



Hydrologie der Schweiz

Ausgewählte Aspekte und Resultate

M. Spreafico und R. Weingartner

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 7 – Bern 2005



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Hydrologie der Schweiz

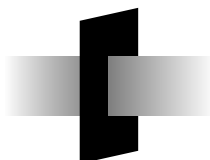
Ausgewählte Aspekte und Resultate

M. Spreafico und R. Weingartner

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 7 – Bern 2005

Mit Beiträgen von:

M. Auer, Ch. Graf, A. Grasso, Ch. Hegg, A. Jakob, A. Käab, Ch. Könitzer, Ch. Lehmann, R. Lukes, M. Maisch
R. Meister, F. Paul, T. Reist, B. Schädler, M. Spreafico, J.-P. Tripet, R. Weingartner



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Herausgeber

M. Spreafico, BWG
R. Weingartner, GIUB

Redaktion

T. Reist, GIUB

Autoren

Kapitel 1

M. Spreafico, BWG; R. Weingartner, GIUB

Kapitel 2

T. Reist, GIUB; R. Weingartner, GIUB

Kapitel 3

M. Auer, SLF; A. Kääh, GIUZ; Ch. Könitzer, GIUB; M. Maisch, GIUZ;
R. Meister, SLF; F. Paul, GIUZ

Kapitel 4

T. Reist, GIUB; R. Weingartner, GIUB

Kapitel 5

T. Reist, GIUB; M. Spreafico, BWG

Kapitel 6

Ch. Könitzer, GIUB

Kapitel 7

J.-P. Tripet, Ittigen

Kapitel 8

Ch. Graf, WSL; A. Grasso, BWG; Ch. Hegg, WSL; A. Jakob, BWG;
Ch. Lehmann, H – W; M. Spreafico, BWG

Kapitel 9

A. Jakob, BWG; R. Lukes, BWG

Kapitel 10

T. Reist, GIUB; B. Schädler, BWG; J.-P. Tripet, Ittigen;
R. Weingartner, GIUB

Übersetzungen

R. Bandi-Tebbutt, B. Jann, V. Linder

Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Wasser und Geologie

ISSN: 1660-0746

Auflage: 2000

Zitiervorschlag: Spreafico, M. & Weingartner, R. (2005):
Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte
Aspekte und Resultate. Berichte des BWG,
Serie Wasser Nr. 7, Bern.

Kartendaten: © swisstopo (BA046528)

Reviewing

M. Barben, BWG
N. Bischof, SLF
Ch. Bonnard, EPFL
A. Gautschi, Nagra
N. Goldscheider, CHYN
D. Grebner, IACETH
J. Gurtz, IACETH
D. Hartmann, BUWAL
F. Hauser, GIUB
Ch. Hegg, WSL
P. Heitzmann, BWG
T. Herold, BWG
A. Jakob, BWG
R. Kozel, BWG
Ch. Lehmann, H – W
Ch. Lienhard, MHNG
M. Maisch, GIUZ
Ch. Marty, SLF
B. Meylan, BUWAL
P. Moeschler, MHNG
A. Pochon, CHYN
B. Schädler, BWG
M. Schürch, BWG
D. Streit, BWG
L. Tacher, EPFL
S. Vogt, BWG
F. Vuataz, CHYN
J. Wessels, SLF

Abkürzungen

BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Ittigen-Bern
BWG	Bundesamt für Wasser und Geologie, Ittigen-Bern
CHYN	Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
GIUB	Geographisches Institut der Universität Bern
GIUZ	Geographisches Institut der Universität Zürich
H – W	Hydrologie – Wasserbau, Urtenen-Schönbühl
IACETH	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich
MHNG	Muséum d'histoire naturelle, Genève
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen
SLF	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf

Bildnachweis Umschlag: oben: Aletschgletscher. S. Crameri, GIUB
Mitte: Aare. B. Sigris, BWG
unten: Source Bossy (NE). NAQUA, BWG

Gestaltung Umschlag: H.-P. Hauser, avd

Bezugsadresse: BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern
Bestellnummer: 804.507 d
Internet: www.bbl.admin.ch/bundespublikationen

Copyright: © BWG, Januar 2005

Vorwort

Wasser ist Leben

Zur nachhaltigen, ökologisch optimalen und wirtschaftlich sinnvollen Nutzung der Ressource Wasser sind Kenntnisse über Qualität und Quantität der ober- und unterirdischen Wasservorkommen in Raum und Zeit unabdingbar. Die Beschaffung dieser Kenntnisse – nämlich die Messung der Wasserflüsse und -speicher, die Analyse und Erforschung der ablaufenden Prozesse – ist Aufgabe der Hydrologie. Seit mehr als 150 Jahren werden in der Schweiz solche hydrologischen Grundlagen durch die Landeshydrologie systematisch bereitgestellt. Dabei arbeiten Bundesstellen, Kantone, Forschungsinstitute und Private zusammen.

Die vorliegende Publikation dokumentiert den Stand des Wissens in der Schweiz bezüglich der ober- und unterirdischen Gewässer anhand ausgewählter Aspekte und Resultate. Grundzüge und Übersichten zur Hydrologie der Schweiz stehen im Mittelpunkt. Es handelt sich um eine Monographie, die von mehreren Wissenschaftlern unter der Federführung der Landeshydrologie und der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern zusammengestellt wurde. Sie richtet sich an eine breite Öffentlichkeit und erhebt dementsprechend nicht den Anspruch, jedes wissenschaftliche Detail zu erläutern.

Ich danke allen Beteiligten für Ihren Beitrag.

Préface

L'eau, c'est la vie

On ne peut exploiter la ressource eau de façon durable, optimale d'un point de vue écologique et raisonnable d'un point de vue économique, sans connaissances sur la qualité ainsi que la quantité des eaux superficielles et souterraines dans l'espace et le temps. L'acquisition de ces connaissances (à savoir le jaugeage des cours d'eau et des réservoirs, l'analyse et l'étude des processus qui se déroulent) constitue la tâche de l'hydrologie. En Suisse, c'est le Service hydrologique national qui pose systématiquement ces bases hydrologiques depuis plus de 150 ans. Pour cela, il collabore avec les services fédéraux, les cantons, les instituts de recherches et les privés.

Dans la présente publication, divers thèmes et résultats ont été retenus pour documenter l'état du savoir relatif aux eaux superficielles et souterraines en Suisse. La publication met l'accent sur les principaux caractères de l'hydrologie de la Suisse et sur des vues d'ensemble. Il s'agit d'une monographie compilée par plusieurs scientifiques sous la responsabilité du Service hydrologique national et du Groupe pour l'hydrologie de l'Institut de géographie de l'Université de Berne. S'adressant à un large public, elle n'a pas la prétention d'expliquer chaque détail scientifique.

Je remercie toutes les personnes ayant contribué à cette publication.

Bundesamt für Wasser und Geologie

Der Direktor



Dr. Ch. Furrer

Prefazione

L'acqua è vita

Per l'uso rinnovabile, ecologicamente ottimale ed economicamente sensato della risorsa acqua sono indispensabili delle conoscenze sulla qualità e sulla quantità delle acque superficiali e sotterranee, sull'arco sia del tempo, sia dello spazio. L'ottenimento di queste conoscenze – cioè la misurazione dei flussi e delle riserve d'acqua, l'analisi e lo studio dei processi in corso – è compito dell'idrologia. Da più di 150 anni il Servizio idrologico nazionale elabora sistematicamente tali dati idrologici di base. Ciò è possibile grazie alla collaborazione con uffici federali, cantoni, istituti di ricerca e privati.

La presente pubblicazione documenta lo stato delle conoscenze in Svizzera, riguardanti le acque di superficie e sotterranee, in base ad una scelta di aspetti e di risultati. Si è voluto porre l'accento sui tratti fondamentali e le visioni d'insieme riguardanti l'idrologia svizzera. Si tratta di una monografia, realizzata da diversi ricercatori, sotto la direzione del Servizio idrologico nazionale e del Gruppo per l'idrologia dell'Istituto di Geografia dell'Università di Berna. Essa si rivolge a un vasto pubblico e perciò non ha la pretesa di spiegare ogni dettaglio scientifico.

Ringrazio tutti i partecipanti per il loro contributo.

Preface

Water is Life

Knowledge of the quality and quantity as well as the spatial and temporal aspects of surface and subterranean water reserves is essential for the sustainable, ecologically optimal and economically feasible exploitation of water as a resource. Obtaining this knowledge, namely through measuring discharge and reserves, as well as analysing and researching the processes that govern them – is the task of hydrologists. For more than 150 years this basic hydrological information has been provided in Switzerland by the Swiss National Hydrological Survey, which involves federal offices, cantonal authorities, research institutions and private business as well as individuals.

The present publication covers selected aspects and results concerning current knowledge of surface water and groundwater in Switzerland. It focuses on the basic aspects of hydrology in Switzerland and provides an easy-to-read overview. It is a monograph drawn up by several scientists under the guidance of the Swiss National Hydrological Survey and the Hydrology Group of the Geographical Institute at the University of Berne. It is aimed at the general public, for which reason not every scientific detail is explained.

I should like to thank everyone who has helped to produce this work.

