

Beiträge zur Hydrologie der Schweiz

Nr. 35

Herausgegeben von der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrologie und
Limnologie (SGHL)

Hydrologie kleiner Einzugsgebiete

Gedenkschrift Hans M. Keller

Herausgeber dieser Nummer
Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL), Bern
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und
Landschaft (WSL), Birmensdorf
1994

Titeländerung

Mit der vorliegenden Nummer 35 erscheint die Reihe «Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie» neu unter dem Namen **«Beiträge zur Hydrologie der Schweiz»**.

Zitierung

Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL); Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Hrsg.) 1994: Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Gedenkschrift Hans M. Keller. Beitr. Hydrol. Schweiz 35: 211 S.

ISBN 3-905620-41-3

Redaktion

Dr. Ruth Landolt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 8903 Birmensdorf

Herstellung der Druckvorlagen

Jacqueline Gilgien, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 8903 Birmensdorf

Druck

Schüler AG, Jurastrasse 10, 2501 Biel

Bezugsadresse

Geographisches Institut ETH
Bibliothek
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich
Telefon 01 - 257 52 13
Fax 01 - 362 51 97

Preis: Fr. 48.–

© Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und
Limnologie, Bern, 1994

Vorwort

Ich lernte Hans M. Keller 1966 kennen, als ich als junger Wissenschaftler meine erste Stelle an der damaligen EAFV antrat. Seine Spontaneität und Kollegialität haben mir den Einstieg an der Versuchsanstalt wesentlich erleichtert. Aufgrund der gleichartigen Wellenlängen entwickelte sich bald eine gute persönliche Beziehung, sodass gelegentlich auch privat Gemeinsames unternommen wurde.

Durch sein offenes Auftreten und seine Fähigkeit, subtil auf andere Leute einzugehen, knüpfte er mit Leichtigkeit neue Kontakte. Dies war sicher auch ein wichtiger Grund für seine bereits in jungen Jahren beachtlichen wissenschaftlichen Verbindungen zu einem grossen Kollegen- und Freundeskreis im In- und Ausland.

Als ich 1969 die EAFV verliess, trennten sich unsere Wege. Bei meiner Rückkehr 1987 war ich von der Entwicklung seiner forsthydrologischen Aktivität und der Ausstrahlung seines Wirkens beeindruckt. Neben längeren Aufenthalten in den USA und in Neuseeland hatte er in der Zwischenzeit auch in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien massgeblich mitgewirkt. So in der Hydrologischen Kommission der Schweiz, im Schweizerischen Forstverein, in der IUFRO-Arbeitsgruppe «Forstliche Hydrologie», im Fachausschuss «Wald und Wasser» des DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) und im European Reference Basin Network. Sein ausgesprochenes Flair, unterschiedliche Standpunkte einander anzunähern, zu vermitteln und konsensfähige Beschlüsse vorzubereiten, prädestinierte ihn für diese Tätigkeiten.

Als Folge der wachsenden Bedeutung des Wassers im Zusammenhang mit den anstehenden Waldproblemen, ist aus der Gruppe «Forstliche Hydrologie» eine Sektion entstanden. Mitten im aktiven Gestalten wurde Hans M. Keller durch einen tragischen Unfall aus unserer Mitte gerissen. Das von ihm Geschaffene soll durch diese unerwartete Wende nicht beendet sein. Die Mitarbeiter der Sektion «Forstliche Hydrologie» sollen vielmehr mit jenem Elan und jener unermüdlichen Schaffenskraft, die Hans Keller eigen waren, die Herausforderung annehmen und auf dem eingeschlagenen Weg neue Ziele festlegen und anvisieren.

Der vorliegende Gedenkband soll an das breitgefächerte hydrologische Wirken von Hans M. Keller erinnern und uns durch die Vielfältigkeit auch Mut für zukünftiges hydrologisches Schaffen machen.

Rodolphe Schlaepfer, Direktor WSL

Hans Martin Keller verunglückte Ende Juli zusammen mit seiner Frau und einem befreundeten Bergführer in den Walliser Alpen auf tragische Weise. Ihr Tod hat uns zutiefst erschüttert. Aus diesem Gefühl der Fassungslosigkeit heraus ist spontan die Idee entstanden, eine Gedenkschrift für Hans Martin Keller auszuarbeiten. Sie soll ein letzter bescheidener Dank sein für den grossen Einsatz, den der Verstorbene für die Hydrologie im In- und Ausland und insbesondere auch für die Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SHGL) und das Hydrologische Landeskomitee geleistet hat.

Freunde, Weggefährten, Kolleginnen und Kollegen haben zu dieser Gedenkschrift beigetragen. Deren Titel – «Hydrologie kleiner Einzugsgebiete» – ist einer Thematik gewidmet, die Hans Martin Keller sehr am Herzen lag und sein wissenschaftliches Lebenswerk bestimmte. Die über zwanzig Beiträge zeigen das breit gefächerte Spektrum dieses Arbeitsgebietes auf.

Die Arbeiten zur Gedenkschrift wurden durch die Herren Felix Forster, Ueli Moser, Felix Naef, Bruno Schädler und Rolf Weingartner initiiert, vom Publikationsdienst der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) unter der umsichtigen Leitung von Frau Ruth Landolt redigiert und von der WSL und der SGHL finanziert.

Hans, wir vermissen Dich!

Rolf Weingartner
Präsident der Schweizerischen Gesellschaft
für Hydrologie und Limnologie

Inhalt

Vorwort	3
Die Forsthydrologie und Hans M. Keller: Wissenschaftliche und persönliche Würdigung Daniel L. Vischer	7
Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal Hans Burch	18
Die Geschichte der Hydrologischen Kommission Karin Schram	34
Mountains – A Hydrological Paradox or Paradise? John C. Rodda	41
Was bringt uns die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten? Herbert Lang, Ludwig Braun, Mario Rohrer, Urs Steinegger	52
Kleine hydrologische Einzugsgebiete – ein Index für grosse Flusseinzugsgebiete? Bruno Schädler	61
Small catchment studies of forest hydrology in the UK Mark Robinson, James R. Blackie	71
Ecohydrological research on a small basin scale: scientific approach of the runoff formation key process Andreas Herrmann	83
Ganglinienseparation in kleinen Einzugsgebieten Christian Leibundgut, Yifeng Cui	96
Do forests control run-off? Peter F. Germann	105
Wie reagiert ein Einzugsgebiet auf extreme Niederschläge? Alte und neue Ideen und Experimente Felix Naef, Simon Scherrer, Andrew Faeh	111
Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Konzepte und erste Ergebnisse aus Untersuchungen in den Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee) und Spissibach (Leissigen) Rolf Weingartner, Hans Kienholz	120
Messung des Feststofftransportes im Erlenbach Dieter Rickenmann, Philippe Dupasquier	134

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	145
Long-term studies of biogeochemical and physical parameters in Swiss rivers Joan S. Davis	155
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	164
Abflussmengenbestimmung mit dem Verdünnungsverfahren Manfred Spreafico	173
Modélisation hydrologique à base physique: Objectifs, réalités et perspectives Ion Iorgulescu, André Musy, Daniel Devred, Jean-Pierre Jordan	181
Die Simulation hydrologischer Prozesse mit dem Modell BROOK – eine Analyse Felix Forster	195
Verzeichnis der Publikationen von Hans M. Keller	209

Die Forsthydrologie und Hans M. Keller: Wissenschaftliche und persönliche Würdigung

Daniel L. Vischer

Abstract **Forest hydrology and Hans M. Keller**

The following article is an attempt to evaluate the work of Hans M. Keller in the context of the now well-developed field of forest hydrology in Switzerland. It describes the origin of this science and the consecutive contributions by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research founded in 1885 and of its forest engineers Arnold Engler (1869–1923), Hans Burger (1889–1973), Felix Richard (1915–1984) and Hans Keller (1936–1993). It also mentions the events which resulted in the Federal Law of Forest Police in 1876 and the initiation of the first hydrological research basins shortly before the turn of the century. The closing remarks include the life history of Hans Keller and some of the author's reminiscences.

Keywords: forest hydrology, floods, erosion, forestry laws, hydrological research basins, water balance, water quality

Hans Keller war *Forsthydrologe*. Er hat auch den Begriff der Forsthydrologie, wie er selber feststellte, in der Schweiz zum erstenmal verwendet (1985). Was aber ist schweizerische Forsthydrologie? Seit wann gibt es sie?

Was ist Forsthydrologie?

Selbstverständlich will ich hier keine vollständige Geschichte der Hydrologie aufzeichnen. Aber die Frage nach dem Zweck der Forsthydrologie ist berechtigt. Der natürliche Wasserkreislauf ist ja keineswegs an eine bestimmte Vegetationsdecke oder Oberflächenbeschaffenheit gebunden. Er ist, was Wald, Fluren, Siedlungen, Seen, Meere und Gebirge anbelangt, ein übergreifendes Phänomen. Er muss also in seiner Gesamterscheinung erforscht und erklärt werden. Und Hans Keller gehörte bestimmt zu jenen Wissenschaftlern, die das wussten und taten. Gerade darum war ihm aber auch klar, wie viele Einflussgrössen da im Spiel sind. Wer Hydrologie treiben will, muss sich mit Tausenden von Parametern auseinandersetzen. Will er sich dabei nicht in Einzelheiten verlieren, muss er vom Unwesentlichen abstrahieren und Vereinfachungen einführen. Das heisst, er muss mit einigen Haupteinflüssen Modelle erarbeiten, die fasslich sind, aber die Natur doch genügend gut nachbilden. In diesem Sinne könnte als Forsthydrologie folglich jene Hydrologie bezeichnet werden, bei der der Wald zu diesen Haupteinflüssen zählt.

Die Ursprünge der Forsthydrologie um 1850

Ich überlasse es Berufeneren die Geburtsstunde der so definierten Forsthydrologie auszumachen. Ein wohl entscheidender Impuls ging aber von Diskussionen Mitte des 19. Jahrhunderts aus. Offenbar vertrat 1857 ein namhafter französischer Gelehrter die These, der Wald sei hydrologisch gesehen nichts Besonderes oder gar belanglos. Deshalb könne er ohne jegliche Konsequenzen geschlagen und beseitigt werden, um neue Kultur- und Siedlungsflächen zu erschliessen. Diesem «Waldfeind» wurde aber damals von verschiedenen Seiten entschlossen der Kampf angesagt. Einer der kompetentesten Vertreter der Antithese war der Berner Ingenieur Robert Lauterburg (1816–1893), bei dem ich es nachgelesen habe (ein nahezu vollständiges Literaturverzeichnis findet sich in VISCHER 1988). Temperamentvoll, ja polemisch, verteidigte er in seiner Schrift «Über den Einfluss der Wälder auf die Quellen- und Stromverhältnisse» (1877) die Besonderheiten bewaldeter Gebiete. Allerdings deutete er auch an, dass er sich der Beweisführung einiger «Waldfreunde» aufgrund von Messungen an Lysimetern von nur einem Quadratfuss Auffangfläche – also von Blumentopfgrösse – nicht anschliessen wolle. Diese Geräte seien durch grössere zu ersetzen, postulierte er, wie er überhaupt die Aufstellung von Messgeräten zur Erfassung der Abflüsse in Funktion der Waldart und der Waldveränderung im Einzugsgebiet empfahl.

Lauterburg, der von 1866 bis 1872 das neugegründete Eidgenössische Hydrometrische Zentralbüro leitete, aus dem später die Landeshydrologie und -geologie hervorging, arbeitete dann auch Modelle aus, die ihm quantitative Aussagen ermöglichten. Sein Modell zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse kann als Vorläufer der heutigen «rational formula» betrachtet werden. Aufgrund entsprechender Ermittlungen schrieb er 1887 beispielsweise folgendes: «So lässt zum Beispiel ein dichter, geschlossener, selbst ziemlich steiler Tannenwald von der stärksten auf ihn fallenden Regenmasse pro Sekunde nur ein Drittel oder höchstens die Hälfte derjenigen Abflussmenge ablaufen, die über das gleiche, aber unbewaldete und glatte Terrain abfliessen würde. Überdies findet aber vermöge der starken vegetabilischen Wasserabsorption und Verdunstung über dem Waldgrunde eine Reduktion der gesamten auf ihn fallenden Regenmenge statt. Etwas weniger stark wirken die Laubwälder und unter den Nadelwäldern am schwächsten die Lärchenwälder»... und später: «Alle diese Einflüsse müssten jedoch ein Ende nehmen, wenn die starken Regenfälle wochenlang anhalten würden.»

Lauterburg erkannte selbstverständlich auch die Bedeutung des Waldes als Erosionsschutz in steilen Gebieten. In diesem Zusammenhang ist etwa sein Taschenbuch über «die Sicherstellung unserer Flussläufe und Rutschhalden» von 1886 zu sehen, wo er praktische Ratschläge für die Bepflanzung von Lockergesteinsböschungen und – hängen «mit rasch wachsenden, kräftig und tiefwurzelnden Baum- und Strauchgattungen» vermittelte.

Die Forsthydrologie im Kontext von Erosion und Hochwasser

Der Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen, Erosion, Hochwasser und Wald, war damals *das hydrologische Hauptthema*. Offenbar traten beim kühleren Klima in der Schweiz des 19. Jahrhunderts grössere Niederschläge und häufigere Hochwasser auf als früher. So sollen die Jahresmittel der Niederschläge vor allem in der Zentral- und Ostschweiz sowie in Graubünden anderthalbmal so gross gewesen sein wie heute. Aber auch die Wälder, und das ganz besonders in den steilen Berghängen, waren in schlechtem Zustand, «aufgelichtet, übernutzt und den Schutzaufgaben schlecht gewachsen» (KELLER 1985). Das geht aus manchen Zeitdokumenten, aber ganz besonders aus den viel beachteten Berichten zweier ETH-Professoren hervor: 1864 veröffentlichte der aus der Pfalz stammende Carl Culmann (1821–1881), Professor für Ingenieurwissenschaften, seinen «Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrat

über die Untersuchung der schweizerischen Wildbäche, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863». Und 1886 widmete der Zürcher Elias Landolt (1821–1896), Professor für Forstwirtschaft, sein Buch dem Thema «Die Bäche, Schneelawinen und Steinschläge und die Mittel zur Verminderung der Schädigungen durch dieselben».

Hochwasser als wichtige Begründung für das Eidgenössische Forst-polizeigesetz von 1876

«Der Erlass des ersten Eidgenössischen Forstpolizeigesetzes 1876 war», schrieb KELLER (1985), «nicht allein auf die Notwendigkeit der Verbesserung des Waldzustandes zurückzuführen, sondern in gleichem Masse durch das Auftreten extremer Niederschlagsereignisse und der Folgen begründet. Dass ausgerechnet im Jahre 1876 wiederum extreme Ereignisse stattfanden, mag den Erlass des Forstpolizeigesetzes in letzter Minute noch beschleunigt haben». Und etwas später zitierte KELLER (1985) eine einschlägige Äusserung Landolts, der selber massgeblich an der Formulierung des Forstpolizeigesetzes beteiligt war, in der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen 1876: «Frägt man nach den Ursachen dieser Erscheinung (gemeint sind verheerende Höchsthochwasser in der ganzen Ostschweiz), so muss selbstverständlich der ganz ungewöhnlich starke und lange andauernde Regenfall als Grundursache bezeichnet werden... Zu den in zweiter Linie wirkenden Ursachen gehört nun ganz unzweifelhaft zunächst die Entwaldung unserer Berge».

Eine Bemerkung zum Erlass des Forstpolizeigesetzes

Zur Auflockerung meiner Ausführungen möchte ich hier noch eine Bemerkung einfügen, die mir meine Kollegen aus der Forstwirtschaft nicht übelnehmen wollen. – Das Eidgenössische Forstpolizeigesetz von 1876 spielt mit den damaligen kantonalen Gesetzen bis heute eine überragende Rolle und das nicht nur als erste gesetzliche Grundlage auf Bundesebene, sondern gewissermassen als Geisteshaltung. So kann man immer wieder hören, dass man vor hundert Jahren hinsichtlich des Waldbestandes und der Hochwassergefahren *erstens* ein grosses nationales Problem erkannt habe, das dann *zweitens* mit einem Gesetz und dessen Einhaltung gelöst worden sei. Ich verstehe gut, dass sich das mehrheitlich etatistische Forstwesen dieser kausalen Vereinfachung gerne bedient und heute auf andere Wald- und Umweltprobleme anwenden möchte. Aber es handelt sich eben um eine Vereinfachung, die den damaligen Gegebenheiten nicht gerecht wird. Eine entscheidende Rolle spielten nämlich auch die Ausbildung von Fachleuten und der Eisenbahnbau beziehungsweise der damit möglichgewordene Steinkohleimport.

Die Ausbildung am Eidgenössischen Polytechnikum ab 1855

Da ich selber ETH-Professor bin, muss ich selbstverständlich auf die Bedeutung der Ausbildung hinweisen. 1855 wurde das Eidgenössische Polytechnikum, also die spätere ETH, gegründet. Es erhielt nach ausländischen Vorbildern, sowie als Frucht einiger kantonalen Vorarbeiten, eine Forstschule, die 1869 zur Land- und Forstwirtschaftlichen Schule erweitert wur-

de. In dieser ETH-Abteilung, wie man heute sagen würde, wirkten von Anfang an der bereits erwähnte Professor Elias Landolt zusammen mit seinem welschen Kollegen, dem Berner Xavier Marchand, als Lehrer. Beide bildeten mit einem Studienplan, der gemäss GONET (1955) «devait former des forestiers chargés beaucoup plus de la police, de la conservation et de la restauration des forêts que de leur culture et de leur économie», eine Generation von Förstern aus, die rund 20 Jahre später, eben 1876 beim Erlass des Eidgenössischen Forstpolizeigesetzes, als Fachkräfte für die Umsetzung zur Verfügung standen. Ohne diese Fachkräfte hätte das Forstpolizeigesetz wohl kaum *greifen* können.

Eisenbahnbau und Steinkohleimport ab 1855

Die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts besonders manifest gewordenen Folgen von Waldrodungen und Waldschädigungen hingen nicht nur mit dem Fehlen forstlicher Regelwerke und dem Mangel an Fachleuten zusammen, sondern auch mit einem *energiewirtschaftlichen Sachzwang*. Bis zum betrachteten Zeitpunkt war nämlich der Wald praktisch die einzige Quelle für Wärmeenergie. Die paar wenigen, damals in der Schweiz noch betriebenen Kohlebergwerke fielen kaum ins Gewicht. So ist es gut verständlich, dass die besonders im 19. Jahrhundert stark wachsende Bevölkerung den Wald vermehrt nutzte, ja nutzen musste. Dazu trug auch der Umstand bei, dass die um 1800 in einigen Gebieten der Schweiz sich ansiedelnde Industrie auf die gleiche Wärmequelle angewiesen war. Sie verstärkte dementsprechend den schon vorher bestehenden, bereits beträchtlichen Holzbedarf der Salinen von Bex und von tirolisch Hall (teilweise vom Engadin aus versorgt). Ferner diente das Holz ja auch als Baustoff für den Eigenbedarf sowie als Exportartikel für den Hochbau (in den Nachbarländern), für Pfahlgründungen (in Holland) und für den Schiffsbau (an den Binnengewässern wie am Meer). Dabei erfolgte der Holztransport zum weitaus überwiegenden Teil auf dem Wasser, das heisst durch Triften und Flößen in Bächen, Flüssen und Seen. Dafür kam selbstverständlich nur Holz in Frage, das gut schwimmt, also Stämme von Nadelbäumen, sowie Holz, das in der Nähe eines Gewässers gewonnen und diesem leicht übergeben werden konnte. Kein Wunder also, dass die Wälder – und unter ihnen ganz besonders die hochstämmigen Tannenwälder – gerade längs den Gewässern gelichtet wurden.

Eine Wende trat erst ein, als auf dem Markt eine alternative Wärmequelle auftauchte: *die Steinkohle*. Sie wurde aus dem Ausland mit der Bahn antransportiert und machte die Industrie vom Brennholz weitgehend unabhängig. Sie ersetzte das Brennholz aber teilweise auch in den Haushaltungen, vor allem dort, wo sie zu Stadtgas veredelt und so verwertet wurde. Dabei begann der *Eisenbahnbau* in der Schweiz im Vergleich zum angrenzenden Ausland verhältnismässig spät, das heisst abgesehen von zwei kleinen Strecken in Basel und von Zürich nach Baden (Spanischbrötlibahn) erst in den fünfziger Jahren. Zwischen 1855 und 1860 wurden rund 1000 km neue Linien in Betrieb genommen; ein Höhepunkt war dabei 1858 die Eröffnung des Hauensteintunnels bei Olten, was den Anschluss des Mittellandes an das in den Hauptzügen schon bestehende nordeuropäische Bahnnetz bedeutete. Bis 1875 wurden in der Schweiz dann weitere rund 1000 km neue Linien gebaut, was einen bemerkenswerten Personen- und Güterverkehr ermöglichte. Als 1876 das Eidgenössische Forstpolizeigesetz in Kraft gesetzt wurde, war die Kohleneinfuhr also nicht nur möglich, sondern bereits im vollen Gange. Die Dampflokomotiven der Bahn selber brauchten ja ständig solche Kohle. Ich erlaube mir daher den Hinweis, dass der Wald ab 1876 wohl nur deshalb nachhaltig und wirksam geschützt werden konnte, weil ein Ausweichen auf eine alternative Wärmequelle *technisch und wirtschaftlich machbar* geworden war.

Nun aber zurück zur *Forsthydrologie*!

Die Gründung und Ausrichtung der Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen 1885

Um 1876, aber auch noch später, verquickte man die Forstpolitik also stark mit der Hochwasser- und Erosionsfrage und begann in grossem Stil aufzuforsten. Ebenso widmete man sich, und das auch als Folge des Eidgenössischen Wasserbaupolizeigesetzes von 1877, den Wildbachverbauungen. Dieser Zusammenhang zwischen Wald- und Wasserproblemen zeigte sich ebenfalls darin, dass die 1885 gegründete Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, (die später in Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, EAFV, und dann in Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, umgetauft wurde) mit dem Zweck gegründet wurde «...durch wissenschaftliche Versuche, Untersuchungen und Beobachtungen der Forstwirtschaft in ihrem vollen Umfange eine sichere Grundlage zu verschaffen und zur Lösung wichtiger *forstlich-meteorologischer Fragen* beizutragen». Heute würde man, wie KELLER (1985) schon bemerkte, anstelle von *forstlich-meteorologischen* einfach von *forsthydrologischen* Fragen sprechen.

Die hydrologischen Testgebiete und Arnold Engler (1869–1923)

Zunächst widmeten sich an der ETH und an der Centralanstalt nur wenige Forschungsarbeiten dem Thema Wald und Wasserkreislauf. 1892 erschien die erste Arbeit über Niederschläge im Wald und 1895 eine Untersuchung über die Verdunstung des Wassers aus dem Boden. Einen bedeutenden Schritt vollzog dann Conrad Bourgeois (1855–1901), ab 1889 Professor für Forstwissenschaft an der ETH und ab 1897 Leiter der Centralanstalt, als er den Sperbel- und Rappengraben bei Wasen im Emmental als Testgebiete auswählte. Das eine Gebiet war zu 97% bewaldet, das andere zu 35%, so dass vergleichende Abflussmessungen den *Waldeinfluss* zeigen mussten. Das Eidgenössische Hydrometrische Bureau, unter der Leitung von Ingenieur Josef Epper (1855–1925) errichtete zu diesem Zweck in beiden Gebieten Wassermessstationen, die 1890 den Betrieb aufnahmen. Da Bourgeois schon im darauffolgenden Jahr starb, konnte er die Früchte seiner Anstrengungen nicht mehr ernten.

Dies besorgte nach ihm mit Eifer und Umsicht Arnold Engler (1869–1923), der 1897 als Professor für Forstwissenschaft an die ETH berufen wurde und 1902 die Nachfolge von Bourgeois als Leiter der Centralanstalt übernahm. Wohl aus der Einsicht, dass sich hydrologische Bilanzstudien zwangsläufig auf mehrjährige Messreihen abstützen müssen, wurde lange nichts publiziert. Engler, der von seinen Kollegen als Forschernatur charakterisiert wurde, widmete sich zunächst einer Fülle von andern Fragen des Forstwesens und schrieb dann erst 1919 seine einzige, aber vielbeachtete hydrologische Arbeit in der Form einer über 600-seitigen Mitteilung der Centralanstalt mit dem Titel «Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer». Im Nekrolog, den die Centralanstalt (1924) nach dem Tod von Engler verfasste, steht dazu folgendes: «Mit dieser Arbeit allein hat sich Prof. Dr. Engler ein unvergängliches Denkmal gesetzt. Für alle Fragen über das Regime der Gewässer, Quellen über Fluss- und Bachverbauungen, Wasserversorgungen, Terrainschutz usw. wird diese Arbeit grundlegend bleiben. Auch hat er es verstanden den Nachweis zu erbringen, dass die ganze Frage viel weniger eine hydrometrisch-ingenieurtechnische, sondern von Grund aus eine forstliche Frage ist und in solcher Weise alle die intimen Beziehungen des Waldes zum Boden, zur Luft und allen Atmosphärien behandelt und beleuchtet». Etwas nüchterner und einfacher schrieb sein Zeitgenosse WEBER (1923): «Die Mitteilung stellt in klarer Beweisführung dar, wie die Bewaldung ausgleichend wirkt und extreme Trockenheit und Überschwemmungen verhindern kann». Und 60 Jahre später, liess sich KELLER (1985), durch die zeitliche Distanz etwas abgeklärt, dann so vernehmen: «Die graphisch mit Zahlen und mit überzeugendem Text

ausgestaltete Publikation hat ihre Wirkung nicht verfehlt. Endlich waren die erwarteten Ergebnisse wissenschaftlich belegt: *Der Wald mindert die Hochwasser, er speist die Quellen...* Die Wissenschaft war wohlwollend und skeptisch zugleich. Wohlwollend, indem sie die Idee des kleinen Einzugsgebietes als Test- und Versuchsfläche übernahm, skeptisch, weil sie der wissenschaftlichen Argumentation und Herleitung der Ursächlichkeit nicht folgen konnte. So musste das Argument der Quellenspeisung des Waldes in dieser Form später stark revidiert werden, als sich herausstellte, dass der Wald der grösste Wasserverbraucher (Evapotranspirationsverluste) aller Vegetationsdecken ist».

Von Arnold Engler zu Hans Burger (1889–1973)

Die damaligen kleinen Übertreibungen bei der Beurteilung der Arbeit von Engler tun dessen Verdiensten ebensowenig Abbruch wie die heutigen Vorbehalte. Wären Forschungsarbeiten stets vollkommen, hätte die Menschheit längst «ausgeforscht». Engler hat auf jeden Fall die schweizerische Forsthydrologie begründet! Die Centralanstalt war gut beraten, als sie sich entschloss, die Arbeiten von Engler weiterzuführen. So sind die unscheinbaren Testgebiete Sperbel- und Rappengraben in hydrologischen Kreisen schliesslich fast weltbekannt geworden. Freilich stand der Anstalt für diese Art der Forschung eine höchst fähige Nachwuchskraft zur Verfügung: der Aargauer Hans Burger (1889–1973).

Hans Burger stiess 1914 zum Mitarbeiterstab der 1933 in Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) umbenannten Centralanstalt und wurde ab 1934 deren *vollamtlicher* Leiter. Er besass daneben also nicht noch eine ordentliche Professur an der ETH, erhielt von jener aber 1943 den Titel eines Honorarprofessors. Wie Engler betrieb auch er die Forsthydrologie zwar mit Nachdruck aber beileibe nicht ausschliesslich. Dafür war er viel zu breit interessiert, so dass er sich noch mit manchen anderen forstlichen Fragen auseinandersetzte. Es ist aber bezeichnend, dass sich die zu seinem 70. Geburtstag herausgegebene Festschrift schwergewichtig der Forsthydrologie widmete (Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen 1959). Zum Geleit schrieb dort sein Nachfolger als Direktor der EAFV, Alfred Kurt: «Die Wasserprobleme wurden gewählt, weil sich Hans Burger während Jahrzehnten besonders eingehend mit ihnen beschäftigte. Als er im Jahre 1914, 25-jährig, als Assistent seine Tätigkeit an der Versuchsanstalt aufnahm, gelangten die Untersuchungen Englers eben zur Auswertung. Nach dem frühen Hinschied Englers wurde Burger mit dieser Forschungsaufgabe betraut. Da ihm die allgemeinen Erkenntnisse der ersten Versuche in der Folge nicht mehr genügten, schenkte er den Zusammenhängen einerseits und den Ausnahmen andererseits besondere Beachtung. Dies führte ihn zu eingehenden bodenphysikalischen Versuchen, zur Messung der Geschiebeführung, zur kritischen Betrachtung der klimatischen Messungen, zur Prüfung der Messmethoden und zur Suche nach Fehlerquellen. Er erkannte auch die beschränkte Gültigkeit gewisser Ergebnisse und veranlasste Parallelversuche unter gänzlich verschiedenen Verhältnissen. Besonders eingehend wurden Ausmass und Wirkung der Hochwasser unter verschiedenen Voraussetzungen studiert, und es konnten neue, wertvolle Erkenntnisse über die Niederwasser gesammelt werden. Kurz vor seinem Rücktritt altershalber konnten zwei neue Messstationen im Flyschgebiet des Kantons Freiburg in Betrieb genommen werden. Diese neuen grossen Versuchsanlagen, welche dazu dienen, die Auswirkungen der Entwässerung und Aufforstung abzuklären, bilden die sichtbare Krönung der tiefschürfenden Tätigkeit Burgers auf diesem Gebiete.»

Damit wurden die forsthydrologischen Verdienste von Burger trefflich umrissen. Als Ergänzung dazu sei erwähnt, dass jener die umfangreiche Schrift von Engler 1919 mit dem Titel «Über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer» durch fünf weitere, von 1934 bis 1954 veröffentlichte Mitteilungen mit dem gleichen Titel ergänzte. Davon betrafen drei den

Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben und zwei jenen im Valle di Melera. Im Testgebiet Valle di Melera TI wollte Burger insbesondere die Folgen einer Aufforstung untersuchen, ein Ziel, das ab 1934 auch von der Abteilung Hydrologie der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH an der Baye de Montreux VD verfolgt wurde.

Sind Testgebiete Experimentierflächen oder bloss kleine Einzugsgebiete?

