questi diversi comportamenti potranno trovare spiegazione nella maggiore o minore gradualità dei processi di fusione del manto nevoso, nella concomitanza di eventi piovosi, nelle caratteristiche di estensione spaziale, continuità e di durata del manto nevoso durante il periodo invernale.

5 Processi erosivi e morfologia d'alveo: rilievi nel bacino

Il rilievo e l'analisi dei dati sul trasporto solido alla stazione sperimentale sono stati integrati da dettagliati studi di campagna condotti all'interno dell'unità idrografica, finalizzati ad approfondire le conoscenze sui processi erosivi e di trasporto del sedimento sui versanti, nei collettori minori e lungo l'asta torrentizia principale del Rio Cordon.

Le aree sorgenti di sedimento presenti sui versanti e lungo i corsi d'acqua minori sono state oggetto di rilievi che hanno consentito di determinarne superficie, quota, pendenza copertura vegetale e di valutare la distribuzione granulometrica del materiale coinvolto. Le aree sorgenti di sedimento presenti nel bacino del R. Cordon consistono principalmente in falde detritiche, piccole frane superficiali, aree decorticate da eccessivo pascolamento, sponde e alvei in erosione su piccoli collettori. Sono state rilevate 131 aree sorgenti di sedimento; la superficie da esse complessivamente occupata ammonta al 5,2 % della superficie del bacino. Le informazioni rilevate sono state cartografate, digitalizzate e gestite per mezzo del sistema informativo geografico impiegato per l'analisi delle caratteristiche fisiche del bacino. Questa analisi ha consentito di sviluppare alcuni indicatori dell'attività delle sorgenti di sedimento (area drenata, connessione con la rete idrografica, distanza dalla sezione di chiusura), anche in relazione a diverse ipotesi di espansione del reticolo idrografico (DALLA FONTANA e MARCHI 1994).

Il rilievo morfologico dell'asta torrentizia del Rio Cordon (BILLI 1993) ha portato all'individuazione di tratti con caratteristiche differenziate: tratti d'alveo a gradinata (step pool), tratti alluvionali e tratti misti. La morfologia a gradinata, descritta da diversi autori (WHITTAKER 1987; GRANT *et al.* 1990) è caratteristica di molti piccoli corsi d'acqua di montagna. I tratti a gradinata sono i più stabili fra quelli rilevati nel Rio Cordon ed appaiono suscettibili di variazioni morfologiche solo in occasione di eventi di piena di notevole entità. Sono stati definiti tratti misti quelli in cui le sequenze a gradinata sono irregolarmente interrotte da accumuli disordinati di materiale grossolano. Nei tratti d'alveo classificati come «alluvionali», il Rio Cordon scorre entro i propri depositi, presentando un alveo di piena, inattivo, ben distinto da quello di magra. I tratti d'alveo alluvionali presentano corpi sedimentari come barre longitudinali e trasversali, che costituiscono importanti aree di immagazzinamento del sedimento.

6 Discussione e Conclusioni

La base informativa raccolta sul bacino del Cordon unitamente alle potenzialità offerte dai sistemi informativi geografici ha permesso di affrontare lo studio dei processi idrologici secondo un approccio di tipo distribuito. In tal senso è stata indagata la propensione del bacino alla generazione dei deflussi diretti definendo a scala locale, attraverso la sintesi di una dettagliata carta del CN, il grado di efficienza idrologica del complesso suolo-soprassuolo.

La disponibilità di un modello digitale del terreno di notevole dettaglio ha inoltre consentito di affrontare su base «topografica» la simulazione del meccanismo di generazione dei deflussi di piena. Si riconducono a questo filone sia le ricerche riguardanti la sintesi del reticolo idrografico a partire dalla matrice delle quote (BORGA e DA ROS 1994), sia i tentativi di modellazione degli eventi di piena basati sul concetto di «area variabile di contributo al deflusso» (BORGA 1992).

In accordo con gli obiettivi originali del bacino sperimentale i risultati più significativi sono tuttavia quelli relativi alle indagini sui rapporti fra trasporto solido al fondo e deflussi liquidi.

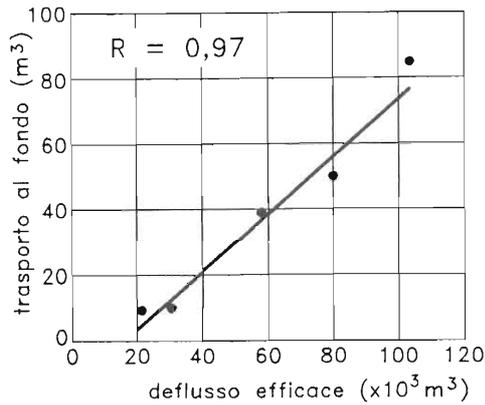


Fig. 4. Relazione tra deflussi liquidi e volume di trasporto al fondo.

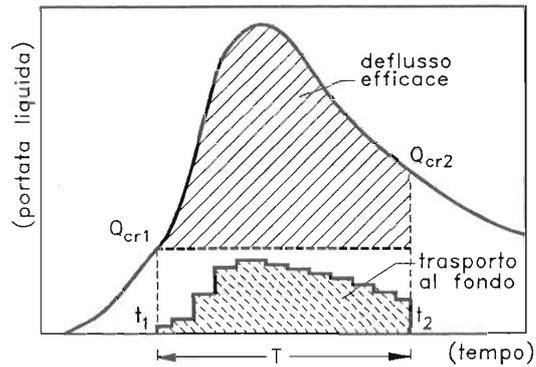


Fig. 5. Determinazione del volume di deflusso responsabile del trasporto al fondo.

Una relazione analitica fra portate liquide e trasporto al fondo è stata sviluppata impiegando dati mediati su base oraria (D'AGOSTINO *et al.* 1994). L'espressione sviluppata presenta la seguente forma:

$$Q_s = [(3600 Q)^x / K_1] - K_2$$

dove sono:

Q_s = trasporto al fondo di sedimento grossolano ($m^3 h^{-1}$)

Q = portata media oraria ($m^3 s^{-1}$)

x, K_1, K_2 = parametri di taratura.

I risultati che emergono dall'applicazione della formula riportata sopra mostrano in effetti un buon accordo fra i volumi cumulati dei deflussi liquidi e del trasporto al fondo, mentre la variabilità dei parametri di taratura fra i diversi eventi è risultata relativamente contenuta.

In figura 4, viene presentata la relazione fra il volume di materiale solido depositato alla stazione di misura durante i vari eventi di piena e il corrispondente deflusso efficace (BILLI *et al.* 1994). Il deflusso efficace ai fini del trasporto solido al fondo è stato determinato, per ciascuna piena, come il deflusso eccedente la portata critica all'inizio dell'evento (fig. 5). La correlazione, pur nell'esiguità del campione disponibile, è soddisfacente, ed appare migliore per gli eventi maggiori che per quelli caratterizzati da deflussi efficaci più modesti.

7 Riassunto

La memoria presenta una sintesi delle ricerche condotte nel bacino attrezzato del Rio Cordon (Dolomiti, Italia Nord-Orientale). Vengono brevemente descritte le caratteristiche morfometriche e tematiche del bacino, che sono state analizzate per mezzo di un sistema informativo geografico. Sulla base dei dati raccolti durante i primi anni di osservazione, vengono delineati gli aspetti essenziali del regime idrologico e del trasporto solido del bacino. Per quanto concerne l'idrologia del bacino, il regime dei deflussi è caratterizzato da deflussi sostenuti durante il periodo di fusione della copertura nevosa (mesi di maggio e giugno), mentre gli eventi di piena più significativi hanno luogo in estate ed all'inizio dell'autunno. Vengono brevemente discusse le relazioni fra il trasporto solido al fondo, rilevato in occasione di alcuni eventi di piena, e le caratteristiche dei deflussi liquidi responsabili del trasporto (volume di deflusso, portata critica all'inizio ed alla cessazione del trasporto).