Federal Office for Water and Geology

The Director



Dr Ch. Furrer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort, Préface, Prefazione, Preface.....	3	3.7.1	Messnetze.....	37
Inhaltsverzeichnis.....	5	3.7.2	Untersuchungsmethoden.....	37
1 Einleitung, Introduction, Introduction....	7	3.7.3	Glaziale Prozesse.....	38
2 Niederschlag.....	9	3.7.4	Resultate.....	39
2.1 Niederschlag messen.....	9	3.7.5	Gletscher als Wasserspeicher.....	40
2.1.1 Entwicklung der Messnetze.....	9	4 Verdunstung.....	41	
2.1.2 Niederschlagsmessnetze der MeteoSchweiz... ..	9	4.1	Die Verdunstung – das Kühlsystem der Erde	41
2.1.3 Messgeräte und Messfehler.....	11	4.1.1	Energiehaushalt.....	41
2.2 Vom Punkt zur Fläche.....	12	4.1.2	Verdunstung – Evapotranspiration.....	41
2.2.1 Abminderungsfaktoren.....	12	4.1.3	Potentielle und reale Verdunstung.....	42
2.2.2 Interpolation.....	13	4.2	Verdunstung messen.....	42
2.2.3 Wasserbilanzmethode.....	14	4.2.1	Messung der potentiellen Verdunstung.....	42
2.2.4 Niederschlagskarten.....	14	4.2.2	Messung der realen Verdunstung.....	43
2.3 Niederschlagsverhältnisse.....	15	4.3	Verdunstung berechnen.....	43
2.3.1 Jahresniederschläge.....	15	4.3.1	Berechnung der potentiellen Verdunstung ..	43
2.3.2 Saisonale Niederschlagsverteilung.....	17	4.3.2	Berechnung der realen Verdunstung.....	44
2.4 Extremwerte.....	18	4.4	Verdunstungsverhältnisse.....	44
2.4.1 Starkniederschläge.....	18	4.4.1	Jahresverdunstung.....	44
2.4.2 Trockenheit.....	19	4.4.2	Verdunstung im Jahresverlauf.....	46
2.5 Vertiefende Aspekte.....	20	4.4.3	Trend im 20. Jahrhundert.....	46
2.5.1 Bestandesniederschlag.....	20	5 Abfluss.....	47	
2.5.2 Nebelniederschlag.....	20	5.1	Abfluss messen.....	47
2.5.3 Hagel.....	21	5.1.1	Wasserstand und Abfluss.....	47
2.6 Niederschlag Schweiz – Europa – Welt.....	22	5.1.2	Messung des Wasserstands.....	47
2.7 Entwicklung und Aussichten.....	23	5.1.3	Messung des Abflusses.....	49
3 Schnee und Eis.....	25	5.1.4	Messstationen.....	50
3.1 Bedeutung des Schnees.....	25	5.1.5	Messnetze.....	52
3.2 Entwicklung der Messnetze.....	25	5.1.6	Messfehler.....	52
3.3 Grundlagen bei der Erhebung von Schneee-		5.2	Abfluss schätzen.....	54
daten.....	26	5.2.1	Abschätzung von langjährigen Monats-	
3.3.1 Das Basisdreieck Station – Zeit – Parameter..	26		mitteln des Abflusses.....	54
3.3.2 Messgeräte und -methoden.....	28	5.2.2	Abschätzung von Hochwasserabflüssen.....	54
3.4 Modelle.....	30	5.2.3	Abschätzung von Niedrigwasserabflüssen ...	57
3.4.1 SNOWPACK – das Schneedeckenmodell.....	30	5.3	Abflussverhältnisse in der Schweiz.....	59
3.4.2 AVAL-1D – dynamische Lawinenberech-		5.3.1	Jährliche Abflussmengen.....	59
nung.....	31	5.3.2	Saisonale Verteilung der Abflüsse.....	60
3.4.3 NXD – Lawinenprognosemodelle.....	33	5.4	Eingriffe ins Abflussgeschehen.....	61
3.5 Schneehöhenverteilung in der Schweiz.....	33	5.5	Hochwasser.....	63
3.5.1 Schneebedeckungsdauer.....	33	5.5.1	Kenntnis von Hochwasserabflüssen.....	63
3.5.2 Abhängigkeit der Schneehöhe von der		5.5.2	Entstehung grosser Hochwasser.....	64
Höhe über Meer.....	34	5.6	Abflussbildung.....	64
3.5.3 Schneehöhenkarten.....	34	5.6.1	Abflussprozesse.....	65
3.5.4 Regionale Schneehöhenverteilung.....	35	5.6.2	Abflussreaktion von Gebieten.....	65
3.6 Weitere Schwerpunkte der aktuellen		5.6.3	Fliesswiderstand.....	65
Schneeforschung.....	35	5.6.4	Retention.....	67
3.6.1 Schneesport.....	35	5.7	Hochwasser vorhersagen.....	68
3.6.2 Schutzwald.....	36	6 Seen.....	71	
3.6.3 Permafrost.....	36	6.1	Seen – Weiher – Teiche.....	71
3.7 Gletscher.....	37	6.1.1	Bereiche von Seen.....	71
		6.1.2	Schichtung und Zirkulation.....	71

6.2	Vorkommen von Seen.....	72	7.12.2	Hydrogeologische Karten in der Schweiz	99
6.2.1	Seegenese.....	72	7.12.3	Digitale Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000	99
6.2.2	Verlandung.....	73			
6.2.3	Seen der Schweiz.....	74			
6.3	Funktionen von Seen	74	8	Feststoffbeobachtung	101
6.4	Stoffhaushalt und Wasserqualität	75	8.1	Feststoffe messen	101
6.4.1	Phosphor und Sauerstoff	75	8.1.1	Feststoffprozesse	101
6.4.2	Der Phosphorgehalt in Seen – eine Erfolgsgeschichte des Gewässerschutzes	76	8.1.2	Schwebstoffe	101
6.4.3	Die Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff	77	8.1.3	Geschiebe.....	103
			8.1.4	Murgänge.....	104
			8.1.5	Seesedimentation.....	105
			8.1.6	Korngrößenverteilung.....	105
7	Grundwasser.....	79	8.2	Resultate	106
7.1	Wasser im Untergrund.....	79	8.2.1	Schwebstoffkonzentration und -frachten... 106	
7.1.1	Grundwasser und Hydrogeologie.....	79	8.2.2	Feststofffrachten (Geschiebe und Schwebstoffe)	106
7.1.2	Grundwasserleiter.....	79	8.2.3	Deltaaufnahmen: Linth-Delta.....	107
7.2	Grundwasserstände und Quellschüttungen messen	81	8.2.4	Stauraumverlandung.....	108
7.3	Grundwasserregime.....	82	8.3	Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen.....	108
7.4	Die Qualität des Grundwassers	83	8.4	Feststoffenerhebung nach Unwettern	109
7.4.1	Instrumente der landesweiten Beobachtung	83			
7.4.2	Vorgehensschritte zur Datenbeschaffung.....	83	9	Wasserqualität.....	111
7.4.3	Darstellung ausgewählter Messreihen	84	9.1	Wasserqualität messen	111
7.5	Grundwasser als Lebensraum.....	85	9.1.1	Messnetze und Beprobungsarten	111
7.5.1	Lebewesen im Grundwasserbereich	85	9.1.2	Beprobung und Messgeräte NADUF	112
7.5.2	Der Grundwasserbereich als Ökosystem	86	9.2	Ausgewählte Parameter.....	113
7.6	Anwendung von Tracern im Grundwasser ...	87	9.2.1	Wassertemperatur.....	113
7.6.1	Einsatz künstlicher Tracer.....	87	9.2.2	Phosphor.....	115
7.6.2	Anwendung natürlicher Tracer.....	88	9.2.3	Nitrat	116
7.7	Wasser in geringdurchlässigen Gesteinen.....	89	9.2.4	Sauerstoff.....	117
7.7.1	Geringe Durchlässigkeiten und Messanforderungen.....	89	10	Wasserhaushalt.....	119
7.7.2	Art der Grundwasserzirkulation – ein Beispiel.....	89	10.1	Wasserkreislauf	119
7.8	Grundwasser als Gefahrenpotential	90	10.2	Wasserhaushalt und Wasserbilanz.....	120
7.8.1	Grundwasser und Überschwemmungen	90	10.2.1	Klassische Wasserbilanz	120
7.8.2	Grundwasser und Massenbewegungen	91	10.2.2	Hydrologische Wasserbilanz	121
7.9	Grundwassernutzung	92	10.2.3	Wasserbilanz der Schweiz.....	121
7.9.1	Grundwasser für die Wasserversorgung	92	10.3	Die Alpen als Wasserschloss Europas	123
7.9.2	Grundwasser als Wärmelieferant.....	93	10.4	Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten	124
7.10	Grundwasserschutz	94	10.5	Die Isotope im Wasserkreislauf	125
7.10.1	Grundwassergefährdung	94	10.5.1	Messung der Isotope im Wasserkreislauf ...	125
7.10.2	Grundsätze des Grundwasserschutzes	94	10.5.2	Messgrößen.....	126
7.10.3	Planerischer Schutz	95	10.5.3	Darstellung ausgewählter Messreihen.....	126
7.11	Grundwasser und Wald	96			
7.11.1	Wenig Fremdstoffe und optimale Reinigungsprozesse im Wald.....	96			
7.11.2	Der Wald als Trinkwasserlieferant.....	96			
7.11.3	Luftschadstoffe und Nitratbelastung: potentielle Gefahren und Lösungen	97			
7.12	Hydrogeologische Karten	98			
7.12.1	Die Darstellung von hydrogeologischen Daten	98			
				Literaturverzeichnis	129
				Bildnachweis.....	137

1 Einleitung, Introduction, Introduction

Einleitung

Die Hydrologie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Wasser auf und unter der Landoberfläche, seinen Erscheinungsformen, seiner Zirkulation, seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung, seinen biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften und seinen Wechselwirkungen mit der Umwelt befasst.