Engler und Burger gehörten zu den Begründern *hydrologischer Testgebiete*. Über diesen empirischen Ansatz der damaligen Zeit, schrieb KELLER (1985) noch einige aufschlussreiche Einzelheiten: «Die internationalen Kontakte von Engler und mehr noch von Burger mögen zur Folge gehabt haben, dass in den USA von 1911 bis 1926 das berühmte Experiment im Gebiet des Wagon Wheel in Colorado durchgeführt wurde. Anstelle eines langfristigen Vergleichs wie im Emmental wurde der Ansatz der *gepaarten Einzugsgebiete* gewählt. Nach einer Eichphase wird *eines* der beiden Gebiete behandelt (z.B. Kahlschlag, Aufforstung usw.), und aus den veränderten Differenzen wird auf die Wirkung der Behandlung geschlossen. In der Folge multiplizierten sich diese Experimente im Ausland, vor allem in den USA. Jene Forscher mussten aber kein Forstgesetz mit Kahlschlagverbot in ihre Überlegungen einbeziehen, im Gegenteil! – Dieser Ansatz des Experimentes in gepaarten Einzugsgebieten hatte Burger lange Zeit begleitet. Projektstudien aus den dreissiger und vierziger Jahren beweisen, an wie vielen Orten in der Schweiz er solche Experimente in Szene setzen wollte, vor allem mit dem Ziel, die Wirkung einer Aufforstung experimentell und langfristig nachzuweisen. Leider waren dann die Rückschläge aus finanziellen und wahrscheinlich auch aus politischen Gründen so gross, dass jeweils nur ein halbes Experiment zur Durchführung kam». Ein solches Experiment war eben jenes im bereits erwähnten Valle di Melera und später in den beiden Testgebieten im Kanton Freiburg. Diese «halben Experimente» beruhten damit letztlich auf instrumentell gut ausgestatteten *kleinen Einzugsgebieten* und nicht auf eigentlichen Experimentierflächen.

Der Bodenphysiker Felix Richard (1915–1984)

Die bodenphysikalischen Versuche von Burger wurden an der EAFV schon ab 1951 durch Felix Richard (1915–1984) aufgenommen und fortgesetzt. Seine Arbeiten standen, wie KURT (1984) ihm attestierte «unter dem klar gesteckten und stets befolgten allgemeinen Ziel, den komplexen Zusammenhang von Böden und Vegetation nicht nur beschreibend, sondern mit kausalen und objektivierbaren Beziehungen wenn möglich erfassbar zu machen». Die dabei erzielten Erfolge führten 1962 zur Schaffung einer Professur für Bodenphysik an der ETH, die man Richard übertrug. Sein Standort blieb aber weiterhin die EAFV. Ein Teil seiner Forschung widmete sich Fragen ausserhalb der Forsthydrologie; ein gewichtiger Teil berührte jedoch den Wasserkreislauf im Waldboden und in den Waldbäumen. KURT (1984) fasste es so zusammen: Vorab in «Dissertationen, werden Einflüsse verschiedener Muttergesteinslagerungen auf den Wasserhaushalt untersucht. Es wird die Dimensionierung der Gräben von Entwässerungen behandelt und die Wirkung der Wasserspiegelabsenkung durch diese aufgezeigt. Es wird der Luft- und Wasserhaushalt im Wurzelraum von Waldböden betrachtet. In gleicher Weise derjenige eines einzelnen Baumes in ebener Lage und weiter eines Mischbestandes in Hanglage geklärt».

Hans M. Keller (1936–1993), der erste vollamtliche Forsthydrologe

Die hydrologischen Arbeiten von Burger fanden nach seinem Rücktritt 1954 zunächst keine Fortsetzung. Der Versuchsbetrieb in den Testgebieten der EAFV wurde dementsprechend stark eingeschränkt. Die Problematik der Quantität und Qualität der Abflüsse aus bewaldeten Gebieten blieb aber weiterhin weltweit aktuell und wurde insbesondere in den USA intensiv bearbeitet. Nicht weniger als 30 forstliche Versuchsanstalten und Forstschulen sollen sich damals dort dieser Frage gewidmet haben. Deshalb – und hier folge ich weitgehend den Ausführungen der heutigen Mitarbeiter der WSL-Sektion Forstliche Hydrologie (1993) – beschloss Alfred Kurr, ab 1952 Professor für Forstwissenschaft der ETH und, wie schon erwähnt, ab 1955 Leiter der EAFV, in den 60er-Jahren eine Wiederbelebung. Diese Aufgabe übertrug er dem jungen Forstingenieur Hans Keller (1936–1993), der 1963 nach einer zweijährigen Zusatzausbildung in den USA an die EAFV zurückkehrte, um dort die neugeschaffene Stelle eines vollamtlichen Forsthydrologen zu übernehmen und eine entsprechende Forschungsgruppe aufzubauen.

Im Sinne einer «reprise en main» widmete sich Keller vorerst den vorhandenen Testgebieten und betitelte 1968 eine seiner ersten Publikationen mit «der heutige Stand der Forschung über den Einfluss des Waldes auf den Wasserhaushalt». Damit griff er das klassische forsthydrologische Thema seiner Vorgänger wieder auf und dokumentierte auch nach aussen hin seinen Bezug zu Engler und Burger. Bald gab er aber auch zu erkennen, dass er vermehrt noch die *Wassergüte* in die hydrologischen Gebietsuntersuchungen einbeziehen wollte. Dies äusserte sich schon bei der 1965 begonnenen Ausrüstung neuer hydrologischer Testgebiete im Alptal SZ, wo die Abhängigkeit und Sensibilität der verschiedenen Wasser- und Stoffbilanzkomponenten in bezug auf Landnutzung, Klima und Geologie im Brennpunkt des Interesses standen. Es zeigte sich aber auch in seiner daraus entstandenen, 1970 eingereichten Dissertation mit dem Titel «Der Chemismus kleiner Bäche in teilweise bewaldeten Einzugsgebieten in der Flyschzone eines Voralpentales», sowie in zahlreichen weiteren Publikationen. Von den rund 60 wissenschaftlichen Beiträgen aus seiner Feder, bearbeiteten nämlich mehr als die Hälfte diese Thematik. Die übrigen Beiträge befassten sich ausser mit fachlichen Übersichten schwergewichtig mit dem allgemeinen Wasserhaushalt forstlicher Gebiete sowie mit der Schnee- und Schneeverteilung im Wald. Einige besonders beachtete Artikel behandelten die Entwicklungen seiner Forschungsgruppe zur Erfassung von Hochwasserabflüssen und Wasserinhaltsstoffen mit automatischen Messstationen. Das wache Interesse von Keller für eine zuverlässigere Datenerhebung in der Hydrologie manifestierte sich auch beim 1982/83 erfolgten Ausbau der Messanlage Erlentobel im Alptal. Diese hydrologische Station an einem kleinen Wildbach gehört heute mit ihren Einrichtungen zur Erfassung des Geschiebehaushalts wohl zu den bestausgerüsteten Limnigraphen der Welt. Selbstverständlich müsste ich hier zur Abrundung des Bildes auch noch auf die Publikationen der Mitarbeiter von Keller eingehen, doch würde das zu weit führen.

Die enge Verquickung der Forsthydrologie mit dem Forstingenieurwesen

Eine Art Contrapunkt zu den Arbeiten von Keller setzte der Bauingenieur Jürg Zeller. Er trat 1968 von der damaligen Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH an die EAFV über. Unter dem ab 1969 amtierenden Direktor der EAFV, Walter Bosshard (1926–1986), baute er bald eine leistungsstarke Abteilung für Verbauwesen und Hydrologie auf. Neben einer Fülle von Expertisen für konkrete Probleme des Hang- und Wildbachverbau, bei denen ihm sowohl seine bodenmechanischen wie hydraulischen Kenntnisse voll zustatten kamen, zeugten fast drei Dutzend Publikationen von seinen Schwerpunktsarbeiten. Die bedeutendste davon

2.5 Geologie

Beim Muttergestein der Alptaler Einzugsgebiete handelt es sich durchwegs um Formationen des alttertiären Wäggitaler Flyschs. Die unregelmässige Schichtung wechselt zwischen mächtigen Mergel- und Tonschiefern einerseits sowie Kalk- und Kalksandstein andererseits.

Die Gerinne weisen oft steile Einhänge und tief eingeschnittene Bachsohlen auf. Mit zunehmender Hangneigung nimmt auch die Häufigkeit von oberflächlichen Rutschungen zu. In einer Neuaufnahme (STAMMBACH 1989) der geologischen Verhältnisse wurden die Einzugsgebiete Erlenbach und Lümpenenbach im Massstab 1:2000 detailliert kartiert. Auffällig ist dabei, dass über 60% der aktiven Rutschungszonen in Gerinnenähe zu finden sind. Besonders aktiv in dieser Beziehung ist der Erlenbach, deshalb wird seit 1983 in diesem Gebiet zusätzlich noch der Geschiebehaushalt intensiv untersucht.

2.6 Boden und Vegetation

Die relative Ähnlichkeit der Witterung und der Böden im ganzen Tal einerseits sowie die unterschiedliche Vegetationszusammensetzung und Bodennutzung in den Einzugsgebieten andererseits sind der Anlass, hier vergleichende forsthydrologische Studien durchzuführen.

Der Waldanteil liegt weit über dem schweizerischen Mittel. Die Nutzung ist extensiv. Die Untersuchungsgebiete sind unterschiedlich bewaldet (vgl. Abb. 1). Es handelt sich dabei um einen subalpinen Fichtenwald mit 10 bis 15% Weisstannenanteil. Zusätzlich weisen die Bestände einen Laubholzanteil (Buchen, Weissleren, Ahorn) von gegen 15% auf. Der heute meist mehrstufige Wald stockt auf tonreichen, gehemmt durchlässigen, z.T. sauren Hanggleyböden mit unterschiedlich mächtiger Oxidationszone, siehe z.B. Lokalform «Chnoden» nach RICHARD *et al.* (1978). Je nach Vernässungsgrad des Oberbodens variiert die Humusform von Rohhumus bis Anmoor. Auffallend in diesen flachgründigen Böden sind die 30 bis 40 cm dicken Wurzelteller, welche nach einem Windwurf auszumachen sind. Im Gebiet des Vogelbachs sind auch schwere, tonreiche Braunerden zu finden, welche z.T. tiefgründig und relativ gut durchlässig sind.

Im Nichtwaldgebiet treten vor allem Weiden, Sumpfwiesen und Hangmoore auf. Auf flacheren und höher gelegenen Partien dagegen zeigt sich unter den Humushorizonten häufig Grund- bzw. Hangwasserstau. Trotz der geologischen Ähnlichkeit der Gebiete können die Bodenwasserverhältnisse insbesondere zwischen Mulden- und Kuppenlage auf engem Raum stark variieren. Während bis Ende der 70er Jahre selbst die Waldgebiete durch Rinder und Ziegen beweidet wurden, ist heute eine Trennung zwischen Wald und Weide praktisch vollzogen. Nebst der Streunutzung beschränkt sich die landwirtschaftliche Bewirtschaftung heute noch auf das Einzugsgebiet des Lümpenenbaches.

Alle drei noch heute untersuchten Gebiete sind teilweise mit Forststrassen erschlossen. Der Nutzungsgrad wird als durchschnittlich für eine Voralpenregion bezeichnet. Die Holznutzung geschieht sowohl konventionell, mit Seilkrahn, Helikopter als auch traditionell mit Pferden und Schlitten.

3 Untersuchungen

3.1 Wissenschaftliche Fragestellungen, Forschungsansätze

Fragen im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt:

Das wissenschaftliche Ziel besteht darin, die ablaufenden hydrologischen Prozesse im Ökosystem Wald zu erkennen und zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurde an der WSL vor 25 Jahren je ein Projekt zur Erfassung der Wasser- und der Stoffbilanz sowie ihrer Komponenten

in kleinen voralpinen Einzugsgebieten initiiert. Der Ein- und Austrag von Wasser in Menge, Qualität und zeitlicher Verteilung sind bis heute Hauptbestandteil dieser Projekte.

Die Komponenten des Wasserkreislaufes im Wald sind zwar weitgehend bekannt, doch können die absoluten Beträge von Gebiet zu Gebiet sehr unterschiedlich sein. Die Messung dieser Komponenten ist aufwendig und erfolgt nur punktuell. Für das Alptal rechnen wir mit folgenden Beiträgen. Als Wasserspeicher tritt zuerst das Kronendach auf, welches mittels Interzeption 2 bis 5 mm Wasser pro m² Waldboden zurückhalten kann. Infolge dieser Zwischenspeicherung gelangen im Alptal bis 10% des Jahresniederschlags nie auf den Boden. Der Waldboden übernimmt den grössten Teil der Zwischenspeicherung. Hier können je nach lokalen Bodenverhältnissen und Witterungsvorgeschichte 20 bis 50 mm, in Ausnahmefällen etwas mehr, Niederschlag gespeichert werden. Mittels Verdunstung können im Sommer bei günstigen Verhältnissen täglich 4 bis 6 mm Wasser über die Evapotranspiration an die Atmosphäre abgegeben werden. Nebst der Interzeptionsverdunstung kann der Nadelwald bei günstiger Witterung im Winter, selbst bei einer geschlossener Schneedecke, eine minimale Transpirationsrate aufweisen.

Fragen im Zusammenhang mit dem Stoffhaushalt:

Die Forschung soll sich aber nicht auf die klassischen hydrologischen Fragestellungen für Wildbachgebiete beschränken. Selbstverständlich sind die Fragen der Wasserverluste, der Wasserspeicherung in Gebieten mit unterschiedlichem Wald-, Nassfläche- und Weideanteil, die Häufigkeit der Hochwasser sowie der Geschiebetransport grundlegend und wesentlich.

Noch bevor man auf den schlechten Zustand des Waldes in der Schweiz aufmerksam wurde, begann die Forschungsgruppe um Hans Keller sich mit folgenden ökologischen Fragen auseinanderzusetzen:

- Welche Qualität hat Wasser aus Waldgebieten?
- Wie wirkt sich die Deposition saurer Niederschläge aus?
- Lässt sich ein Einfluss auf den Gesundheitszustand des Waldes nachweisen?
- Verschlechtert sich das Wasser aus geschädigten Wäldern?

3.2 Einbettung in nationale und internationale Erhebungsprogramme

Auf nationaler Ebene bestehen Kontakte mit der ETH, den geographischen Instituten der ETH Zürich und der Uni Bern, der LHG (Landeshydrologie und -geologie) und der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau). Bei Projekten des Nationalfonds waren oder sind wir beim NFP14+ und NFP31 integriert. Auch beim Projekt «Unwetter 1987» des BWB (Bundesamt für Wasserwirtschaft) konnten wir entscheidende Resultate beisteuern.

Es war ein Anliegen von Hans Keller, Forschungsergebnisse aus dem Alptal international bekannt zu machen. So sind eine Vielzahl von Beiträgen für Kongresse und Tagungen in aller Welt zustande gekommen. Während einigen Jahren präsidierte Hans Keller die IUFRO-Gruppe S1.03–02 (Forest Hydrology and watershed management). Zuletzt war er Vorsitzender des ERB (European Network of Experimental and Representative Basins).

Zur Zeit arbeitet unsere Sektion in zwei europäischen Projekten mit:

- NITREX (Nitrogen saturation experiments): Sieben europäische Nationen führen auf rund einem Dutzend Versuchsflächen entweder N-Addition oder N-Removal-Experimente durch. Bei Freilandexperimenten am Standort Alptal wird die Rolle von erhöhten Stickstoffeinträgen in Waldökosysteme untersucht.
- EROSLOPE (Solid transport dynamics and slope failure): vier europäische Nationen befassen sich mit der quantitativen Erfassung von Geschiebetransportprozessen während Hochwasserereignissen. Dabei steht einerseits der Vergleich und die Verbesserung der angewandten bestehenden Messmethoden bei Feldexperimenten im Vordergrund. Andererseits soll die Grenzstabilität des Gerinnebettes, die Ermittlung gerinnenaher Hangbewegungen und die Ermittlung der Sedimentbilanz entlang von Bachabschnitten untersucht werden.

3.3 Instrumentierung der Messstationen

Abflussstation Lümpenenbach

Nach der Zerstörung der ersten provisorischen Abflusssektion wird seit 1975 ein Rechteckprofil mit Nieder- und Mittelwasserrinne als Messquerschnitt verwendet. Der Pegel wird heute noch mit einem mechanischen Ott-Pegelschreiber erfasst. Wir schätzen diese Geräte vor allem bei Rekonstruktionen nach Datenausfällen wegen längeren Netunterbrüchen. 1982 haben wir begonnen, alle kontinuierlichen Daten analog, bzw. digital auf Datenlogger in Intervallen von 10 Minuten aufzuzeichnen. Für diese Pegelerfassung verwenden wir ebenfalls Schwimmersysteme oder Druckmesssonden. Luft- und Wassertemperaturen werden mit PT-100 Fühlern erfasst, während die elektrische Leitfähigkeit mit LF-91/95 Sonden von WTW gemessen werden.

Abflussstation Erlenbach oben

Als Messquerschnitt wird seit 1978 ein Trapezprofil mit Niederwasserrinne verwendet. Ansonsten bestehen vergleichbare Installationen wie im Lümpenenbach.

Abflussstation Erlenbach unten

Als Messquerschnitt wird ein Dreiecksüberfall verwendet. Nach der Passage des Geschiebesammlers (2000 m³) können selbst im Hochwasserbereich zuverlässige Abfluss-Daten gemessen werden. In die Schusssrinne des Erlenbachs sind vor dem Geschiebesammler Geschiebesensoren, sog. Hydrophone, eingebaut. Diese wurden 1986 installiert und registrieren Beginn und Ende sowie die Intensität der Geschiebebewegungen. Eine eingebaute Video-Kamera zeichnet das Abflussverhalten im Bereich der Hydrophon-Sensoren auf. Dank der Flutlichtanlage können seit Frühjahr 1990 auch nächtliche Hochwasser erfasst werden.



Abb. 5. Die Station Vogelbach im Jahr 1968.

Abflussstation Vogelbach

Der erste provisorische Messquerschnitt aus dem Jahre 1968 ist auf Abbildung 5 zu erkennen. Das Hochwasser vom 23.6.1974 zerstörte die erste Station. Der Messquerschnitt aus dem Jahre 1975 ist, ausgenommen vom Fehlen der Niederwasserrinne, mit der Station Lümpenenbach vergleichbar (Abb. 6). Um die auftretenden Geschiebeablagerungen im Messquerschnitt zu eliminieren und die Messgenauigkeit im Hochwasserbereich zu verbessern, wurde ein Auftrag zur hydraulischen Sanierung der Messstation an die VAW erteilt (BURCH 1991). Im Herbst 1993 konnten wir die Station auf Grund einer Modellstudie der VAW hydraulisch sanieren (VAW 1992). Der Einlaufbereich sowie die Gefällsverhältnisse wurden neu gestaltet. Gleichzeitig konnte im neuen Messquerschnitt die Installation von Geschiebesensoren vorbereitet werden (Abb. 7). Die Messgeräte und die erfassten Parameter sind nach wie vor mit der Station Lümpenenbach vergleichbar.

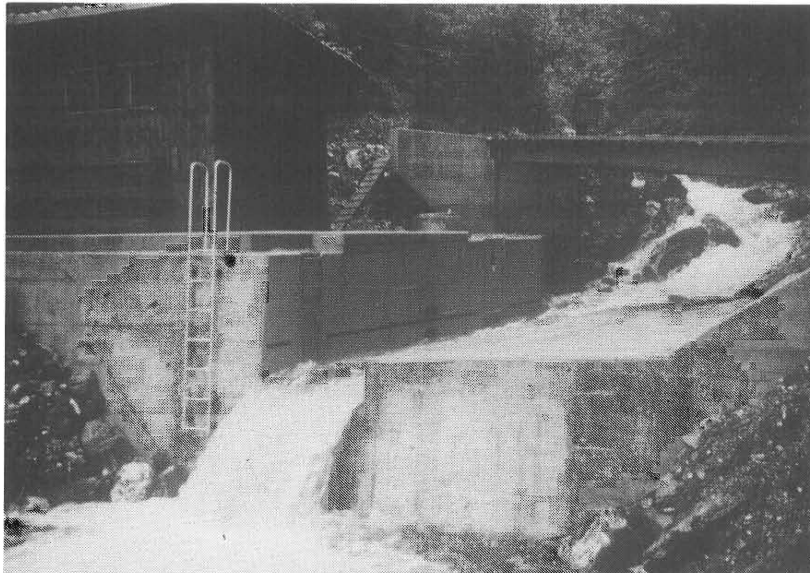


Abb. 6. Die Station Vogelbach im Jahr 1976.

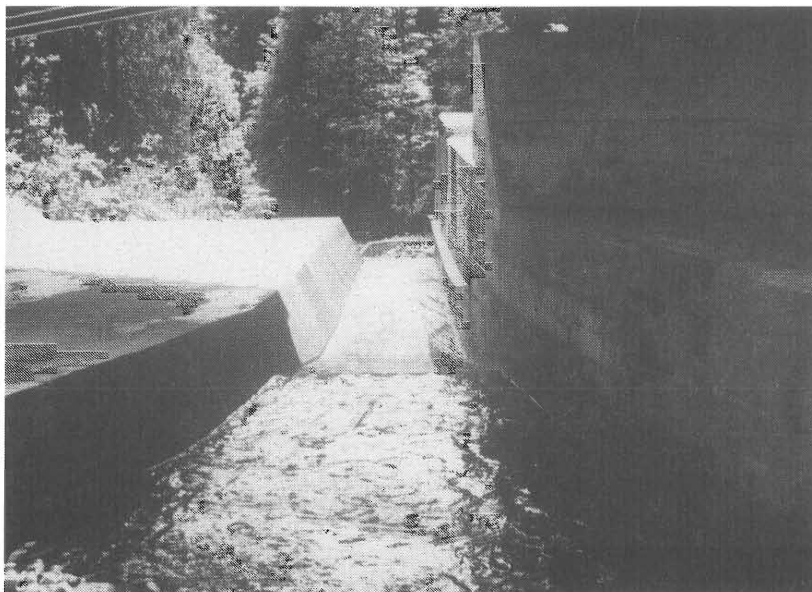


Abb. 7. Die Station Vogelbach im Herbst 1993.

Klimastation Erlenhöhe

Diese Freiland-Station dient seit Herbst 1981 der Erfassung folgender Parameter: Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windweg Nord/Süd, Windweg Ost/West, Windspitze, Niederschlag mit Wippe, Waage und Totalisator, Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Helligkeit. Mit Ausnahme von Waage und Totalisator werden alle Werte auf einen Logger aufgezeichnet. 1987 wurde nebst einem «wet-only» ein hochauflösender Fraktionensammler zur differenzierten Erfassung der Niederschläge entwickelt und installiert.

Klimastation Erlen-Meteo-Turm

Mit Beginn des Projektes NFP14+ wurde 1985 diese Wald-Station eingerichtet (NFP14+ 1988). Dort werden zusätzlich zum Parametersatz der Station 10B folgende weitere Parameter erfasst:

Bestandesniederschlag, Ozonkonzentrationen, Staubgehalt der Luft, Luftdruck und reflektierte Strahlung. Zur Untersuchung von allfälligen Gradienten werden die Parameter Wind, Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf 2, 10, 20, 25 und 35 Meter über Grund kontinuierlich erfasst (Abb. 8).

Weitere Messeinrichtungen

Das Niederschlagsmessnetz umfasst heute noch zwei Totalisatoren, eine Waage und ein bis zwei Wippen pro unterhaltenes Einzugsgebiet (vgl. Abb. 1). Für die Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes sind seit 1970 zwei Grundwasserpegel (Ott-Pegelschreiber) im oberen Vogelbachgebiet installiert. Zusätzlich steht seit Herbst 1992 in der Klimastation Erlenhöhe ebenfalls ein automatischer Grundwasserpegel zur Verfügung. Zur Vervollständigung der gebietshydro-

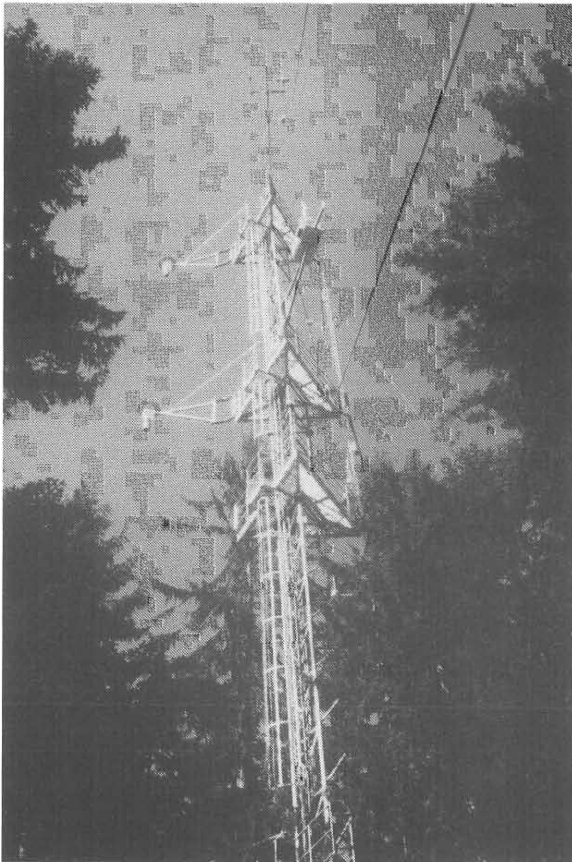


Abb. 8. Der Meteo-Messturm im Alptal.

logischen Untersuchungen sei noch das Schneemessnetz im Alptal erwähnt. Dabei werden seit 1972 in Intervallen von 14 oder 28 Tagen auf 14 bis 15 Messstrecken im Wald und im Freiland die Schneehöhe und -Dichte bestimmt. Zur Beurteilung des Eintrages an gelösten Stoffen werden an ausgewählten Strecken Schneeproben für die chemische Analyse genommen.

Die Nachführung der Eichtabellen für die Abflussstationen ist eine zentrale Aufgabe der operationellen Hydrologie. Zu diesem Zweck werden in allen Einzugsgebieten periodisch Abflussmessungen durchgeführt. Dabei kommen die volumetrische und die Salzverdünnungsmethode mit konstanter oder momentaner Injektion zum Einsatz. Um auch Messpunkte im Hochwasserbereich zu erhalten, ist bei uns eine Hochwassermessanlage im Einsatz, die bei einem vorgegebenen Pegelstand eine Salzverdünnungsmessung automatisch durchführen kann (BURCH und FRITSCHI 1994).

Weiter bietet sich die Möglichkeit an, die Messquerschnitte im hydraulischen Labor nachbilden zu lassen und auf diesem Weg zuverlässige Eichkurven auch im Hochwasserbereich zu erhalten. Die untere Messstation Erlenbach sowie die 1993 umgebaute Station Vogelbach wurden für den Mittel- und Hochwasserbereich auf diesem Weg geeicht. Somit kann davon ausgegangen werden, dass für diese beiden Stationen Hochwasserabflüsse mit einer Standardabweichung von weniger als 5% bestimmt werden können.

3.4 Datenverarbeitung

Das Messnetz Alptal hat in den letzten 26 Jahren eine grosse Palette von Datenerfassungsmethoden erlebt. Wurde zu Beginn mit manuellen Protokolleinträgen und Aufzeichnung auf mechanischen Schreibersystemen gearbeitet, sind heute die automatische Speicherung der Daten auf Logger, Memory-Card oder Harddisk von PC eine Selbstverständlichkeit geworden.

Bei der Datenaufbereitung sind die Lochkarten zwar noch in bester Erinnerung, trotzdem sind die heutigen Möglichkeiten mit PC und anschliessender Datenbank erheblich benutzerfreundlicher. Trotz dem Einsatz der EDV darf der Aufwand für den Aufbau und den Unterhalt einer solchen Datenbank nicht unterschätzt werden.

Da wir heute die Daten von allen Stationen mit kontinuierlicher Aufzeichnung täglich über Modem abrufen und online kontrollieren können, hat sich der Aufwand für Rekonstruktionen von Datenlücken spürbar verringert.

Das eigentliche Kapital bilden anschliessend die bereinigten Daten. Sie werden nach den Grundsätzen der Datensicherheit mehrfach getrennt gespeichert.

4 Resultate

Zur Dokumentation der vorliegenden Daten wird in der Folge eine Auswahl von Auswertungen präsentiert und diskutiert.

4.1 Langjährige Wasserbilanzen

Vogelbach (1968–1993)

Wir beginnen mit der quantitativen Bilanzierung über Niederschlag und Abfluss im Einzugsgebiet des Vogelbaches (Abb. 9). Der Niederschlag als Input wird seit 1968 mit zwei Totalisatoren, eine Niederschlagswaage, seit 1977 zusätzlich mit einer und seit 1993 mit einer zweiten Wippe gemessen. Aus diesen Daten lassen sich mit der Thyssen-Methode die Gebiets-

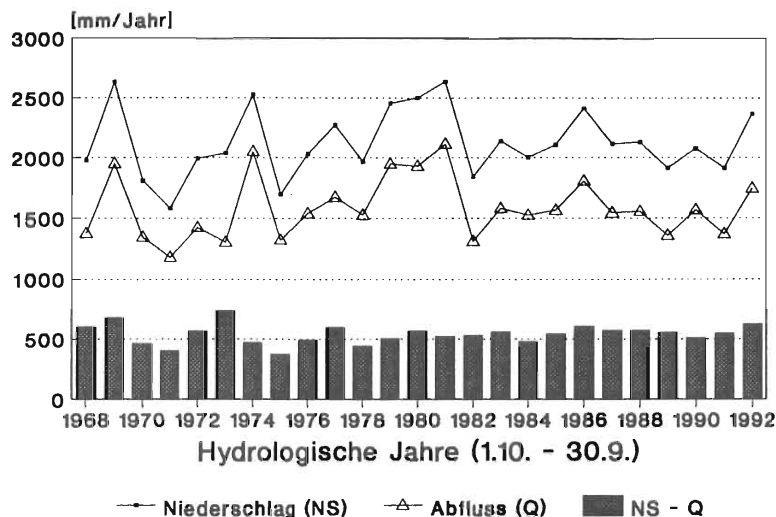


Abb. 9. Die Wasserbilanzgrößen Niederschlag und Abfluss für das Einzugsgebiet des Vogelbaches für die Periode 1968–1993. Die entsprechenden Summenwerte basieren auf dem gewählten hydrologischen Jahr vom 1. Oktober–30. September.

niederschläge errechnen. Für den Abfluss als Output ist nach dem Bau der ersten Station 1968, dem Neubau 1975 und der hydraulischen Sanierung von 1993 die 3. Generation der Messstation im Einsatz.