8 Riferimenti bibliografici

- BÄNZIGER, R.; BURCH, H., 1990: Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent. *IAHS Publ.* 193: 207–214.
- BILLI, P., 1993: Rilievo morfologico-sedimentario dell'alveo del Rio Cordon. Rapporto preliminare. Progetto CEE-EROSLOPE, Contr. n. EV5V-CT92-0179.
- BILLI, P.; D'AGOSTINO, V.; LENZI, M.A.; MARCHI, L., 1994: Geomorphological processes and sediment yield in a small basin of the Dolomites (North-Eastern Italy). Tokyo, Japan, International Symposium on Forest Hydrology, Oct. 24–28, 1994. (in press).
- BORGA, M., 1992: Modellazione dell'area variabile di contributo al deflusso in un bacino montano. *Quaderni di Idronomia Montana* 11, 12: 61–82.
- BORGA, M.; DA ROS, D., 1994: On the hydrologic response of basins from analysis of digital elevation data derived networks. XVII General Assembly EGS, Grenoble. Part II, Section VI, C393.
- CAMBON, J.P.; MATHYS, N.; MEUNIER, M.; OLIVIER, D., 1990: Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne. *IAHS Publ.* 193: 231–238.
- CATTANEO, D.; VIOLA, F., 1992: Assetti climatologici, vegetazionali e pedologici. In: *Il bacino attrezzato del Rio Cordon*. Regione Veneto, *Quaderni di Ricerca*. 13: 27–96.
- CAZORZI, F., 1992: Il modello digitale del bacino. In: *Il bacino attrezzato del Rio Cordon*. Regione Veneto, *Quaderni di Ricerca*. 13: 97–107.
- CAZORZI, F., 1993: A Watershed Oriented Digital Terrain Model. User Manual. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali. University of Padova. Internal Report. pp. 180.
- D'AGOSTINO, V.; LENZI, M.A.; MARCHI, L., 1994: Sediment transport and water discharge during high flows in an instrumented watershed. In: ERGENZINGER, P.; SCHMIDT, K.H. (eds) *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*. Lecture notes in Earth Sciences. Berlin-Heidelberg, Springer 52: 67–81.
- DALLA FONTANA, G.; MARCHI, L., 1994: Sediment source areas in a small alpine basin. International Symposium on Forest Hydrology, Oct. 24–28, 1994, Tokyo, Japan. (in press).
- DALLA FONTANA, G., 1992: Caratteri salienti dell'idrologia del bacino. In: *Il bacino attrezzato del Rio Cordon*. Regione Veneto, *Quaderni di Ricerca*. 13: 145–158.
- FATTORELLI, S.; KELLER, H.M.; LENZI, M.; MARCHI, L., 1988: An experimental station for the automatic recording of water and sediment discharge in a small alpine watershed. *Hydrol. sci. j.* 33, 6: 607–617.
- FRIZ, C.; GATTO, G.; SILVANO, S., 1992: Caratteristiche geolitologiche, geomorfologiche e dissesti. Regione Veneto, *Quaderni di Ricerca* 13: 15–25.
- GOVI, M.; MARAGA, F.; MOIA, F., 1993: Seismic detectors for continuous bed load monitoring in a gravel stream. *Hydrol. sci. j.* 38, 4: 123–132.
- GRANT, G.E.; SWANSON, F.J.; WOLMAN, M.G.; 1990: Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Geol. soc. Am. bull.* 102: 340–352.
- KELLER, H.M.; STROBEL, T., 1982: Water balance and nutrient budgets in subalpine basins of different forest cover. *Proc. Symp. Hydrolog. Research Basins*. Sonderheft Landeshydrologie. S. 683–694.
- RICKENMANN, D., 1994: Bedload transport and discharge in the Erlenbach stream. In: ERGENZINGER, P.; SCHMIDT, K.H. (eds) *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*. Lecture notes in Earth Sciences. Berlin-Heidelberg, Springer 52: 53–66.

- SCHMIDT, K.H.; ERGENZINGER, P., 1992: Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surf. Process. Landf.* 17: 147–165.
- WHITTAKER, J.G., 1987: Sediment transport in step-pool streams. In: Thorne, C.R.; Bathurst, J.C.; Hey, R.D. (eds) *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Chichester, Wiley. pp. 545–579.

Ringraziamenti

Le ricerche sul bacino del Rio Cordon sono state prevalentemente finanziate dal Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica della Regione Veneto. Recentemente hanno ottenuto un significativo impulso nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla Comunità Europea. (Programma Environment 1992–94, contratto n.EV5V-CT92-0179): «Instability, erosion and solid material transport in steep mountain slope, combined laboratory and field investigations».

Indirizzo dell'autore:

Prof. Sergio Fattorelli, Dr. Federico Cazorzi,
Prof. Giancarlo Dalla Fontana, Prof. Mario A. Lenzi
Università di Padova
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali
Via Gradenigo 6
35131 Padova, Italia

Dr. Alberto Luchetta, Dr. Renzo Scussel
Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica, Regione Veneto
Via passo Campolongo 122
32020 Arabba BL, Italia

Dr. Lorenzo Marchi
CNR-IRPI
Corso Stati Uniti 4
35020 Padova, Italia

Long-term studies of biogeochemical and physical parameters in Swiss rivers *

Joan S. Davis

Abstract

The NADUF-Programme, a long-term surveillance of chemical and physical parameters of major Swiss rivers, has now been in operation for over 15 years. Within this programme, water samples (continuously taken, flow proportional) are analysed bi-weekly for biogeochemical substances of natural and anthropogenic origin. Physical parameters are continuously measured and registered. The long-year database permits a differentiated evaluation of the changes in concentration and loads as well as of the factors which influence them. The trends that have been observed for the nutrients phosphate and nitrate are discussed here, as well as the problems and progress associated with endeavours to minimize the nutrient loads.

Keywords: rivers, nutrients, long-term surveillance, phosphate, nitrate, temperature, phosphate-ban.

1 Introduction

Examining river water for quality changes serves a double purpose: detecting increasing loading, i.e., signals for the need for additional water protection measures, and controlling the success of measures which have already been implemented. In both cases however, subtle changes from year to year, indicating possible trends, are difficult to detect even with the best of data: changes in discharge influence concentration, and in addition, each hydrological year exhibits different characteristics of precipitation patterns and temperature regime, thus providing different influence parameters for both geochemical as well as biological substances. Obtaining conclusive evidence of changes in a short time span is thus problematic, unless the changes are particularly marked. For this reason, when data are required for evaluating the necessity and/or successes of water protection measures, longer term surveillance is required.

The surveillance programme, upon which this paper is based, has been in operation for over 15 years. In the report following, two aspects have been selected from the overall study: the long term changes in nutrients (mainly anthropogenic sources) and the annual periodicity in the concentrations of nutrients and geochemical substances.

2 Materials and Methods

2.1 Surveillance programme 'NADUF'

The NADUF-Programme is a surveillance network of stations located on the main rivers of Switzerland. It is a joint project of the Federal Office of the Environment (BUWAL), the Federal Institute for Water Resources and Water Protection (EAWAG), and the Swiss National Hydrological and Geological Survey (LHG). The programme serves both water protection goals as well as scientific studies.

* This article is based on a recent report on this work published in German (JAKOB *et al.* 1994)

Within this programme, water samples are taken continuously on a flow proportional basis, thus allowing appropriate estimates of loads. The samples are analysed bi-weekly for biogeochemical substances of natural and anthropogenic origins. The following substances are measured: total hardness, alkalinity, calcium, magnesium, potassium, sodium, chloride, sulfate, silicate, nitrate, ortho-phosphate, total-phosphorous, dissolved organic carbon, total organic carbon, nitrite (until 1986), ammonium, Kjeldahl-nitrogen, total nitrogen (since 1986). At selected stations the heavy metals zinc, copper and lead are also determined. Several additional parameters are continuously measured and registered: sensor detection of pH, electrical conductivity, temperature, oxygen concentration; FIA of nitrite and ammonium. A detailed description of the programme has been previously published, together with initial evaluations (Davis *et al.* 1985). The data are published annually in the Swiss Hydrological Yearbook (LHG), and are also available on diskette directly from the LHG (Landeshydrologie und Geologie; Postfach, CH-3003 Bern).

2.2 Characterisation of the sampling stations

The locations of the sampling stations are indicated on the map in Figure 1. The stations can be divided according to their geographical characteristics into three groups.

1. Rivers with mainly alpine or pre-alpine catchment areas: Rhine – Diepoldsau, Saane – Gümmenten, Kleine Emme – Littau, Rhône – Porte du Scex, Ticino – Riazzino, Inn – Martinsbruck.
2. Large Mittelland rivers with lakes in their catchment areas: Rhine – Rekingen, Rhine – Laufenburg, Rhine – Village-Neuf, Aare – Bern, Aare – Hagneck, Aare – Brugg, Reuss – Mellingen, Limmat – Gebenstorf, Rhône – Chancy.
3. Smaller rivers in heavy populated areas of the Mittelland and of the Jura area: Thur – Andelfingen, Glatt – Rheinsfelden, Birs – Münchenstein.

Table 1 provides a comparison of these stations according to a selection of physical characteristics.

For the part of the study presented in this paper, four sampling stations have been selected for comparison. These stations differ considerably in discharge, population, geological characteristics, use of land and size of the catchment area. Figure 2 shows the differences in the land use, which plays a major role in the type and amount of chemical and nutrient loading the rivers receive.



Fig. 1. The NADUF-sampling stations.