Die Schweiz wird dank ihrer gebirgigen und damit niederschlagsreichen Einzugsgebiete gerne als «Wasserschloss Europas» bezeichnet. Dass diese Bezeichnung gerechtfertigt ist, zeigt allein schon die Tatsache, dass die Schweiz rund 45 % zum Gesamtabfluss des Rheins in den Niederlanden beiträgt, und dies bei einem Flächenanteil von nur 21 %.

Diese naturräumlich bedingte Vorrangstellung und die damit verbundene Verantwortung haben schon unsere Vorfahren erkannt. Politik, Forschung und Verwaltung haben bereits Mitte des 19. Jahrhunderts Anstrengungen unternommen, die Wasservorkommen zu erfassen, zu messen und zu erforschen, um sie optimal nutzen und schützen zu können.

Die Schweiz besitzt heute räumlich dichte, zeitlich meist hoch auflösende hydrologische Messnetze, welche uns grundlegende Erkenntnisse über die Quantität und Qualität der Wasservorkommen sowie über die in diesem Zusammenhang relevanten hydrologischen Prozesse liefern. Diese Informationen dienen letztlich auch den flussabwärts gelegenen Staaten, welche das Wasser aus der Schweiz nutzen. Die in der Schweiz erworbenen Erfahrungen tragen auch zur Entwicklung anderer, meist messtechnisch schlecht erschlossener Gebirgsräume bei. So unterstützt die Schweiz Zentralasien beim Wiederaufbau ihrer hydrometeorologischen Dienste, bei der Erstellung von Abflussvorhersagen und beim Erfassen der verfügbaren Wasserressourcen. Darüber hinaus bringt die Schweiz ihr hohes Fachwissen in der Hydrologie auch in viele internationale Fachgremien ein. Schweizerische Forschungsinstitutionen führen angewandte Projekte in vielen Ländern des Südens durch und tragen damit zur nachhaltigen Entwicklung dieser Regionen bei.

Die vorliegende Publikation gibt einen Überblick über Resultate und Erkenntnisse zu verschiedenen Aspekten der Hydrologie der Schweiz. Sie hat zum Ziel, die in der einleitenden Definition der Hydrologie angesprochenen Themen übersichtsmässig darzustellen. Der inhaltliche Aufbau wurde vom «Hydrologischen Atlas der Schweiz» (HADES) inspiriert, welcher fortlaufend mit

Beiträgen der wichtigsten hydrologisch tätigen Institutionen der Schweiz ergänzt wird. Die vorliegende Monographie ist keine Zusammenfassung des HADES, welcher sich eher an ein wissenschaftlich orientiertes Publikum richtet, sondern sie will ausgewählte Aspekte der schweizerischen Hydrologie diskutieren und in kurzer, prägnanter Form einer breiten Öffentlichkeit zugänglich machen.

Die Herausgeber danken den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, die an dieser Publikation mitgearbeitet haben und freuen sich auf die weitere Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an Tom Reist, der mit seinem unermüdlichen Einsatz wesentlich zum Gelingen dieses Werks beigetragen hat.

Introduction

L'hydrologie est la science qui s'occupe de l'eau en surface et sous terre en étudiant ses manifestations, sa circulation, sa distribution dans l'espace et le temps, ses propriétés biologiques, chimiques et physiques ainsi que ses interactions avec l'environnement.

A cause de ses bassins versants montagneux et donc pluvieux, la Suisse est volontiers qualifiée de «château d'eau de l'Europe». Le seul fait que la Suisse contribue à raison de 45 % environ au débit total du Rhin aux Pays-Bas (alors que sa surface ne représente qu'une part de 21 %) suffit pour montrer la pertinence de cette dénomination.

Nos ancêtres ont déjà reconnu cette prééminence, due à l'espace naturel, et compris la responsabilité qu'elle implique. Dès le milieu du 19^{ème} siècle, la politique, la recherche et l'administration se sont efforcées d'inventorier, de mesurer et d'étudier les ressources en eau, afin de pouvoir les exploiter et les protéger de la meilleure manière possible.

La Suisse possède aujourd'hui des réseaux de mesure hydrologiques denses dans l'espace et ayant en général une haute résolution dans le temps; ceux-ci nous livrent des connaissances fondamentales sur la quantité et la qualité des ressources en eau ainsi que sur les processus hydrologiques essentiels dans ce contexte. En fin de compte, ces informations servent aussi aux riverains situés en aval qui utilisent l'eau en provenance de notre pays. Les expériences acquises en Suisse contribuent également au développement d'autres régions de montagnes, en général peu équipées en réseaux de mesure. Par exemple, la Suisse aide l'Asie

centrale à reconstruire ses services hydrométéorologiques, à établir des prévisions d'écoulement et à inventorier les ressources en eau disponibles. De plus, de nombreuses commissions internationales bénéficient également de ses importantes connaissances spécialisées en hydrologie. Des institutions suisses de recherche mènent des projets appliqués dans de nombreux pays du Sud, contribuant ainsi au développement durable de ces régions.

La présente publication aborde divers aspects de l'hydrologie de la Suisse et donne une vue d'ensemble des résultats et conclusions qui s'y rapportent. Son but est de représenter de manière synoptique les thèmes mentionnés dans la définition préliminaire de l'hydrologie. Son contenu s'articule selon l'«Atlas hydrologique de la Suisse» (HADES), qui est complété en continu par des contributions fournies par les principales institutions suisses actives dans le domaine de l'hydrologie. Cette monographie n'est pas un résumé de l'HADES, qui s'adresse plutôt à un public de scientifiques; elle veut discuter de certains aspects de l'hydrologie suisse et les rendre accessibles à un plus large public sous une forme abrégée plus concise.

Se réjouissant de la poursuite de cette collaboration, les éditeurs expriment leurs remerciements aux nombreux collègues ayant contribué à cette publication. Ils remercient tout particulièrement Tom Reist, qui, en s'engageant sans jamais se lasser, a considérablement contribué à la réussite de cet ouvrage.

Introduction

Hydrology is the science that deals with water on and below the surface, its various forms, how it circulates, its spatial and temporal distribution, its biological, chemical and physical characteristics and its interaction with the environment.

Thanks to its mountainous terrain and the associated high-rainfall catchments, Switzerland is often called the «water-tower of Europe». The justification of this description can be seen for example in the fact that Switzerland provides some 45 % of the total discharge of the Rhine when it reaches the Netherlands, although it represents only 21 % of the total area.

This geographical predominance and the responsibility that it implies were already known to our ancestors. As early as the middle of the 19th century, politicians, researchers and the authorities made efforts to record,

measure and research the water reserves in order to be able to exploit and protect them as efficiently as possible.

Today Switzerland has hydrological measuring networks at its disposal that are dense and provide frequent information which ensures a basic knowledge of the quantity and quality of water reserves as well as the relevant hydrological processes. This information is also of service to the countries further downstream which use the water emanating from Switzerland. The experience gained in Switzerland is also leading to the development of other mountain areas where measuring networks are not so advanced. In this way Switzerland is helping countries in Central Asia to rebuild their hydrometeorological services, including discharge predictions and estimating available water resources. In addition, Switzerland contributes its wealth of specialised knowledge in the field of hydrology to many international bodies. Swiss research institutions carry out applied projects in many countries of the south and thus help to ensure the sustainable development of these regions.

The present publication provides an overview of the results and current knowledge concerning various aspects of hydrology in Switzerland. Its aim is to demonstrate the aspects mentioned in the above definition of hydrology in a clear and concise manner. The content is based on the «Hydrological Atlas of Switzerland» (HADES), which is regularly updated through contributions from the principal hydrological institutions in Switzerland. The present monograph is not a summary of the Atlas, which would tend to interest a scientific readership, but rather a discussion and brief account of selected aspects of hydrology in Switzerland that will appeal to the general public.

The publishers would like to thank the many helpers that have made this publication possible and look forward to working with them again in the future. Particular thanks are due to Tom Reist, who through his untiring efforts has made an important contribution towards the success of this work.