Für die Bilanzierung gehen wir davon aus, dass die Tiefensickerung in diesen Böden vernachlässigbar klein ist. Mit der Einführung von hydrologischen Jahren (1. Okt.–30. Sept.) kann der Einfluss der Zwischenspeicherung von Schnee eliminiert werden. Da kein Lysimeter zur Verfügung steht, arbeiten wir mit dem vereinfachten Ansatz für die Wasserbilanz (vgl. Abb. 9):

$$\text{Niederschlag (NS)} - \text{Abfluss (Q)} = \text{Evapotranspiration (ET)}$$

Die Variation der Jahresniederschläge zeigt einen zufälligen Charakter und bewegt sich zwischen 1600–2600 mm/Jahr. Der Jahresabfluss ist abhängig von den Jahresniederschlägen und weist demzufolge eine ähnliche Variation auf. Die Evapotranspiration als resultierendes Differenzglied hängt weiter noch von der Strahlungsbilanz ab.

Über die gewählte 25jährige Periode von 1968–1993 lassen sich folgende Jahresmittelwerte berechnen.

Niederschlag:	2130 mm
Abfluss:	1590 mm
Evapotranspiration:	540 mm

Für alle drei Wasserbilanzgrößen können für die gewählte Beobachtungsdauer im Vogelbachgebiet auf der Basis der Jahresmittelwerte keine Trends festgestellt werden.

Die Wasserbilanzen im Gebietsvergleich (1978–1993)

Ein Hauptinteresse der forstlichen Hydrologie besteht ja darin, den Einfluss des Waldes auf das Abflussverhalten von unterschiedlich bewaldeten Einzugsgebieten zu messen und vorhersagbar zu machen.

Um Gebietsvergleiche vornehmen zu können, wählen wir für alle zu untersuchenden Einzugsgebiete die gleiche Zeitperiode aus. In diesem Fall betrachten wir die drei noch heute in Betrieb stehenden Stationen für die Dauer von 1978 bis heute.

Beim Vergleich der Gebiete können signifikante Unterschiede in den Komponenten der Jahresbilanzen festgestellt werden. Als mögliche Ursachen kommen die folgenden Einflussfaktoren in Frage: Pedologische Unterschiede, Exposition, Gefällsverhältnisse, Strahlungsbilanz, Entwässerung, Drainagedichte, Bewirtschaftung, Vegetation und Bewaldung.

Um eine Aussage über den Einfluss der Bewaldung auf die Wasserbilanz machen zu können, müssen die zu vergleichenden Gebiete möglichst kleine Unterschiede in den restlichen Einflussfaktoren aufweisen. In diesem Fall trifft dies am ehesten für den Lümpenen- und den Vogelbach zu. Beide liegen auf der gleichen Talseite und weisen im Gegensatz zum Erlenbach nur eine kleine Drainagedichte aus. Die Daten aus Tabelle 2 bestätigen die bekannte Hypothese, dass die Evapotranspirationsrate in vergleichbaren Einzugsgebieten mit zunehmendem Waldanteil ansteigt.

Tab. 2. Jahreswasserbilanzen 1978–1993 im Alptal (Kalendarische Werte).

	Waldanteil	Niederschlag	Abfluss	Evapotranspiration	Abflusskoeffizient
Lümpenen	19%	2290 mm	1990 mm	300 mm	86,9%
Erlenbach	39%	2190 mm	1740 mm	450 mm	79,5%
Vogelbach	63%	2170 mm	1630 mm	540 mm	75,1%

4.2 Frequenzanalyse der jährlichen Hochwasser

Die jährlichen Höchsthochwasser sind für die gleichen drei Einzugsgebiete und die Periode 1978–1993 ausgewertet worden. Dabei treten signifikante Unterschiede zwischen den drei Gebieten auf (vgl. Abb. 10). Der Erlenbach weist bei diesen jährlichen Hochwasserspitzen spezifische Abflussspenden aus, die bis 2,5 mal grösser sind als im Vogelbach. Diese Unterschiede basieren im wesentlichen auf der höheren Drainagedichte des Erlenbachgebietes und den etwas tiefgründigeren Böden im Vogelbachgebiet. Nur zu einem kleineren Teil kann in diesem Fall der grössere Waldanteil des Vogelbachs als Begründung herangezogen werden.

Zum Erkennen des Einflusses der Bewaldung auf die Reduktion der Hochwasserspitzen betrachten wir die Gebiete Vogelbach (63% Wald) und Lümpenen (19% Wald). Für die Analyse der Unterschiede in den jährlichen Hochwasserspitzen sind vor allem die Form des Einzugsgebietes, der Boden und der Bewaldungsanteil massgebend. Für die gewählte Periode weist der Lümpenenbach für ein Hochwasser mit der Jährlichkeit 10 eine 35% höhere Abflussspitze als der Vogelbach aus. Trotz der stark unterschiedlichen Formen der Einzugsgebiete und den leicht unterschiedlichen Böden kann ein wesentlicher Teil der hochwasserhemmenden Wirkung im Vogelbachgebiet dem Wald zugeschrieben werden.

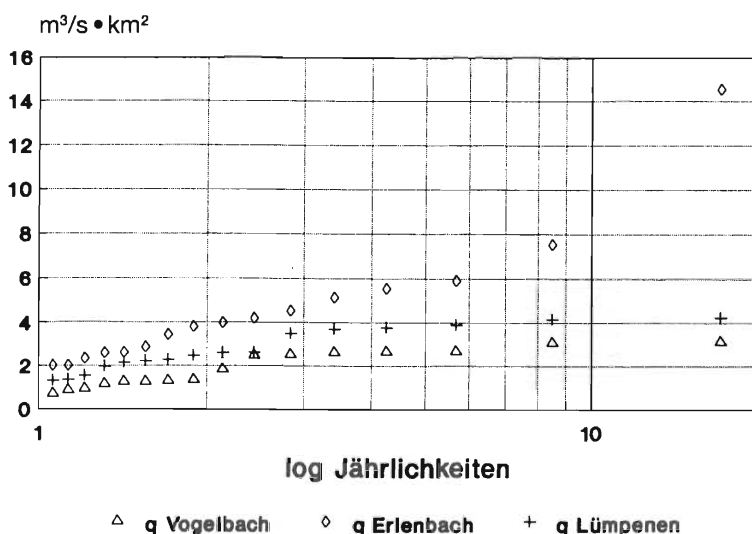


Abb. 10. Die jährlichen Höchsthochwasser in drei Einzugsgebieten im Alptal von 1978–1993. Nach der Umrechnung der Hochwasser in spezifische Abflüsse (q), können die Gebiete miteinander verglichen werden.

Die hydrologische Wirkung des Waldes als Hochwasserschutz darf jedoch nicht überschätzt werden. Das Wasserrückhaltevermögen ist abhängig von der witterungsbedingten Vorgeschichte, dem Füllungsgrad allfälliger Retentionsspeicher wie Boden, Interzeption, Mulden und Senken sowie der Niederschlagsintensität und der Wasseraufnahmekapazität des Bodens (LEUPPI und FORSTER 1990).

4.3 Wasserqualität

Die elektrische Leitfähigkeit im Abfluss

Der Mineralgehalt (Ca, Mg, SO_4) in den untersuchten Bächen ist unterschiedlich und kann über die elektrische Leitfähigkeit ermittelt werden. Für die Periode 1968–1993 beträgt das Mittel im Vogelbach 175 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Der Jahresmittelwert der Leitfähigkeit im Abfluss ist ein relativ konstanter Kennwert mit einer kleinen Standardabweichung. Die Werte schwanken zufällig, es ist kein Muster zu erkennen (KELLER *et al.* 1989).

Für die Periode 1988–1993 wurden für die folgenden drei Gebiete die mittleren Leitfähigkeiten im Abfluss berechnet:

Vogelbach:	181 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Lümpenen:	239 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Erlenbach:	222 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

Die Variation zwischen den Bächen ist erstaunlich und lässt sich auf lokal leicht unterschiedliches Muttergestein, verschiedene Mächtigkeit der Böden und die unterschiedliche Bewirtschaftung zurückführen.

Der anorganische Stickstoff in Niederschlag und Abfluss

Für Fragen der Wasserqualität werden seit 1976 alle 7 bis 14 Tage Proben des Niederschlags im Einzugsgebiet des Vogelbachs genommen. Seit 1968 werden wöchentlich momentane Abflussproben, ab 1985 abflussproportionale Proben genommen. Diese Probenahme wurde ebenfalls auf die Gebiete Lümpenen und Erlenbach ausgedehnt. Die Proben werden im Zentrallabor der WSL mit modernsten Geräten analysiert. Aus der Vielzahl der gemessenen chemischen Parameter wollen wir im folgenden Beispiel auf den Gehalt von anorganischem Stickstoff in Niederschlag und Abfluss eingehen. Als Input messen wir den Gehalt an Gesamt-Stickstoff (TOT-N) im Niederschlag. Diese Jahresmittel basieren auf wöchentlichen Probenahmen im Sommer und 14-täglichen Intervallen im Winter. Die vorliegenden Werte deuten auf eine Zunahme des Stickstoffinputes ins Einzugsgebiet des Vogelbaches von 1976 bis heute hin. Als Output wird das gelöste Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) im Abfluss untersucht. Dabei sind signifikante Unterschiede zwischen den Gebieten zu erkennen (Abb. 11).

Tatsache ist, dass der Nitratgehalt im Abfluss des Lümpenenbachs durchwegs über dem des Erlenbachs liegt. Dieser Unterschied ist nicht auf den Wald, sondern wohl auf die landwirtschaftliche Nutzung des Lümpenengebietes zurückzuführen.

Schwieriger zu interpretieren ist die ausgewiesene stetige Zunahme des gelösten Nitrat-Austrags im Abfluss des Vogelbachs im Vergleich zum Erlenbach. Ob die Veränderung der Luftqualität und mit ihr die Filterung und Auswaschung der trockenen Deposition in Nadelwäldern, oder ob ein veränderter Stickstoffbedarf der Vegetation mitspielt, oder ob andere Gründe vorliegen, wissen wir nicht. Der Stickstoffkreislauf im Ökosystem Wald ist sehr komplex. Hypothesen über ablaufende Prozesse können zwar aufgestellt, aber mit den vorliegenden Daten noch nicht bewiesen werden. In diese Richtung zielen jedoch die Untersuchungen im früher bereits erwähnten Projekt NITREX.

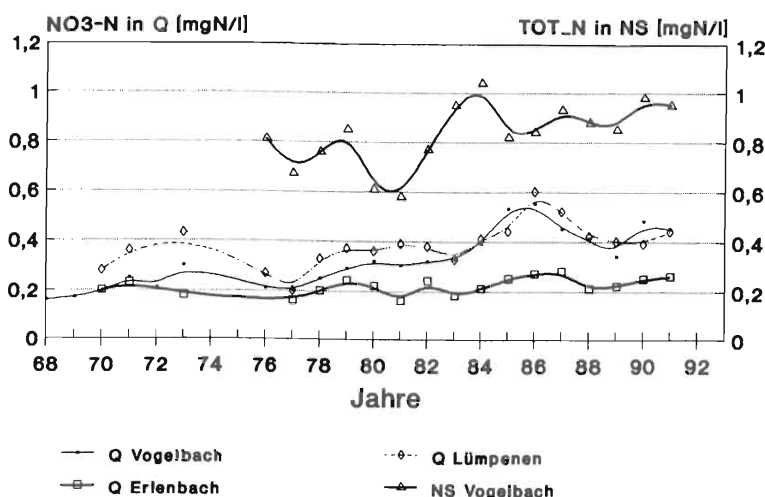


Abb. 11. Stickstoffkonzentrationen im Niederschlag (NS) und Abfluss (Q) im Alptal für die Periode von 1968–1993. Zur Visualisierung wurden die entsprechenden Jahresmittel mit einer Glättungskurve verbunden.

4.4 Weitere Resultate

Als Resultate können alle Publikationen erwähnt werden, die auf den Daten der Alptaler Einzugsgebietsstudien basieren. Das betrifft alle WSL-internen und -externen Publikationen, welche in einer Publikationsliste zusammengefasst sind (WSL 1992), sowie viele Diplomarbeiten, Praktikumsberichte und Dissertationen. Mit dem angesammelten Know-how aus dem langjährigen Betrieb der Forschungseinrichtungen konnten zudem Anfragen bezüglich Messtechnik und Instrumentierung von neuen Messgebieten beantwortet und spezifische hydrologische Beratungen durchgeführt werden.

5 Diskussion, Ausblick

Es ist sinnvoll, den Parametersatz von Monitoring-Projekten periodisch zu überprüfen und aktuellen Forschungsbedürfnissen anzupassen. Doch wer kann sagen, welche Parameter für die Forschung in 5 oder 10 Jahren relevant, oder eben nicht mehr relevant sein werden? Das ist wohl der Grund, dass bei der Aufstockung des Parametersatzes in den seltensten Fällen eine parallele Reduktion des bestehenden Parametersatzes erfolgt. Eher wird versucht, diesen Mehraufwand beim Erfassen eines grösseren Parametersatzes durch die Reduktion des Stichprobenumfangs und der redundanten Messsysteme zu kompensieren, basierend auf konstanten oder rückläufigen Budgetvorgaben.

Die forsthydrologische Forschung braucht nach wie vor zuverlässige Daten, um die hydrologischen Prozesse in Waldökosystemen auf allfällige Trends und ihre Ursachen untersuchen zu können. Neben der mengenmässigen und zeitlichen Erfassung von Wasser- und Geschiebetrachten bei Extremereignissen stehen die ökologischen Parameter, wie die gelösten chemischen Wasserinhaltsstoffe in Niederschlag und Abfluss, im Zentrum des Interesses.

Wir sind zuversichtlich, dass die WSL die von Hans Keller initiierten Projekte, Wasser- und Stoffbilanz in kleinen voralpinen Einzugsgebieten, in den wesentlichen Teilen weiterführen wird. Somit werden die Messnetze im Alptal, wenngleich in angepasster und aktualisierter Form, auch zur Jahrtausendwende ihren Beitrag zur forsthydrologischen Forschung liefern können.

6 Literatur

- BURCH, H., 1991: Die Abflussstation Vogelbach: Situationsanalyse für eine hydraulische Sanierung. Interner Hydrologie-Bericht. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 22 S.
- BURCH, H.; FRITSCHI, B., 1994: Die automatische Hochwassermessanlage im Alptal. Nouvelles der LHG 1: 11–13.
- Forstliche Hydrologie, 1993: 25 Jahre Vogelbach/Alptal 1968–1993, Resultate aus hydrologischen Untersuchungen der WSL im Alptal/SZ, Unterlagen der Tagung vom 2. Juli 1993 in Alpthal. 22 S.
- LEUPPI, F.; FORSTER, F., 1990: Zur Frage der Wirksamkeit des Waldes für den Hochwasserschutz ein Beispiel aus dem oberen Reusstal. Schweiz. Z. Forstwes. 141, 11: 943–954.
- KELLER, H.M., 1985: Die hydrologische Forschung an der EAFV seit 1889. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 61, 2: 746–756.
- KELLER, H.M.; BURCH, H.J.; GUECHEVA, M., 1989: The variability of water quality in a small mountainous region. Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989. IAHS Publ. 182: 305–312.
- NFP14+, 1988: Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz. Schweizer Nationalfonds, Ausgabe März 1988, S. 7–11.
- RICHARD, F.; LÜSCHER, P.; STROBEL, T., 1978: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bd. 1.
- STAMMBACH, M., 1989: Rutschungen im hinteren Alptal (Kt. Schwyz). Geologische Karte 1:2000, Gebiet Brunnli-Haggenegg–Langried–Furggeln. Diplomarbeit Universität Zürich. 96 S.
- VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau) 1992: Wassermessstation Vogelbach, Bericht über die hydraulischen Modellversuche zur Sanierung der bestehenden Messstation. Bericht Nr. 4056, Juni 1992. 47 S. Interner Bericht.
- WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) (Hrsg.) 1992: Publikationen Hydrologie – Eine Zusammenstellung von Arbeiten der WSL (EAFV) zur Hydrologie 1891–1991. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 61 S.
- ZELLER, J.; GEIGER, H.; KELLER, H.M., 1985: Die EAFV heute: Abteilung 9, Verbauwesen und Hydrologie. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 61, 2: 886–904.

Adresse des Autors:

Hans Burch

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Die Geschichte der Hydrologischen Kommission

Karin Schram

Abstract

The history of the Commission of Hydrology

The Commission of Hydrology of the Swiss Academy of Sciences was founded in 1947. The reason why it was founded, the aim of the Commission and its activities are described.

Im Sommer 1948 soll in Oslo zum ersten Mal nach dem 2. Weltkrieg wieder eine Tagung der IAHS (International Association of Hydrological Sciences), einer der 7 wissenschaftlichen Vereinigungen der IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) stattfinden. Auch die Schweiz ist aufgefordert, zu den Tagungsthemen beizutragen. Aber was heisst «die Schweiz»? Es gibt hier kein Gremium, in dem die Hydrologen organisiert sind, das die Beiträge koordinieren und die Fachleute vertreten könnte. Eine Reihe von Wissenschaftlern befasst sich in der Schweiz mit hydrologischen Fragen. Allen voran O. Lüscher, einer der Pioniere auf dem Gebiet der Hydrologie in der Schweiz und seit 1936 Präsident der IAHS. Er gründete das Institut für Gewässerkunde, das nach seiner Pensionierung als Abteilung für Hydrologie (Leiter E. Hoeck) der VAWE/ETH (Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau) angegliedert wurde. In der hydrologischen Forschung tätig sind u.a. auch Mitarbeiter der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) in Birmensdorf, des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (EISLF) auf Weissfluhjoch, des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft in Bern sowie der Universitäten Genf und Lausanne. Die Forscher kennen sich und ihre Projekte, es gibt aber keine Koordination und keine institutionalisierten Kontakte.

Nach Absprache mit O. Lüscher und auf seinen Wunsch verfasst M. de Quervain (EISLF) am 16. 4. 1947 ein Rundschreiben an die Hydrologen bzw. an Institutsvorsteher, in deren Amtsbereich Hydrologen oder hydrologisch interessierte Wissenschaftler tätig sind. Darin werden Fachleute, die zu den Themen der Tagung in Oslo einen Beitrag liefern können, aufgefordert, an einer ersten Fühlungnahme und Besprechung teilzunehmen. Meyer-Peter, Direktor der VAWE, greift diese Anregung sofort auf und schlägt nach Rücksprache mit Hoeck und Lüscher eine Zusammenkunft in seinem Institut mit zwei Haupttraktanden vor: die Beteiligung der Schweiz an der Tagung der IAHS und die Prüfung der Gründung einer «schweizerischen Kommission oder Gesellschaft für hydrologische Fragen». De Quervain überlässt die Federführung Meyer-Peter, da sein Arbeitsgebiet nur am Rande im Bereich der Hydrologie liegt.

Am 29. Mai 1947 findet unter dem Vorsitz von Meyer-Peter eine Sitzung mit 9 Teilnehmern statt, an der einstimmig festgehalten wird, dass

- ein Zusammenschluss der Hydrologen wünschenswert ist
- die zu gründende Körperschaft der SNG (Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft) angeschlossen sein muss, damit die internationalen Beziehungen gewährleistet werden können.

Im Prinzip stehen drei Möglichkeiten zur Diskussion:

1. Gründung einer freien Hydrologischen Gesellschaft, die an die SNG als Zweiggemeinschaft angeschlossen wird,

2. Anschluss einer Hydrologischen Gesellschaft an die Gesellschaft für Geophysik, Meteorologie und Astronomie,
3. Bestellung einer Hydrologischen Kommission der SNG.

Der Präsident der SNG, Prof. Dr. A. von Muralt, bevorzugt eindeutig die 3. Variante, da eine Hydrologische Kommission wegen der kleinen Mitgliederzahl gegenüber einer Gesellschaft den Vorteil einer wesentlich grösseren Beweglichkeit und Leistungsfähigkeit aufweise. Bereits am 16. Juli 1947 versenden Meyer-Peter und Lüschg einen Entwurf des Reglementes der Hydrologischen Kommission mit den folgenden Hauptpunkten:

Die SNG ernennt durch ihren Senat die Hydrologische Kommission, deren Aufgabe die Förderung des Studiums der Gewässerkunde ist. Die Kommission konstituiert sich selber, besteht aus 7 bis 9 Mitgliedern und versammelt sich mindestens zweimal jährlich. Sie ist mit der Durchführung neuer oder Erweiterung bereits in Gang befindlicher Untersuchungen betraut mit dem Ziel, den Wasserhaushalt charakteristischer Einzugsgebiete und schliesslich des gesamten Schweizerlandes abzuklären. Zudem sollen neue Instrumente und Messmethoden für die hydrologische Forschung entwickelt und bestehende verbessert werden. Die Aufgaben können nach Genehmigung des Programms durch die Kommission Fachleuten übertragen werden. Eine weitere zentrale Aufgabe ist die Veröffentlichung der Untersuchungen in der Serie «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie – Hydrologie», in der bereits eine Reihe von hydrologischen Arbeiten von der Geotechnischen Kommission herausgegeben wurde und die mit dieser gemeinsam weitergeführt werden soll. Die Einnahmen der Kommission bestehen aus Subventionen der Eidgenossenschaft und dem Verkauf der Publikationen.

Wenige Tage nach Unterzeichnung des Reglementsentwurfes stirbt O. Lüschg am 22. Juli 1947 unerwartet.

An der konstituierenden Sitzung der Hydrologischen Kommission am 4. Dezember 1947 in Zürich sind alle Mitglieder anwesend:

Ing. H. Bircher, Sektionschef des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern

Prof. Dr. H. Burger, Direktor der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Zürich

Dr. M. de Quervain, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos

PD Dr. F. Gyax, Universität Bern

Ing. Ch. Herter, Directeur du Service des Eaux de Vevey-Montreux, Vevey

Dr. E. Hoeck, Chef der Abt. Hydrologie der VAWE, ETH Zürich

Prof. Dr. E. Meyer-Peter, Direktor der VAWE, ETH Zürich

Prof. Dr. A. Stucky, Directeur de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne.

Prof. Dr. L. Collet von der Université de Genève hatte seine Mitarbeit zugesagt, trat dann aber wegen anderweitiger starker Belastung zurück. An seiner Stelle wird an der 2. Sitzung der Hydrologischen Kommission J.C. Thams, Direktor des Osservatorio Ticinese in Locarno-Monti, als 9. Mitglied und Vertreter der Meteorologie und der Südschweiz gewählt.

An der konstituierenden Sitzung wird das Reglement mit kleinen Änderungen genehmigt und Meyer-Peter zum Präsidenten, Stucky zum Vizepräsidenten und Hoeck zum Aktuar gewählt. Hoeck wird auch zum offiziellen Vertreter der Schweiz an der Tagung in Oslo ernannt. Für diese Reise erhält er vorübergehend einen Dienstpass, ausgestellt vom Eidg. Politischen Departement.

An der 2. Sitzung am 23. März 1948 werden das Arbeitsprogramm und das Budget für 1949 aufgestellt. Folgende drei Vorschläge werden genehmigt: Erweiterung der Niederschlagsmessungen und Untersuchung der Strahlungsverhältnisse im Einzugsgebiet der Baye de Montreux (durch Hoeck) und Ausbau des Totalisatorennetzes im oberen Bleniotal (durch Gyax). Dafür sollen für die Arbeiten in der Baye de Montreux Fr. 3600.–, für jene im Bleniotal Fr. 3000.–, zur Verfügung stehen und für die Administration (Einrichtung des Sekretariates sowie Reisespesen der Kommissionsmitglieder zu den Sitzungen) Fr. 1400.–, also ein Gesamtbudget von Fr. 8000.–. Es wurden dann allerdings nur Fr. 6000.– bewilligt.

Tab. 1. Die Mitglieder der Hydrologischen Kommission der SANW.

Name	Amt	Mitglied (Präsident: P) (Sekretär: S) von...bis
Bircher, H., Ing.	Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern	1947–1954
Bonnard, D., Prof.	Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne	1959–1970
Bruschin, J., Prof.	EPF-Lausanne	1977–1982
Burger, A. Prof. Dr.,	Université de Neuchâtel	1968–1982
Burger, H., Prof. Dr.	Eidg. Anst. für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf	1947–1948
Courvoisier, H.W., Dr.	Schweiz. Meteorologische Anstalt, Zürich	1971–1987
Emmenegger, Ch., Dr.	Landeshydrologie und -geologie, Bern	1975–1990
Flühler, H., Prof. Dr.	ETH-Zürich	1988–1991
Föhn, P. Dr.	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos	1977–1991 (S: 1977–1983)
Gillieron, F., Dr.	Eidg. Amt für Wissenschaft und Forschung, Bern	1975–1981
Götz, A., Dipl.Ing.	Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern	1980–1991
Gygax, F., Prof. Dr.	Universität Bern	1947–1978
Herter, Ch., Ing.	Service des Eaux de Vevey-Montreux, Vevey	1947–1959
Hoeck, E. Dr.	ETH-Zürich	1947–1951 (S: 1947–1951)
Kasser, P. Prof.	ETH-Zürich	1953–1976 (S: 1953–1976)
Keller, H. Dr.	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf	1970–1991 (P: 1988–1991) (S: 1983–1988)
Kelts, K. Dr.	Eidg. Anstalt für Abwasserreinigung, Wasserversorgung und Gewässerschutz, Dübendorf	1987–1990
Kurth, A., Prof. Dr.	Eidg. Anst. für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf	1961–1970
Lang, H., Prof. Dr.	ETH-Zürich	1977–1991
Leibundgut, Ch., Prof. Dr.	Universität Bern	1983–1991
Lichtenhahn, C., Dipl. Ing.	Eidg. Anst. für Strassen- und Flussbau	1972–1980
Meyer-Peter, E. Prof. Dr.	ETH-Zürich	1947–1959 (P: 1947–1954)
Mornod, L, Dr.	Geologiebüro, Bulle	1972–1980
Müller, G.	Schweiz. Meteorologische Anstalt, Zürich	1988–1991
Musy, A. Prof. Dr.	EPF-Lausanne	1984–1991
Naef, F. Dr.	ETH-Zürich	1988–1991
Nänny, P., Dr.	Eidg. Anstalt für Abwasserreinigung, Wasserversorgung und Gewässerschutz, Dübendorf	1972–1985
Nydegger, P., Dr.	Universität Bern	1979–1983
Pervangher, C., Dipl. Ing.	Kanton Tessin	1983–1991
de Quervain, M., Prof. Dr.	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos	1947–1976 (P: 1970–1976)
Regamey, P., Prof. Dr.	EPF-Lausanne	1975–1984
Schlatter, A.J.	Eidg. Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei, Bern	1949–1960
Schnitter, G., Prof.	ETH-Zürich	1954–1974 (P: 1955–1969)
Schweizer, H.U., Dr.	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern	1975–1987
Stadelmann, P., Dr.	Kanton Luzern	1990–1991
Stucky, A., Prof. Dr.	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	1947–1958
Sturm, M., Dr.	Eidg. Anstalt für Abwasserreinigung, Wasserversorgung und Gewässerschutz, Dübendorf	1991
Thams, J.C.,	Osservatorio Ticinese, Locarno	1948–1972
Trüeb, E., Prof. Dr.	ETH-Zürich	1975–1987
Vischer, D., Prof. Dr.	ETH-Zürich	1970–1987 (P: 1977–1987)
Walser, E., Dr.	Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern	1955–1974
Zwahlen, F., Prof.	Université de Neuchâtel	1986–1991

Ein weiterer wichtiger Diskussionspunkt an der 2. Sitzung ist die Beziehung der Hydrologischen Kommission zu den anderen, in der Schweiz bereits bestehenden Kommissionen, die sich mit Wasser beschäftigen. Es sind dies:

- die Gletscherkommission der SNG
- die Geotechnische Kommission der SNG
- die Kommission für Schnee- und Lawinenforschung, ein Kuratorium des Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, nicht Mitglied der SNG.

Vorschläge, die Kommissionen zu vereinen oder eine Dachkommission zu gründen, stossen mit Rücksicht auf die verschiedenen Aufgaben und die historische Entwicklung der einzelnen Kommissionen auf Widerstand. Es wird aber angeregt, die Präsidenten der anderen Kommissionen jeweils zu den Sitzungen einzuladen und für die internationale Vertretung einen Turnus einzuführen.

In den folgenden Jahren tagt die Hydrologische Kommission in der Regel zweimal pro Jahr. Dabei wird über die Sitzungen der SNG und über internationale Tagungen informiert, an denen Mitglieder teilgenommen haben. Eine wichtige Aufgabe der Hydrologischen Kommission ist die Herausgabe der Hydrologischen Bibliographie. Die Hydrologische Kommission abonniert Fachzeitschriften und lässt sie unter den Mitgliedern zirkulieren. An den Sitzungen werden Listen der kommenden Tagungen verteilt. Ein Traktandum befasst sich jeweils mit den Aktivitäten und Ergebnissen der Forschungsarbeiten, die durch die Hydrologische Kommission finanziell unterstützt werden. Es sind dies

- Hydrologische Untersuchungen im Tessin (Gygax), in deren Rahmen eine Reihe von Dissertationen ausgearbeitet werden,
- Untersuchung der Strahlungs- und Sonnenscheinverhältnisse in der Baye de Montreux (Kasser, Thams),
- Untersuchung des Einflusses von Strahlung und Temperatur auf den Schmelzprozess von Schnee und Eis auf dem Aletschgletscher (Kasser, Thams).

Viele Jahre hindurch ist die Mitfinanzierung dieser Forschungsarbeiten möglich, und die Hydrologische Kommission sieht sie als eine ihrer Aufgaben an. Mitte der 70er Jahre werden die Mittel knapper, einige Projekte sind abgeschlossen und werden nicht mehr ersetzt. Die Hydrologische Kommission beschränkt sich auf andere Aufgaben. Zu deren Formulierung werden immer wieder Anstrengungen unternommen.