Tab.1. Statistical information on the NADUF-sampling stations and their catchment areas (Table form A. Jakob, LHG)

| Sampling station | Height [m a.s.l.] ¹⁾ | Catchment area, [km ²] | Average Height [m a.s.l.] ¹⁾ | Discharge (Q) [m ³ /s] ²⁾ | Inhabitants/Q [Inh./[m ³ /s]] ³⁾ |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Rhein – Diepoldsau | 410 | 6119 | 1800 | 230 | 1380 |
| Thur – Andelfingen | 356 | 1696 | 770 | 47.7 | 7140 |
| Glatt – Rheinfelden | 336 | 416 | 498 | 8.54 | 39970 |
| Rhein – Rekingen | 323 | 14718 | 1260 ⁴⁾ | 440 | 5570 |
| Rhein – Laufenburg | 299 | 34074 | 1130 ⁴⁾ | 1027 | 6130 |
| Birs – Münchenstein | 268 | 911 | 740 | 15.3 | 8940 |
| Rhein – Village-Neuf | 243 | 36472 | 1100 ⁴⁾ | 1067 | 6470 |
| Aare – Bern | 502 | 2969 | 1610 | 119 | 2000 |
| Saane – Gümmenen | 474 | 1880 | 1130 | 55.3 | 3550 |
| Aare – Hagneck | 437 | 5140 | 1370 | 180 | 3900 |
| Aare – Brugg | 332 | 11750 | 1010 | 314 | 6180 |
| Kleine Emme – Littau | 431 | 477 | 1050 | 14.9 | 3110 |
| Reuss – Mellingen | 345 | 3382 | 1240 | 139 | 3680 |
| Limmat – Gebenstorf | 332 | 2415 | 1130 | 102 | 8260 |
| Rhône – Porte du Scex | 377 | 5220 | 2130 | 172 | 1600 |
| Rhône – Chancy | 347 | 10294 | 1580 | 327 | 4360 |
| Ticino – Riazzino | 200 | 1611 | 1640 | 70.7 | 1040 |
| Inn – Martinsbruck | 1030 | 1945 | 2350 | 56.5 | 370 |

¹⁾ Source: Swiss Hydrological Yearbook (LHG)

²⁾ Averages of the period 1961–1980 (SCHÄDLER and WEINGARTNER 1992)

³⁾ Population as of 1990 (Data source: GEOSTAT, Swiss Federal Office of Statistics) Foreign population estimated; tourism not included.

⁴⁾ Includes only Swiss part of catchment area (Data source: GEOSTAT, Swiss Federal Office of Statistics)

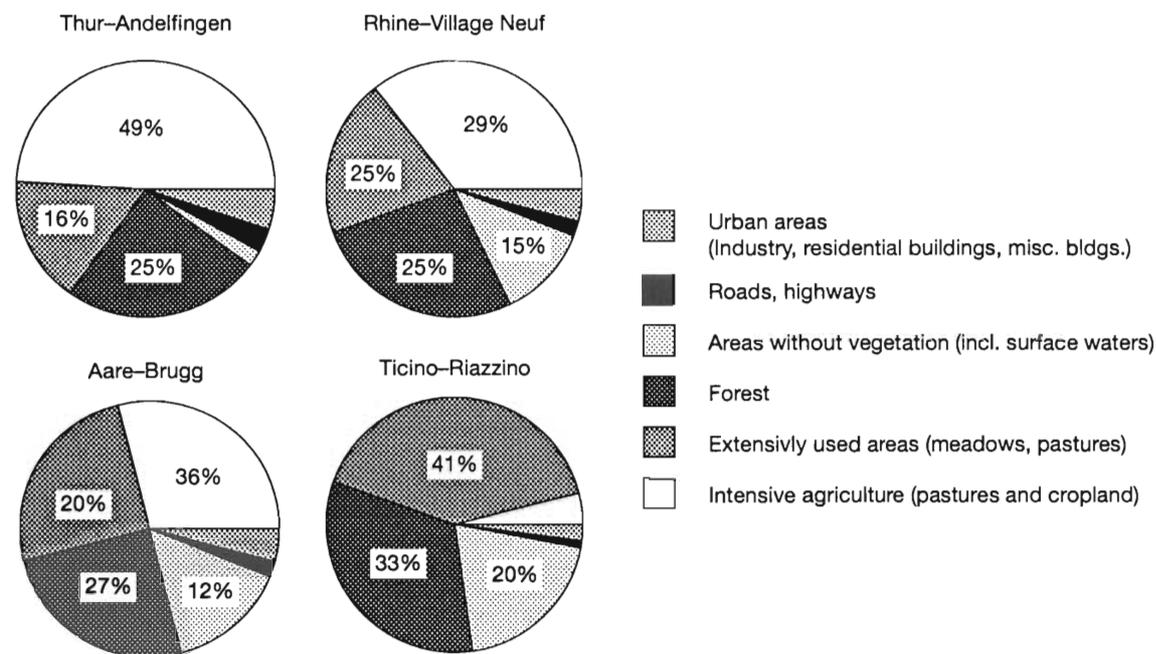


Fig. 2. Land use of four selected NADUF-sampling stations (for Village-Neuf only the Swiss part is represented). Data source: GEOSAT, Swiss Federal Office of Statistics. Data preparation: GIS/LHG. (Graph from A. Jakob, LHG)

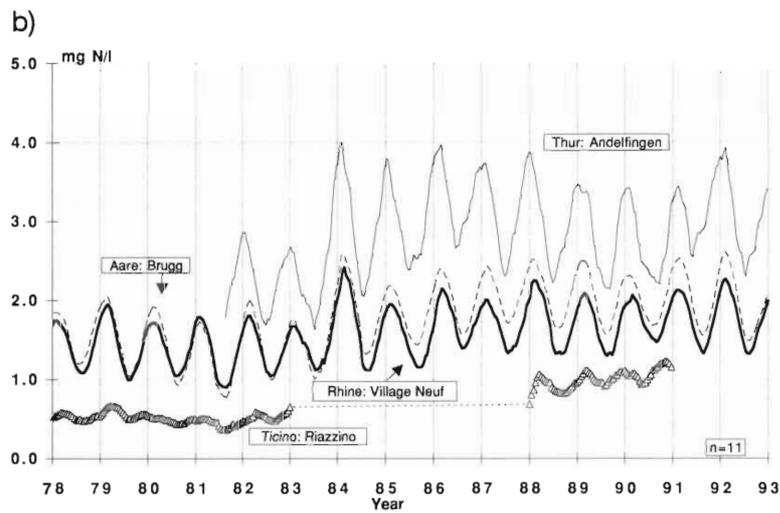
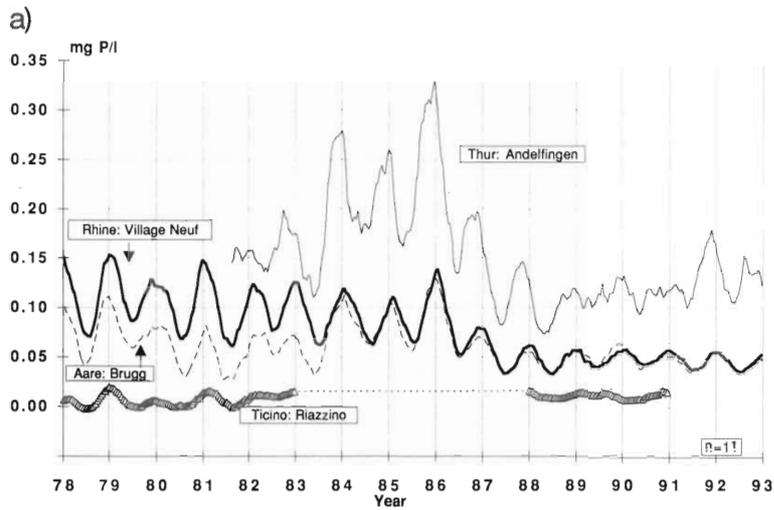


Fig. 3. Development of the ortho-phosphate (a) and the nitrate (b) concentrations in four rivers, which have significantly different nutrient loads. The data are represented as a moving average over 11 two-week continuously collected samples.

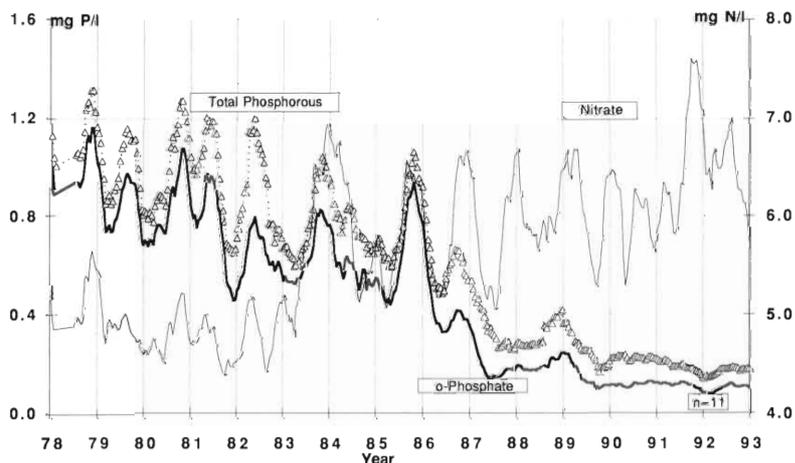


Fig. 4 Development of phosphate and nitrate concentrations at the sampling station Rheinsfelden, located on the heavily loaded river Glatt. (Note that the y-scales of Figures 3a and 3b are different.)

3 Results and Discussion

The data of the NADUF-Programme are evaluated according to various methods, in order to meet the different information needs for water protection issues and for studies on the behaviour of biogeochemical substances in surface waters. In this report, three evaluation methods are used: long year changes in concentration, semi-quantitative estimates of changes in concentration and/or load, and annual periodicity of concentration patterns.

3.1 Development of nutrient loading

Nutrients are a significant indicator of water quality and of anthropogenic influence. In this context, phosphorous is considered particularly relevant. The development of ortho-phosphate in the four rivers of different characteristics selected for this report is shown in Figure 3a. In spite of the fact that the annual periodicity is particularly marked in this graph (plotted as a moving average over 11 measurements) it is clearly recognizable that the phosphate concentration has decreased in the last few years. This can be attributed to several factors: additional water treatment plants have been built; phosphate precipitation has been installed in existing plants; phosphate was banned in 1986 for use in laundry detergents.