2 Niederschlag

Kennziffern

Mittlerer Jahresniederschlag Schweiz (1961–1990)	1458 mm		Quelle: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a
Tiefster mittlerer Jahresniederschlag (1951–1980)	522 mm	Ackersand (VS)	Quelle: KIRCHHOFER & SEVRUK 1992
Höchster mittlerer Jahresniederschlag (1951–1980)	3142 mm	Mönchsgrat (VS/BE)	Quelle: KIRCHHOFER & SEVRUK 1992
Höchster Jahresniederschlag	5910 mm	Mönchsgrat (VS/BE) 1939/40	Quelle: MeteoSchweiz
Höchster Tagesniederschlag	500 mm	Maggia (TI), 10.9.1983	Quelle: GEIGER et al. 1991
Höchster Stundenniederschlag	105 mm	Sternberg (ZH), 23.6.1930	Quelle: GEIGER et al. 1991
Höchster 10-Minuten-Niederschlag	50 mm	Heiden (AR), 26.7.1895	Quelle: GEIGER et al. 1991
Längste Trockenperiode	77 Tage	Lugano (TI), 6.12.1988–20.2.1989	Quelle: MeteoSchweiz

2.1 Niederschlag messen

Im Prinzip kann der Niederschlag überall mit einfachen Mitteln aufgefangen und gemessen werden. In der Realität sieht sich die Niederschlagsmessung aber mit grossen Problemen konfrontiert. Für die Verwendbarkeit der Daten ist entscheidend, in welchem Intervall die Ableseung/Messung erfolgt. Vier gesamtschweizerische Messnetze liefern Niederschlagswerte in Jahres-, Tages-, Halbtages- und 10-Minuten-Auflösung.

2.1.1 Entwicklung der Messnetze

An einigen Standorten wird der Niederschlag ab dem 18. Jahrhundert gemessen. Die systematische Erfassung des Niederschlags beginnt in der Schweiz aber 1863 mit dem Betrieb von anfangs rund 40, mit einem Niederschlagsmesser ausgerüsteten Klimastationen durch die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft. 1881 übernimmt die neugegründete Meteorologische Zentralanstalt die bestehenden Stationen. In den folgenden Jahren steigt die Zahl der Stationen stark an und bereits um 1900 werden die Niederschläge täglich an 345 Stationen abgelesen (vgl. Fig. 2-1).

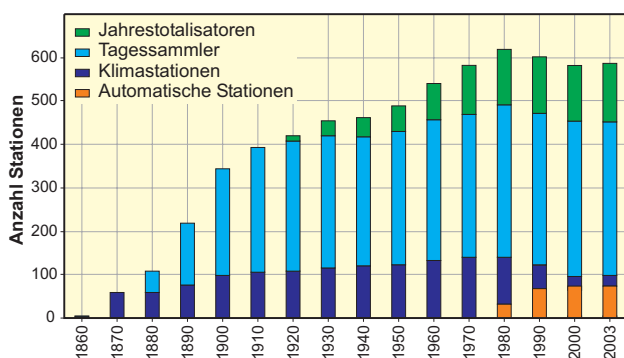


Fig. 2-1: Entwicklung der schweizerischen Niederschlagsmessnetze (nach WEINGARTNER 1992; Daten ab 1990: MeteoSchweiz).

Eine tägliche direkte Ableseung erfordert leicht zugängliche Stationen. Die Folge ist eine Konzentration der Messstellen in tieferen Lagen und ganzjährig bewohnten Gebieten. Ab 1914 werden die Lücken im Hochgebirge durch das Netz der Jahrestotalisatoren verkleinert. Mit dem Aufbau des automatischen Messnetzes (ANETZ) ab 1978 stehen Niederschlagsdaten hoher zeitlicher Auflösung für alle Regionen der Schweiz zur Verfügung. Zur selben Zeit (1977) nehmen die beiden ersten Wetterradarstationen ihren operationellen Betrieb auf. Von den ab 1995 eingerichteten automatischen Stationen des Ergänzungsnetzes (ENET) messen einige ebenfalls den Niederschlag. Nebst diesen nationalen gibt es verschiedene kantonale, private und spezielle (z.B. Flughafen-) Messnetze, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

2.1.2 Niederschlagsmessnetze der MeteoSchweiz

Die niederschlagsmessenden Netze der MeteoSchweiz umfassen rund 600 Stationen (vgl. Tab. 2-1). Mit einer durchschnittlichen Stationsdichte von 1 Station pro 70 km² steht für die Bestimmung von Jahresniederschlagsmengen ein auch im globalen Vergleich sehr dichtes Messnetz zur Verfügung. Allerdings variiert die Dichte von Region zu Region (vgl. Fig. 2-2) und nimmt im Gebirge ab (vgl. Fig. 2-3). Dadurch wird der Niederschlag in höheren Lagen räumlich nicht genügend detailliert erfasst. Beispielsweise sind in der Höhenzone oberhalb 2000 m ü.M. nur noch 9 Tagesmessstationen verfügbar (1 Station pro 1073 km²).

Messnetz	zeitliche Auflösung	Stationen
Klima	Halbtagesummen	25
Niederschlag (NIME)	Tagessummen	351
Jahrestotalisatoren	Jahressummen	137
ANETZ	10-Minuten-Intensitäten	68
ENET	10-Minuten-Intensitäten	5
Total		586

Tab. 2-1: Niederschlagsmessnetze der MeteoSchweiz (Stand 2003; 2002 bei Jahrestotalisatoren) (Quelle: MeteoSchweiz).

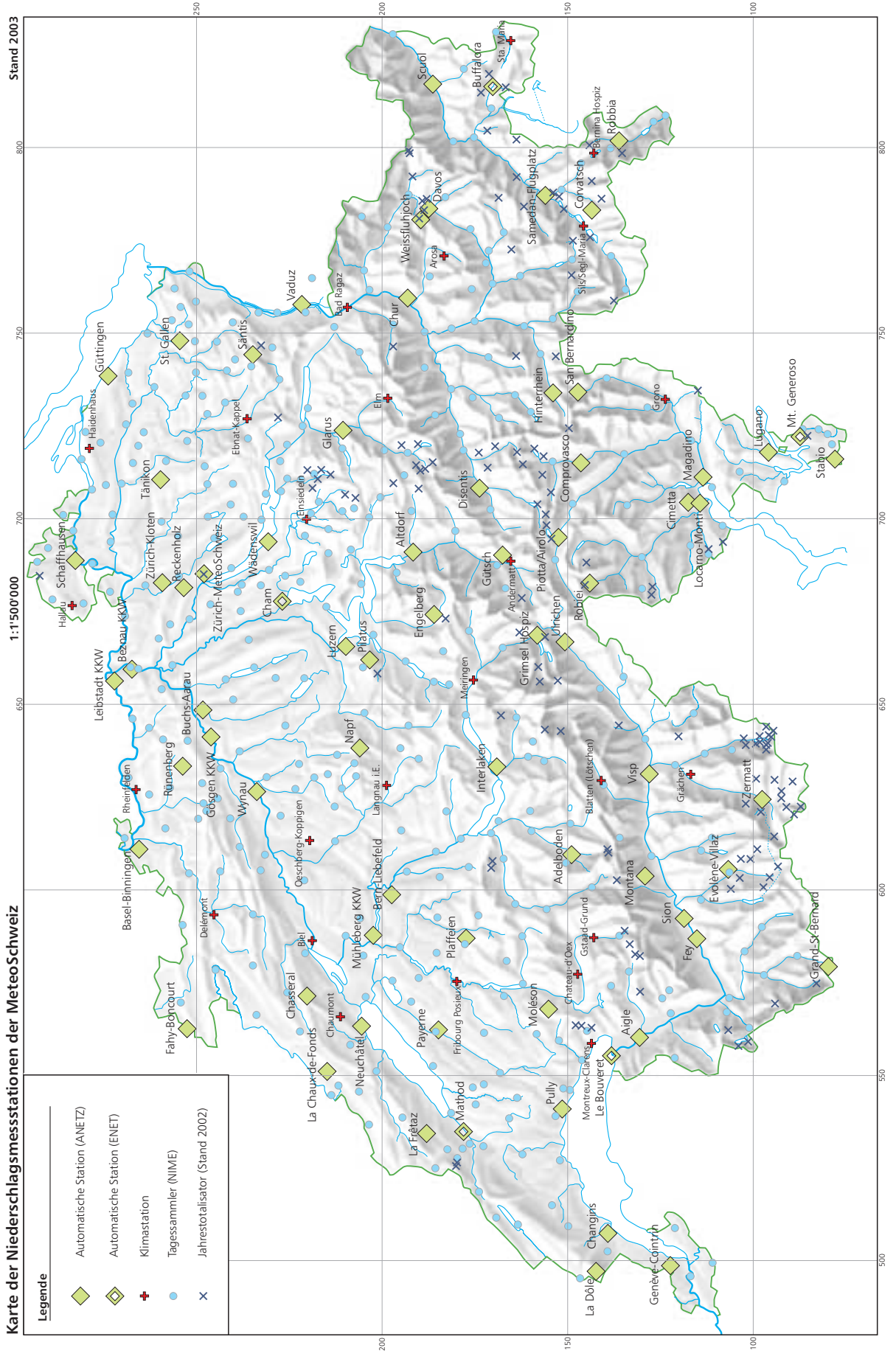


Fig. 2-2: Karte der Niederschlagsmessstationen der MeteoSchweiz (Stand 2003; 2002 bei Jahrestotalisatoren) (Daten: MeteoSchweiz).