An der 16. Sitzung vom Dezember 1955 ist das Haupttraktandum der Neuüberdenkung der hydrologischen Forschung in der Schweiz und den Aufgaben der Hydrologischen Kommission gewidmet. Thams regt die Diskussion mit einem Eingangsvotum an, in dem er vorschlägt, man solle kleine, noch nicht veränderte Einzugsgebiete für die hydrologische Forschung sozusagen «reservieren». Mit dem Ausbau der Wasserkräfte und Verkehrswege sowie der Erweiterung der Siedlungsräume nimmt die Anzahl der Gebiete mit einem natürlichen hydrologischen Regime ständig ab, aus Naturlandschaften werden Kulturlandschaften. Die Hydrologische Kommission solle sich dem Kardinalproblem der Hydrologie, der Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss annehmen, und sich dabei auf Grundlagenforschung beschränken. Dazu müssen vor allem auch die Messmethoden verbessert werden. Es wird eine Studiengruppe bestehend aus Kasser, Thams und Walser zur Erarbeitung eines Programms gebildet, die zum Schluss kommt, man müsse zunächst den Stand der hydrologischen Forschung in der Schweiz erheben. Sie entwirft einen Fragebogen, der als Grundlage für die persönliche Befragung in den einzelnen Institutionen dient. Diese Erhebungen werden aus Zeitmangel wegen der vielen Aktivitäten auf internationaler Ebene (z.B. IHD usw.) nicht zuende geführt. Hydrologische Einzugsgebiete werden aber in der Schweiz von verschiedenen Institutionen, allen voran dem Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, eingerichtet.

20 Jahre später ergreift Burger die Initiative und lässt durch einen Mitarbeiter eine Erhebung über die hydrologische Forschung in der Schweiz durchführen. Das Projekt wird von dem im

hydrologische Probleme auf wenige Personen beschränkt und so wird immer wieder der Wunsch nach einer Öffnung der Hydrologischen Kommission laut.

An der 70. Sitzung vom 19. April 1988 findet eine erste Aussprache über die allfällige Gründung einer Hydrologischen Gesellschaft statt. Die Schweizerische Akademie für Naturwissenschaften (SANW, früher SNG) schliesst die Gründung einer selbständigen Gesellschaft aus, für sie kommt nur ein Zusammenschluss mit einer bereits bestehenden Gesellschaft in Frage. Nach verschiedenen Abklärungen wird beschlossen, sich der Gesellschaft für Limnologie anzuschliessen und eine «Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie» (SGHL) zu bilden. An der 75. Sitzung der Hydrologischen Kommission am 25. Oktober 1990 wird die Gründung der SGHL bekanntgegeben. Die Hydrologische Kommission wird auf den 31. 12. 1991 aufgelöst, ihre Aufgaben übernimmt das «ständige hydrologische Komitee», ein Organ der SGHL, das nicht wie die Hydrologische Kommission der Sektion III, sondern der Sektion IV der SANW angehört. An der 77. und letzten Sitzung der Hydrologischen Kommission vom 24. Oktober 1991 treten langjährige Mitglieder, deren Amtsperiode abgelaufen ist, zurück, unter ihnen der Präsident, Dr. Hans M. Keller. Das ständige hydrologische Komitee formiert sich im 1. Quartal 1992, Prof. Dr. A. Musy übernimmt das Präsidium.

Damit bricht eine neue Ära an, die Notwendigkeit und die Aufgaben dieses Komitees müssen neu überdacht und formuliert werden. Zweifelsohne hat die Hydrologische Kommission in der Schweiz eine wichtige Aufgabe erfüllt und die hydrologische Forschung in starkem Masse geprägt und gefördert; eine Forschung, die noch lange nicht abgeschlossen sein wird und angesichts von Überschwemmungen und Murgängen immer wieder vor neue Herausforderungen gestellt sein wird. Diese sind nur mit gemeinsamen Anstrengungen zu bewältigen. Ein Gremium, das Prioritäten setzt, die Forschungsbedürfnisse abklärt und die Verbindung zu den internationalen Organisationen aufrecht erhält, hat sicher seine Daseinsberechtigung, ja ist unentbehrlich.

Der vorliegende Abriss über die Geschichte der Hydrologischen Kommission wurde anhand der Protokolle zusammengestellt. Die Verfasserin führte diese von 1970 bis 1988, konnte also einen grossen Teil der Geschichte selber miterleben.

Adresse der Autorin:
Dr. Karin Schram
Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
ETH-Zürich
CH-8092 Zürich

Mountains – A Hydrological Paradox or Paradise?

John C. Rodda

Abstract

Mountains are the origin of much of the world's water resources. Yet less is known hydrologically about mountains on a global scale than plains, deltas, hilly regions and other areas. This conventional view is challenged by the existence of many experimental and representative basins in the mountain regions of the World. Hence the question is: mountains – a hydrological paradox or paradise?

Keywords: water resources, instrument networks, basin studies

1 Introduction

As demands for water for drinking, irrigation, power and for other purposes continue to rise, the pressures on the world's fresh water resources grow (AYIBOTELE 1992). Indeed some regions of the world are currently experiencing considerable shortages for a number of reasons, but principally because the margin between the available resource and the demand is very small or non-existent. Droughts, such as those that recur in parts of Africa, exacerbate these conditions and highlight the dangers of over-utilization of a meagre resource.

This situation must worsen as the world population grows, pollution of surface water and groundwater increases and climate change threatens. There are even forecasts that, with the doubling of the global population sometime during the next century and the soaring demand, a world water crisis will develop (AYIBOTELE and FALKENMARK 1992). In these circumstances, the world's fresh water resources will become even more precious than today. At the other hydrological extreme, most parts of the world are subject to floods and other water-related natural disasters. Indeed the toll of death and destruction due to floods is the largest of any of the different types of disaster. With the rising population there will be a bigger target in the future for floods, avalanches, landslides and mudslides.

Too much or too little water can set back the progress of a developing country towards the sustainable development that UNCED and Agenda 21 (UN 1992) espouse. They can also be hindrances to developed countries in pursuit of this goal.

2 Contemporary Problems in Mountain Regions

Of course, the world's mountain regions are the source of the major part of these water resources. Countries which contain mountainous areas within their borders are usually well-blessed with water resources, much of it in the form of snow and ice. Rivers draining these mountains provide a part of these resources to adjacent nations through the river basins they share. In the arid and semi-arid regions of western Asia and Latin America, the juxtaposition of well-watered mountain ranges and dry plains crossed by perennial rivers highlights this point. Even in the humid parts of the world, the dependence of downstream countries on highland areas upstream is an important "fact of life".

In the developing world, mountains are sources of raw materials, they are areas of less productive agriculture and often their development is not so advanced as in other regions. In the developed world, they are looked on with favour as remote, unspoiled playgrounds by the majority of the populations in the lower lying areas that surround them. But this is not entirely true – in many parts of the globe they are subject to an increasing number of problems that may be destroying the pristine mountain environment and changing their image. These problems were initially associated with the development of natural resources, for example minerals, forest products and water and also to a certain extent with agriculture. More recently, the expansion of leisure and recreational activities, particularly winter sports, has created a new set of problems and there are also the contemporary threats of pollution and climate change to contend with. The fragile ecosystems of mountains are under threat from erosion, landslides, loss of habitat and reduction of biological diversity. Chapter 13 of Agenda 21 (UN 1992) proposes how these unfavourable trends should be reversed and what the necessary programmes will cost.

Of course, mountain regions often form major watersheds between river basins and the frontiers between neighbouring states. The consequences of these political divisions are several, one being that the physical heterogeneity is compounded by administrative contrasts between one side of a frontier and the other which are generally not conducive to improving the hydrological understanding of mountains. In addition, communications are difficult, settlement is sparse, services such as electricity and telephone are limited and the environment is harsh, a combination of circumstances which does not favour monitoring for hydrological and other purposes.

3 Mountain Water Resources

The importance of mountainous regions for water resources derives principally from the enhanced precipitation they enjoy which is caused by uplift and ascent of moist air over them. Part of this precipitation (a varying part) falls seasonally as snow in higher latitudes and altitudes, some forming glaciers and ice sheets, features which add to the hydrological dimensions of mountainous regions.

Although it is a variable which is difficult to measure, cloud is a characteristic of the climate of most mountainous regions. In some arid and semi-arid environments substantial amounts of water are harvested from these clouds, but their role is more significant in humid areas, particularly where the droplets are charged with emission products, such as sulphur compounds. The wet deposition from these droplets on the forest canopy, together with the greater volume of deposited acidity due to the larger volume of precipitation must be significant in the acidification of mountainous regions where, in addition, soil buffering may be lacking.

The exact relationship between precipitation and altitude varies greatly between different parts of the world, depending on the volume of moisture in the air and its temperature, the steepness of the ascent and other factors, such as time of year and whether another mechanism is adding to the uplift. However, within the extensive literature on this topic, most relationships for the increase in annual precipitation totals with altitude seem to fall within the range of 0.05 mm per metre to 7.5 mm per metre. There is also a range of altitudes where the maximum precipitation occurs: usually between 1500 m and 4000 m, totals decreasing above these levels. Precipitation amounts on the leeward sides of mountains generally decrease less rapidly and distribution patterns are more variable than on windward slopes. Of course, there are some mountainous regions where there are no clear-cut windward and leeward sides and the patterns of precipitation do not exhibit these differences.

The precipitation incident on a mountain surface, liquid or solid, is in time partitioned between evaporation, overland flow and saturated and unsaturated subsurface flow, the relative

magnitude of these components being largely determined by the nature of each particular surface. As regards evaporation, literature is sparse on its relation to altitude, but it seems logical to assume that evaporation decreases with altitude, although its main controls do not all respond in this way. This view agrees with LANG (1981) who gives examples of evaporation: altitude relations for the Alps showing a range of decreases from 0.07 mm per metre to 0.36 mm per metre for annual totals. In contrast to evaporation, it seems likely that overland flow increases with altitude as gradients increase and the thin soils with their limited infiltration capacities which, in any case are often saturated, are replaced by impermeable strata. MARTINEC (1979) provides some estimates of the relative volumes of water in these different components of the water balance of the Dischma basin. The concentration of the overland flow and returned subsurface flow in the extensive network of stream channels of mountain basins ensures a high specific runoff. Alternatively, where infiltration can occur to permeable strata, mountainous regions act as recharge areas to the underlying aquifers, which may extend below the adjacent lowlands to provide an exploitable source of water.

The processes of erosion and transport of materials are stimulated by the overland flow and the dense network of channels. Consequently, the loads of mountain streams and rivers usually increase rapidly with increasing flows. As gradients lessen, deposition occurs and material accumulates.

4 A hydrological paradox?

From one hydrological point of view, mountain regions present a paradox. Although they provide the bulk of the world's water resources, knowledge of these resources is generally much less extensive, reliable and precise than for other physiographic regions. As KLEMES (1988) says, mountain regions represent, in practical terms, "the blackest of black boxes in the hydrological cycle". Only their output is known with any degree of precision and reliability.

LANG (1989) highlights the extreme spatial variability of conditions and processes in mountain areas, both horizontally and vertically and on the micro, meso and macro scales. He stresses the differences in surface processes that can occur over distances of a few metres, because of changes of slope angle, exposure and similar features. He sees the same variety in the range 100 m to 1000 m, with the added complications of the vertical gradients of temperature, precipitation and other variables, together with the differences due to the presence or absence of vegetation. He also notes the influence of mountains on the motion of air masses on the 1 km to 100 km scale.

In addition to this heterogeneity, there is often only limited storage available in most mountain regions, except for those in karst and volcanic areas and regions of similar geological formations, because of the extent of rock outcrops, shallow soils and impervious bedrock, as well as the steep slopes. Some storage does exist in glaciers, ice sheets and in the seasonal snow cover but, as MARTINEC (1985) points out, this volume is not large. For example, without renewal by precipitation, the volume of water stored in Swiss glaciers would maintain the average runoff from Switzerland for only $1\frac{1}{2}$ years. The consequence of this combination of factors is that runoff is usually rapid and variable, running water, avalanches, mudslides and landslides transporting large quantities of material to lower elevations in short intermittent periods.

From the scientific point of view, the heterogeneity of hydrological conditions within mountains would appear to demand data collection systems which provide more hydrological data than for adjoining lowland areas. It could be imagined that more data and samples of the different hydrological variables and allied information are required than in other regions and that there would be more stations than recommended by WMO for minimum network densities (Table 1). While this may be the case in theory, the practice is rather different. In general

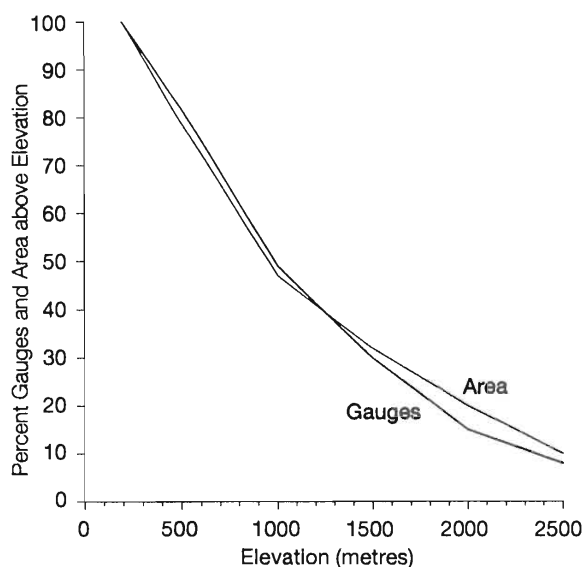


Fig. 1. Elevation distribution of precipitation gauges, 27 countries from WMO RA VI (Europe).

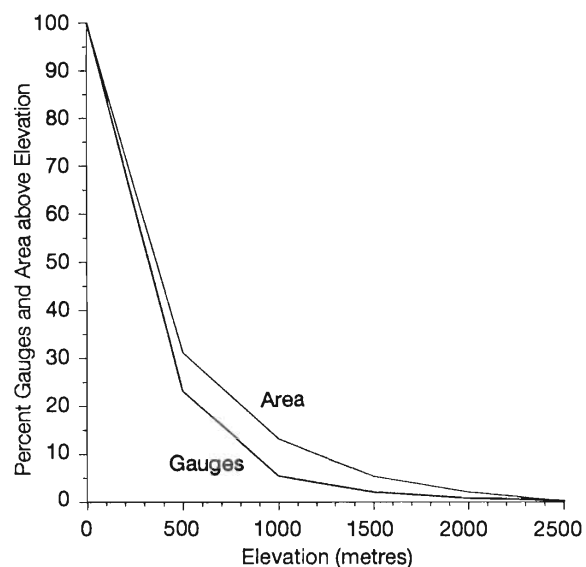


Fig. 2. Elevation distribution of precipitation gauges, Switzerland.

Table 1. Minimum density of networks in mountainous regions. From Chapter 3 – Design of Networks, “Guide to Hydrological Practices”, Vol. 1, Data Acquisition and Processing. WMO, 1981.

Variable	Range of norms for minimum network Area (km ²) per station	Range of provisional norms tolerated in difficult conditions Area (km ²) per station	Comments
Precipitation	100–250 25 (small islands) 10% of the gauges should be recording gauges	250–1000	Desirable to have stations distributed altitudinally in zones of approximately 500 per zone, with a minimum density of 40–100 stations for 10 000 km ² – 1 station for 100–250 km ²
Streamflow	300–1000 140–300 (small islands)	1000–5000	There should be at least two precipitation gauges for each stream gauge near it and the other in the upper part of the basin. There should be at least as many gauges on basins smaller than 1000 km ² as there are on basins larger than 1000 km ²
Snow	One course per 2000 to 3000 km ²		Desirable to have stations distributed in altitudinal zones of approximately 500 m per zone with a minimum density of 10–30 stations for 10 000 km ² – 1 station for 300–1000 km ²
Evaporation Sediment transport Water quality Groundwater			There are no recommendations specific to mountainous regions

terms, networks of instruments and observations in mountainous areas and the records from them are not as adequate as for some other physiographic regions (PERKS and WINKLER 1992) (Table 2). Although Table 2 shows that precipitation station densities are adequate for the basins sampled, the networks are particularly poor for discharge and evaporation. There is also the point that the distribution of stations in most countries does not correlate well with the distribution of altitude, for example, precipitation stations (Fig. 1), but for certain nations the range of altitude is adequately sampled (Fig. 2) (WMO 1994).

Table 2. Adequacy of basic station densities based on physiography (difference between existing basic and needed basic station densities). (from PERKS and WINKLER 1992)

	Population Class		
	<500 000	500 000–2 500 000	>2 500 000
Non-recording precipitation			
number of sub-basins used	175	56	45
standard deviation	7736	4933	4939
mean area per station (km ²) (avg. 3475 km ²)	3832	2702	3052
Recording precipitation			
number of sub-basins used	156	62	46
standard deviation	22425	9959	12175
mean area per station (km ²) (avg. 8455 km ²)	10389	4623	7063
Water temperature			
number of sub-basins used	125	58	43
standard deviation	21720	10363	10557
mean area per station (km ²) (avg. 9364 km ²)	11285	6548	7575
Evaporation			
number of sub-basins used	124	52	45
standard deviation	29193	11350	23607
mean area per station (km ²) (avg. 14 390 km ²)	17976	7997	11897
Discharge (does not include water levels)			
number of sub-basins used	202	60	41
standard deviation	28934	9215	8797
mean area per station (km ²) (avg. 7671 km ²)	9124	4308	5436
Sediment			
number of sub-basins used	62	27	28
standard deviation	28397	28068	8133
mean area per station (km ²) (avg. 12 943 km ²)	16095	12260	6621
Water quality			
number of sub-basins used	87	36	24
standard deviation	25796	9374	12337
mean area per station (km ²) (avg. 6745 km ²)	8446	4517	3923
Ground water			
number of sub-basins used	35	26	19
standard deviation	1443	18183	4886
mean area per station (km ²) (avg. 3634 km ²)	786	7972	2946
average mean area per station (km ²)	9870	5817	6466

5 A Hydrological Paradise?

Of course, there are several exceptions to this pattern of lack of data from mountains. One is the data collected in the considerable number of representative and experimental basins established in mountain regions in various parts of the world. Another is the satellite imagery for mountains. This provides the spatial detail where some data exist and the only coverage where ground-based instruments are absent. Large amounts of data can be available from both these origins. One source of data for mountain basins is the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB) and its ICARE, the Inventory of Catchment Research in Europe (KELLER 1993) (Fig. 3). Another is the FRIEND project (RoALD *et al.* 1989), and particularly the archive of data available for European basins (REES *et al.* 1993) (Table 3). In addition, there are various national registers of these basins. Within them, these sources contain a wealth of information on mountain basins and there is also a large volume of recent literature published internationally which contains further details; for example LANG and MUSY (1990), BERGMANN *et al.* (1991), MOLNAR (1992), YOUNG (1993). Some of this literature also deals with remote sensing applied to mountain areas, particularly for assessing the characteristics of the snow and ice cover for runoff estimation, MARTINEC (1991) and THAPA (1993). The Satellite Image Atlas of Glaciers of the World (WILLIAMS and FERRIGNO 1991) provides more detail for ice cover, while the archives of the World Glacier Monitoring Service represent another source (HAEBERLI and HERREN 1991). And there is, of course, World Data Centre A for Glaciology located at Boulder, Colorado with its extensive holdings in the areas of ice, snow and permafrost. Again there are national archives of remotely sensed images, some of which contain material highly relevant to mountain basins, for example, some of the WetNet Data Information collected by NASA and made available to the Unidata Community. Also in the area of remote sensing there have been several studies of the application of weather radar in mountainous areas (ANDREU *et al.* 1990; Joss and LEE 1993).

Table 3. Number of basins and station years per country for flow data in the European Water Archive.

Country	Stations	Station years	Mean length of record (years)
Austria	79	1712	22
Belgium	76	703	9
Czech-Slovak Republics	39	2379	61
Denmark	19	924	49
Finland	38	1150	30
France	1316	29257	22
Germany	505	13845	27
Netherlands	18	245	14
Norway	180	6616	37
Republic of Ireland	36	872	24
Sweden	49	1348	28
Switzerland	57	1989	35
UK	1049	25206	24
Total	3461	86246	
Average			25

6 Time and space variations

Within a representative or an experimental basin, high-quality instruments recording the different hydrological variables are invariably sited to provide good representativity of the different physical characteristics of the basin. For example, in the 19 km² Plynllynon catchments in Wales (KIRBY *et al.* 1991), stations in the precipitation network were established over the basins according to the distribution of topographic domains, in order to sample the various ranges of altitude, slope and aspect (Fig. 4) occurring. In a similar fashion, the lines of the neutron probe network were constructed to sample the different combinations of soil type, slope, etc. (Fig. 5). Regular observations of these and other variables provide data sets of the inputs to the Plynllynon catchments and of their outputs and these are detailed in time and in space. A similar degree of detail is contained in the data from other basin studies in various mountain regions and in



Fig. 3. Distribution of the study sites within the Experimental and Representative Basin Network in July 1992 (from ROBINSON and WHITEHEAD 1993).

Table 4. Variables monitored in the basins of the Tatra Mountains (from MOLNAR 1993)

Three basic water balance elements, surface water, soil moisture and groundwater, are monitored by 15 quantitative and qualitative parameters as follows:
a) Liquid and solid precipitation in the catchments
b) Chemical composition of precipitation
c) Interception amounts in forested catchments
d) Water and element fluxes through vegetation and humus
e) Evapotranspiration from selected catchments
f) Transpiration by forest vegetation
g) Surface water amounts
h) Surface water chemistry
i) Soil water amounts in the unsaturated catchments
j) Soil water chemistry
k) Spring yield in selected catchments
l) Spring water chemistry
m) Groundwater resources within the catchments
n) Groundwater runoff
o) Groundwater chemistry

Table 5. Components of the Balquhider catchment database. (from JOHNSON 1991).

Component	Number of sites
Long-term database:	
Precipitation	25
Streamflow	3
Weather Stations: Automatic	6
Manual	1
Snow	Regional Observations
Soil moisture	4
Suspended sediment	2
Bedload	2
Streamwater solutes	8
Precipitation quality	1
Freshwater biology	5
Short-term data from site studies:	
Forest interception	1
Grassland water use	1
Nutrient cycling	3
Sediment sources	Many
Bedload movement	Many

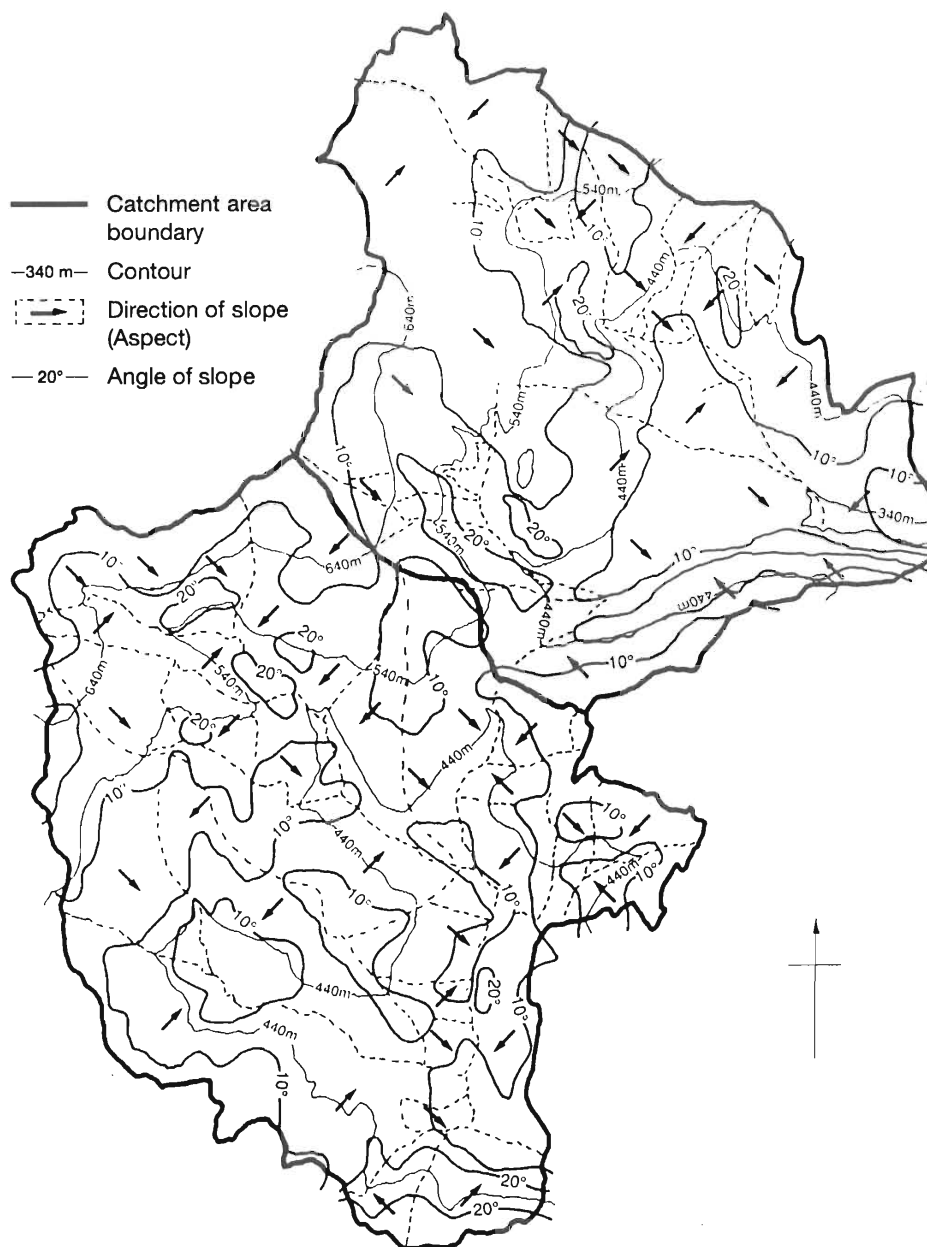


Fig. 4. Plynlimon domain map.

the studies of hydrological processes that have been mounted within them, for example on interception and nutrient cycling. MOLNAR (1993) lists 15 variables which are monitored in the Tatra mountain catchments (Table 4) and JOHNSON (1991) notes the 10 components of the Balquhiddy database (Table 5), together with the sites used for short-period investigations of processes. These observations of the major variables are often recorded automatically on site, minute by minute or hour by hour at sites which fit Lang's mesoscale (LANG 1989) and they are supplemented by a large number of other observations made at lower frequencies. The consequence is that there are large volumes of data for many of the basins in the representative and experimental basin network, a subset being mountain basins. For example, in the case of the Plynlimon catchments, which commenced operation in the early 1970s, there could be some 15 000 years of data in the archive representing variables registered at frequencies from once a minute to once a month.

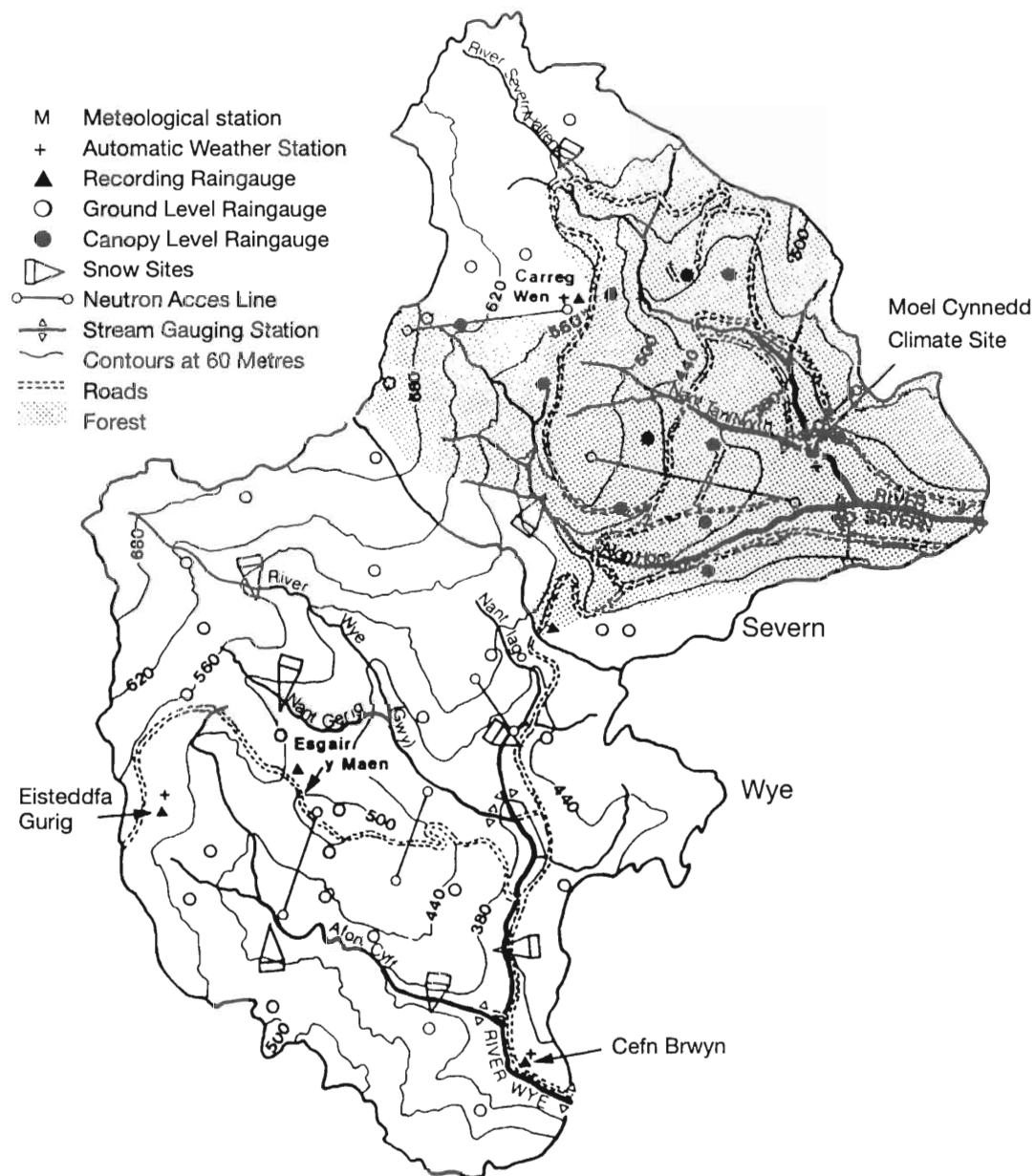


Fig. 5. The Plynlimon research catchments, showing the Rivers Severn and Wye and their tributaries and the main measuring networks. (from JOHNSON, 1991).