A similar plot of nitrate (Fig. 3b) gives a different picture: an increase is recognizable here at all sampling stations. This is especially obvious in the Ticino after the break in sampling.

When examining the trends of these two nutrients in the river Glatt, which is more heavily loaded than the other four rivers, even more marked changes in concentration are seen (Fig. 4).

3.2 Estimate of change in loading

The graphs above, while indicating the trend in the concentration of the substances examined, are not suitable for estimating the amount of the change: since the discharge continuously affects the concentration and (calculated) load, increases or decreases in these values cannot be estimated without specifically considering the influence of the change in discharge.

One approach to obtain a semi-quantitative estimate of the change in concentration or load is to compare years having similar discharges, thus eliminating the influence of discharge. Plotting annual averages in this way (Fig. 5a), the increase in nitrate at the Village-Neuf station is estimated at 20–30%, depending on the time range considered. Phosphate (Fig. 5b) on the other hand shows a very marked decrease, estimated at about 50%.

In using such a graphic comparison of years with similar discharge, it should not be forgotten that different hydrological patterns, for example whether the high discharge period occurs in a warm or cold time of year, will prevent such years from being completely comparable. In spite of these differences in the course of the individual years, comparing within the range of similar discharges essentially eliminates a strong variable, thus favoring the detection of other factors contributing to differences in concentration and load.

Marked changes have been observed with this method not only for nutrients, but also for temperature (Fig. 5c): in the Rhine at Village-Neuf the increase in temperature is approximately 1°C. In looking for an explanation of this increase, one might look to the use of water for cooling purposes, however, there have been no new large water cooling installations in this period of time in this area. Further, the total amount of heat produced in the area is insufficient for such a rise: the increase observed would require a heat input almost 2½ times that given off by all thermal electricity production in Switzerland, equivalent to about 12% of the total energy use of the country.

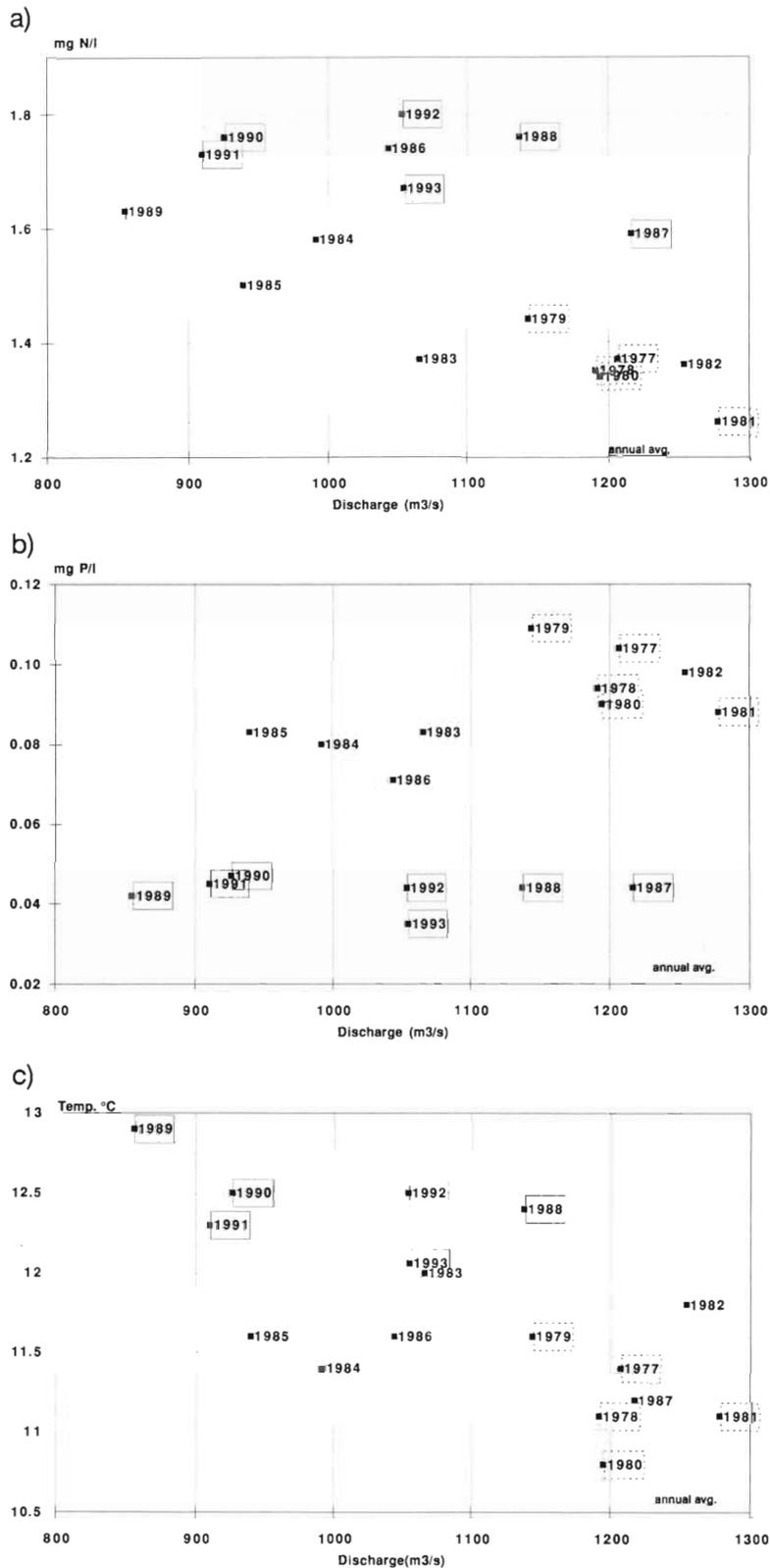


Fig. 5. Annual average values of concentrations (nitrate, a), phosphate, b)) and of temperature c) plotted as a function of annual average discharge. This representation facilitates the semi-quantitative estimates of changes in water quality (by comparing years of similar discharge). Sampling station Village-Neuf (Rhine, at Basel).

3.3 Annual fluctuations: the role of discharge and temperature

The annual behaviour patterns of three different parameters, a geochemical substance (magnesium), a nutrient (nitrate) and the water temperature appear very similar when plotted against discharge (Fig. 6a). Particularly conspicuous in the pattern shown by both of the substances is the essentially constant concentration, over a large range in the discharge, which is generally considered to be the major influence upon concentration. A different picture is seen when using temperature as the independent variable (Fig. 6b), and plotting the concentrations and discharge against it: the concentrations show a strong dependency upon temperature.

The influence of temperature upon concentration is both direct and indirect, depending on the substance. With respect to nutrients, the effect is direct, in that microorganisms metabolize the substances faster at a higher temperature. The effect upon geochemical substances is more indirect: the source of water – precipitation, groundwater, melt water - varies during the course of the year, and accordingly also the concentration of minerals. In the case of calcium however, there is in addition to the indirect effect via source, also a direct temperature effect upon the solubility.

Not only factors with an annual periodicity, i.e., temperature and discharge, exert an effect upon dissolved substances and physical parameters. There are also daily (JAKOB and TSCHUMI 1988) and weekly influences: the natural 24 hour cycle of light, with strong effect on organisms

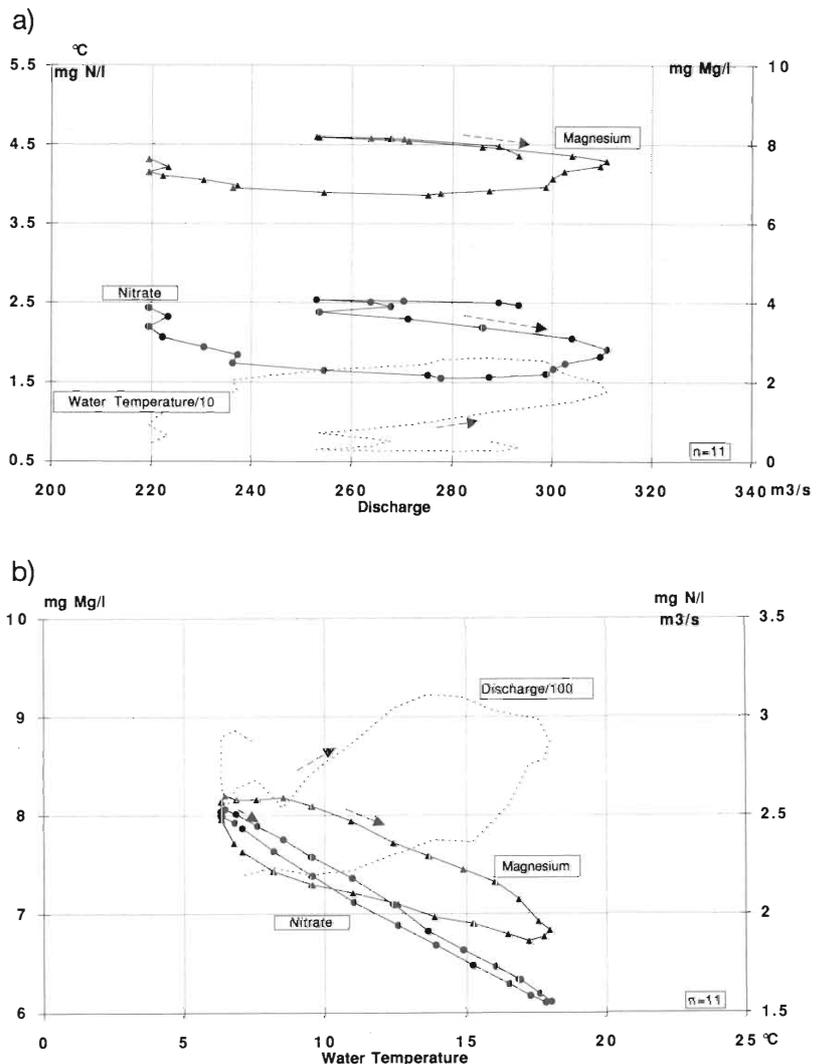


Fig. 6. Annual cyclic behaviour patterns of nitrate and magnesium concentrations plotted as a function of discharge (a) and water temperature (b). Sampling station Aare -- Brugg (1991).