Figur 2-3 ermöglicht den Vergleich der Höhenverteilung der Messnetze verschiedener zeitlicher Auflösung mit der Höhenverteilung der Landoberfläche. Bei optimaler Verteilung wären die einzelnen Kurven deckungsgleich. In der Realität ist die Höhenverteilung bei den Stationen mit einem Messintervall von mindestens einem Tag wenig repräsentativ. 90 % aller ANETZ- und ENET-Stationen und beinahe 100 % der Klimastationen und Tagessammler, jedoch nur 77 % der Landoberfläche liegen unterhalb von 2000 m ü.M.

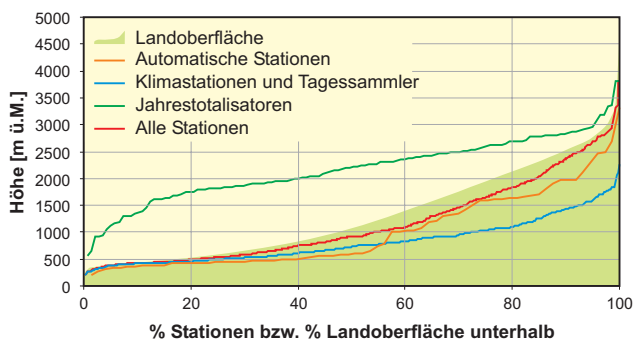


Fig. 2-3: Höhenverteilung von Landoberfläche und Niederschlagsstationen in der Schweiz (Daten: MeteoSchweiz).

2.1.3 Messgeräte und Messfehler

Die genauesten Niederschlagsmessungen sind Punktmessungen. Ein Pluviometer sammelt Regentropfen, Hagelkörner und Schneeflocken, die seine Auffangfläche treffen (200 cm² bei den Regenmessern nach Hellmann und Joss-Tognini). Je nach Intervall der Ablesung werden verschiedene Messgeräte eingesetzt, die sich vor allem in ihrem Fassungsvermögen unterscheiden (vgl. Fig. 2-4 und Fig. 2-5). Pluviographen sind zusätzlich mit einer Vorrichtung zur kontinuierlichen, analogen oder digitalen Aufzeichnung der Niederschläge versehen (vgl. Fig. 2-5 und Fig. 2-6). Die Messgeräte werden in einer Höhe von 1,5 m (2 m im Gebirge, 4 m bei Totalisatoren) über dem Boden und mit genügend seitlichem Abstand zu Bäumen und Gebäuden installiert. Auch sehr windexponierte oder stark abgeschirmte Standorte werden nach Möglichkeit gemieden. Bei tiefen Temperaturen ist ein Betrieb nur noch mit beheizten Messgeräten möglich.

Wie jedes Objekt verändert auch ein Niederschlagsmesser das Windfeld in seiner Nähe. Windgeschwindigkeit und Turbulenzen nehmen zu und lenken vor



Fig. 2-4: Pluviometer (Monatstotalisator nach Hellmann) auf der Alp Gibel (BE), Wildbach-Testgebiet Leissigen des Geographischen Instituts der Universität Bern.



Fig. 2-5: Niederschlagsmessgeräte der ANETZ-Station Rünenberg (BL). Mitte: Pluviograph (Wippe nach Joss-Tognini), rechts: Pluviometer (nach Hellmann).



Fig. 2-6: Niederschlagsmessgeräte im hydrologischen Testgebiet der ETHZ (Rietholz bach, SG); von links nach rechts: Pluviograph (nach Joss-Tognini), Pluviometer (Jahrestotalisator nach Mougins mit Windschutzring), Pluviograph (Belfort-Waage, analoge Datenaufzeichnung), Pluviograph (Belfort-Waage, digitale Datenaufzeichnung).

allem leichtere Tropfen und Schneeflocken vom Messgerät ab. Der sich ergebende Messfehler steigt mit zunehmender Windgeschwindigkeit, weshalb an besonders windexponierten Standorten spezielle Windschutzvorrichtungen angebracht werden (vgl. Fig. 2-6 und Fig. 2-7). Verluste durch Spritzwasser, Verdunstung aus dem Gefäss und Ungenauigkeiten bei der Ablesung sind weitere Fehlerquellen. Insgesamt ist der Messfehler bei Schneefall und in hohen Lagen am grössten. Im Jahresmittel muss damit gerechnet werden, dass Punktmessungen den wahren Niederschlag um bis zu 25 % unterschätzen (vgl. Fig. 2-8). In Einzelfällen kann der Fehler aber auch grösser als 30 % werden.



Fig. 2-7: Pluviograph (Waage, Ott pluvio 250) mit Windschutzvorrichtung im forsthydrologischen Testgebiet Sperbelgraben (BE) der WSL und des Geographischen Instituts der Universität Bern.

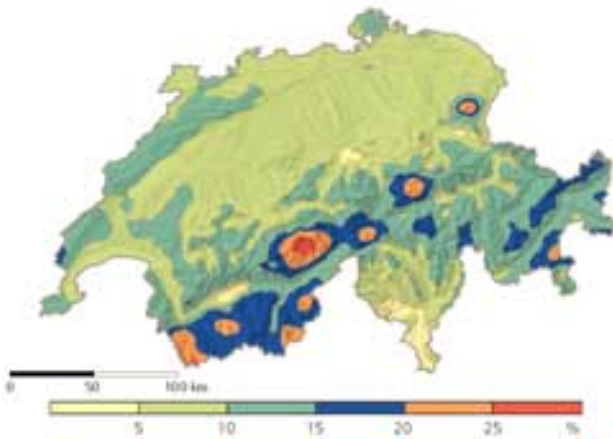


Fig. 2-8: Schätzung des mittleren Fehlers, der bei einer Niederschlagsmessung in diesem Gebiet beim Jahresniederschlag zu erwarten wäre (in % des gemessenen Niederschlags) (nach SEVRUK & KIRCHHOFFER 1992).

2.2 Vom Punkt zur Fläche

Für hydrologische Anwendungen sind die gemessenen Punktniederschläge oft nicht direkt verwendbar. Gesucht sind die in einem bestimmten Gebiet gefallenen Niederschlagsmengen (Gebietsniederschlag). Verschiedene Methoden stehen zur Übertragung der punktuellen Niederschlagsmessungen auf die Fläche zur Verfügung (vgl. Fig. 2-9). Zur Kontrolle dient der Ansatz der Wasserbilanzmethode.

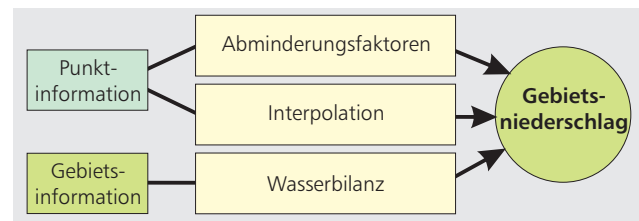


Fig. 2-9: Methoden zur Abschätzung des Gebietsniederschlags.

2.2.1 Abminderungsfaktoren

Punktmessungen sind nur für den Messort und seine nähere Umgebung repräsentativ, je nach Topographie und Niederschlagsprozess für maximal 10–100 km². Die Niederschlagsmenge sinkt mit zunehmender Distanz zum Niederschlagszentrum in charakteristischer Weise (vgl. Fig. 2-10). Die Abnahme, als Abminderungskurve bezeichnet, wird von der Dauer des Ereignisses und der Niederschlagsintensität bestimmt. Schauer (konvektive Niederschläge) sind von kurzer Dauer und überdecken nur kleine Flächen. Landregen (advective Niederschläge) sind grossflächiger, aber weniger intensiv. Regionale Abminderungsfaktoren für die gesamte Schweiz sind in GREBNER et al. (1999) publiziert.

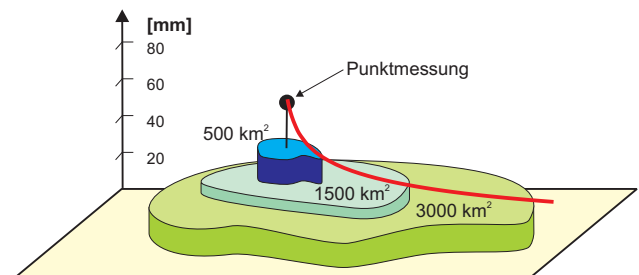


Fig. 2-10: Prinzipskizze der Abminderungskurve für ein dreistündliches Niederschlagsereignis mit Gebietsniederschlagsmengen (nach GREBNER et al. 1999).

2.2.2 Interpolation

Interpolationen versuchen, die Informationslücken zwischen den Messstellen zu schliessen. Die Qualität einer Interpolation hängt dabei in entscheidendem Mass von der Anzahl und der Verteilung der Messstellen und der Wahl der Interpolationsmethode ab.

Die älteste und oftmals recht genaue Methode besteht darin, die Niederschlagsverteilung unter Einbezug der Messstellen, der Topographie und der lokalen klimatischen Verhältnisse subjektiv abzuschätzen und durch Linien derselben Niederschlagshöhe (Isohyeten) darzustellen (vgl. Abschnitt 2.2.4). Objektive Methoden können ebenfalls gute Resultate erbringen, wenn sie den Verhältnissen entsprechend angewendet werden. Die im Folgenden vorgestellte Bestimmung des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet der Reuss (vgl. Fig. 2-11) mit drei gebräuchlichen Methoden (Thiessen-Polygone, Distanzgewichtung und Höhenregression) zeigt, welche Unterschiede sich ergeben können.