7 From research to operational needs

As SPREAFICO (1994) points out, the use made of data from representative and experimental basins has hitherto been mostly for research. For many countries, the same applies to the satellite imagery for mountain areas. But there is a strong interest in the results from small basins for the purposes of operational hydrology. The networks of gauges maintained by hydrological services do not normally sample small basins, especially those in headwater regions. The focus is usually downstream from both the quantity and quality points of view, for surface water and groundwater. This leaves many unanswered questions, as SPREAFICO (1994) reports: questions about flood magnitude/frequency relations for design purposes, about sediment transport also for design and more fundamentally, about the loads of the different chemical constituents from the "relatively" unpolluted upstream environment, to provide "base line"

data to compare with conditions downstream. Consequently, there are a number of advocates for the integration of small basin studies into national networks and also those who support the view that remote sensing should be tied strongly to the needs of operational hydrology. If this were to happen generally, a clearer picture of the hydrological state of mountain regions would emerge.

This process of integration is receiving a number of stimulants at the present time. One is the reduction in funds available to both the research and operational activities in a number of countries: the economy of effort in data collection that often results in bringing together two interests. At the international level, there is the intention to bring the International Hydrological Programme of UNESCO and WMO's Hydrology and Water Resources Programme closer together (UNESCO/WMO/ICSU 1993). Then there are also plans for the establishment of a World Hydrological Cycle Observing System (WHYCOS) (RODDA *et al.* 1993) which would also help integration.

Of course, the benefits from the integration of research and operational networks may have already been achieved in some countries and for others it may never be possible. Consequently, the results of WMO's Basic Network Assessment Project (BNAP) (WMO 1993) may be the best method of highlighting the problem and focussing on the improvement needed to hydrological networks in mountains. The BNAP results (Table 1) demonstrate clearly that for most nations, their overall hydrological network in mountainous regions is not adequately designed to meet the needs of rational planning and management of water resources. Nor can protection of the fragile ecosystems of mountainous regions be achieved without proper and continued assessments of the physical and chemical characteristics of the mountain environment where water is the key component. This coincidence of interests should create a climate of change in attitudes. Should current attitudes prevail, the paradox will remain and paradise is postponed.

8 References

- ANDREU, H.; CREUTIN, J.D.; LEOUSOFF, J.; Pointin, Y., 1990: A French hydrometeorological experiment to evaluate weather radar capabilities for medium elevation mountain hydrology. In: MOLNAR, L. (ed) *Hydrology of Mountainous Areas*. IAHS Publ. 190: 67–85.
- AYIBOTELE, N.B., 1992: The world's water: assessing the resource. Keynote paper 1, International Conference on Water and the Environment, Dublin. World Meteorological Organization, pp. 1.7–1.26.
- AYIBOTELE, N.B.; FALKENMARK, M., 1992: Freshwater Resources. In: DOOGE, J.C.I.; GOODMAN, G.T.; O'RIORDON, T.; PRADERIE, F. (eds) *An Agenda of Science for Environment and Development into the 21st Century*. Cambridge, Cambridge University Press. pp.182–203.
- BERGMANN, H.; LANG, H.; FREY, W.; ISSLER, D.; SALM, B. (eds) 1991: *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas*. IAHS Publ. 205: 250 pp.
- HAEBERLI, W.; HERREN, E., 1991: *Glacier Mass Balance Bulletin*. IAHS/UNEP/UNESCO, Bulletin 1: 70 pp.
- JOHNSON, R.C., 1991: Effects of Upland Afforestation on Water Resources, Institute of Hydrology Report 116: 73 pp.
- JOSS, J.; LEE, R., 1993: Weather radar: Operational Processing for Nowcasting and Precipitation Estimation in WMO Regional Association IV (Europe) Workshop on Requirements and Applications on Weather Radar Data in Hydrology and Water Resources. R. Moore (ed) (in press). WMO Technical Reports in Hydrology and Water Resources.
- KELLER, H.M., 1993: Foreword. In: ROBINSON, M. (ed) *Methods of Hydrological Basin Intercomparison*. Institute of Hydrology Report 120.
- KIRBY, C.; NEWSON, M.D.; GILMAN, K. (eds) 1991: *Plynlimon research: the first two decades*. Institute of Hydrology Report 109: 188 pp.
- KLEMES, V., 1988: Foreword. In: MOLNAR, L. (ed) *Hydrology of mountainous areas*. IAHS Publ. 190: vii.
- LANG, H., 1981: Is evaporation an important component in high alpine hydrology? *Nord. Hydrol.* 12: 217–224.
- LANG, H., 1989: Sloping land with snow and ice. In: FALKENMARK, M.; CHAPMAN, T. (eds) *Comparative Hydrology*. pp. 146–162.

- LANG, H.; MUSY, A. (eds) 1990: Hydrology in Mountainous Regions I, Hydrological Measurements: the Water Cycle. IAHS Publ. 193: 809 pp.
- MARTINEC, J., 1979: Snowmelt hydrographs from spatially varied input. In: MOREL-SEYTOUX H.J.; SALAS J.D.; SANDERS T.G. (eds) Surface land subsurface hydrology. Water resour. Publ. pp. 100–111.
- MARTINEC, J., 1985: Time in Hydrology. In: RODDA, J.C. (ed) Facets of Hydrology II. New York, Wiley. pp. 249–290.
- MARTINEC, J., 1991: Areal modelling of snow water equivalent based on remote sensing techniques. In: BERGMANN, H.; LANG, H.; FREY, W.; ISSLER, D.; SOLM, B. (eds) Snow Hydrology and Forests in High Alpine Areas. IAHS Publ. 205: 121–129.
- MOLNAR, L. (ed.) 1992: Hydrology of Mountainous Areas. IAHS Publ. 190: 451 pp.
- MOLNAR, L., 1993: Integrated monitoring of mountainous catchments in the Tatras National Park. In: ROBINSON, M. (ed) Methods of hydrological basin comparison. Institute of Hydrology Report 120: 40–45.
- PERKS, A.; WINKLER, T., 1992: The adequacy of hydrological networks: A Global Assessment Report to the Ninth Session of the Commission for Hydrology (unpublished).
- REES, G.; ROALD, L.; DIXON, J., 1993: Hydrological Data in Flow Regimes from International Experimental and Network Design (FRIEND), Vol. II. Institute of Hydrology. 226 pp.
- ROALD, L.; NORDSETH, K.; HASSEL, K.A. (eds) 1989: Friends in Hydrology. IAHS Publ. 187: 491 pp.
- ROBINSON, M.; WHITEHEAD, P.G., 1993: A review of experimental and representative basin studies. In: ROBINSON, M. (ed) Methods of hydrological basin comparison. Institute of Hydrology Report 120: 1–12.
- RODDA, J.C.; PIEYNS, S.A.; SEHMI, N.S.; MATTHEWS, G., 1993: Towards a world hydrological cycle observing system. Hydrol. sci. j. 38: 373–378.
- SPREAFICO, M., 1994: Hydrological observation requirements in operational hydrological reference basins, WMO Technical Reports in Hydrology and Water Resources 41: 36 pp. (+appendices).
- THAPA, K.B., 1993: Estimation of snowmelt runoff in Himalayan Catchments Incorporating Remote Sensing Data. In: YOUNG, G.J. (ed) Snow and Glacier Hydrology. IAHS Publ. 218: 69–74.
- UN, 1992: Earth Summit, Agenda 21: The United Nations Programme of Action from Rio. United Nations Publication. 294 p.
- UNESCO/WMO/ICSU, 1993: Report of the International Conference on Hydrology: Towards the 21st century research and operational needs. 18 pp. UNESCO.
- WILLIAMS, R.S.; FERRIGNO, J.G., 1991: Satellite Image Atlas of Glaciers of the World Middle East and Africa. USGS Professional Paper 1386-G: 70 pp.
- WMO, 1981: Guide to Hydrological Practices. Vol. 1. Data Acquisition and Processing. Geneva, World Meteorological Organization.
- WMO, 1993: Commission for Hydrology, Report of the Ninth Session, Geneva, World Meteorological Organization.
- WMO, 1994: Infhydro Manual. 2nd Edition. WMO Operational Hydrology, Report 28. Geneva, World Meteorological Organization. (in press).
- YOUNG, G.J. (ed) 1993: Snow and Glacier Hydrology. IAHS Publ. 218: 410 pp.

Acknowledgements

The author wishes to thank his colleagues in the Hydrology and Water Resources Department for their help and encouragement at all stages in the preparation of this manuscript.

Address of the author:

Dr. John C. Rodda

Director of Hydrology and Water Resources Department

World Meteorological Organization

41 Giuseppe-Motta

Case postale N° 2300

CH-1211 Genève 2

Was bringt uns die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten?

Herbert Lang, Ludwig Braun, Mario Rohrer, Urs Steinegger

Abstract

What results can we expect from hydrological basin research?

This contribution summarizes some of recent results from detailed field studies and data analyses performed in and on various alpine basins in Switzerland. Long time series of individual components of the hydrological budget help to assess their natural variability and to put possible current trends into perspective. A better understanding of the various processes such as the distribution of precipitation, snow accumulation and melt, evaporation and runoff generation necessitate intensive and therefore usually short-term field investigations, which in turn help to develop and to validate more physically-based modelling procedures. Research in hydrological basins still is a powerful tool to deepen our understanding of the dominant processes and their interaction.

Keywords: hydrological budget, alpine basins, field studies, snow cover, runoff simulation, time series

1 Einleitung

Die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten ist der unmittelbarste Zugang zu Einsichten in die Prozesse des Wasserhaushaltes und in ihre Variabilität in Raum und Zeit. Durch die Umsetzung der gewonnenen Kenntnisse in Modelle lassen sich Prozesse simulieren, und dies kann wiederum unser Prozessverständnis erhöhen. Die verifizierten Modelle können schliesslich z.B. zur räumlichen Interpolation von Punktmessungen, der Vorhersage von Abflussmengen oder zur Hochwasserwarnung verwendet werden.

Heute beschäftigen wir uns sogar mit hydrologischen Zukunftsszenarien als Folge von möglichen Klimaänderungen. Vertiefte Prozessverständnisse, gewonnen aus Detailstudien in hydrologischen Einzugsgebieten und deren Umsetzung in die Modelle sind auch bei dieser Herausforderung die wichtigste Grundlage.

2 Klassische und moderne Methoden

Die direkte Messung der hydrologischen Komponenten im Gelände respektive innerhalb eines Einzugsgebietes ist bis heute die beste Methode, um den Wasserhaushalt eines Gebietes zu bestimmen. Intensive Feldstudien sind jedoch meist nur in relativ kleinen Gebieten und über kurze Zeiträume möglich.

Der Vergleich der gewonnenen Messungen und Resultate mit standardmässig erhobenen meteorologischen und hydrologischen Daten, wie z.B. durch die Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA), durch die Landeshydrologie und -Geologie (LHG) und weiterer Institutionen ermöglicht eine Interpretation über die Zeit der Feldstudie hinaus. Oft ist auch eine räumliche Einordnung und die Übertragung der Ergebnisse verlangt – die entsprechenden

Verfahren werden heute unter dem Begriff «Regionalisierung» systematisch entwickelt. Die klassische Analyse der Einzelkomponenten in der Einzugsgebietshydrologie im Lichte der Gesamtbilanz eröffnet uns nur beschränkt den Einblick in die Prozesse. Durch den Vergleich unterschiedlicher Einzugsgebiete können die Änderungen im Einfluss der Einzelkomponenten in Funktion der Höhenlage, der Geologie, der Vegetation u.a. erkannt werden. Das Erfassen und das Studium von Teilkomponenten des Wasserkreislaufes in kleinen Einzugsgebieten, ergänzt durch die Erfahrungen aus der Modellierung der Niederschlags-Abfluss-Prozesse, ermöglicht dann auch, die Hydrologie grosser Gebiete mit einem weiteren klimatischen Bereich wie den des Alpenraums besser zu verstehen.

Die klassischen Untersuchungen in kleinen Einzugsgebieten wurden oftmals ergänzt durch experimentelle Studien über den Einfluss der Vegetation oder des Waldes auf den Wasserhaushalt und auf die Hochwasserverhältnisse. So wurden z.B. bereits in den frühen Untersuchungen über den Sperbelgraben und den Rappengraben (ENGLER 1919) folgende fundamentale Fragen bearbeitet: Wie gestalten sich die Abflussverhältnisse bewaldeter und unbewaldeter Einzugsgebiete unter sonst möglichst gleichen Bedingungen

- a) bei heftigen Gewitterregen, Wolkenbrüchen,
- b) bei starken anhaltenden Landregen,
- c) bei rascher Schneeschmelze,
- d) in Trockenperioden?

In jüngerer Zeit werden bei den Untersuchungen in hydrologischen Forschungsgebieten neben den klassischen Fragestellungen und Methoden weitere Probleme bearbeitet wie z.B.: Grundwasserneubildung (GRONOWSKI und LANG 1993); Wasserhaushalt und damit verbundener Stoffhaushalt und Stoffflüsse, – ein Problemkreis, der besonders auch von Hans Keller und seiner Gruppe verfolgt wurde (KELLER und FORSTER 1991); Bodenwasserhaushalt, Abflusskomponenten und Abflussbildungsprozesse (z.B. GERMANN 1981, KOENIG 1994); Bodenwasserflüsse, Vegetation und Evapotranspiration; schnee- und gletscherhydrologische Untersuchungen (RÖTHLISBERGER und LANG 1987; BRAUN *et al.* Manuskript; ROHRER 1992); spezielle Prozesse bei Hochwassersituationen (Haider 1994).

Gemeinsames Kennzeichen der meisten Untersuchungen ist heute das Bestreben, die Erkenntnisse in Modellkonzeptionen zu übernehmen – letzten Endes, um unsere modell-simulierten Prozesse immer näher an die in der realen Natur ablaufenden Prozesse im hydrologischen Kreislauf heranzubringen. Ein grosser Teil des Fortschrittes in der prozessbezogenen Einzugsgebietsforschung ergab sich in den letzten 20 Jahren vor allem auch aus den Verbesserungen in den Messtechniken. Dabei sind neben den modernen Messverfahren z.B. zur

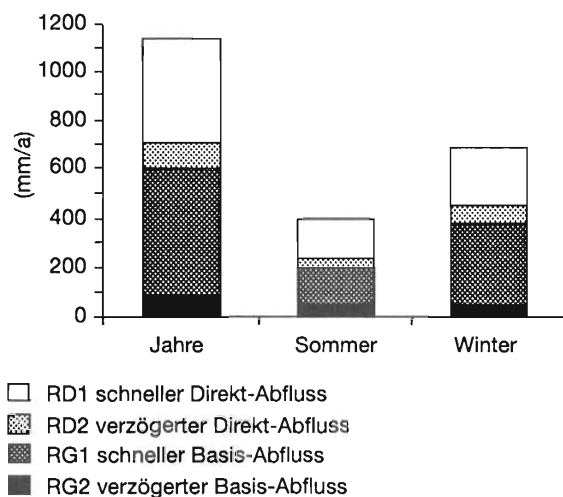


Abb. 1. Aufteilung des Gesamtabflusses in mittlere Abflusskomponenten (1975-1990) mit den Speicherkonstanten $CG_2=300$ Tage (charakterisiert verzögerten Abfluss), $CG_1=8$ Tage, $CD_2=2$ Tage und CD_1 =wenige Stunden. Die Winterperiode bezieht sich auf die Monate November bis April (aus KOENIG 1994).

Tab. 1. Übersicht über einige bearbeitete Einzugsgebiete im Rahmen der Forschungen am Geographischen Institut der ETH Zürich.

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	mittlere Höhe [m ü.M.]	tiefster Punkt [m ü.M.]	höchster Punkt [m ü.M.]	Gletscher [%]
Rietholzbach	3,2	795	682	950	0
Wägital	42,4	1360	900	2294	0
Linth-Limmern	75,7	2330	803	3614	24
Dischma	43,3	2372	1668	3146	2

Messung der Bodenfeuchte («time domain reflectometry» unter Ausnützung der Beziehung zwischen Dielektrizitätswert und Wassergehalt des Bodens) vor allem die Registrierung der Messwerte mit hoher zeitlicher Auflösung zu nennen. Die seit 1976 laufenden Registrierungen von hydrologischen und meteorologischen Grössen mit einer zeitlichen Auflösung von z.B. 5 Minuten für Niederschlag und Abfluss oder 1 Stunde für die Lysimeter-Evapotranspiration und den Sickerwasserabfluss im Forschungsgebiet Rietholzbach ermöglichen wichtige Einsichten in die wesentlichen Prozesse der Abflussbildung und des Bodenwasserhaushaltes (Abb. 1).

Besonders wertvoll sind diese Untersuchungen auch durch die Breite des Skalenbereichs: dieser reicht vom Kleinst-einzugsgebiet des Lysimeters (3,14 m²) über den Huwilerbach (0,5 km²) als Teil des Rietholzbachgebietes (3,2 km²) bis zum gesamten Thurgemeindegebiet (1696 km²).

Mit dem Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) wird nun versucht, die verschiedenen hydrologischen Komponenten zu «regionalisieren» unter Berücksichtigung der Topographie (DGM) und der Landoberflächencharakteristiken (Landnutzung, usw.). In Tabelle 1 werden die Charakteristiken einiger Einzugsgebiete dargestellt, welche am Geographischen Institut der ETH Zürich untersucht werden.

3 Einige Fallbeispiele aus dem Gebirgsbereich

3.1 Wägital

Die langjährigen Messungen im Untersuchungsgebiet «Inneres Wägital» ermöglichten es uns, Wasserbilanzen für die hydrologischen Halbjahre während der Periode 1943 bis 1988 zu bestimmen (LEPORI 1993). Die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Speicherung wurden dabei unabhängig voneinander berechnet. Die Bestimmung des Gebietsniederschlags erfolgte mit der Methode des Kriging, gestützt auf fünf Halbjahrestotalisatoren und sechs Niederschlagsstationen mit täglicher Messung im Einzugsgebiet und in der näheren Umgebung. Die Mittelwerte betragen im hydrologischen Winterhalbjahr 837 mm, im Sommerhalbjahr 1272 mm. Die Speicheränderung in Form der Schneedecke wurde mit Daten berechnet, welche jährlich am 1. April erhoben werden. Die Schätzung der Wasseräquivalente der Schneedecke beruhen auf Direktmessungen von Schneehöhen und -dichten unter Einbezug der Meereshöhe und Exposition. Der Mittelwert der Gebiets-Schneereserven liegt in der untersuchten Periode bei 388 mm Wasseräquivalent. Die Schätzung der Schneereserven dient dem Kraftwerk Wägital jedes Jahr zur Optimierung der Speicherbewirtschaftung, ist sie doch ein verlässlicher Indikator für die Sommerzuflüsse aus der Schmelze. Für die Abschätzung der Gebietsverdunstung wurde die Formel von PENMAN (1948) gewählt. Verwendet wurden dabei die Stationen Einsiedeln, Oberiberg und Rigi-Kaltbad unter Berücksichtigung der Meereshöhe und der verschiedenen Oberflächentypen. Abbildung 2 zeigt die langjährige Variation der Gebietsverdunstung, im Winter- und Sommerhalbjahr. Der langjährige Verdun-

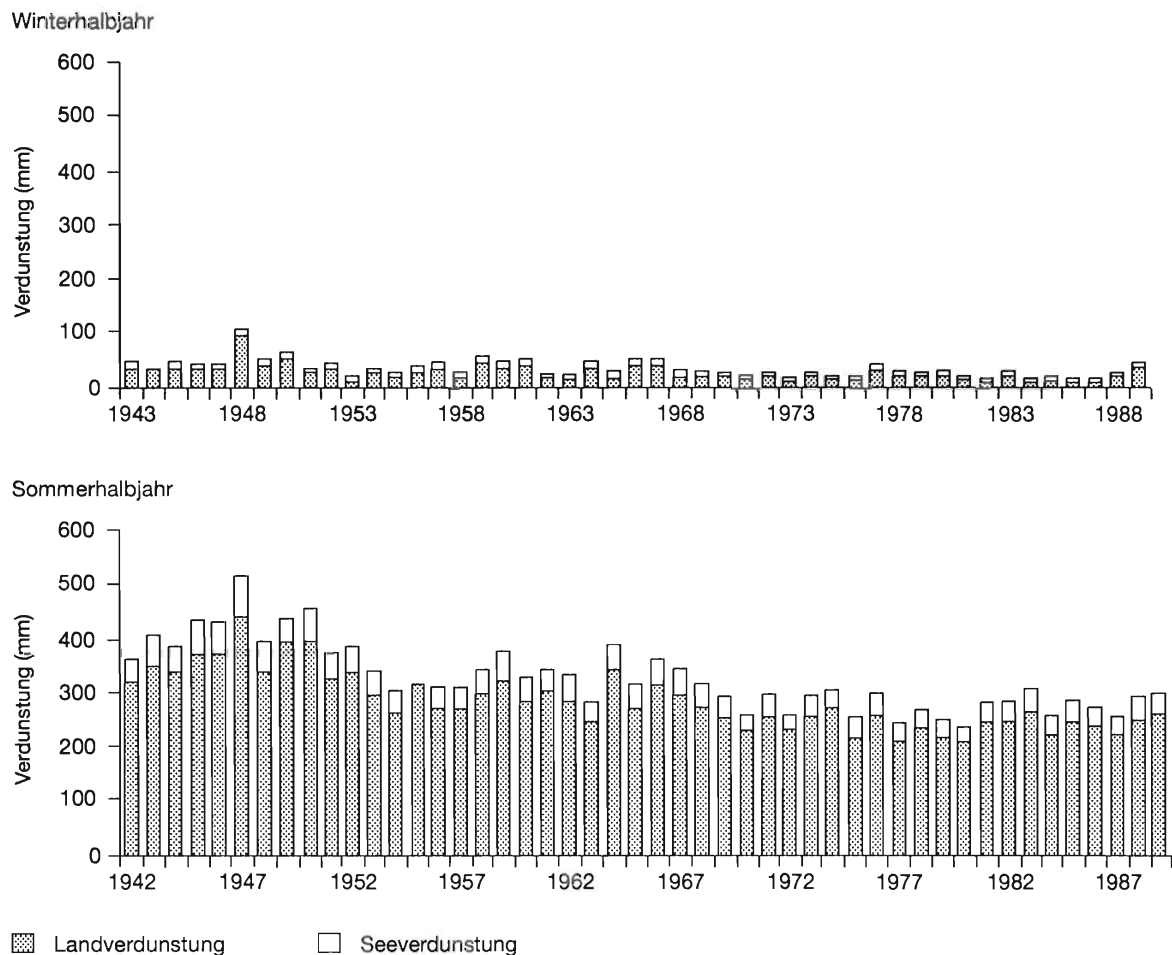


Abb. 2. Abschätzung der potentiellen Verdunstung im Einzugsgebiet des Stausees Wägital berechnet mit der Formel von PENMAN (1948). Abgeleitet von den meteorologischen Stationen Einsiedeln, Oberiberg und Rigi-Kaltbad unter Berücksichtigung der Meereshöhe und der verschiedenen Oberflächentypen (aus LEPORI 1993).

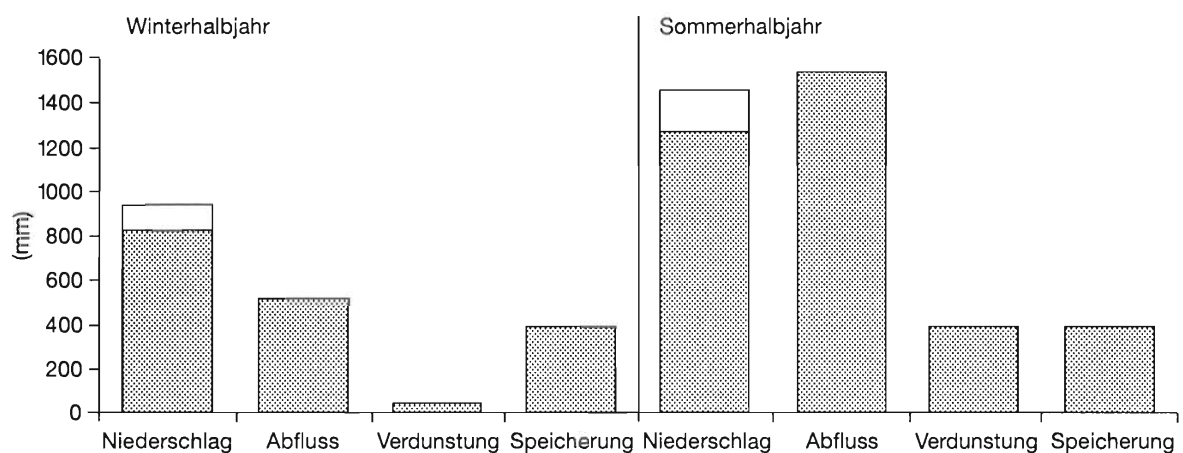


Abb. 3. Langjährige Halbjahres-Mittelwerte (1943–88) der Wasserhaushaltskomponenten im Einzugsgebiet des Wägitalersee. Alle Komponenten wurden unabhängig voneinander bestimmt. Weiss dargestellt sind die Fehlerglieder, welche dem Niederschlag als systematischer Niederschlagsmessfehler addiert werden können (aus LEPORI 1993).

stungs-Mittelwert (inkl. See) im Winterhalbjahr beträgt 33 mm, wobei dieser Wert vor allem von der Oktober-Verdunstung bestimmt wird. Die Sommergeverdunstung des gesamten Untersuchungsgebietes liegt bei 324 mm, über Land bei 303 mm, über dem See bei 520 mm. Mit zunehmendem Jahresniederschlag nimmt der Anteil der Verdunstung am Niederschlag ab. Durch den Höhenbereich des Einzugsgebietes werden die natürlichen Zuflüsse zum Stausee sowohl pluvial wie auch nival beeinflusst (nival de transition, ASCHWANDEN und WEINGARTNER 1984). Abbildung 3 zeigt die mittleren Werte aller Komponenten der Halbjahreswasserbilanzen. Das Gebiet hat einen mittleren Jahresabfluss von 2051 mm, wovon ein Viertel (520 mm) auf das Winter- und drei Viertel (1531 mm) auf das Sommerhalbjahr entfallen. Die Bilanzierung der Wasserhaushaltskomponenten ergab ein Restglied mit der Grösse von etwa 15% des berechneten Gebietsniederschlags. Es scheint, dass der «wahre Niederschlag» des Gebietes um etwa diese Grösse über dem berechneten Gebietsniederschlag liegt. Der Anteil des Abflusses am entsprechend korrigierten Gesamtniederschlag beträgt 84%.

3.2 Linth-Limmern

Das alpine Limmerngebiet gehört zu den niederschlagsreichsten Regionen der Nordalpen. Die mit Totalisatoren gemessenen Niederschlagswerte liegen im allgemeinen zu tief. Die Messfehler führen im Sommer (Mai bis September) zu einem mittleren Messdefizit von 10%. In der kalten Jahreszeit (Oktober bis April) liegt die Messunsicherheit, bedingt durch die vorwiegend festen Niederschläge, höher. Die Problematik der Niederschlagsmessung im Winter wurde in diesem Gebiet durch den Vergleich zwischen Niederschlagswerten der Totalisatoren und den Wasseräquivalentwerten der Schneedecke an benachbarten repräsentativen Standorten untersucht. Im Mittel über 23 Jahre liegen die Messwerte des Wasseräquivalents 30% über denjenigen

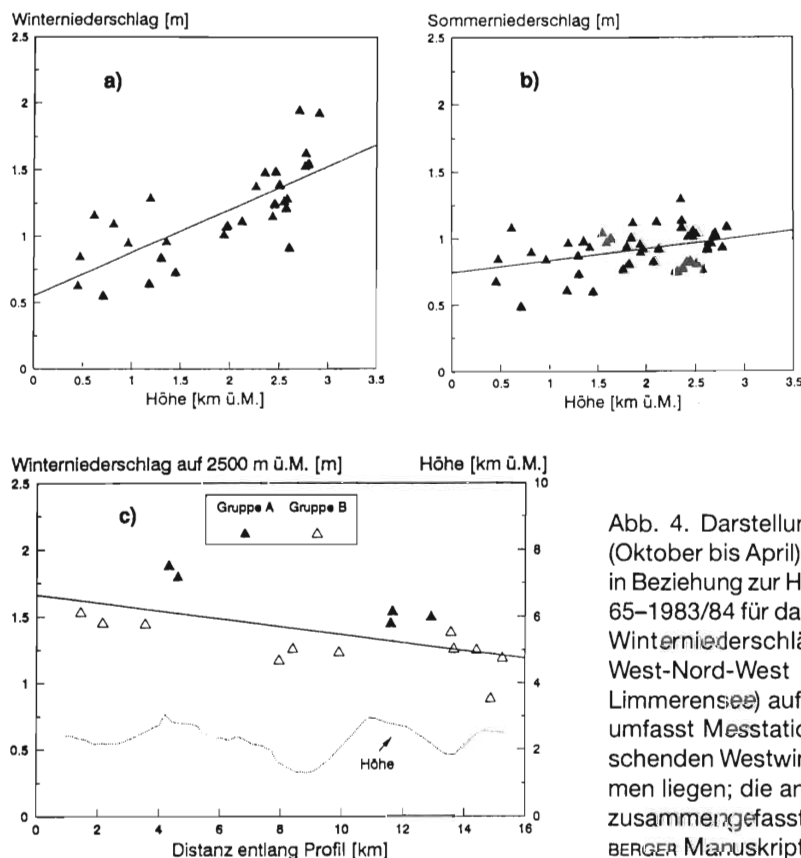


Abb. 4. Darstellungen (a) des Winterniederschlags (Oktober bis April) und b) des Sommerniederschlags in Beziehung zur Höhe über Meer in der Periode 1964/65–1983/84 für das Linth-Limmerngebiet, sowie der Winterniederschläge c) entlang eines Profils von West-Nord-West nach Ost-Süd-Ost (Klausenpass-Limmerensee) auf 2500 m ü.M. reduziert. Gruppe A umfasst Messtationen die in bezug auf die vorherrschenden Westwinde auf der Leeseite nahe an Kämmen liegen; die anderen Stationen sind in Gruppe B zusammengefasst (aus MÜLLER-LEMANS und KAPPENBERGER Manuskript).

der Totalisatoren. Je nach Standort variiert dieser Wert allerdings beachtlich (STEINEGGER 1990). Anhand der vorliegenden Werte des Winter- respektive Sommerniederschlags wurden Niederschlagskarten gezeichnet, um den Gebietsniederschlag bestimmen zu können. In Abbildung 4 ist die Variation des Niederschlags mit der Höhe und entlang eines Profils Klausenpass-Limmernsee dargestellt (MÜLLER-LEMANS und KAPPENBERGER Manuskript).