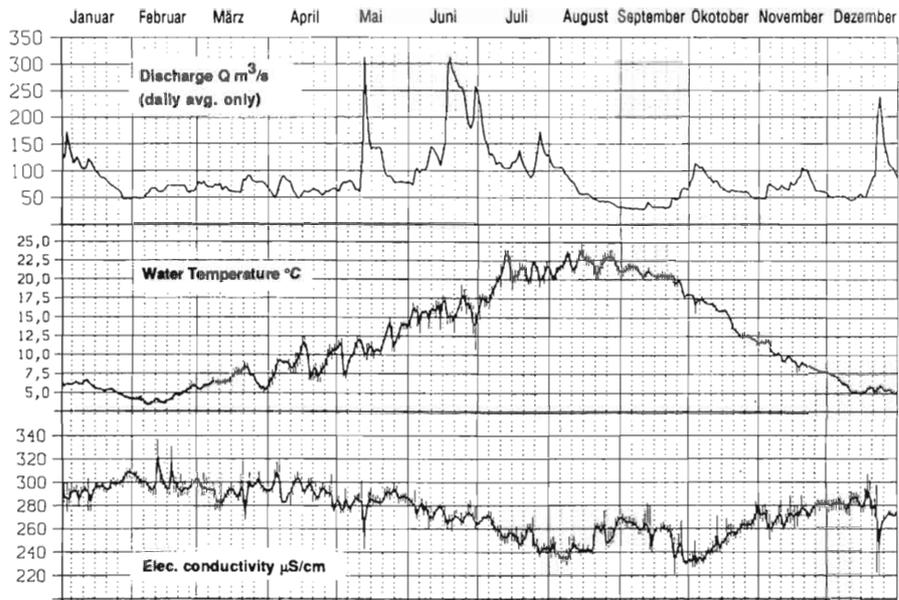


Fig. 7 Continuous recording of the physical parameters discharge, water temperature and electrical conductivity at the sampling station Limmat - Baden, Gebenstorf, 1991 (LHG, 1991). The seven-day periodicity is particularly marked in June, July and August.

and temperature, as well as anthropogenic influences on both a daily and weekly basis, mainly via discharges from water treatment plants as well as industrial production activities. Continuously recorded parameters (Fig. 7) indicate the extent of such fluctuations. The anthropogenic influence is easily recognized in that the minima of temperature and conductivity often have a seven day periodicity and occur on weekends.

4 Summary

The long term surveillance programme NADUF provides a data basis for dealing with water protection issues. Examples are:

- judging the current water quality of rivers
- detecting and estimating long-term changes of river water quality
- measuring the success of water protection measures
- estimating the amount of suspended material transported in the rivers, including that exported to surrounding countries
- estimating the influence of different factors such as the type of land use, population, discharge and water temperature upon the concentration and transported loads of dissolved substances and suspended material in rivers

Based on the evaluations used in this report, the following conclusions can be drawn with reference to the above mentioned issues:

- The phosphate loading of the rivers has been significantly reduced as a result of water protection measures, which increased efficiency of the phosphate removal in water treatment plants and brought a ban on phosphates in household laundry detergents. It should be noted however, that the reduction of phosphates in the rivers due to these measures would have been greater, had it not been for the increase in diffuse inputs of phosphates coming from intensively used agricultural areas, i.e., from fertilizers and soil erosion.

- Nitrate in river water has increased. This also comes mainly from intensively used areas. In contrast to rivers, some lakes have shown a stabilization of the nitrate concentration. In lakes, nitrogen elimination can occur via sedimentation and denitrification (HÖHENER and GÄCHTER 1993), which have not been observed in rivers.
- Seasonal variations in water sources as well as the effect of temperature upon the concentration of nutrients and geochemical substances are generally underestimated. Temperature often has a dominant effect, even in comparison to discharge, which is more often looked upon as playing the major rôle.
- The temperature in the larger rivers of Switzerland has shown an increase in the last 15 years. The use of water for cooling thermal energy plants can explain only a small part of this increase.
- Fluctuations (seasonal, weekly, daily) in the influencing parameters themselves (temperature, discharge) are often underestimated. Such periodicities need to be taken into consideration both in planning water sampling programmes and evaluating their data.

5 References

- DAVIS, J.S.; FAHRNI, H.-P.; LIECHTI, P.; SPREAFICO, M.; STADLER, K.; ZOBRIST, J., 1985: Das nationale Programm für die analytische Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer – eine Standortbestimmung. *Gas Wasser Abwasser* 65: 123–135.
- HÖHENER, P.; GÄCHTER, R., 1993: Prediction of dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentrations in deep, seasonally stratified lakes based on rates of DIN input and N removal processes. *Aquat. sci.* 55: 112–131.
- JAKOB, A.; TSCHUMI, P.A., 1988: Tagesschwankungen chemischer und physikalischer Faktoren in einem Fließgewässer (Schüss, Berner Jura). *Arch. Hydrobiol.* 113: 607–620.
- JAKOB, A.; ZOBRIST, J.; DAVIS, JOAN S.; LIECHTI, P.; SIGG, LAURA, 1994: NADUF – Langzeitbeobachtung des chemisch-physikalischen Gewässerzustandes. *Gas Wasser Abwasser* 74, 3: 171–186.
- LHG (Landeshydrologie und -geologie): *Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz*. Bern, Landeshydrologie und -geologie.
- SCHÄDLER, B.; WEINGARTNER, R., 1992: Natürliche Abflüsse 1961–1980. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern, Landeshydrologie und -geologie, Tafel 5.4.

Acknowledgements

Appreciation is expressed to my colleagues Jürg Zobrist and Laura Sigg of the EAWAG, Adrian Jakob (LHG) and Paul Liechti (BUWAL) for the long-standing cooperation on this project, as well as to Prof. Charles Emmenegger for his continuing support of the project and heading the project group. A special thanks is given to the many who have helped during these years in constructing the sampling sites, collecting the samples, running the analyses and preparing the data.

My deep appreciation is also due to Hans M. Keller. Woven through the work discussed here on behavioural patterns of substances in river, were the many conversations on comparing data on rivers and streams. His long-year experience, his creative approach on data evaluation, and his constructive cooperation on joint articles contributed significantly to these studies.

Address of the author:

Dr. Joan S. Davis

Swiss Federal Institute of Water Resources and Water Pollution Control (EAWAG)

Überlandstrasse 133

CH-8600 Dübendorf

Long-term hydrologic and stream chemistry responses of southern Appalachian catchments following conversion from mixed hardwoods to white pine

Wayne T. Swank, James M. Vose

Abstract

We summarize nearly 40 years of research on changes in water yield and timing of streamflow, and over 20 years of stream chemistry data, following conversion of two mixed deciduous hardwood forests to plantations of eastern white pine. Only 10 years after planting, annual streamflow from the pine-covered watersheds was less than expected from mixed hardwoods and by age 15, water yield reductions were about 20 cm. Subsequently, annual streamflow reductions frequently exceeded 25 cm. Significant flow reductions occurred in every month, with the greatest absolute changes in the high flow months and the largest percentage reductions (40%) in the low flow months. Based on hydrologic modelling and experimental data, greater evapotranspiration from pine is due to a much higher leaf area index throughout the year, and, consequently, greater interception loss in the dormant season and more transpiration loss in early spring and late fall. Flow duration analysis showed that conversion to pine reduced the frequency of both high and low flows by 33 to 60 percent. Concentrations of most streamwater solutes were similar between the pine covered watersheds and mature hardwoods. However, nutrient budget comparisons (input-output) showed net accumulations of 1.2 to 4.4 kg ha⁻¹ yr⁻¹ for Ca, Mg, K, and Na in pine ecosystems compared to hardwoods. The conservation of nutrients in pine ecosystems is due to reduced discharge and also greater accretion of nutrients in the vegetation compared to hardwoods.

Keywords: water yield, flow duration, stream chemistry, eastern white pine, mixed hardwoods

1 Introduction

The origin and development of forest hydrologic investigations are embedded in basic questions of the relationship between forests and runoff. In 1902, paired experimental watersheds were established in the Emmental region of Switzerland to study the effects of deforestation and intensive use of mountain lands on flood flows and sediment transport (KELLER 1988). Forest hydrology research programs in many countries were initially established to address controversy about the influence of forests on floods and erosion. Small catchment research has also been very successful in establishing hydrologic principles which are used to evaluate the effects of management practices on water resources (SWANK and JOHNSON 1994).