Bei der Thiessen-Polygon-Methode wird der Stationswert als repräsentativ für ein Gebiet angesehen, das methodisch bis zur halben Entfernung zu den Nachbarstationen reicht. Die Methode der Distanzgewichtung berücksichtigt alle um einen zu interpolierenden Ort liegenden Stationen, misst aber den nähergelege-

nen mehr Gewicht bei als weiter entfernten. Höhenregressions-Methoden berechnen aus den verfügbaren Stationswerten Höhengradienten, welche dann bei der Niederschlagsinterpolation weiterverwendet werden.

Bei den ersten beiden Methoden wird die Interpolation stark von den im Gebiet liegenden Stationen bestimmt (vgl. Fig. 2-12). Zuverlässige Abschätzungen sind vor allem im flachen Relief möglich, wo Niederschlagsmessungen für ein weites Gebiet repräsentativ sind. In gebirgigen Gegenden sind mit Höhenregressionen berechnete Gebietsniederschläge in der Regel genauer (vgl. Tab. 2-2). Allerdings hängt das Ergebnis stark von der Auswahl der Stationen zur Bestimmung des Niederschlagsgradienten ab, wie das folgende Beispiel zeigt. Der aus den Jahresniederschlägen der Stationen Altdorf, Andermatt und Gütsch berechnete Gradient

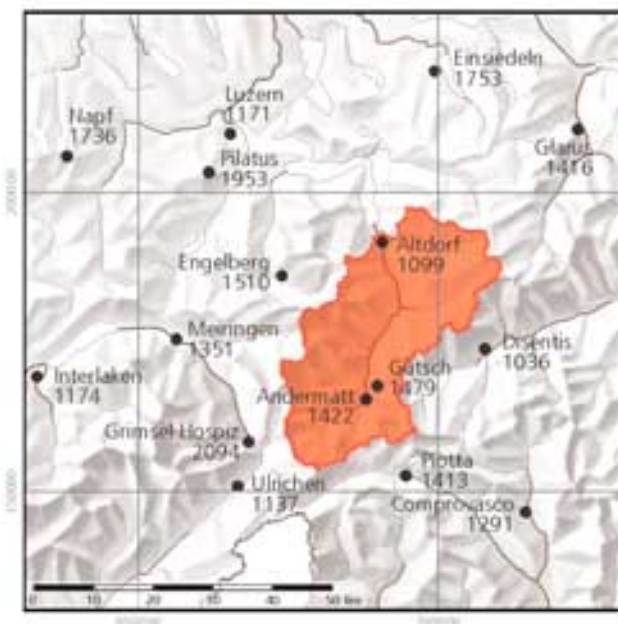


Fig. 2-11: Niederschlagsstationen im Bereich des Einzugsgebiets der Reuss (Abflussmessstation Seedorf): Mittlere Jahresniederschlagssummen in mm der Periode 1961–1990 (Daten: MeteoSchweiz).

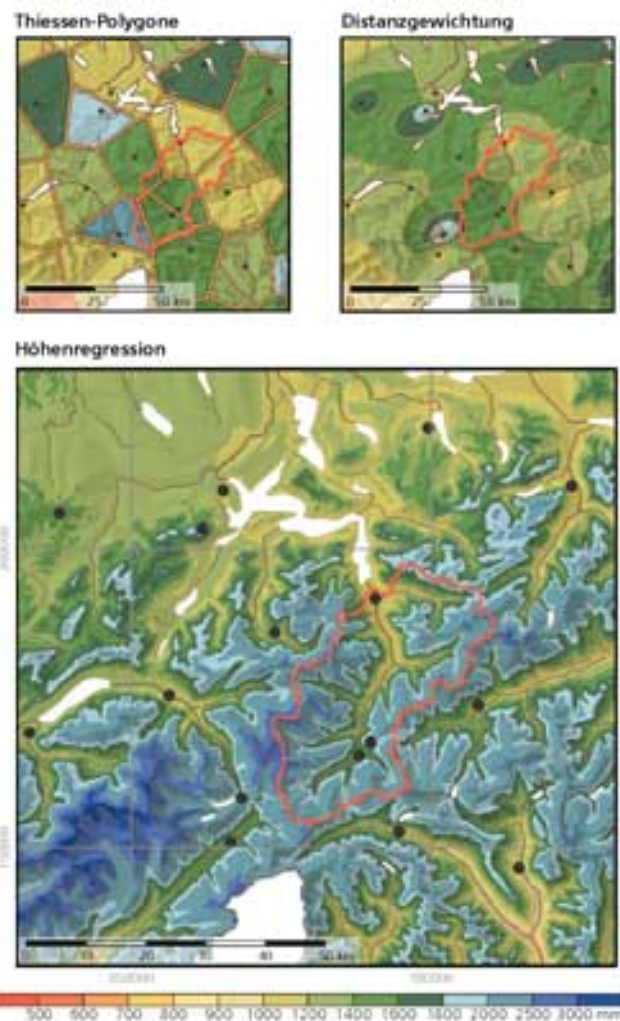


Fig. 2-12: Vergleich dreier Interpolationsmethoden: Räumlich interpolierte Jahresniederschlagssummen, Niederschlagsstationen (Punkte) und das Einzugsgebiet Reuss – Seedorf (rote Linie).

von 21 mm/100 m führt im Einzugsgebiet der Reuss zu einer starken Unterschätzung des Gebietsniederschlags. Ursache dafür ist, dass zwischen den beiden höhergelegenen Stationen Andermatt (1442 m ü.M.) und Gütsch (2287 m ü.M.) kein Gradient mit der Höhe vorhanden ist, da an beiden Stationen annähernd gleich viel Niederschlag gemessen wird (vgl. Fig. 2-11). Verwendet man statt Gütsch die Station Grimsel Hospiz (1980 m ü.M., 2094 mm), resultiert ein Gradient von 60 mm/100 m und damit ein Gebietsniederschlag in der Höhe des Referenzwerts (vgl. Tab. 2-2).

Methode	Jahresniederschlag [mm]
Thiessen-Polygone	1340
Distanzgewichtung	1387
Höhenregression (Altdorf, Andermatt, Gütsch)	1465
Höhenregression (Altdorf, Andermatt, Grimsel)	1981
Referenzwert aus der Wasserbilanz	2000

Tab. 2-2: Vergleich der interpolierten Jahresniederschlagswerte (Periode 1961–1990) für das Einzugsgebiet Reuss – Seedorf mit dem Referenzwert nach SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002a).

2.2.3 Wasserbilanzmethode

Der Wasserhaushalt eines Gebietes wird durch seine Wasserbilanz beschrieben (vgl. Kap. 10). Der gefallene Niederschlag muss restlos aus Abfluss, Verdunstung, Speicheränderung und unterirdischen Zu- oder Abflüssen erklärt werden können. Die Fehler bei der Bestimmung von Abfluss- und Verdunstungswerten sind gegenüber den grossen Unsicherheiten bei der Messung und Interpolation von Niederschlägen im Gebirge relativ klein, in der Regel kleiner als 10 %. Der indirekte Weg über die Wasserbilanz darf damit als genaueste Methode zur Bestimmung von Gebietsniederschlägen im Gebirge gelten (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

2.2.4 Niederschlagskarten

Gesamtschweizerische Niederschlagskarten wurden schon wenige Jahre nach der Gründung des Niederschlagsmessnetzes entworfen. Für die «Schweizerische Flussgebietskarte mit Niederschlagskurven» (WOLF 1871) standen rund 40 Stationen zur Verfügung. Bemerkenswerterweise stimmen die verwendeten Stationswerte trotz der kurzen Messperiode gut mit den Standardwerten der Periode 1961–1990 überein (vgl. Tab. 2-3). Die grossen Distanzen zwischen den Stationen liessen allerdings nur eine grobe Interpolation mit Isohyeten zu (vgl. Fig. 2-13).



Fig. 2-13: Entwicklung der Niederschlagskarten, dargestellt an demselben Ausschnitt (Farbsignaturen haben in jeder Karte eine andere Bedeutung).

In der «Regenkarte der Schweiz» (BROCKMANN 1923) wurden erstmals Daten der Jahrestotalisatoren aus Hochgebirgsregionen verwendet. Das Messnetz umfasste um 1920 bereits mehr als 400 Stationen und ermöglichte eine viel detailliertere Interpolation. Die «Niederschlagskarte der Schweiz» (UTTINGER 1949) basiert auf 230 Bezugsstationen mit Beobachtungsreihen ab 1900. 500 weitere Messreihen, darunter diejenigen von 142 Jahrestotalisatoren, wurden anhand der Bezugsstationen korrigiert und/oder ergänzt und ebenfalls in der Karte verwendet. In Gegensatz zu den vorhergehenden Karten wurden hier bei der subjektiven Interpolation auch Höhengradienten verwendet. Mit der Karte «Mittlere jährliche korrigierte Niederschlags-höhen 1951–1980» (KIRCHHOFER & SEVRUK 1992) wird der Übergang zu objektiven Interpolationsmethoden vollzogen. Rund 400 Stationswerte standen für das kombinierte Verfahren aus Höhenregression und Distanzgewichtung (Kriging) zur Verfügung. Die Unterschiede bei den Stationswerten (vgl. Tab. 2-3) sind in erster Linie auf die vorgängige Korrektur des systematischen Messfehlers zurückzuführen. Eine vereinfachte Version der aktuellsten Karte von SCHWARB et al. (2001a) ist in Figur 2-15 dargestellt.