In diesem stark vergletscherten Einzugsgebiet bildet die Reservenänderung der Schnee- und Eismassen eine wichtige Komponente des Wasserhaushaltes. Vom Claridenfirn liegt eine Massenbilanzreihe seit 1914/15 vor, vom Limmern- und Plattalvagletscher seit 1947/48 (MÜLLER-LEMANS *et al.* Manuskript).

Die Verdunstung spielt in alpinen Regionen für die langjährige Wasserbilanz eine untergeordnete Rolle, da ihre Grösse und Variation, verglichen mit Niederschlag und Abfluss, klein ist (LANG 1981). Hingegen kann die Verdunstung einen wesentlichen Einfluss auf die kurzfristigen Variationen des Schmelzwasser-Abflusses haben. In einer Höhe von 2000 m wird die jährliche Verdunstung auf etwa 300 mm geschätzt.

Das Abflussregime der Linth zeigt im Sommer ein deutliches Maximum. Die Ursachen dafür liegen im sommerlichen Niederschlagsmaximum und ab Mitte Mai in der Schneeschmelze, wo besonders bei Strahlungswetter grosse Wassermengen freigesetzt werden. Bei 24% Vergletscherung (vgl. Tab. 1) wird besonders in niederschlagsarmen Sommern bei starker Ausaperung der Gletscher und damit tiefer Albedo der Abfluss durch Eisschmelze zusätzlich erhöht (LANG 1989). Trotz grosser Variation der Niederschläge von Jahr zu Jahr zeigt der natürliche Abfluss der Linth wegen der ausgleichenden Wirkung von Eis und Schnee eine bemerkenswert geringe Variation. Die Geologie des Einzugsgebietes ist vielfältig. Wichtig für die Abflussbedingungen ist insbesondere der durch den Karst bedingte unterirdische Wasserfluss. Während für das Einzugsgebiet bis zur Tierfehd die Zu- und Abflüsse sich in etwa die Waage halten, muss in den hochgelegenen Teileinzugsgebieten mit grösseren Verlusten gerechnet werden. Bisher konnten diese Verluste nur durch Simulationsrechnungen abgeschätzt werden. Durch Tracerversuche könnten die Fliesswege ermittelt werden.

Eine Abschätzung der Wasserbilanz wurde für drei Gebiete durchgeführt (MÜLLER-LEMANS und KAPPENBERGER, Manuskript). Trotz Unsicherheiten bei der Gebietsverdunstung und den Karstverlusten resultiert aus der Wasserhaushaltsgleichung, dass die Niederschläge trotz Korrektur eher noch zu tief angesetzt sind. Auf jeden Fall können die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte von über 3000 mm in den Firn- und Gletschergebieten bestätigt werden (vgl. z.B. MÜLLER und KAPPENBERGER 1991). Eine Zusammenstellung von Untersuchungsergebnissen für das Linth-Limmerngebiet findet sich in BRAUN *et al.* (Manuskript).

Die langjährigen Messreihen in diesem Gebiet erlauben gut fundierte Aussagen über die Wasservorkommen. Zusätzlich kann die natürliche Variabilität der Komponenten abgeschätzt werden. Speziell Schnee- und Eisspeicher werden stark durch klimatische Variationen beeinflusst. Zeitreihen direkter Messungen dieser Grössen sind auch wertvolle Indikatoren für die Auswirkungen klimatischer Änderungen auf den Wasserkreislauf.

3.3 Dischmabach

Das Einzugsgebiet des Dischmabaches bei Kriegsmatten oberhalb von Davos ist seit 1963/64 ein hydrologisches Untersuchungsgebiet der Landeshydrologie und -Geologie (Landeshydrologie 1980; Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, versch. Jahrgänge). Durchgehende meteorologische Messreihen sind in der näheren Umgebung des Einzugsgebietes von Davos (1560 m ü.M.) und vom Weissfluhjoch (2690 m ü.M.) von der SMA (Annalen, verschiedene Jahrgänge; DB-SMA-ETH, versch. Jahrgänge) erhältlich. Im Dischmatal sind Daten von Stillberg (2190 m ü.M.), auf der orographisch linken Talseite an der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL, pers. Mitteilung von R. Häsler) vorhanden. Langjährige Messreihen des Wasseräquivalentes der Schneedecke werden auf dem Weissfluhjoch-Schneemess-

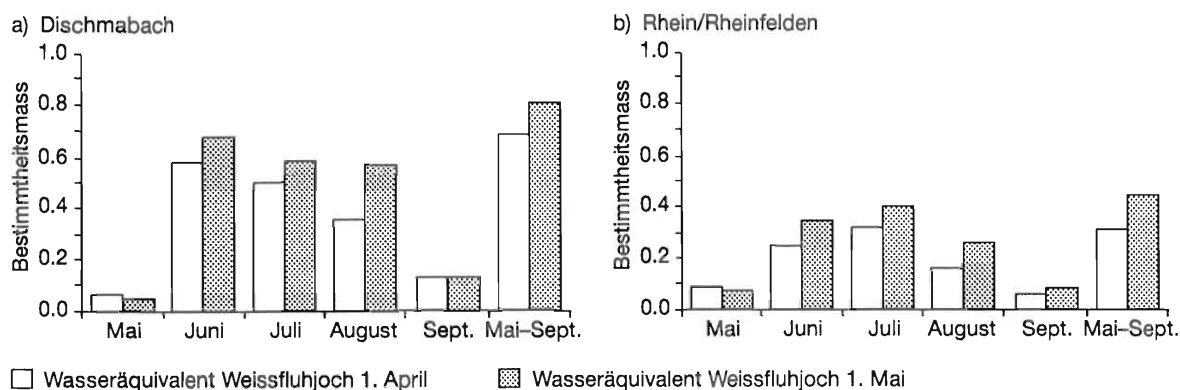


Abb. 5. Varianzanteile (Bestimmtheitsmasse) des Wasseräquivalentes der Schneedecke an der Station Weissfluhjoch-Davos (2536 m ü.M.), gemessen jeweils am 1. April bzw. am 1. Mai, an den Schwankungen der Monatssummen des Abflusses von zwei verschiedenen Einzugsgebieten (aus ROHRER und LANG 1990).

feld (2540 m ü.M.), auf der Büschalp (1980 m) und in Davos-Flüelastrasse (1560 m) erhoben. Auf dem Stillberg wird an zwei Stellen das Wasseräquivalent der Schneedecke gemessen auf 2070 m und auf 2300 m (Snow-Pillow). Zwischen 1973 und 1985 wurde im hintern Dischmatal das WE der Schneedecke vom Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) erhoben. Die Sommer-Niederschlagsverteilung im Dischmatal wurde bereits von Urfer-Henneberger (1970) beschrieben. Rohrer und Lang (1990) konnten zeigen, dass über 80% der Jahr-zu-Jahr-Variation des Abflusses des Dischmabaches mit der Variation der Winterschneedecke auf dem Weissfluhjoch erklärbar sind (Abb. 5).

Aufgrund der für ein alpines natürliches Einzugsgebiet langen Messreihen wird versucht, langjährige Halbjahres-Wasserbilanzen des Dischmabaches bei Kriegsmatten zu erstellen. Auch ist das Dischmatal als Testgebiet für die Ermittlung der Verdunstung im Alpenraum vorgesehen.

4 Schlussbemerkungen

Der Abfluss gilt allgemein als die am zuverlässigsten zu bestimmende Grösse im Wasserhaushalt. Allerdings ist zu bedenken, dass durch Karstphänomene das hydrologische Einzugsgebiet oft schwierig zu bestimmen ist. Manchmal tritt auch eine erhebliche In- oder Exfiltration in der Bachstrecke bis zur Abflussmessstelle auf. Hydrologische Gebietsuntersuchungen bringen hier die nötigen Abklärungen.

Beim Niederschlag treten die Probleme des Niederschlagsmessfehlers auf, der bei hochalpinen Einzugsgebieten im Winterhalbjahr durch die Verwendung von Wasseräquivalentmessungen der Schneedecke abgeschätzt werden kann. Schwieriger ist die Ermittlung des Gebietsniederschlags, weil in höheren Lagen oft Stationen fehlen.

Aus den Detailuntersuchungen der Schneedecke in den verschiedenen Einzugsgebieten lassen sich Ansätze und Methoden ableiten, welche die räumliche Verteilung des Wasseräquivalentes der Schneedecke aus Punktmessungen über den ganzen Schweizer Alpenraum erlaubt. Im Kartenblatt 3.4 des Hydrologischen Atlas der Schweiz (1995) wird das Ergebnis entsprechender Arbeiten publiziert.

Eine regionale Messung der Verdunstung ist bis heute nicht möglich. Die Messungen und Parametrisierungen der Verdunstung im Mittelland und voralpinen Gebiet an einzelnen Punkten ergeben zuverlässige Werte und erlauben heute, u.a. unter Benützung eines Geographischen

Informationssystem (GIS) die Gebietsverdunstung unabhängig von der Wasserhaushaltsgleichung zu bestimmen. Bis heute besteht aber in hochalpinen Gebieten eine grosse Unsicherheit.

Trotz der obenerwähnten Probleme in der Bestimmung einzelner Wasserbilanzkomponenten erlauben es die langjährigen Messreihen, den Gebietswasserhaushalt befriedigend abzuschätzen. Das lückenhafte Wissen über hochalpine Verdunstungsprozesse soll in der nächsten Zeit durch ergänzende Studien im Dischmatal soweit wie möglich geschlossen werden. Dieser und weitere Mosaiksteine tragen zum Verständnis der Prozesse und der genaueren Erfassung der Wasserbilanz in den Alpen bei.

Der Versuch, mögliche Änderungen im Wasserhaushalt für zukünftige Klimaszenarien abzuschätzen, ist eine aktuelle Herausforderung an unsere wissenschaftliche Hydrologie. Die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten darf auch hier mit Recht als wichtigste Grundlage bei der Lösung dieser Aufgabe angesehen werden.

5 Literatur

- Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), versch. Jahrgänge.
- ASCHWANDEN, H.; WEINGARTNER, R., 1984: Die Abflussregime der Schweiz (+Karte). Teil II: Mittelländische und jurassische Abflussregimes, Bern, Geographisches Institut der Universität Bern. 94 S.
- BRAUN, L.N.; AELLEN, M.; FUNK, M.; HOCK, R.; ROHRER, M.B.; STEINEGGER, U.; KAPPENBERGER, G.; MÜLLER-LEMANS, H., Manuskript: Measurement and simulation of high alpine water balance components in the Linth-Limmern head watershed (north-eastern Switzerland). Z. Gletsch.kd. Glazialgeol. submitted for publication.
- DB-SMA-ETH, versch. Jahrgänge: Datenbank der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt SMA auf dem Rechner AEOLUS der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH, Zürich.
- ENGLER, A., 1919: Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 12: 1–626.
- GERMANN, P., 1981: Untersuchungen über den Bodenhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 51: 135 S.
- GRONOWSKI, T.; LANG, H., 1993: Die natürliche Grundwasserneubildung in einem urban beeinflussten Einzugsgebiet im Voralpenraum. Wasser energ. luft 85, 3/4: 48–52.
- HAIDER, S., 1994: Der Beitrag von Vorlandüberflutungen zur Verformung von Hochwasserwellen. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 128: 182 S.
- Hydrologischer Atlas der Schweiz, 1995: Blatt 3.4: Die räumlich-zeitliche Variation des Wasseräquivalentes der Schneedecke. Bern, Landeshydrologie und -Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz (versch. Jahrgänge). Bern, Landeshydrologie und -Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- KELLER, H.M.; FORSTER, F., 1991: Simulating soil moisture and runoff components to estimate variability of streamflow chemistry. IAHS Publ. 202: 143–151.
- KOENIG, P., 1994: Abflussprozesse in einem kleinen voralpinen Einzugsgebiet. Zür. Geogr. Schr. 58: 166 S.
- LANG, H., 1981: Is evaporation an important component in high Alpine hydrology? Nord. Hydrol. 12: 217–224.
- LANG, H., 1989: Hydrological aspects of high mountain areas above the forest line. In: FALKENMARK, M.; CHAPMAN, T. (eds.) Comparative Hydrology. Paris, UNESCO. S. 146–162.
- LEPORI, M., 1993: Langjährige Halbjahres-Wasserbilanzen im Einzugsgebiet des Wägitals. Berichte und Skripten, Nr. 50. Zürich, Geographisches Institut ETH. 97 S.
- Landeshydrologie, 1980: Verzeichnis der Hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Mitt. Landeshydrol. Geol. 2: 293 S.
- MÜLLER, H.; KAPPENBERGER, G., 1991: Claridenfirn-Messungen 1914–1984, Daten und Ereignisse eines gemeinschaftlichen Forschungsprojektes. Zür. Geogr. Schr. 40: 79 S.
- MÜLLER-LEMANS, H.; AELLEN, M.; FUNK, H.; KAPPENBERGER, G., Manuskript: Langjährige Massenbilanzreihen von Gletschern in der Schweiz. Beitr. Geol. Schweiz: Hydrol. 33 S.
- MÜLLER-LEMANS, H.; KAPPENBERGER, G., Manuskript: Niederschlagsverteilung im Tödigebiet. Messungen und Überprüfung mit der Wasserhaushaltsgleichung. Beitr. Geol. Schweiz: Hydrol. 38 S.
- PENMAN H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. A, London 193: 120–145.

- ROHRER, M.B., 1992: Die Schneedecke im Schweizer Alpenraum und ihre Modellierung. Zür. Geogr. Schr. 49: 178 S.
- ROHRER, M.B.; LANG, H., 1990: Point modelling of snow cover water equivalent based on observed variables of the standard meteorological networks. IAHS Publ. 193: 197–204.
- RÖTHLISBERGER, H.; LANG, H., 1987: Glazial Hydrology. In: GURNELL, A.M.; CLARK, M.J. (eds) Glacio-fluvial Sediment Transfer. New York, Wiley. S. 207–284.
- STEINEGGER, U., 1990: Niederschlagsmessung im Hochgebirge: Informationsgehalt von Totalisatoren- und Schneedaten im Limmerngebiet. Diplomarbeit, Geographisches Institut der ETH Zürich. 133 S.
- URFER-HENNEBERGER, Charlotte, 1970: Die Sommerniederschläge im Dischmatal bei Davos. Gebirgsprogramm: 9. Beitrag. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 46, 2: 67–110.

Adresse der Autoren:

Prof. Herbert Lang
 Dr. Ludwig Braun
 Dr. Mario Rohrer
 Dipl. sc. nat. Urs Steinegger
 Geographisches Institut
 ETH Zürich
 Winterthurerstrasse 190
 CH-8057 Zürich

Kleine hydrologische Einzugsgebiete – ein Index für grosse Flusseinzugsgebiete?

Bruno Schädler

Abstract

Small hydrological basins – an index for large river-basins?

Possibilities and limits of representative basins are illustrated and discussed in different scales of time and space using several examples from Swiss hydrological basins. Taking into account the climatic regions even small basins may represent the long term variations of the different water budget elements of very large regions. Additionally, considering geomorphological characteristics, the transfer of the seasonal variations to a comparable basin is also feasible. Finally the international programmes for the support of representative basins are described.

Keywords: representative basin, water balance, time series, regime

1 Einleitung

Seit den Anfängen der experimentellen Einzugsgebietshydrologie stellt sich den Forschenden die Frage, wie repräsentativ ihre Messergebnisse und Analysen für grössere Gebiete oder für die Hydrologie schlechthin sind. Auf den ersten Blick, so scheint es, ist wegen der grossen Variabilität der massgebenden Parameter ein repräsentatives hydrologisches Verhalten kaum denkbar: die zeitlich-örtliche Variabilität der klimatischen Einflussgrössen, die kleinräumig oft bedeutsame Veränderlichkeit des Untergrundes (Geologie und Boden) und der Landnutzung sowie auch der physiographischen Parameter scheinen ein zu inhomogenes hydrologisches Verhalten zu bewirken.

Aus diesen Gründen, aber auch wegen der oft aufwendigen, mühsamen und schwierigen Feldmessungen und der trotz aller Sorgfalt oft mit grösseren Fehlern behafteten Messergebnisse, wird die experimentelle Hydrologie immer wieder in Frage gestellt. Eine solche erste Phase der Kritik tauchte nach einer längeren «Blütezeit» der experimentellen Einzugsgebietshydrologie mit der Verfügbarkeit der EDV und damit mit dem Aufschwung der hydrologischen Modellierung auf. Viele Forschende glaubten, mit mathematischen Modellierungen den Schwierigkeiten der experimentellen Hydrologie aus dem Weg gehen zu können, in Verkennung der Tatsache, dass letztlich auch ihre Modelle von den Erkenntnissen der Feldmessungen abhängig sind.

Diese Tendenzen führten schliesslich so weit, dass in der hydrologischen Literatur Artikel auftauchten, die den Stellenwert der Einzugsgebietshydrologie zu verteidigen suchten. Zu einer Zeit, als in der Schweiz von der Landeshydrographie (WALSER 1971) ein ganzes Netz von etwa 50 sogenannten Testgebieten unterhalten wurde, und auch die sich mit Hydrologie befassenden Forschungsinstitute in Zürich und in Lausanne ihre eigenen Untersuchungsgebiete eingerichtet hatten, fühlte sich auch Hans KELLER (1979) zur Verteidigung der experimentellen Einzugsgebietshydrologie aufgerufen.

In der Zwischenzeit ist nicht nur die gegenseitige Achtung und Anerkennung der Feld- und der Modell-Hydrologen gewachsen, sondern es werden mit neuen Erkenntnissen in den hydrologischen Prozessen und mit neuen Fragestellungen beispielsweise unter dem Stichwort «Klimaänderung» zusätzliche Anforderungen an die Messresultate aus hydrologischen Einzugsgebieten gestellt.

2 Repräsentativität und Regionalisierung

Ein einzelnes Einzugsgebiet kann das hydrologische Geschehen eines beliebig grossen oder beliebig weit entfernt gelegenen Gebietes nur in Ausnahmefällen repräsentieren. Neben dem räumlichen Massstab spielt auch die zeitliche Skala eine wichtige Rolle: Langfristige Veränderungen von Mittelwerten über längere Zeiträume dürften sich wesentlich besser von einem Gebiet auf ein anderes übertragen lassen als beispielsweise momentane Hochwasserspitzen. Ebenso ist die Art der zu übertragenden Grösse von Bedeutung: handelt es sich um eine eher konservative Grösse wie die von der Lufttemperatur abhängige Schneeschmelze, so dürfte die Übertragung besser gelingen als bei einer stark von der individuellen Ausprägung des Einzugsgebietes abhängigen Grösse wie etwa der vom geologischen Untergrund massgeblich beeinflusste unterirdische Abfluss.

In den folgenden Kapiteln sollen daher beispielartig die Möglichkeiten der Übertragung von Ereignissen aus Repräsentativgebieten in Abhängigkeit von den verschiedenen hydrologischen Variablen und der zeitlich/örtlichen Auflösung diskutiert werden.

3 Langfristige Schwankungen im Wasserhaushalt

3.1 Resultate aus Flussgebieten

Analysen der langfristigen Veränderungen der Niederschläge in vier Flusseinzugsgebieten der Schweiz (Abb. 1) zeigen erstaunlich gleichartige Muster. Obwohl die Niederschlagsmengen entsprechend der Klimagebiete grosse Unterschiede aufweisen, sind die Veränderungen im Verlaufe der Zeit sehr ähnlich. Nasse und trockene Perioden folgen sich in mehr oder weniger gleich grossen Abständen, parallel in allen Gebieten. Nur im Gebiet des Ticino scheint sich ab etwa 1940 der Niederschlag auf einem tieferen Niveau eingependelt zu haben, um nach 1975 wieder auf das frühere, höhere Niveau zurückzukehren. In allen Gebieten deutlich zu beobachten ist das Maximum der Niederschläge um das Jahr 1980 herum. Langfristig scheinen sich die Niederschlagsmengen (mit einer leichten Tendenz zur Zunahme) nur wenig zu verändern.

Die Verdunstung, berechnet aus der vollständigen Wasserbilanz (SCHÄDLER 1985), nimmt mit Ausnahme des Inngebietes in allen Gebieten der Schweiz leicht zu (Abb. 2).

Im Abfluss (Abb. 3), dem Restglied der Wasserbilanz, widerspiegelt sich in allen Gebieten deutlich das Niederschlagsgeschehen. Entsprechend lassen sich auch im Abfluss dieselben Muster von abwechslungsweisen trockenen und feuchten Perioden erkennen, welche synchron in den vier Gebieten auftreten. Insgesamt scheinen die Abflüsse wenig verändert, mit einer Tendenz, langfristig eher etwas abzunehmen. Einzig im mit zu Beginn des Jahrhunderts

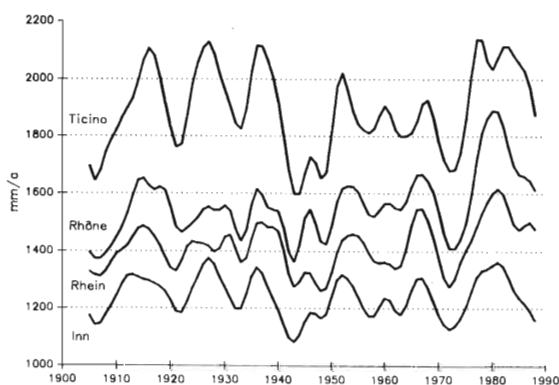


Abb.1. Zeitreihen der jährlichen (unkorrigierten) Gebietsniederschläge (in mm/a) 1901–1992 für die Einzugsgebiete des Ticino bis Bellinzona, der Rhône bis zum Genfersee, des schweizerischen Teils des Einzugsgebietes des Rhein bis Basel sowie des Inn bis zur Landesgrenze. Die Zeitreihen der Jahressummen sind mit einem Gauss'schen Tiefpassfilter über jeweils 9 Jahre geglättet.

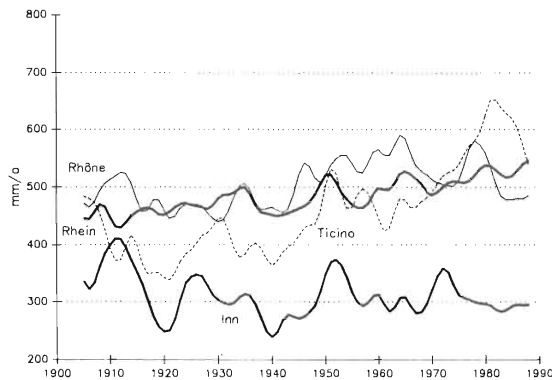


Abb. 2. Zeitreihen der jährlichen Verdunstung (in mm/a) 1901–1992 für die Einzugsgebiete des Ticino bis Bellinzona, der Rhone bis zum Genfersee, des schweizerischen Teils des Einzugsgebietes des Rhein bis Basel sowie des Inn bis zur Landesgrenze. Die Zeitreihen der Jahressummen sind mit einem Gauss'schen Tiefpassfilter über jeweils 9 Jahre geglättet.

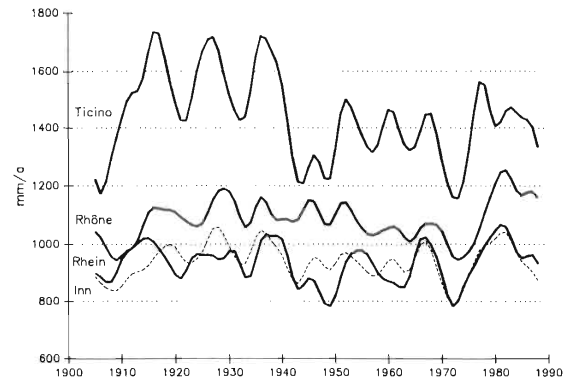


Abb. 3. Zeitreihen der jährlichen spezifischen Abflüsse (in mm/a) 1901–1992 für die Einzugsgebiete des Ticino bis Bellinzona, der Rhone bis zum Genfersee, des schweizerischen Teils des Einzugsgebietes des Rhein bis Basel sowie des Inn bis zur Landesgrenze. Die Zeitreihen der Jahressummen sind mit einem Gauss'schen Tiefpassfilter über jeweils 9 Jahre geglättet.

mit 18% und heute mit 14% stark vergletscherten Einzugsgebiet der Rhone wurde durch die starke Ablation der Gletscher vorübergehend eine Zunahme der Abflüsse registriert.

Wie eine Analyse von 50 grösseren über die ganze Welt verteilter Flüsse zeigt (PROBST und TARDY 1987), können langfristige synchron ablaufende Schwankungen in Regionen von subkontinentaler bis kontinentaler Grösse über die ganze Welt beobachtet werden. Eine derartige Region mit synchronen langfristigen Schwankungen bildet auch Westeuropa. Offenbar können also die Beobachtungen über die langfristigen Schwankungen der Abflüsse in einem Flussgebiet in der Schweiz sogar für Westeuropa repräsentativ sein.

3.2 Resultate aus Repräsentativgebieten

Leider gibt es nur wenig kleine Einzugsgebiete, welche eine entsprechend lange Messreihe aufweisen. KELLER (1993) hat die Wasserhaushaltsdaten des Sperbelgrabens (0,54 km²) mit denjenigen des Rheins bis Basel (35929 km²) verglichen und eine erstaunliche Übereinstimmung in den Variationen und in der spezifischen Abflussmenge festgestellt (Abb. 4). Offenbar repräsentiert der Sperbelgraben mit einer ähnlichen mittleren Höhe wie das Rheingebiet und einigermaßen zentral im Gebiet gelegen, trotz beinahe vollständiger Bewaldung, das Rheingebiet recht gut.

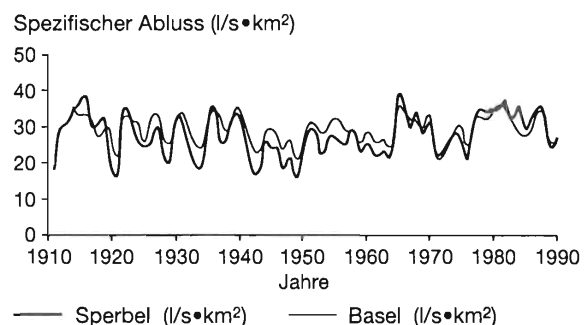


Abb. 4. Vergleich der Zeitreihen des Abflusses im Rhein bei Basel (35929 km²) und des Sperbelgrabens (0,54 km²) von 1910 bis 1990. Dargestellt sind die gleitenden Mittelwerte des spezifischen Abflusses über jeweils 3 Jahre. Quelle: KELLER (1993)

Für 9 verschiedene Einzugsgebiete hat SCHÄDLER (1989) gezeigt, dass sie alle analoge relative Änderungen aufweisen und die langfristigen Variationen der grossen Einzugsgebiete repräsentieren, wobei die stark vergletscherten Gebiete eine entsprechende Ausnahme bilden und nur unter sich vergleichbar sind (siehe auch obiges Beispiel der Rhone).

Aus den vorliegenden Analysen lässt sich folgern, dass die Beobachtungen über die langfristigen Schwankungen in kleinen Einzugsgebieten, welche bezüglich ihrer Höhenlage (Vergletscherung) dem grösseren Einzugsgebiet einigermaßen entsprechen, für grössere Einzugsgebiete, ja sogar für Regionen von subkontinentaler Grösse repräsentativ sein können.

4 Wasserhaushalt einzelner Jahre

Bis zu welchem Mass ein einzelnes kleines Einzugsgebiet für grössere Gebiete auch in einer zeitlichen Auflösung von Einzeljahren repräsentativ sein kann, kann nur im Rahmen spezieller Analysen untersucht werden. Seit 1975 wird von der Abteilung Hydrologie des Geographischen Institutes der ETH Zürich das Untersuchungsgebiet Rietholzbach in der Ostschweiz (Thurgebiet) unter anderem mit dem Ziel betrieben (LANG 1978; KOENIG und MENZEL 1993), Möglichkeiten und Grenzen eines Repräsentativgebietes zu untersuchen. Zur Ausrüstung des Gebietes gehört auch ein wägbares Lysimeter von 2 m Durchmesser, sozusagen ein subminiatur-Einzugsgebiet im Zentrum des Gebietes Rietholzbach. Bereits SCHÄDLER (1980) zeigte, dass dieses Lysimeter als Index für das Einzugsgebiet zumindest während der schneefreien Zeit selbst für relativ kurze Zeiträume von Tagen bis etwa 6 Monaten verwendet werden kann.

Neuere Analysen von MENZEL (1991) erlauben nun den Vergleich der Wasserhaushaltsdaten des Einzugsgebietes Rietholzbach mit denjenigen des Lysimeters und den Daten der übergeordneten Einzugsgebiete der Thur und des Rheins bis Basel (SCHÄDLER 1985) über einen Zeitraum von 9 hydrologischen Jahren (Tab. 1, Abb. 5 bis 7).