The purpose of this paper is to provide a synthesis of long-term studies on the effects of forest species conversions on hydrologic and nutrient responses for several catchments at the Coweeta Hydrologic Laboratory. Specifically, we summarize nearly 40 years of research on changes in water yield and timing of streamflow, and over 20 years of stream chemistry data, following conversion of two mixed deciduous hardwood forests to plantations of eastern white pine (*Pinus strobus* L.). Hydrologic modeling and process level studies are used to explain the integrated watershed responses to vegetation manipulation.

2 Site Description

The research was conducted in the Blue Ridge Providence of the southern Appalachian Mountains of western North Carolina, U.S.A. (Fig. 1). The experimental watersheds are within the 2185-ha basin of the Coweeta Hydrologic Laboratory. The climate is classed as marine, humid temperate with water surplus in all seasons (SWIFT *et al.* 1988). The average annual precipitation varies from 1700 mm at the lower elevations to 2500 mm on the upper slopes. The mean monthly temperature ranges from 3.6 °C in January to 20.2 °C in July.

The two experimental watersheds converted from hardwoods to pine and their undisturbed reference watersheds are located at lower elevations (800 m). Watershed (WS) 1 covers 16.1 ha, has a relief of 293 m, and a south aspect. After a calibration period of 10 years, the oak-hickory forest was clearcut in 1956 and white pine seedlings were planted in 1957. Watershed 17 (WS17) covers 13.4 ha, has a relief of 280 m, and a northwest aspect. The native hardwood forest was initially cut in 1942, recut for 13 years, and planted with white pine in 1956. Hardwood sprouts were cut or sprayed with chemicals as required to release the pine on both WS1 and WS17. The control or reference watersheds are immediately adjacent to the experimental treatments; WS2 is 12 ha and WS18 is 13 ha. The mixed hardwood forest on the reference watersheds has remained undisturbed since selective logging during the period between 1919-1923. The vegetation is classified as an oak-history association. However, numerous species

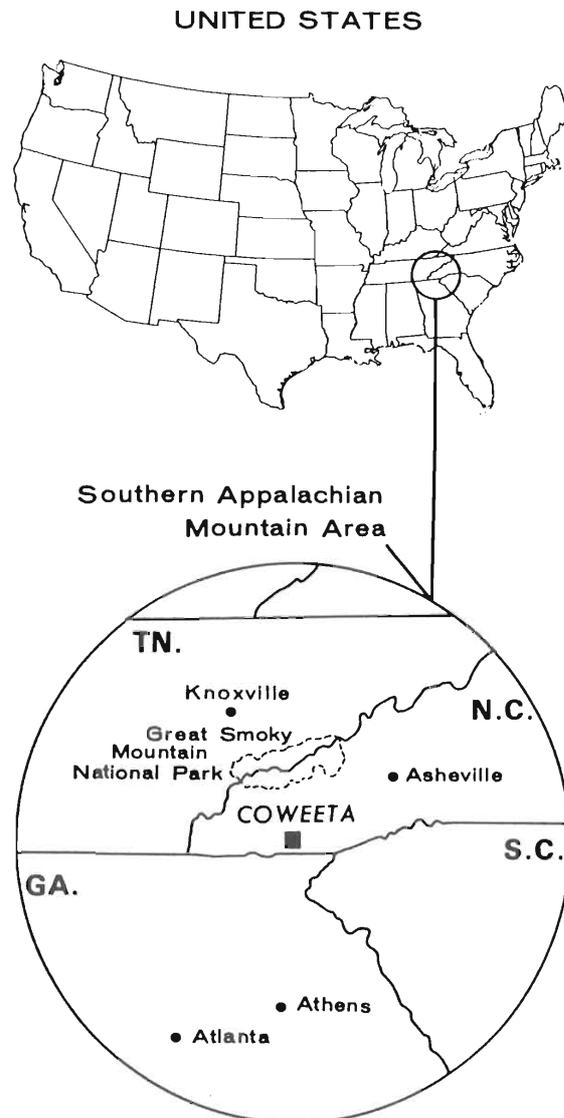


Fig. 1. The Coweeta Hydrologic Laboratory is located in the southern Appalachian Mountains of southwestern North Carolina, U.S.A.

occur in the overstory and, frequently, 20 or more species in the 60–100 year age class are found in the overstory. Soils of these watersheds are ultisols and are represented by typic hapludults and humic hapludults. Detailed descriptions of experimental treatments, climate, vegetation, and soils are reported elsewhere (SWANK and CROSSLEY 1988).

3 Methods

Stream gaging began on all four watersheds in 1934–1936 using 90 °C or 120 °C sharp-crested V-notch weirs. Processing of hydrologic data was previously described by HIBBERT and CUNNINGHAM (1966). The hydrologic analysis is based on monthly streamflow prediction equations derived from a calibration period during which the reference watershed and the watershed to be treated (pine conversion) were in an undisturbed condition. Annual treatment effects are the sums of deviations from twelve monthly calibration regressions (actual minus predicted flow). Annual streamflow is significantly different at the 0.95 probability level if it differs from the predicted flow by about ± 3.0 cm on WS1 and ± 4.0 cm on WS17.

Most of the basic system for long-term water chemistry measurements was established in 1972. Bulk precipitation samples are collected weekly using plastic funnels at eight sites co-located with stations previously established to quantify precipitation within the Coweeta Basin. Stream water is routinely sampled each week in the flowing stream above the weir on each watershed. Previous studies comparing flow weighted proportioned sampling with weekly grab samples has shown that weekly grab samples provide reliable estimates of nutrient export for most constituents (SWANK and WAIDE 1988). Water samples are analyzed at Coweeta for a full suite of ions following established analytical procedures (REYNOLDS *et al.* 1986). No pre-treatment water chemistry data are available since the pine conversion predated chemistry monitoring. Thus, the effects of treatment on solute concentrations and nutrient budgets are deduced from comparisons with adjacent, undisturbed control watersheds. Soils and geology of adjacent watersheds are quite similar, which minimizes differences in water chemistry between watersheds and allows inferences to be made about the effects of treatment on stream chemistry. Additional details on hydrologic methods, water chemistry sampling, and analytical methods are given in SWANK and CROSSLEY (1988).

PROSPER was used to simulate evapotranspiration (Et) and discharge for the white pine plantations. PROSPER is a phenomenological, one-dimensional model that links the atmosphere, vegetation, and soils. Plant and soil characteristics are combined in an ET surface and ET is predicted by a combined energy balance-aerodynamic method using a Penman-Monteith equation. A daily time-step was used in the hydrologic simulations for the pine forests. PROSPER has been widely used to estimate hydrologic fluxes from Coweeta forests and other forest ecosystems (SWIFT *et al.* 1975; HUFF and SWANK 1985; TROENDLE 1979; VOSE and SWANK 1992); specific implementation of the model for data used in this paper is described by VOSE and SWANK (1994).

4 Results and Discussion

4.1 Annual Water Yield

These long-term studies of the effects of converting mixed hardwood to white pine on water yield have shown dramatic changes in streamflow which are important to forest resource managers, hydrologists, and ecologists. Streamflow responses to hardwood clearcutting prior to planting of white pine have been reported for both watersheds (SWANK and MINER 1968). After

Table 1. Simulated interception and transpiration totals for oak-hickory and white pine forests during the growing and dormant seasons. After SWIFT *et al.* (1975).

| Year and Vegetation Type | Interception (cm) | | | Transpiration (cm) | | |
|--------------------------|-------------------|----------------|-------|--------------------|----------------|-------|
| | May-October | November-April | Total | May-October | November-April | Total |
| 1972–1973 | | | | | | |
| Oak-hickory | 13.83 | 9.01 | 22.84 | 56.05 | 9.98 | 66.03 |
| White pine | 18.28 | 13.64 | 31.92 | 54.68 | 21.84 | 76.52 |

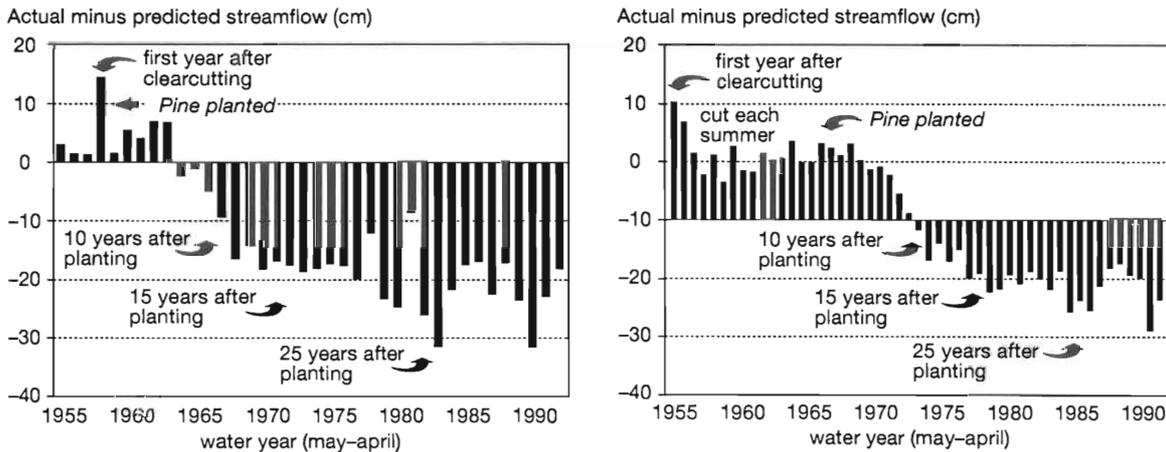


Fig. 2. Annual changes in flow after clearcutting mixed hardwood forests and planting white pine on two Coweeta watersheds.