Autor und Jahr	Periode	Zürich	Einsiedeln
WOLF 1871	1864–1869	1050	1700
BROCKMANN 1923	–	1140	1600
UTTINGER 1949	1901–1940	1070	1680
KIRCHHOFER & SEVRUK 1992	1951–1980	1218	1807
Normwerte (MeteoSchweiz)	1961–1990	1086	1753

Tab. 2-3: Normwerte der Jahresniederschläge in mm im Vergleich mit Werten anderer Perioden und Autoren.

Die Überprüfung verschiedener Niederschlagskarten mit wasserhaushaltlich abgestützten Gebietsniederschlägen zeigt, dass objektive Verfahren (KIRCHHOFER & SEVRUK 1992, SCHWARB et al. 2001a) nicht genauer sind (vgl. Tab. 2-4). Interessanterweise ergibt die Karte von UTTINGER (1949), bei der subjektives Expertenwissen eingeflossen ist, das beste Ergebnis.

Autor und Jahr	Niederschlag	Abweichung
UTTINGER 1949	1461	0
KIRCHHOFER & SEVRUK 1992	1681	15
SCHWARB et al. 2001a	1385	-5
Referenzwert	1458	0

Tab. 2-4: Jahresniederschlagssummen in mm für die Schweiz nach unterschiedlichen Autoren und Abweichung vom Referenzwert aus der Wasserbilanz in % (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

2.3 Niederschlagsverhältnisse

Der durchschnittliche Jahresniederschlag der Schweiz von 1458 mm (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a) sagt nur wenig über die effektiven Verhältnisse innerhalb des Landes aus. Niederschlagsprozesse werden durch die Lage der Gebirge entscheidend beeinflusst. Zwischen Talboden und Gipfelregion, Luv- und Leelage, Alpennord- und Alpensüdseite entsteht eine Vielfalt verschiedenster Niederschlagsklimata.

2.3.1 Jahresniederschläge

Am offensichtlichsten zeigt sich der Einfluss der Gebirge in der Zunahme der Niederschläge mit der Höhe. Auf der Alpennordseite nimmt der Niederschlag im Mittel um rund 70–80 mm pro 100 m Höhe zu. Dieser allerdings nicht sehr straffe Zusammenhang gilt vor allem für die Gebiete unterhalb 1500 m ü.M. (vgl. Fig. 2-14). Aktuelle Niederschlagskarten (SCHWARB et al. 2001a) berücksichtigen den Gebirgseffekt differenzierter. Die abgebildete Karte der Jahresniederschlagssummen (s. Fig. 2-15) verwendet rund 10'000 lokale Gradienten.

Die niederschlagsreichste Zone erstreckt sich entlang des nördlichen Alpenkamms mit einem Maximum in den Berner und Walliser Alpen. Überdurchschnittlich viel Niederschlag erhält zudem der gesamte Kanton Tessin. Die Gebiete mit den geringsten Jahresniederschlagsmengen liegen im Niederschlagschatten der Alpenkämme. Anhand zweier Nord-Süd-Profile lässt sich der Einfluss der Gebirge auf den Niederschlag verdeutlichen (vgl. Fig. 2-15).

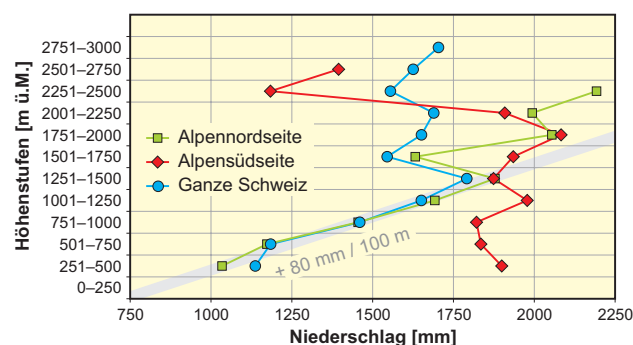


Fig. 2-14: Mittlerer Jahresniederschlag der nach Höhenzonen gegliederten Bilanzierungsgebiete (Periode 1961–1990, nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b), ergänzt mit dem linearen Niederschlagsgradienten (+ 80 mm/100 m) von KIRCHHOFER & SEVRUK (1992).

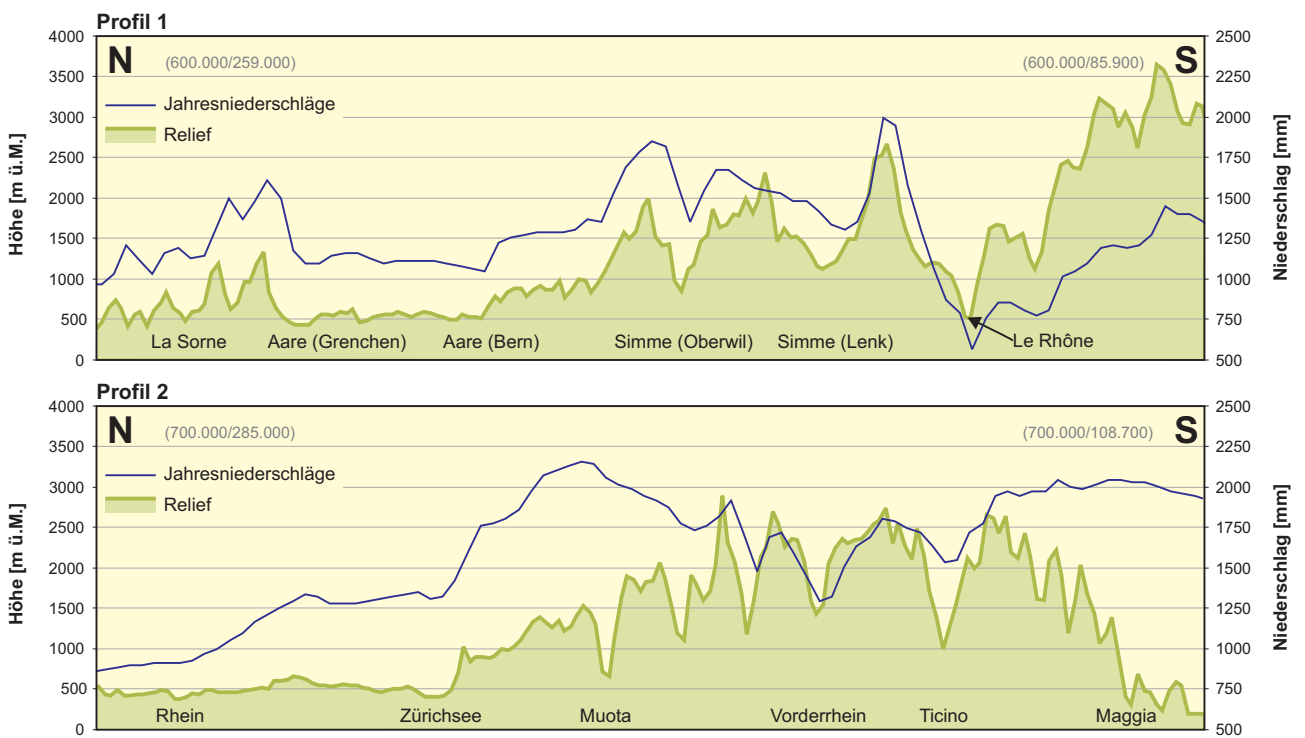
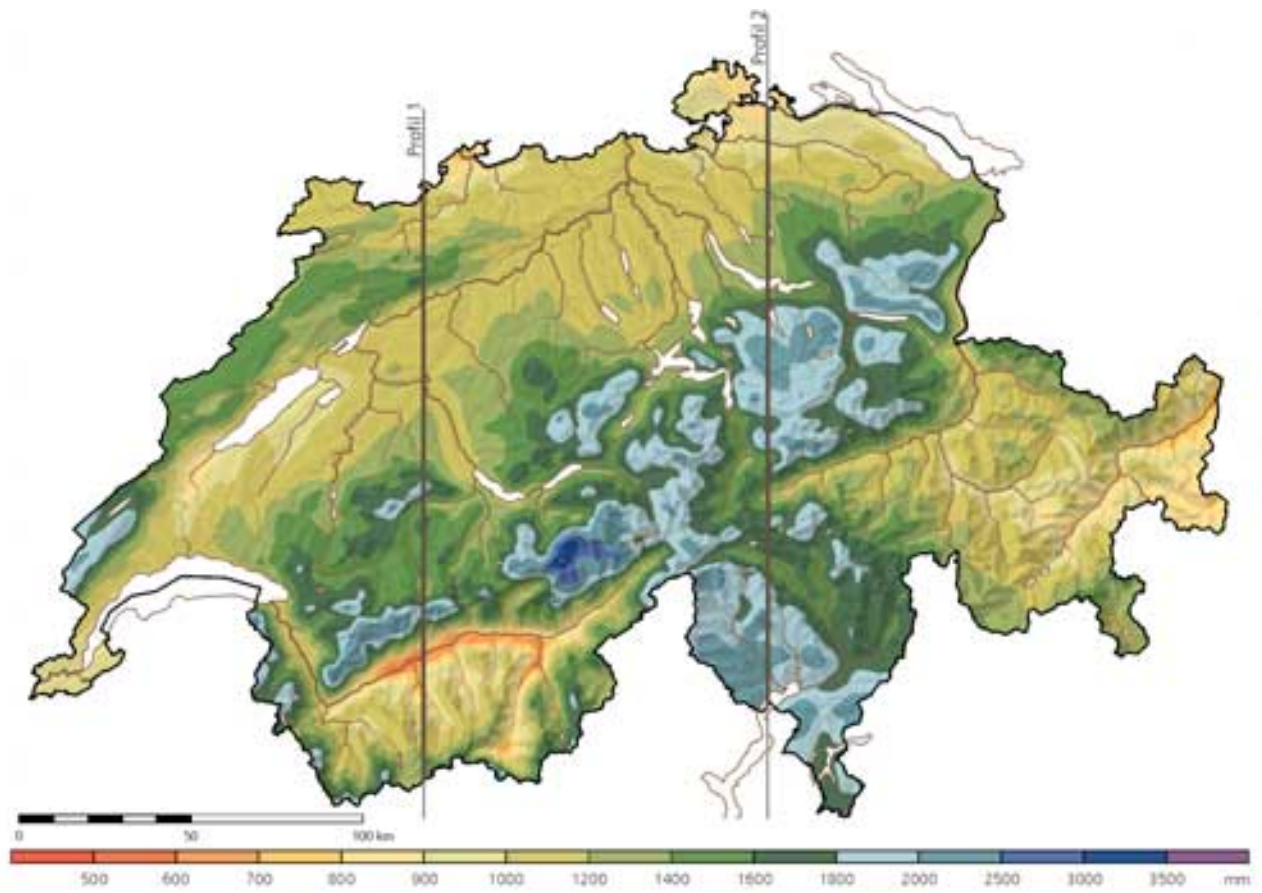