Tabelle 1 zeigt deutlich die Grössenverhältnisse der verschiedenen Gebiete: das Rheingebiet ist rund 10000 mal grösser als das Rietholzbachgebiet und dieses wiederum eine Million mal grösser als das Lysimeter. Während das Rheingebiet, das sich vom Mittelland über den Jura bis zum Alpenkamm erstreckt im Mittel 300 m höher als das Thur- und Rietholzbachgebiet liegt, ist das Zwischeneinzugsgebiet der Thur zwischen Halden und Andelfingen rund 250 m tiefer gelegen. Die mittleren (korrigierten) Gebietsniederschläge nehmen entsprechend der Höhenlage um rund 90 mm/a Niederschlag pro 100 m Höhe zu. Die Verdunstung, als Differenz zwischen Niederschlag und Abfluss berechnet, zeigt recht schwierig zu interpretierende Daten. Der gegenüber dem gesamten Thurgebiet kleinere Verdunstungswert von 583 mm für

Tab. 1. Fünf unterschiedlich grosse Einzugsgebiete im Vergleich: Beschreibende Angaben und 9-jährige Mittelwerte der bodeneben gemessenen 1) bzw. nach SEVRUK und KIRCHHOFFER (1992) korrigierten 2) Niederschläge (N), der Abflusshöhen (A) und der Verdunstung (V). Quellen: 1) MENZEL (1991); 2) SCHÄDLER (1985)

Einzugsgebiet	Fläche km ²	Mittlere Höhe m ü.M.	1977–1985			Bem.
			N	A mm/a	V	
Lysimeter Büel	3,14	750	1588	1044	544	1)
Rietholzbach	3,3	795	1532	1038	494	1)
Thur Halden–Andelfingen	611	521	1183	600	583	1)
Thur–Andelfingen	1696	770	1642	951	691	2)
Rhein–Basel (nur Schweiz)	27969	1110	1703	1021	682	2)

das Gebiet der Thur zwischen Halden und Andelfingen lässt sich durch die relativ geringe Niederschlagsmenge erklären. Die Verdunstung von 494 mm pro Jahr für das Rietholzbachgebiet scheint jedoch, vergleicht man mit anderen ähnlich gelegenen Gebieten (LHG 1992) eher als klein. Es stellt sich hier die Frage, ob dieser kleine Wert ein Indiz für eine nicht zutreffende Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen ist: Ein gegenüber der Wirklichkeit zu klein berechnetes Einzugsgebiet hat eine zu grosse Abflusshöhe und damit eine Verminderung der Verdunstung zur Folge. Gerade in kleinen Einzugsgebieten wirken sich Fehler in der Flächenbestimmung massiv auf die Umrechnung der Abflussmengen in Abflusshöhen aus.

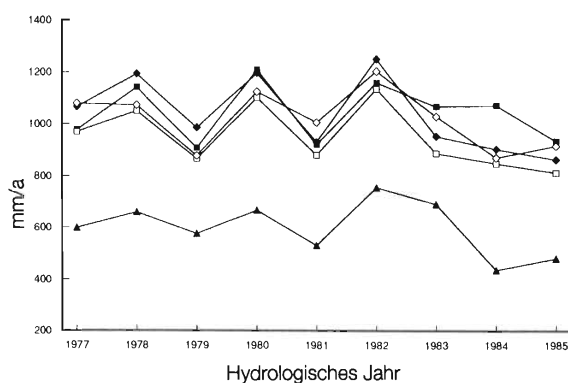
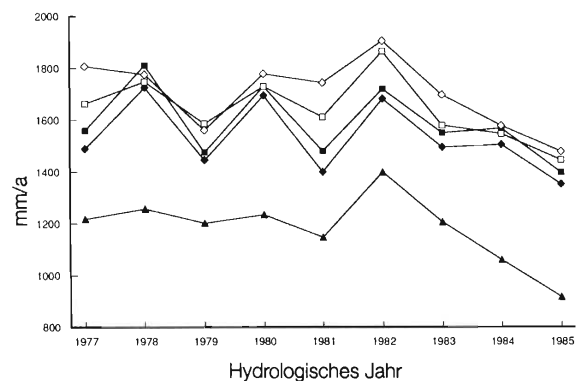
Die über 9 Jahre gemittelten Wasserhaushaltswerte lassen sich also im vorliegenden Fall (mit Ausnahme des Niederschlages) nicht von einem kleinen Indexgebiet auf ein grösseres Gebiet übertragen.

Die jährlichen Änderungen von Niederschlag und Abfluss verlaufen in den fünf so unterschiedlich grossen Einzugsgebieten jedoch erstaunlich synchron (Abb. 5 und 6). Das Lysimeter und der Rietholzbach verlaufen annähernd parallel, das gesamte Thurggebiet ist dadurch ebenso weitgehend repräsentiert. Im Rheingebiet gibt es, besonders 1977 und 1983, gewisse Abweichungen. Das untere Thurggebiet verzeichnet weit weniger stark akzentuierte Schwankungen. In allen Gebieten ist die Tendenz zu trockeneren Jahren zwischen 1982 und 1985 klar ersichtlich.

■ Lysimeter Büel
□ Thur bis Andelfingen
▲ Thur Halden bis Andelfingen

◆ Rietholzbach
◇ Rhein bis Basel (nur Schweiz)

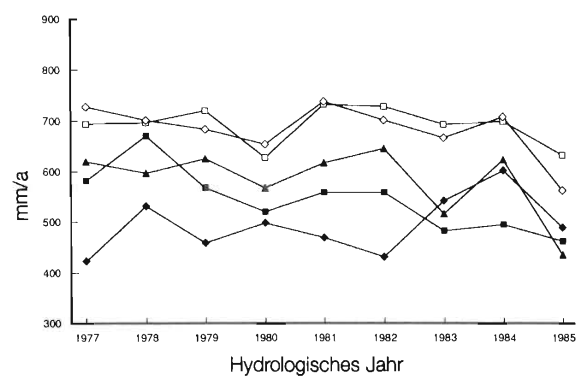
Abb. 5. Verlauf der Jahreswerte der korrigierten Gebietsniederschläge von 5 unterschiedlich grossen Einzugsgebieten (vgl. Tab. 1). Quellen: MENZEL (1991) und SCHÄDLER (1985).



■ Lysimeter Büel
□ Thur bis Andelfingen
▲ Thur Halden bis Andelfingen

◆ Rietholzbach
◇ Rhein bis Basel (nur Schweiz)

Abb. 6. Verlauf der Jahreswerte der Abflusshöhen von 5 unterschiedlich grossen Einzugsgebieten (vgl. Tab. 1). Quellen: MENZEL (1991) und SCHÄDLER (1985).



■ Lysimeter Büel
□ Thur bis Andelfingen
▲ Thur Halden bis Andelfingen

◆ Rietholzbach
◇ Rhein bis Basel (nur Schweiz)

Abb. 7. Verlauf der Jahreswerte der Differenz «Niederschlag – Abfluss» von 5 unterschiedlich grossen Einzugsgebieten (vgl. Tab. 1). Quellen: MENZEL (1991) und SCHÄDLER (1985).

Die Jahreswerte der Differenzen zwischen Niederschlag und Abfluss (Abb. 7) sind offensichtlich so stark von unterschiedlichen Änderungen in den Bodenspeichern beeinflusst, dass sie nicht als Jahresverdunstung betrachtet werden können. Da sich neben den unbekannten Speichergliedern in der Grösse «Niederschlag minus Abfluss» auch die Mess- und Interpolationsfehler in additiver Form manifestieren können, gleichzeitig die zu erwartenden Schwankungen der Verdunstung vergleichsweise klein sind, erstaunt es nicht, dass in der jährlichen zeitlichen Auflösung keine Ähnlichkeiten des Verlaufs sichtbar werden.

5 Hydrologische Regimes

Das Abflussregime eines Einzugsgebietes, also die mittlere jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse, hängt einerseits vom Jahresgang der Niederschläge und der Verdunstung, andererseits aber vom Verlauf von Auffüllen und Entleeren der Speicher im Einzugsgebiet ab. In einem natürlichen Einzugsgebiet sind die wichtigsten jahreszeitlichen Speicher die Schneedecke, die Gletscher sowie der Boden- und Grundwasserspeicher.

Ein Vergleich des hydrologischen Geschehens innerhalb des Jahresverlaufs darf daher nur unter Gebieten mit ähnlicher Charakteristik geschehen. ASCHWANDEN *et al.* (1986) haben für die Abflussregimes der Schweiz eine Raumtypisierung vorgenommen. Während im alpinen Raum die Höhenlage und die areale Vergletscherung die verschiedenen Regimetypen trennen, ist es im Mittelland neben der Höhenlage hauptsächlich die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge.

Innerhalb eines Regimetyps ist die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse eines Gebietes repräsentativ für ein anderes Gebiet, sofern die Gebiete auch Ähnlichkeiten in deren naturräumlichen und klimatischen Verhältnissen aufweisen. WEINGARTNER und ASCHWANDEN (1992) benützen dieses Konzept der Repräsentativgebiete für die Abschätzung der mittleren Monatsabflüsse in Gebieten ohne Abflussmessungen.

Da sich die Regimes zwischen den Regimetypen teilweise sehr stark unterscheiden, ist die Übertragung des Regimes von einem kleinen Repräsentativgebiet auf ein grosses Flussgebiet, welches ein Gemisch verschiedener Regimes darstellt, nicht möglich, sondern nur die Übertragung von einem Einzugsgebiet auf ein anderes mit demselben Regimetyp. Obwohl das Regime die mittlere jahreszeitliche Verteilung beschreibt, lassen sich nach ASCHWANDEN *et al.* (1986) innerhalb eines Regimetyps zwischen den individuellen Einzugsgebieten sehr grosse Ähnlichkeiten für die jahreszeitliche Verteilung auch für die einzelnen Jahre feststellen.

Das Konzept des Repräsentativgebietes lässt sich also auch für die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse von Einzeljahren verwenden. Allerdings muss hier einschränkend darauf hingewiesen werden, dass sich diese Aussage nur auf die Verteilung von Monatsmittelwerten (und nicht etwa Tagesmittelwerten) innerhalb eines Jahres bezieht.

6 Extremwasserstände

Wegen der oftmals zeitlich-örtlich grossen Variationen der Starkniederschläge ist es offensichtlich, dass im Einzelfall Hochwasserabflüsse kaum für ein übergeordnetes oder benachbartes Einzugsgebiet quantitativ repräsentativ sein können. Verschiedenen Bemühungen, für die Hochwasserbemessung relevante statistische Parameter ausgehend von Repräsentativgebieten zu regionalisieren, war bisher auch nur wenig Erfolg beschieden (SPREAFICO und WEINGARTNER 1992).

In bezug auf die Niederwasser hat ASCHWANDEN (1990) gezeigt, dass der jährliche Niederwasserkennwert Q_{347} eine starke Variabilität auf kleinstem Raum besitzt. Selbst in den Teilgebieten eines übergeordneten Einzugsgebietes, in eng benachbarten Gebieten oder in Gebieten desselben Regimetyps treten die extremen Niederwasserzeiten nicht in denselben Jahren auf. Die Variabilität ist dabei am grössten im Alpenraum und am kleinsten im Jura. Im Langzeitverhalten bestehen jedoch insbesondere im Alpenraum und im Jura gewisse regionale Übereinstimmungen, die es erlauben, ausgehend von Daten in Repräsentativgebieten Niederwasserkennwerte zu regionalisieren (ASCHWANDEN und SCHÄDLER 1988).

7 Repräsentativgebiete im internationalen Umfeld

Das Konzept der hydrologischen Repräsentativ- und Experimentalgebiete, wie es von den hydrologischen Pionieren anfangs des Jahrhunderts intuitiv, später dann 1965 bis 1975 von der Internationalen Hydrologischen Dekade offiziell durch die UNESCO (TOEBES und OURYVAEV 1970) eingeführt worden ist, hat sich auch international in der Forschung, aber auch bei den operationellen Diensten bewährt. Davon zeugen nicht zuletzt die Netze der hydrologischen Untersuchungsgebiete: In der Schweiz werden rund 50 Gebiete (Abb. 8) durch die Landeshydrologie und -geologie betrieben (SPREAFICO und BIGLER 1980). Ebenso existieren in vielen Ländern ähnliche Messnetze, wie etwa in Deutschland (Deutsches IHP/OHP-Nationalkomitee 1985) oder in anderen Rheinanliegerstaaten (HOFIUS 1985). Dies hat dazu geführt, dass auch internationale Forschungsprogramme auf der Basis der Messungen solcher Repräsentativgebiete durchgeführt werden können: erwähnt sei an dieser Stelle beispielsweise das Projekt FRIEND (GUSTARD 1993).

Um international die Tätigkeiten auf dem Gebiet der Forschung und des Betriebes von Repräsentativgebieten besser koordinieren zu können, wurden entsprechende Organisationen gebildet. Namentlich erwähnt seien hier zwei Arbeitsgruppen:

- AMHY-FRIEND: «Alpine and Mediterranean Hydrology» im Rahmen von «Flow Regimes from International Experimental and Network Data (FRIEND)» (UNESCO 1993) sowie
- E.R.B.: European Network of Experimental and Representative Basins, welches 12 europäische Länder vereinigt (BARBET 1993). Ziel ist, die Daten der Repräsentativgebiete gegenseitig zur Verfügung zu stellen und gemeinsame Projekte durchzuführen. Hans M. Keller war im Rahmen dieses Projektes bis zu seinem Tod E.R.B.-Koordinator.

Zusätzlich wurden entsprechende Koordinationsbemühungen im Rahmen der Regionalen Assoziation RA - VI der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) von der Working Group on Hydrology begonnen. In diesem Rahmen entstand ein Expertenbericht (SPREAFICO 1994) mit Empfehlungen zum Betrieb und zu den Analysen in repräsentativen Einzugsgebieten.

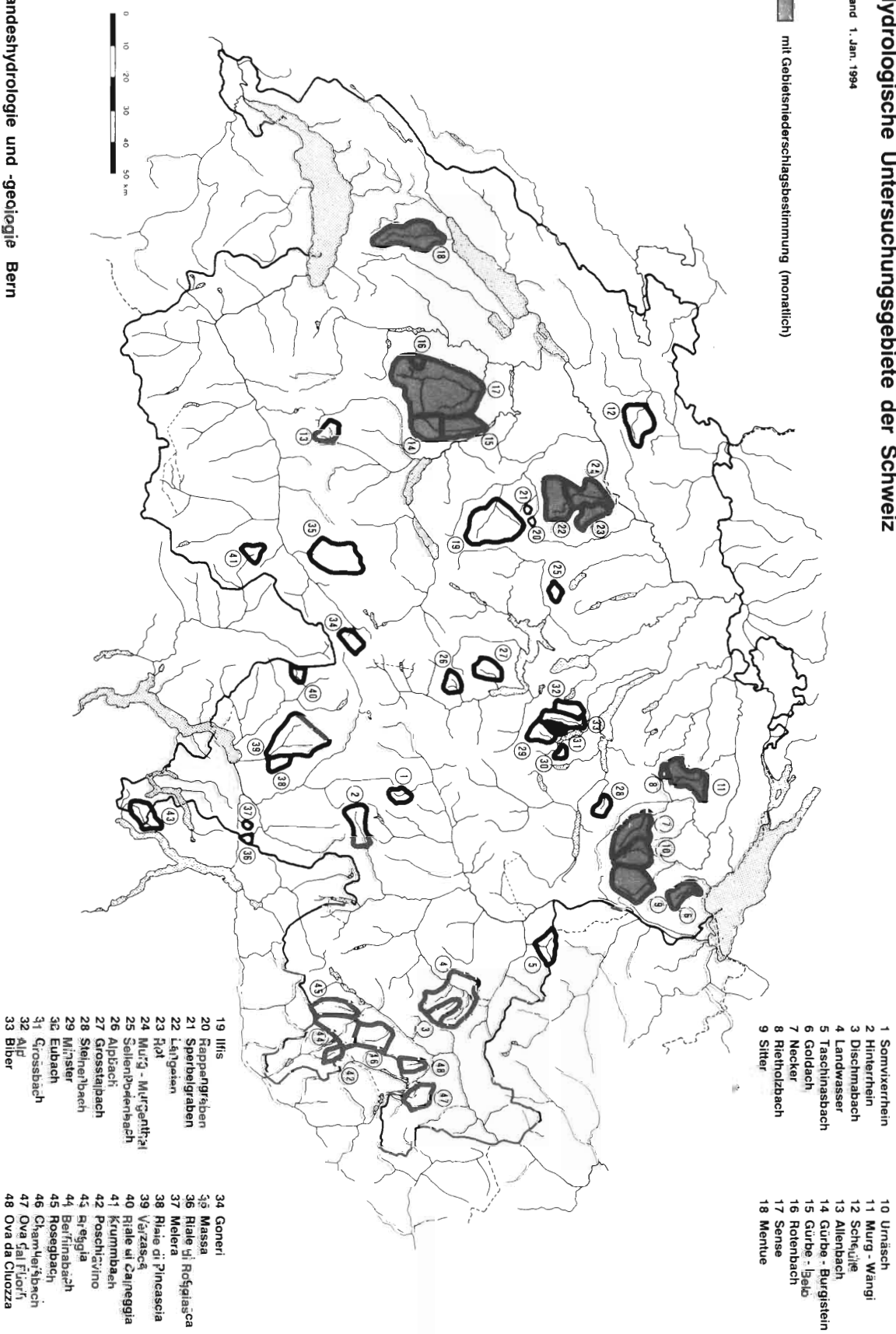
8 Fazit

Messungen und Untersuchungsergebnisse im Naturlabor «Repräsentativgebiet» können ebenso wenig wie Messungen und Versuchsergebnisse im Labor nicht ohne weitere Überlegungen generalisiert und auf Ereignisse mit anderen Randbedingungen übertragen werden. Hier wie dort müssen die ausgesuchten «Labor»-Randbedingungen und Einschränkungen möglichst klar erfasst und beschrieben werden. Damit ist eine Basis gegeben, die Ergebnisse übertragbar zu machen, übertragbar in Einzugsgebiete, die aufgrund einer umfassenden Analyse und aufgrund der wissenschaftlichen und praktischen Erfahrung ähnlich reagieren sollten.

Hydrologische Untersuchungsgebiete der Schweiz

Stand 1. Jan. 1994

mit Gabeltniedererschlagsbestimmung (monatlich)



Landeshydrologie und -geologie Bern

Abb. 8. Messnetz der Hydrologischen Untersuchungsgebiete der Landeshydrologie und -geologie.

Unter Berücksichtigung des zeitlich-örtlichen Massstabes und unter Berücksichtigung der Gebietseigenschaften wie etwa Geomorphologie, Klimatologie, Geologie, Landnutzung usw. lassen sich gewisse Ergebnisse aus bestimmten Einzugsgebieten in andere Gebiete übertragen. Die Gesamtheit aller hydrologisch untersuchten Teileinzugsgebiete mit ihren unterschiedlichen Gebietseigenschaften dient hingegen dazu, im statistischen Sinne repräsentative Resultate für die Gesamtheit der Landoberflächen zu liefern.

«Repräsentativgebiete» schlechthin, die für alle hydrologischen Fragestellungen Antworten liefern, gibt es also konsequenterweise nicht. Dass die ursprüngliche Idee hingegen, in mit bewusst intensiv beobachteten Gebieten Rückschlüsse auf ähnlich benachbarte oder übergeordnete Gebiete zu ermöglichen richtig war, wurde in der Zwischenzeit in zahlreichen angewandten hydrologischen Untersuchungen bestätigt und in diesem Beitrag beispielhaft erläutert. Aufgrund der positiven Erfahrungen werden auch international die Bemühungen der operationell und der wissenschaftlich tätigen Institutionen unterstützt, derartige Gebiete möglichst langfristig zu betreiben und sie möglichst gut zu dokumentieren.

Die Gültigkeit des hinter der Idee des Repräsentativgebietes steckenden Ansatzes lässt sich somit reduzieren auf die Frage «repräsentativ wofür?». Und der Verantwortung, sich diese Frage gründlich zu überlegen, kann sich kein Hydrologe, keine Hydrologin entziehen.

9 Zusammenfassung

Mit verschiedenen Beispielen aus schweizerischen hydrologischen Einzugsgebieten werden die Möglichkeiten und Grenzen von Repräsentativgebieten in den verschiedenen zeitlichen und örtlichen Skalenbereichen illustriert und diskutiert. Unter Berücksichtigung der Klimaregionen können selbst sehr kleine Einzugsgebiete die langfristigen Schwankungen der verschiedenen Elemente des Wasserhaushaltes in sehr grossräumigen Gebieten repräsentieren. Werden zusätzlich geomorphologische Charakteristika berücksichtigt, ist ebenso eine Übertragung des jahreszeitlichen Verlaufs möglich. Abschliessend werden die internationalen Programme im Rahmen der Repräsentativgebiete erläutert.

10 Literatur

- ASCHWANDEN, H., 1990: Einsatz von Kurzzeitmessungen zur Bestimmung der Abflussmenge Q_{347} . Gas-Wasser-Abwasser, 70, 1: 20–28.
- ASCHWANDEN, H.; SCHÄDLER, B., 1988: Die Abflussmenge Q_{347} als Grundlage zur Bestimmung der Restwassermenge – Möglichkeiten der Berechnung in Gebieten ohne Messungen. Gas-Wasser-Abwasser, 68, 9: 491–497.
- ASCHWANDEN H.; WEINGARTNER, R.; LEIBUNDGUT, C., 1986: Zur regionalen Übertragung von Mittelwerten des Abflusses. Teil I: Raumtypisierung der Abflussregimes der Schweiz. Dtsch. gewässerkdl. Mitt. 30, 2/3: 52–61.
- BARBET, D., 1993: E.R.B.: A tool of research for continental ecosystems. Leaflet. Lyon, CEMAGREF. 4 S.
- Deutsches IHP/OHP-Nationalkomitee 1985: Hydrologische Untersuchungsgebiete in der Bundesrepublik Deutschland. Mitt. des Nation.-Kom. BRD für das IHP der UNESCO und für das OHP der WMO Nr. 4. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde. 324 S.
- GUSTARD, A. (Ed.) 1993: Flow Regimes from International Experimental and Network Data (FRIEND). Vol. I–III. Wallingford, Institut of Hydrology. 210/42/200 S.
- HOFIUS, K., 1985: Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet. Bericht Nr. 1–3 der KHR, 's-Gravenhage, CHR/KH. 172 S.
- KELLER, H.M., 1979: Über den Wert hydrologischer Beobachtungen in Einzugsgebieten. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochschule. Zür., 41: 45–154.

- KELLER, H.M., 1993: Watershed Management in Europe – Early Needs and Recent Developments. Unveröffentlichtes Manuskript (ursprünglich vorgesehen zur Publikation in Agric. For. Meteorol.) 21 S.
- KOENIG, P.; MENZEL, L., 1993: Die Forschung im Gebiet Rietholzbach: Eine Standortbestimmung. In: Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. Zür. Geogr. Schr. 53: 9–24.
- LANG, H., 1978: Untersuchungen über den Wasserhaushalt und über Abflussprozesse im hydrologischen Forschungsgebiet Rietholzbach. 1. Tagungsbericht «Forschung in mitteleuropäischen Nationalparks», Mai 1978, Grafenau. Schr.reihe Bayer. Staatsminist. Ernähr. Landwirtsch. Forsten. 108–117.
- LHG, 1992: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz; 4. Teil. Bern, Landeshydrologie und -geologie. 363 S.
- MENZEL, L., 1991: Wasserhaushaltsstudien im Einzugsgebiet der Thur (Ostschweiz). Analyse hydrologischer Feldmessungen 1976–1985. Berichte und Skripten, Heft 46, Geogr. Inst. ETH Zürich. 206 S.
- PROBST, J.L.; TARDY, Y., 1987: Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. J. hydrol. 94: 289–311.
- SCHÄDLER, B., 1980: Der Wasserhaushalt eines Wägelysimeters als Index für ein kleines Einzugsgebiet. Jahrb. Schweiz. nat.forsch. Ges. 1980: 75–79.
- SCHÄDLER, B., 1985: Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitt. Landeshydrol. 6. Bern, Bundesamt für Umweltschutz. 84 S.
- SCHÄDLER, B., 1989: Water balance investigations in Swiss Alpine basins – tool for the improved understanding of impacts of climate changes on water resources. In: Conference on Climate and Water, Suomen Akatemian Julkaisuja 9/89. Helsinki, Valtion Painatuskeskus. Vol. 1: 462–475.
- SEVRUK, B.; KIRCHHOFER W., 1992: Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. In: SPREAFICO, M.; WEINGARTNER, R.; LEIBUNDGUT, C. (eds): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 2.3. Bern, Landeshydrologie und -geologie.
- SPREAFICO, M., 1994: Hydrological Observation Requirements in Operational Hydrological Reference Basins. Tech. Rep. Hydrol. Water Resour. 41; WMO/TD-No. 610, Geneva, World Meteorological Organisation. 72 S.
- SPREAFICO, M.; BIGLER, R., 1980: Verzeichnis der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Mitt. Landeshydrol. 2. Bern, Bundesamt für Umweltschutz. 200 S.
- SPREAFICO, M.; WEINGARTNER, R., 1992: Hochwasserabflüsse – Zur Problematik der Abschätzung in der Schweiz. Schweiz. Ing. Architekt. 10: 199–206.
- TOEBES, C.; OURYVAEV, V. (eds.) 1970: Les bassins représentatifs et expérimentaux. Etudes et rapports d'hydrologie No.4. Paris, UNESCO. 380 S.
- UNESCO 1993: Séminaire international annuel du Groupe AMHY de FRIEND. Compte-rendu, résumé des communications, thèmes programmés. Documents techniques en hydrologie, Paris, UNESCO. 84 S.
- WALSER, E., 1971: Die Rolle von Testgebieten in der alpinen hydrologischen Forschung. Ann. Meteorol. 5: 265–267.
- WEINGARTNER, R.; ASCHWANDEN, H., 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: SPREAFICO, M.; WEINGARTNER, R.; LEIBUNDGUT, C. (eds): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 5.2. Bern, Landeshydrologie und -geologie.

Adresse des Autors:

Dr. Bruno Schädler

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Landeshydrologie und -geologie

CH-3003 Bern

Small catchment studies of forest hydrology in the UK

Mark Robinson, James R. Blackie

Abstract

Small catchment studies of forest hydrology in the UK

The history of forest hydrology studies in the UK is reviewed in the context of the competing uses of the upland areas of the country for water supply and for timber production. This paper demonstrates the importance of conducting process studies to explain, and if necessary extrapolate, the hydrological differences due to land use that are observed on the catchment scale. Forest is compared with other shorter vegetation types, and the impact of forestry activities (such as drainage and felling) on evaporation and streamflow is also discussed.

Key words: small basins, forestry, evaporation, interception

1 Introduction

Although the forest cover in Britain UK is still low compared with other countries in Europe (10% of the total area compared to the European Union's average of 25%), it has grown very rapidly over the last 70 years as a matter of government policy. Large scale planting for timber production began in earnest following the formation of the state-run Forestry Commission in 1919 for strategic reasons. (MATHER 1993). Private forestry (which accounts for nearly half of the forested land) is also encouraged by government grants and tax incentives. The forest plantations created are predominantly conifer species, and are mostly situated in upland areas where agricultural productivity is low (Forestry Commission 1993a). Forestry planning in the late 1970s recommended that over the next 50 years the area of the uplands under forest should increase from 15% of the total area to nearly 50% (CAS 1980). The uplands of Britain with their high rainfall are also the major source area for the country's water resources. These sparsely populated upland sources are attractive because of the relative absence of pollution and their altitude which minimises water pumping costs to lowland centres of population and industry.

2 Early ideas about forestry

Ideas about forest hydrology, at the start of the 20th century were largely based on experiences in the British colonies in Asia and Africa where the clearance of native forests for agriculture was observed to result in soil erosion and increased flooding. It was consequently assumed by water engineers that planting forests in Britain would have beneficial effects; forests would bind the soil and prevent erosion, and by producing a deep litter layer would encourage infiltration. This would help to even out the pattern of streamflow by reducing flooding and increasing dry weather flows. Furthermore, since forest supports a smaller human population than farmland, and no farm animals, it would reduce any chemical and biological pollution to surface water reservoirs (Ministry of Health 1948).

Few people challenged such ideas. It was generally accepted to be a self-evident truth amongst engineers that forest gave more streamflow than grass cover. The Board of Agricul-

ture and Fisheries (BOAF 1918) stated quite categorically that “long continued observations have shown that more water drains from a wooded area than from one devoid of trees”. A rare exception to this consensus was LATHAM (1912) who reported his study of 3 basins in S. Wales indicated that trees gave less water. However, little attention was given to this finding. There was inadequate scientific understanding of the processes involved in evaporation losses from a catchment. Many engineers simply used a standard loss of 14 inches (approximately 355 mm) (LEWIS 1957). Others, in the absence of any direct measurements of evaporation or soil moisture, assumed that water use by vegetation was a percentage of precipitation.

The situation was eased somewhat when in a series of very influential papers the British physicist, Howard L PENMAN (1948, 1963) provided a means of estimating the potential evaporation from open water and from short grass. This was the first physically based equation for estimating evaporation from meteorological measurements over a natural surface. It was a fundamental advance in the understanding and quantification of the evaporation process, since Penman showed how the evaporative demand could be calculated from meteorological observations. These values represent the water use of a short green vegetation cover, with moisture freely available to its root system, subjected to the same meteorological conditions. At about the same time Thornthwaite in the USA developed a simpler and less rigorous approach to estimating evaporation.

In the first half of the 20th century a growing number of catchment studies in Europe and particularly in the USA indicated that forest could reduce total streamflow relative to grassland (ENGLER 1919; BATES and HENRY 1928; KELLER 1988; SWANK and CROSSLEY 1988). At first, it was assumed these results were not relevant to UK conditions due to physical differences, particularly climatic. It was argued, for example, that many of the study areas were drier than the UK uplands. Thus, any higher water use of their forests than grass could be attributed to the greater rooting depth of trees. In contrast, in the British uplands the often peaty soils remain wet in all but the most exceptional droughts. Under such conditions it was argued that for streamflow yield it would make “very little difference whether the area was all forest or all grass” (SCHOFIELD 1948).

3 Frank Law

A British water engineer, Frank Law, who had read the accumulating evidence from overseas was concerned about the possible impact of increasing the forest cover in the gathering grounds of his reservoir upon water yield – “the magnitude of this effect, if it occurs at all under British conditions, is largely unknown” (Law 1957). As a result he established an experimental study at Stocks reservoir in NW England (Law 1956, 1957). There was already considerable evidence that net precipitation under trees could be much less than in open ground (eg HORTON 1919; OVINGTON 1954). However, it was unclear if the intercepted water held on the tree branches and leaves represented a real increase in evaporation or was balanced by a reduction in transpiration. Penman, who was the recognised authority on evaporation was adamant that interception had no effect on the water balance – “whilst energy was being used up to get rid of intercepted water, the same energy could not be used to get rid of the transpired water” (PENMAN 1948, 1963). This argument was supported by many other scientists, including LEYTON and CARLISLE (1959), and COSTIN and DOOGUE (1973).