planting in 1956–1957, annual changes in streamflow were similar on both watersheds as illustrated in Figure 2. For about 6 years after planting of white pine, streamflow increases remained relatively constant with values close to those expected for clearcut hardwoods for north and south-facing watersheds at Coweeta. Subsequently, as the pine stands developed, streamflow increases declined at a rate of 2 to 5 cm per year until 1972. After about 10–12 years following planting, streamflow was below levels expected from mature hardwood forests on both watersheds. By age 15, water yield reductions were about 20 cm (20%) less than expected for a mature hardwood forest. In the ensuing 20 years, annual reductions in flow ranged between 10 and 38 cm in relation to annual precipitation. For example, during exceptionally wet years such as 1980, 1982–1984, and 1990–1991, streamflow reductions were high (23 cm average), but in 1981 and the record (60 year) drought at Coweeta in 1986–1988, lower (17 cm average) streamflow reductions were observed.

Reasons for greater evaporative losses from young pine than from mature hardwoods have been given in several papers (SWANK and MINER 1968; SWANK and DOUGLASS 1974; SWIFT *et al.* 1975). Annual interception and subsequent evaporation of rainfall is greater for pine than hardwoods, particularly during the dormant season (HELVEY 1967). Interception loss varies with leaf area index (LAI), and measurements on watersheds at Coweeta show that during the dormant season LAI for hardwoods is less than 1 compared to 10 for white pine (SWANK *et al.* 1988). Interception studies in plots on WS1 (pine) and WS2 (hardwoods) during 1985–1989 showed that interception loss from pine was more than twice the interception from hardwood (SWANK *et al.* 1992). Evaporation for pine and hardwood was simulated for the 1972–1973 water year using the PROSPER model (SWIFT *et al.* 1975). This analysis showed greater dormant season transpiration losses from pine with very similar transpiration losses for pine and

hardwoods during the growing season (Tab. 1). Differences in dormant season transpiration are strongly influenced by LAI, where early in the growing season before hardwoods are leafed out and in late fall after hardwood leaf senescence, LAI of pine is still substantial (>5). Transpiration continues to occur during these periods because climatic conditions are often favorable for transpiration.

4.2 Monthly Responses

Intra-annual dynamics of evaporation processes in the pine stand on WS1 were observed from PROSPER simulations conducted from 1979–1989 (Vose and Swank 1994). In this study, PROSPER predictions of annual outflow (i.e., the drainage component below the main rooting zone) were well correlated ($r^2 = 0.81$) with measured annual streamflow. We have selected only one year (1984–1985) to illustrate the timing and relative magnitude of interception and transpiration (Fig. 3). In this particular water year, transpiration losses were very high in April and May. Interception losses greatly exceeded transpiration in July due to exceptionally high rainfall (21.5 cm) in that month, while the highest transpiration and lowest interception occurred in September in response to the driest (0.64 cm) September on record at Coweeta.

Modeling provides a method for quantifying hydrologic processes but the monthly outflow from PROSPER cannot be used to assess the magnitude of change in monthly discharge at the weir resulting from pine conversion. There is a lag between evaporative processes on the watershed and measured effects at the weir due to the deep soils at Coweeta which buffer monthly responses. However, the paired watershed approach provides a precise method for quantifying the intra-annual changes in water yield. We selected a four year period from 1980–1983 on WS1 to illustrate the average monthly flow reductions following hardwood to pine conversion (Fig. 4). Compared to flow expected for a hardwood forest on WS1, significant reductions occur in every month following conversion to a pine forest. Large reductions of 2 to 3 cm occur in March, April, and May during the period of highest flow. These large differences coincide with leafless or early leafout conditions in the hardwood watershed, and high transpiration losses. Streamflow reductions average about 1 cm or 40% below levels expected for hardwoods in the low flow months of August, September, and October.

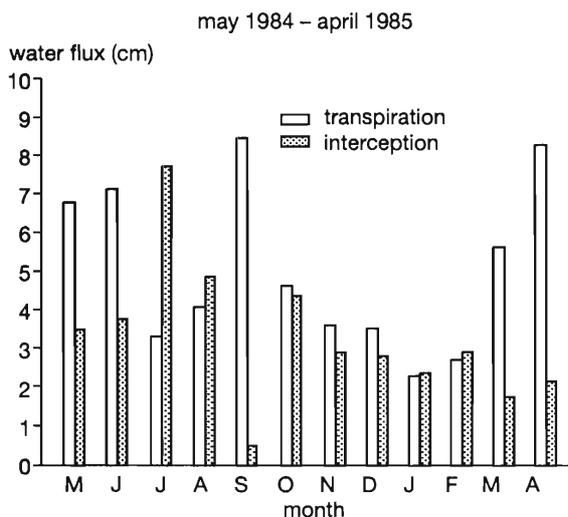


Fig. 3. Monthly simulations of interception and transpiration losses for a 27-year-old white pine plantation on Coweeta WS1 using PROSPER, an evapotranspiration model.

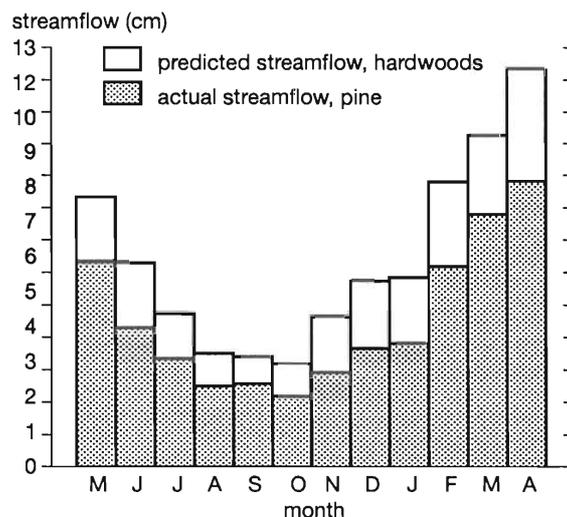


Fig. 4. Mean monthly flows predicted for a mature hardwood forest on Coweeta WS1 compared to measured flows from a white pine plantation on the watershed during a four year period (after Swank et al. 1988)

4.3 Flow Duration Responses

The effects of species conversion on streamflow timing can be further examined by analyzing changes in flow-duration responses. The flow-duration curve is a cumulative frequency curve which quantifies the percentage of time specific discharges are equaled or exceeded during a given time period. FALLAS (1982) analyzed the changes in flow-duration curves for WS1 and WS17 for the entire treatment history of the watersheds. Flow frequency classes were obtained from methods described by HIBBERT and CUNNINGHAM (1966) which provided 12 fixed percentages of time. The paired watershed approach was used to obtain pretreatment calibration regressions of flow rates for WS1 and WS17 with their respective controls; r^2 equalled or exceeded 0.96 (FALLAS 1982).

The frequency of both high and low flows showed significant reductions on both pine watersheds when stands were about 11-years-old. By age 24 on WS17, high flows at 1 and 5% of time were reduced by 33 and 52% respectively and flows for other percentages of time were reduced 37 to 60% below predicted values (Figure 5). Similar results were observed on WS1 at the same age although the magnitude of reductions in flow rates for a given year is dependent on precipitation (FALLAS 1982).

A full assessment of the effects of pine conversion on hydrograph parameters requires more detailed analysis, but the inference from water yield and flow-duration data is that under pine, storm volumes and peakflow rates will be reduced but there will also be a reduction in low flows. Thus, from a hydrologic perspective, a judgement of the deleterious or beneficial effects of hardwood to pine conversion on water resources must be based on forest management objectives, i.e., enhanced water supply for human and/or aquatic life or reduced flood potential. The importance of responses must also be evaluated in a spatial context where hydrologic changes from vegetation conversion on watersheds draining first- and second-order streams are routed downstream in larger drainage basins.

4.4 Solute Responses

All four of the experimental watersheds have been the focus of intensive, long-term biogeochemical cycling research (SWANK and CROSSLEY 1988). Water chemistry measurements began in 1972 and thus the pine stands were about 16-years-old when studies were initiated. Prior analyses (SWANK 1988) showed that long-term mean annual concentrations of most streamwater solutes are very similar between the pine covered watersheds and their controls as illustrated by the comparative data in Table 2. Conversion from hardwoods to pine gener-

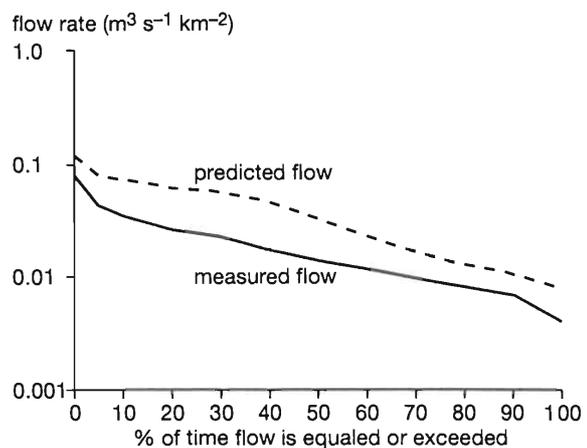


Fig. 5. Flow duration curve predicted for a mature hardwood forest on Coweeta WS17 compared to flow duration values measured from the 24-year-old white pine plantation on the watershed (after FALLAS 1982). Note that the Y axis is in logarithmic units.

Table 2. Volume-weighted mean annual concentrations (mg L⁻¹) of dissolved inorganic constituents for streams during WS17 (young white pine) and WS18 (mature hardwood control). Period of record 1973–1983 for all solutes except SO₄ which is 1974–1983.

| Watershed No. and Cover Type | Solute | | | | | | | |
|-------------------------------------------|--------------------|------|------|------|------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | NO ₃ -N | Ca | K | Na | Mg | NH ₄ -N | PO ₄ | SO ₄ |
| 18 Mature Mixed Hardwoods | 0.004 | 0.59 | 0.41 | 0.86 | 0.59 | 0.003 | 0.001 | 0.14 |
| 17 White Pine (Average for ages 16–26) | 0.13 | 0.51 | 0.39 | 0.79 | 0.51 | 0.004 | 0.006 | 0.48 |

Table 3. Net losses or gain of solutes (kg ha⁻¹ yr⁻¹) for Coweeta WS1 and 17 pine covered watersheds based on a comparison with the net budgets of adjacent undisturbed hardwood-covered watersheds.

| Forest Type and Watershed | Solute | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------|------|------|------|------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | NO ₃ -N | Ca | K | Na | Mg | NH ₄ -N | PO ₄ | SO ₄ |
| White pine, Age 16 through 26 Averages for WS1 and 17 combined | -0.7 | +2.3 | +1.7 | +4.4 | +1.2 | -0.1 | 0.0 | +0.7 |

ated small but measurable increases in NO₃-N, but concentrations are still at very low levels (0.1 mg L⁻¹). It appears the most significant change in solute concentrations occurred for SO₄, where concentrations are about threefold higher in streams draining the pine watersheds compared to the hardwood controls. These elevated concentrations may be due to greater scavenging of SO₄ particulates from the atmosphere by white pine canopies associated with the much higher LAI of pine compared to hardwoods.

A more quantitative analysis of solute responses to species conversion can be made by comparing net budgets (inputs minus outputs) for pines with the long-term net budgets of their adjacent controls (Tab. 3). The white pine plantations show small increases in NO₃-N export, no differences in NH₄-N, PO₄, and SO₄, but accumulations of 1.2 to 4.4 kg ha⁻¹yr⁻¹ for other solutes. For some nutrients such as Ca, Mg, and K, net retention on the pine catchments are 50% to 70% greater than for hardwoods. The net accumulation in the pine ecosystems is partly due to greater evapotranspiration, reduced flow, and hence reduced leaching of soil nutrients from the pine. However, the average flow reduction of 25–30% discussed earlier accounts for less than half of the nutrient accumulations. Biological processes are also important; Knoepp and Swank (1994) estimated that net accumulation of Ca, Mg, and K in above-ground vegetation in pine was more than twice the quantity in hardwoods between 1970 and 1990 due to the higher rates of net primary production in pine.

5 Summary

These long-term catchment studies at Coweeta provide strong, conclusive evidence for the effects of forest species conversion on the hydrologic cycle. Following conversion of mixed hardwood to white pine plantations, annual streamflow reductions of 25 cm (25%) or more frequently occur from the pine covered watersheds. Significant flow reductions are observed in all months, with the largest absolute flow reductions (2–3 cm) in the high flow months and the largest percentage reductions (40%) in the low flow months. Flow duration analysis shows substantial reductions in all classes of flow rates as a result of the species conversion. Rea-

sons for the greatly altered hydrologic regimen are derived by linking process level studies with hydrologic modelling to interpret the integrated catchment responses. Greater evapotranspiration from white pine is due to both higher interception and transpiration losses associated with a large leaf area index and the evergreen characteristic of pine. The effects of conversion on streamwater chemistry are minimal with similar concentrations of solutes in streams draining both cover types. However, the pine ecosystems are more nutrient conservative for base cations as a result of lower discharge and higher nutrient accretion in vegetation.

The effects of similar conversions, from hardwood deciduous species to coniferous evergreen species, on evaporative processes and the quantity and timing of streamflow will depend on a variety of variables. Evaluations for a given location must include the climatic regimen, vegetation structure, soil water characteristics, and plant water relations which incorporate hydrologic process studies with modelling. However, the implications of the findings from the long-term experiments at Coweeta for water resource management in much of the eastern U.S. are clear. If, in forested regions, the goal is to supply water for human and/or aquatic life, conifers are a poor choice of forest cover. Conversely, if the goal is to reduce flood potential, conifers are the optimal choice.

6 References

- FALLAS, J., 1982: Effects of clearcutting, vegetation regrowth, and reforestation on flow duration on three Coweeta experimental basins. Otto, NC, Coweeta Hydrologic Laboratory. Unpublished Report. 91 p.
- HELVEY, J.D., 1967: Interception by eastern white pine. *Water resour. res.* 3: 723–729.
- HIBBERT, A.R.; CUNNINGHAM, G.B., 1966: Streamflow data processing opportunities and application. IN Proceedings of a National Science Foundation advanced science seminar: International Symposium of Forest Hydrology; August 29–September 10, 1965; University Park, PA. New York, Pergamon Press. pp. 725–736.
- HUFF, D.D.; SWANK, W.T., 1985: Modeling changes in evapotranspiration. In: ANDERSON, M.G.; BURTT, T.P. (eds) *Hydrological Forecasting*. Chichester, Wiley. pp. 125–151.
- KELLER, H.M., 1988: European experiences in long-term forest hydrology research. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A. (eds) *Forest Ecology and Hydrology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 407–414.
- KNOEPP, Jennifer D.; SWANK, W.T., 1994: Long-term soil chemistry changes in aggrading forest ecosystems. *Soil sci. soc. Am. j.* 58: 325–331.
- REYNOLDS, Barbara C.; McSWAIN, M.R.; BEALE, R., 1986: Procedures for chemical analyses at the Coweeta Hydrologic Laboratory. Otto, NC, Coweeta Hydrologic Laboratory. Unpublished Report.
- SWANK, W.T., 1988: Stream chemistry responses to disturbance. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A. (eds) *Forest Ecology and Hydrology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 339–357.
- SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A. (eds) 1988: *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 469 p.
- SWANK, W.T.; DOUGLASS, J.E., 1974: Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science* 185: 857–859.
- SWANK, W.T.; JOHNSON, C.E., 1994: Small catchment research in the evaluation and development of forest management practices. In: MOLDAN, B.; CERNY, J. (eds) *Biogeochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research*. Chichester, Wiley. pp. 383–408.
- SWANK, W.T.; MINER, N.H., 1968: Conversion of hardwood-covered watersheds to white pine reduces water yield. *Water resour. res.* 4: 947–954.
- SWANK, W.T.; REYNOLDS, L.J.; VOSE, J.M., 1992: Annual mean atmospheric deposition, throughfall, streamflow, and soil solution fluxes for major ions at Coweeta hardwood and pine sites. In: JOHNSON, D.W.; LINDBERG, S.E. (eds) *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling: A synthesis of the Integrated Forest Study*. *Ecol. Stud.* 91: 634–635.
- SWANK, W.T.; SWIFT, L.W., Jr.; DOUGLASS, J.E., 1988: Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A., Jr. (eds) *Forest Ecology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 297–312.
- SWANK, W.T.; WAIDE, J.B., 1988: Characterization of baseline precipitation and stream chemistry and nutrient budgets for control watersheds. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A., Jr. (eds) *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 57–79.

- SWIFT, L.W., Jr.; CUNNINGHAM, G.B.; DOUGLASS, J.E., 1988: Climatology and hydrology. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A., Jr. (eds) *Forest Ecology and Hydrology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 35–55.
- SWIFT, L.W., Jr.; SWANK, W.T.; MANKIN, J.B.; LUXMOORE, R.J.; GOLDSTEIN, R.A., 1975: Simulating of evapotranspiration and drainage from mature and clearcut deciduous forests and young pine plantation. *Water resour. res.* 11: 667–673.
- TROENDLE, C.A., 1979: Hydrologic impacts of silvicultural activities. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers National Spring Convention and Continuing Education Program, April 24–28, 1978, Pittsburg, PA. Journal Irr. Drainage Div.* 105 (IRI): 57–70.
- VOSE, J.M.; SWANK, W.T., 1992: Water balances. In: JOHNSON, D.W.; LINDBERG, S.E. (eds) *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling: a synthesis of the Integrated Forest Study*. *Ecol. Stud.* 91: 27–49.
- VOSE, J.M.; SWANK, W.T., 1994: Effects of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. *Forest Ecol. Manage.* 64: 25–39.

Address of the authors:

Wayne T. Swank
James M. Vose
United States Department of Agriculture
Coweeta Hydrologic Laboratory
USDA Forest Service
999 Coweeta Lab Road
Ott, NC 28763 USA