Law’s work involved the study of the water balance of a natural lysimeter (0.045 ha) within a Sitka spruce forest. Measurements included the gross rainfall at tree canopy height, net rainfall at ground level beneath the forest canopy and total discharge. The water balance was compared to measurements in a grass-covered catchment (37.5 km²) and a grass covered percolation gauge.

The first year of study showed similar actual losses from the grass catchment and the percolation gauge of 422 mm and 394 mm respectively. The predicted (Penman) open water potential evaporation was 523 mm. Total loss from the forest lysimeter was 710 mm, comprising 370 mm interception (i.e. gross minus net rainfall) and the remaining 340 mm represented forest transpiration. Water loss from the forest was some 50% greater than the calculated Penman potential evaporation for short grass.

The finding that the water “lost” to the atmosphere through evaporation and transpiration was so much greater from the forest than grassland was treated with some scepticism. This was partly because the loss rates measured appeared to be greater than the energy available for evaporation (i.e. by the Penman equation), and partly because of the small size of the forest lysimeter plot. Furthermore, Law’s findings threatened the afforestation plans of the Forestry Commission. British forestry was at that time being actively encouraged as a matter of government policy. Any concern that this forest expansion might have adverse effects on the nation’s water supplies from these upland areas would threaten this long term policy. Criticisms of Law’s experiment centred on the small size of the forest lysimeter (with the possibility of exaggerated interception rates near to the windward forest edge, and on the possibility of unmeasured leakage around the plot boundary and base).

Perhaps because of the storm of protest and criticism from foresters, although Law continued his measurements for another ten years, he did not publish the subsequent data. His records and notebooks were found and analysed some 20 years later and confirmed his initial findings (CALDER *et al.* 1982). However, even recently, some foresters still refuse to accept these results, or indeed those of the long term catchment studies described below (CHARD 1985).

Following Law’s publications there was intense interest in forestry impacts, but an absence of suitable gauged basins upon which to make comparisons of land use differences. This led to a number of studies on interception processes. In addition, the Institute of Hydrology was charged with undertaking a detailed study to quantify the differences in water use and hence in streamflow between catchments under forestry and upland grassland.

4 Studies on forest evaporation

Using an electrical resistance analogue MONTEITH (1965) derived from physical principles a version of the Penman equation which could be applied to any vegetation surface provided that its aerodynamic resistance, r_a , and its stomatal resistance, r_s , could be quantified. This expression with realistic values of the resistances enables actual rather than potential evaporation to be calculated. Forest offers a rougher surface to the atmosphere than a short vegetation and so has a much lower aerodynamic resistance. His work indicated that evaporation rates from a wet leaf surface could be up to 5 times higher than transpiration rates.

RUTTER (1967) measured interception losses from forest crops, and clearly showed much higher evaporation rates of intercepted water than the transpiration. As regards the source of the extra energy required for this evaporation, he concluded “the additional energy required is obtained from the air”. In evidence he quoted lower measured temperatures for wet leaves than the air around them. This work was subsequently used to derive a model of evaporation of intercepted water (RUTTER *et al.* 1975).

The Institute of Hydrology was established in the 1960s, a major theme being the study of the effects of afforestation on water resources. After a very careful examination of a large number of potential sites two adjacent catchments at Plynlimon in mid-Wales, the forested Severn and the grassland Wye, were instrumented to compare the effect of vegetation differences on the water balance (Table 1).

Tab. 1. Catchment mean annual water balances for Plynlimon (Wye and Severn), Coalburn, and Balquhiddar (MONACHYLE and KIRKTON).

Catchment and vegetation	Precip., P (mm)	Streamflow Q (mm)	P-Q (mm)	Et (mm)	Q/P %
Wye Grass	2374	2023	351	482	85
Severn Trees	2336	1695	641	502	72
Coalburn Grass	1266	804	462	434	63
Tree age:					
0–3 yrs	1149	788	361	456	69
4–8	1421	1035	387	440	73
9–13	1445	1049	396	441	73
14–18	1415	1010	405	430	71
Monachyle Heather & grass	2640	2004	636	538	76
Kirkton tree/grass	2260	1821	439	480	81

A number of the early catchment experiments were not well designed, and it was not possible to extrapolate their results to other areas. This led to a great deal of criticism of catchment research (see ACKERMANN 1966). For example, since it was easier and quicker to start with a forested area and to cut it down, than to take a non-forested area and grow a mature forest, most experiments then (as now) dealt with water balances before and after felling of a forest – 80% of the catchment studies in a review of forestry effects on streamflow (BOSCH and HEWLETT 1982) were concerned with deforestation. It is, however, very important to clearly distinguish between the effects of logging and land cover change in forest clearance studies. Many of the observed effects are more the result of soil compaction and logging roads than of the removal of the forest biomass.

In the light of such criticisms care was taken to embed process studies within the Plynlimon catchment framework. Such an approach had been pioneered in a series of catchment studies in E. Africa in the 1950s and 1960s (see EDWARDS and BLACKIE 1981). Without a knowledge and understanding of the processes taking place, the results of catchment experiments are difficult or impossible to extrapolate elsewhere, and the observations and conclusions are only really applicable to situations where the same set of processes is operating.

At the time when the Plynlimon catchments were established, the old arguments about forest evaporation differences being due to rooting depth rather than canopy effects still existed. It was claimed, for example, that the Plynlimon climate would be too wet to show up vegetation differences (e.g. KIRBY 1972). It was only by incorporating process studies, including soil moisture and interception losses, that the true mechanism for greater total losses from forest could be both demonstrated and explained.

The Plynlimon results (KIRBY *et al.* 1991) vindicated Frank Law's work at the catchment scale, and a forest lysimeter (CALDER 1976) showed that the much larger evaporation losses from the forest were due to the higher rates of evaporation of intercepted water held on the forest canopy.

CALDER (1979) describes how there is little difference between the stomatal resistances of conifers and grass, or between their effective canopy storage capacities for intercepted water. Where they differ in evaporation losses is a) under very dry soil conditions in which deeper rooting trees may continue to exploit soil water, and b) in wet conditions when the intercepted water evaporates much more readily from trees. This is due to the trees providing a rougher surface to the wind, creating more air turbulence and deeper mixing of the air above the ground, which is the dominant mechanism responsible for the vertical transport of water vapour from the vegetation surface into the atmosphere.

A study of the fluxes of water and energy was then conducted to clarify the mechanisms determining the evaporation losses from forests. To conduct such a study required very detailed and sensitive micrometeorological measurements, and in particular, in order to interpret the results, clearly needed a suitable site that was free from the localised irregularities of topography, soil moisture and land use. The Plynlimon catchments, surrounded by a complex mosaic of hills and valleys, with varied land use were clearly not suitable. Accordingly it was decided to site this experiment in the middle of an extensive Scots pine forest at Thetford in E England which is an area of almost level countryside. STEWART (1977) showed that the latent heat flux necessary to evaporate intercepted water was much greater than the available net radiation. The extra energy was supplied by the transfer of sensible heat from the air, and was only partly compensated by a reduction in transpiration. This showed that Penman's assertion that interception loss would be compensated by reduced transpiration is not true for forests (although there is experimental evidence to show that it is true for grass).

STEWART (1977) concluded that additional energy for interception evaporation was provided by sensible heat advection from areas upwind. Since the experiment was conducted in the middle of the forest this could not simply be a forest edge effect, and so demonstrated the importance of large scale advection processes to account for the high measured evaporation losses from forests.

Since the interception study at Plynlimon there have been similar studies in other upland areas of Britain. These show that on average approximately 30–35% of annual precipitation is lost to interception. As a first approximation, annual evaporation from UK upland forests may be given by the sum of Penman short grass evaporation (to estimate forest transpiration) and 35% of the precipitation, with a small reduction to allow for reduced forest transpiration on wet days (CALDER and NEWSON 1979). More complex versions of this very simple model have been developed for shorter time intervals and for different vegetation types (HALL and HARDING 1993). This model structure shows the importance of canopy wetting – greatest interception losses in the wettest parts of the country. Elsewhere, smaller differences between forest and grassland (stomatal resistance, rooting depth) may be important.

Further research has been carried out to examine the water use of other vegetation types, particularly heather, and in the early 1980s the Balquhiddy catchments were established in S Scotland. The results of these catchments are described in following sections, starting with the catchment water balances, and then summarising the results of the process studies conducted in those basins which are so necessary in order to generalise the findings.

5 Water balance results

The catchment is the basic unit of hydrological assessment, provided it is geologically watertight and not influenced by artificial water transfers. It is possible to quantify and compare the catchment water balance before and after a land-use change or by simultaneous studies on adjacent, physically similar “paired” catchments with different land-uses. Better still is to additionally investigate the processes controlling the catchment response and how these are modified by the land-use change. This combination of knowledge makes it possible to develop predictive mathematical models, the process information providing the basis for the model structure and the basin scale information allowing the model parameters to be calibrated or checked.

The annual water balance results from the five longest running catchments in the IH forest related studies are given in Table 1. These are based on data for the Severn and Wye at Plynlimon (KIRBY *et al.* 1991), Coalburn (ROBINSON *et al.* 1994) and the Monachyle and Kirkton at Balquhiddy (BLACKIE 1993). The Penman potential evaporation values, E_t , were obtained from meteorological records in the basins.

The annual water use estimates (P–Q) from the grassland Wye and pre-planting Coalburn (1967–71) catchments were similar to Penman Et, whilst the afforested Severn catchment water use is much higher. There, the presence of mature forest increases the annual water use by some 300 mm and hence reduces streamflow from 85% to 72% of the annual precipitation.

In marked contrast are the catchment results from Balquhider and the post-planting results from Coalburn. Superficially at least, both of these seem to suggest that water use by forest is lower than that by the alternative or preceding cover. The water use by the 40% forested Kirkton catchment at Balquhider is lower than Et, whilst that by the heather/grass Monachyle catchment is significantly higher than Et. Mean water use by the Coalburn catchment in the first 20 years after planting is lower than Et.

Even allowing for experimental uncertainties, these results make it clear that blind extrapolation of the Plynlimon results to other areas could result in considerable errors in estimating the effects of forestry on water resources. Consideration of these results in the light of the process information shows that they are not incompatible with the Plynlimon results. Interception losses in the high precipitation Monachyle catchment from the 50% heather cover will more than compensate for its low (0.5 Et) transpiration rate and, indeed, for any reduction relative to Et in the water use of the grass area. Thus a catchment water use in excess of Et is not unusual.

The Kirkton results require consideration of the distribution of forest and grassland within the catchment. The forest is in the valley bottom whilst the grass, with occasional patches of heather, is on the much more exposed upper slopes and ridge tops ranging up to 850 m. Temperatures there are low, and the grass is effectively dormant from November to April. Furthermore, these upper slopes are frequently under snow cover in winter. Process studies indicated that the annual water use of the grass was unlikely to exceed 75% of Et (WRIGHT and HARDING 1993). When allowance is made for possible further reductions due to moisture stress during summer dry spells on the very shallow soil areas on the ridges, the grass area contribution to the annual catchment water use could be as low as 55–60% of Et. Combining this with losses from the forest area at the Severn rate (1.28 Et) and losses from the small heather area at Et (0.5 Et transpiration plus allowance for interception loss) results in an estimated catchment loss rate very close to that listed in Table 1.

The Coalburn results indicate that the simplistic assumption that forest loss rates apply from the time of planting onwards cannot be justified. Pre-planting ground preparation comprising ploughing ditches at 4.5 m spacing resulted in 20% of the area being converted to bare soil, which significantly reduces water use. These furrows also have the effect of draining a considerable volume of water during summer periods when the water table would previously have fallen below the depth of the shallow natural stream channel network. The water use of the catchment seems unlikely to increase above that of the previous grassland vegetation until their growth has a significant effect on the aerodynamic roughness. At Coalburn the catchment data suggest that the water use is only now returning to that of the preceding cover, some 18 years after planting in the growth conditions pertaining there. The greater part of the plantation is now approaching canopy closure, at a height of 6–7 m, and the next few years should provide data of particular interest.

British evidence for the effects of felling on total streamflow is still somewhat tenuous. There should be some reduction in the water use, and hence increase in annual flows, but interception loss from the tree brashings left on the ground after removal of the main trunks will continue at a relatively high level until they decay to the point where the aerodynamic roughness is comparable to that of grass. There will also be an absence of transpiration losses until new vegetation begins to colonise the cleared area. The felling of some 15% of the catchment on the Severn catchment since 1985 (not included in Table 1) indicates a small increase in total flow.

6 Process studies

Penman's approach, subsequently developed by MONTEITH (1965) and others to encompass a wider range of vegetation covers was applied by the Institute of Hydrology in the studies of the energy balance relationships of forests and the vegetation types they replace. These studies, in Thetford Forest (STEWART 1977), in the Plynlimon catchments (KIRBY *et al.* 1991) and within and around the Balquhiddy catchments (HALL 1985, 1987; JOHNSON 1990; WRIGHT and HARDING 1993) have contributed greatly to our understanding of, and our ability to model, the hydrological effects of afforestation. The main points arising from these studies can be summarised as follows:

- a) Upland grassland uses water at the Penman Et, rate except during very dry summer periods when sufficiently large soil moisture deficits develop to curtail transpiration, or during winter periods when temperatures drop low enough for the grass to become dormant.
- b) Closed canopy conifer forest will use water at a rate in excess of Penman Et because the aerodynamic roughness of the canopy results in significant interception of incoming rainfall and its rapid evaporation back to the atmosphere. The energy and water vapour exchange mechanisms work much more efficiently than over relatively smooth grassland and result in considerable additional water loss. Since the basic transpiration rate from forest is comparable to that from grassland the magnitude of the excess loss will depend on the frequency and duration of canopy wetting.
- c) Heather water use can be either higher or lower than Penman Et. The basic transpiration rate is 0.5–0.6 Et, and the interception loss rate is higher than grass but lower than that from forest.
- d) Young forest will use water at some intermediate rate between that of the preceding vegetation and closed canopy forest. No definitive process results have yet been published on the rates of transition from one to the other. The Coalburn catchment results however seem to indicate that the water use remains well below the closed canopy rate for at least the first 15 years, at UK upland growth rates.
- e) Post-felling cover, initially comprising an aerodynamically rough profile of brashings over a needle mat, will have a relatively high interception loss rate but no transpiration component until vegetation colonisation begins.

A wide variety of mathematical models have been and are being developed which can be used to simulate the effects of afforestation on water use and on streamflow and hence on water resources. Water use models range from the relatively simple techniques typified by the CALDER and NEWSON (1979) annual water use type of approach to the much more comprehensive process-based daily water use models developed by HALL and HARDING (1993). Whilst applications of the process-based water use models to the Balquhiddy catchments have produced results that are not entirely in agreement with the catchment scale observations, the differences are generally within the uncertainties associated with the model inputs and the observed data.

An interesting pragmatic approach to the question of the compatibility of upland forestry and water supply is that adopted by GUSTARD and WESSELINK (1993). They analysed a synthetic 25 year daily flow series, generated by the IH Land Use Model calibrated on the two Balquhiddy catchments, to determine the effects of a range of percentage forest covers in the catchments on flow duration curves and on storage/yield relationships. Their results suggest reductions in the mean flows of about 22% would result if forest cover was increased from 0% to 100%. In the storage /yield analysis, the storage required to maintain a given constant yield was shown to increase with increasing forest cover. The detailed results must be treated with caution, but the concept of developing this type of approach for objective assessments of the impacts of forestry on the utilisable water resources is promising.

7 Effects on the stream hydrograph

The change in annual flow volumes is not the sole criterion by which the impact of a land use modification is judged by downstream users. The effects on flood magnitude, frequency and peak heights, and on summer low flows can be of equal or greater importance, since these factors can determine whether the flow can be utilised efficiently for water supply or other purposes. Due to differences in topography, geology, soils, climate and land-use the detailed response characteristics of each catchment is unique. Consequently paired catchment comparisons of the effects of different land-uses on hydrograph shape are of limited value. Before and after comparisons on the same catchment are much more informative, though much more time-consuming, particularly in the case of a long rotation crop such as forest.

The longest sets of data currently available for before-and-after comparisons are those from Coalburn. Analyses of these for the pre- and post- planting periods have produced valuable insights on the effects of afforestation (ROBINSON *et al.* 1994). One important and surprising finding has concerned the impacts of forestry on low flows. This was studied by analysing changes in the catchments's Baseflow Index (BFI) (Institute of Hydrology 1992). This index is effectively the proportion of the total annual flow occurring as baseflow and gives a useful and relatively stable index of the low flow characteristics of a catchment.

In Figure 1 the BFI values for Coalburn since its planting are compared to those of a number of nearby catchments in which no significant land-use changes took place. Their BFI values generally remained within $\pm 15\%$ of the pre-1972 values, indicating no major climatic changes in the region, whilst the Coalburn value increased to 225% of its previous value immediately after the ploughing and planting, and was still some 60% above the pre-treatment value in the 1987-91 period. Although the pre-1972 Coalburn BFI value of 0.108 is much smaller than values for larger catchments (so a small absolute increase in baseflow gives a large percentage increase) it is typical of a small impermeable catchment. The changes in the value are real, indicating a statistically significant and sustained increase in the baseflow component of streamflow as a direct result of the drainage effects of the plough furrows. The subsequent decline in the BFI can be attributed to the decreasing efficiency of the furrows as they become re-vegetated, and to the increasing water use by the growing trees. Whilst it would not be realistic to extrapolate the magnitude of this baseflow increase to other areas where the soils may be more permeable or the depth and density of the furrows may be different, it is valid to

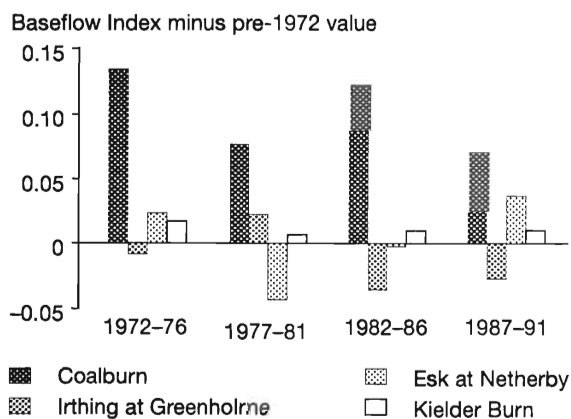


Fig. 1. Comparison of 5-year average Baseflow Index values for Coalburn, relative to its pre forestry value. Values for other nearby catchments are shown for comparison.

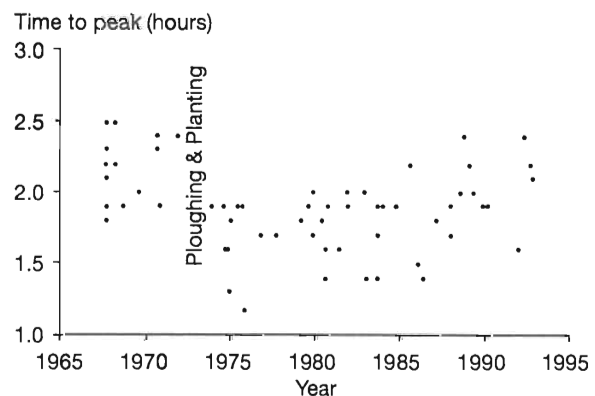


Fig. 2. Storm response times at Coalburn (rain centroid to peak flow) were shortened by the pre forestry ground preparation in 1972, and took 15-20 years to recover.

recognise that land preparation involving furrow drainage will produce a significant increase in baseflow. This is at variance to the widespread view that forests dry soils and reduce baseflows.

In contrast to the positive effect of augmenting baseflow the initial effect of afforestation at Coalburn was to increase flood flows (Table 2). The forestry drainage resulted in a very much shorter time to peak flow and a higher peak in response to storm rainfall (Fig. 2). These effects continued to be statistically significant for up to 16 years after the ploughing. Applying these unit hydrograph parameters to a standard design storm indicates an increase in the resulting flood peaks of 15–20% in the first five years after ploughing, declining to about 5% after 20 years. As with the case for low flows, the study showed that the hydrological effect of forestry drainage could be quite different to that expected from forestry (most texts claim forestry helps to reduce flow peaks).

Tab. 2. Coalburn half hour unit hydrograph parameters, before and after the pre forestry drainage in 1972. Significantly different to the pre forestry value at ** $\alpha = .005$, * $\alpha = .05$ levels.

Period	Time to peak (hours)	Peak ordinate (% volume)
1967–71	2.15	10.5
1973–77	1.68**	14.4**
1978–83	1.76**	12.8*
1984–88	1.87*	11.8
1990–92	2.04	10.0

8 Water quality

A great deal has been written concerning the impacts of forest on water quality, and in recent years much attention has been given to problems of acidification. These discussions are outside the scope of this review, but mention will be given of one aspect of water quality – namely the long standing and widely held view that forest prevents erosion and reduces stream sediment loads.

Following pre-planting plough drainage at Coalburn, the increased storm runoff peaks and the large expanses of disturbed, bare soils resulted in a massive increase in the stream sediment concentrations. From a very low mean annual value of about 4 mg/l (3 tonnes/km²) the concentrations peaked at some 250 mg/l then slowly declined. Sampling 6 years after the ploughing indicated some 15 mg/l whilst sampling at the present time (some 20 years later) suggests values much closer to, but still higher than, the pre-treatment levels. It was estimated (ROBINSON and BLYTH 1982) that the soil loss from the catchment in the five years after ploughing was in the region of 120 tonnes/km², the equivalent of the loss in nearly half a century at the pre-treatment erosion rate.

It has been shown by studies at Plynlimon and at Balquhiddy that disturbances to the catchments by forestry activities (whether afforestation or deforestation) may increase sediment yields. Short term sediment loads are very dependent on forestry activities and on precipitation (JOHNSON 1993).

9 Discussion

In the last three decades studies on both the catchment and the process scale have produced significant improvements in our knowledge of the effects of upland forestry on water resources. Differences in annual streamflow totals resulting from a change from upland grassland or heather to mature forest cover can now be predicted with reasonable accuracy. The long term Coalburn study has provided the first detailed information on the reduction of water use during the period from initial planting to canopy closure. Much progress has been made towards predicting the changes in shape of the flood and low flow hydrographs likely to be associated with pre-planting drainage treatments and towards estimating the duration of these effects. From current work more information on the effects of felling and second crop planting is now beginning to emerge.

Uncertainties remain in a number of aspects however. At Coalburn the land treatment prior to first crop planting resulted in an increase in baseflow which has persisted up to the beginning of tree canopy closure. Will this be sustained or will the increasing water use result in a decline in baseflow below its pre-planting level? The whole question of the effects of the various phases of the forestry cycle on low flows is of great importance to water resource users and requires continuing investigation on both the catchment and the process scale.

The increased water use in wet upland areas by a mature forest cover relative to grassland and, to a lesser extent to heather, has now been generally accepted together with its implications for the water resource users. Coalburn has shown however that water use by the forest in the early growth stages of the first rotation crop is not greater than E_t and may be significantly lower depending on the pre-planting treatment. In a large catchment with a spread of crop ages the question remains whether this will result in a net increase or a decrease in streamflow. Continuation of the catchment monitoring at Plynlimon and Balquhidder together with some process study work on both first and second rotation crops at the intermediate growth stages should shed further light on this aspect of water use.

Research into the effects of the land-use change on upland hydrology, at a range of sites representing the climatic, geological and topographic diversity of the uplands, will continue to have an important part to play in providing the information required in planning the sustainable exploitation of upland Britain in environmentally acceptable ways.

The findings of the Plynlimon catchments have been presented in evidence to government committees concerned with future forest planning (eg WALSH 1980). Lessons learned from the research have also been carried through to forest management guidelines for both state and private forestry (Forestry Commission 1993b).

10 References

- ACKERMANN, W.S., 1966: Guidelines for research on the hydrology of small watersheds. US Department of Interior, Washington DC, Office of Water Resources. 26 pp.
- BATES, C.G.; Henry A.J., 1928: Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. *Monthly Weather Review*, Supplement 30: 1-79. US Dep Agriculture, Weather Bureau.
- BLACKIE, J.R. 1993: The water balance of the Balquhidder catchments. *J. hydrol.* 145: 239-258.
- BOAF, 1918: Relationship of woods to domestic water supplies. Leaflet No 99. London, Board of Agriculture and Fisheries, HMSO.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D., 1982: A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. hydrol.* 55: 3-23.
- CALDER, I.R., 1976: The measurement of water losses from a forested area using a 'natural' lysimeter. *J. hydrol.* 30: 311-325.
- CALDER, I.R., 1979: Do trees use more water than grass? *Water Serv.* 83: 11-14.

- CALDER, I.R.; NEWSON, M.D., 1979: Land use and upland water resources – a strategic look. *Water resour. bull.* 16: 1628–1639.
- CALDER, I.R.; NEWSON, M.D.; WALSH, P.D., 1982: The application of catchment, lysimeter and hydrometeorological studies of coniferous afforestation in Britain to land use planning and water management. *Sonderheft der Landeshydrologie*, Bern. 3: 853–63.
- CAS, 1970: Strategy for the U.K. Forest Industry. Report No 6. Reading, Centre for Agricultural Strategy.
- CHARD, J.S.R., 1985: Forestry and water in the uplands of Britain. *Q. j. for.* 79: 3.
- COSTIN, A.B.; DOOGE, J.C., 1973: Balancing the effects of Man's actions on the hydrological cycle. Chapter II. In: *Man's Influence on the Hydrological Cycle*. Irrigation and Drainage Paper 17, FAO, Rome. pp. 19–51.
- EDWARDS, K.A.; BLACKIE, J.R., 1981: Results of the E African catchment experiments, 1958–74. In: LAL, R.; RUSSELL, E.W. (eds) *Tropical Agricultural Hydrology*. New York, Wiley. 163–88.
- ENGLER, A., 1919: Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 12: 1–626.
- Forestry Commission, 1993a: *Forestry Facts and Figures, 1992–93*. HMSO London.
- Forestry Commission, 1993b: *Forests and Water Guidelines*. HMSO London.
- GUSTARD, A.; WESSELINK, A.J., 1993: Impact of land use change on water resources; Balquhiddy catchments. *J. hydrol.* 145: 389–402.
- HALL, R.L., 1985: Further interception studies of heather using a wet-surface weighing lysimeter system. *J. hydrol.* 81: 193–210.
- HALL, R.L., 1987: Processes of evaporation from vegetation of the uplands of Scotland. *Trans. R. Soc. Edinb., Earth Sci.* 78: 327–334.
- HALL, R.L.; HARDING, R.J., 1993: The water use of the Balquhiddy catchments: a processes approach. *J. hydrol.* 145: 285–314.
- HORTON, R.E., 1919: Rainfall interception. *Monthly Weather Review* 47: 603–23.
- Institute of Hydrology, 1992: Low flow estimation in the United Kingdom. *Inst. Hydrol. Rep.* 108.
- JOHNSON, R.C., 1990: The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *J. hydrol.* 118: 281–287.
- JOHNSON, R.C., 1993: Effects of forestry on suspended solids and bedload yields in the Balquhiddy catchments. *J. hydrol.* 145: 403–417.
- KELLER, H.M., 1988: European experiences in long term forest hydrology research. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A. (eds) *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. *Ecol. Stud.* 66: 407–459.
- KIRBY, C.; NEWSON, M.D.; GILMAN, K. (eds) 1991: *Plynlimon research: The first two decades*. *Inst. Hydrol. Rep.* 109: 188 pp.
- KIRKBY, M.J., 1972: Discussion on Visit to the Plynlimon catchments. *Area.* 4: 253 Institution of British Geographers.
- LATHAM, B., 1912: Discussion on water supply in South Africa. *Proc. Inst. Civ. Eng.* CLXXXVIII: 299–301.
- LAW, F., 1956: The effect of afforestation upon the yield of water catchment areas. *J. Br. Waterwork Assoc.* 38: 484–494.
- LAW, F., 1957: Measurement of rainfall, interception and evaporation losses in a plantation of Sitka Spruce trees. *IAHS Publ.* 44: 397–411.
- LEWIS, W.K., 1957: Investigation of rainfall, runoff and yield on the Alwen and Brenig catchments. *Proc. Inst. Civil Engrs* 8, 17–51.
- LEYTON, L.; CARLISLE, A., 1959: Measurement and interpretation of interception by forest stands. *IAHS Publ.* 48: 111–19.
- MATHER, A., 1993: *Afforestation – policies, planning and progress*. London, Belhaven.
- Ministry of Health, 1948: *Gathering grounds, public access to gathering grounds, afforestation and agriculture on gathering grounds*. Report of the Gathering Grounds Committee. HMSO, London.
- MONTETH, J.L., 1965: Evaporation and environment. *Soc. Exp. Biol. Semin. Ser.* 19: 206–234.
- OVINGTON, J.D., 1954: A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry* 27: 41.
- PENMAN, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. Series A*, 193: 120–46.
- PENMAN, H.L., 1963: *Vegetation and hydrology*. Tech. Commun. 53. Harpenden, Commonwealth Bureau of Soils. 124 pp.
- ROBINSON, M.; BLYTH, K., 1982: The effects of forestry drainage operations on upland sediment yields: a case study. *Earth Surf. Process. Landf.* 7: 85–90.
- ROBINSON, M.; JONES, T.K.; BLACKIE, J.R., 1994: *The Coalburn catchment experiment – a 25 year review*. Bristol, National Rivers Authority, Research and Development Note 270. 54 pp.
- RUTTER, A.J., 1967: An analysis of evaporation from a stand of Scots Pine. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W. (eds) *Forest Hydrology*. London, Pergamon. S. 403–416.

- RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C., 1975: A predictive model of rainfall interception in forests. II Generalisation of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. appl. ecol.* 12: 367–80.
- SCHOFIELD, R.K., 1948: Discussion of Biology and Civil Engineering. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 90 pp.
- STEWART, J.B., 1977: Evaporation from the wet canopy of a pine forest. *Water resour. res.* 13: 915–21.
- SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A., 1988: (eds) *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. Ecological Studies No 66, New York, Springer Verlag. 469 pp.
- WALSH, P.D., 1980: The impacts of catchment afforestation on water supply interests. Evidence to the House of Lords Select Committee on Science and Technology "Scientific Aspects of Forestry". HMSO London. 376–381.
- WRIGHT, I.R.; HARDING, R.J., 1993. Evaporation from natural mountain grassland. *J. hydrol.* 145: 267–283.

Address of the authors:

Dr. Mark Robinson
James R. Blackie
Institute of Hydrology
Wallingford, OX10 8BB, UK