Fig. 2-15: Karte der Jahresniederschlagssummen (Periode 1971–1990) mit zwei Profilschnitten (Daten: SCHWARB et al. 2001a).

2.3.2 Saisonale Niederschlagsverteilung

Die Verteilung der Niederschläge ist in der Schweiz saisonal betrachtet recht ausgeglichen (vgl. Tab. 2-5). Im Winter fällt am wenigsten, im Sommer am meisten Niederschlag. Frühling und Herbst sind gleich niederschlagsreich. Von Juni bis August werden grosse Niederschlagsmengen hauptsächlich durch Schauer verursacht. Die Verteilung gleicht dabei stark derjenigen der Jahresniederschläge mit Spitzenwerten am Alpennordrand und im Tessin (vgl. Fig. 2-16).

Die im Winter vorherrschenden Strömungslagen führen vor allem den im Westen gelegenen Gebieten viel Niederschlag zu (vgl. Fig. 2-17). Die zentralen und öst-

Frühling	Sommer	Herbst	Winter
25	29	25	21

Tab. 2-5: Mittlere saisonale Verteilung der Jahresniederschläge in der Schweiz in % (Periode 1971–1990) (nach SCHWARB et al. 2001b).

lichen Alpengebiete dagegen erreichen in dieser Jahreszeit ihr Niederschlagsminimum. Im Frühling und Herbst führen häufige Anströmungen aus Südwesten zu Starkniederschlägen in den Südalpen.



Fig. 2-17: Jahreszeit mit der höchsten Niederschlagsmenge (Periode 1971–1990) (nach SCHWARB et al. 2001b).

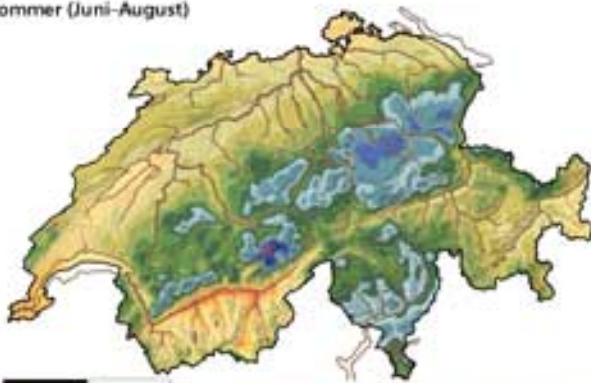
Frühling (März–Mai)



Herbst (September–November)



Sommer (Juni–August)



Winter (Dezember–Februar)



Fig. 2-16: Saisonale Niederschlagssummen (Periode 1971–1990) (Daten: SCHWARB et al. 2001b).

2.4 Extremwerte

Bei Starkniederschlägen ist der Zusammenhang zwischen der Dauer eines Ereignisses und der Menge des gefallenen Niederschlags besonders stark. Niederschlagsextreme werden daher mit Niederschlagsmenge und -dauer oder direkt mit Niederschlagsintensitäten in mm/h angegeben. Trockenperioden werden ausschliesslich durch ihre Dauer zu Extremereignissen.

2.4.1 Starkniederschläge

Die Einstufung als «Starkniederschlag» ist abhängig von der Definition. Als Kriterien dienen Schwellenwerte, eine Anzahl stärkster Ereignisse oder die jährlich höchsten Niederschläge. Für die höchsten, in der Schweiz gemessenen Niederschläge ist eine Unterteilung in Alpennord- und Alpensüdseite sinnvoll (vgl. Fig. 2-18). Starkniederschläge von kurzer Dauer erreichen auf der Alpennordseite höhere Niederschlagsintensitäten. Diese Ereignisse gehen auf einzelne Schauer während der Monate Juni bis September zurück. Starkniederschläge längerer Dauer werden von grossskaligen Wettersystemen bestimmt und können das ganze Jahr hindurch auftreten. Besonders niederschlagsreich sind sie auf der Alpensüdseite (advective Lage), wo Fronten und Tiefdruckgebiete oft einen starken Feuchtetransport aus dem Mittelmeerraum gegen die Südalpen bewirken. Die Niederschlagsintensitäten längerer Dauer (Wochen, Monate) in Figur 2-18 sind aus Niederschlagssummen der angegebenen Dauer berechnet. Allgemein gilt, dass die Intensität mit zunehmender Dauer abnimmt.

Die stärksten, an einem Ort gemessenen Ereignisse werden zu Extremwertserien zusammengestellt und nach ihrer Eintreffenswahrscheinlichkeit klassiert. Gebräuchlich ist die Darstellung der 2,33- und der 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten bestimmter Dauer in Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen (s. Fig. 2-19).

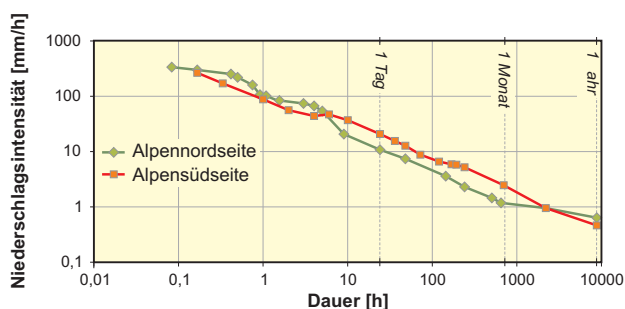


Fig. 2-18: Höchste in der Schweiz bis 1990 beobachtete Niederschläge (nach GEIGER et al. 1991).

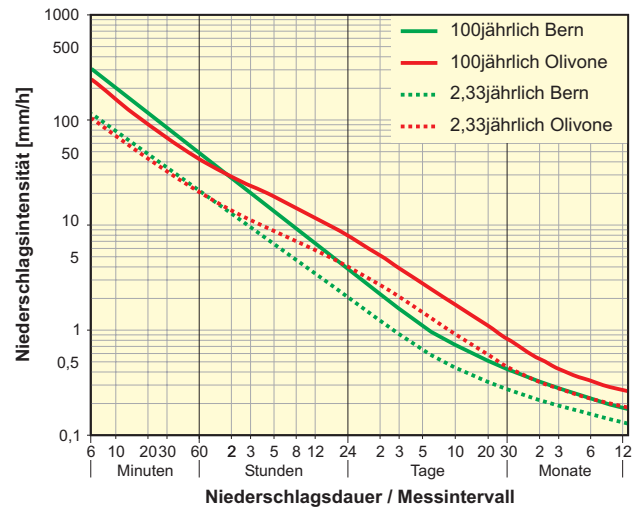


Fig. 2-19: Niederschlags-Intensitäts-Diagramm für Bern und Olivone (TI) (nach GEIGER et al. 1991).

In Form von Karten extremer Punktniederschläge verschiedener Dauer und Wiederkehrperioden stehen diese Informationen flächendeckend zur Verfügung (vgl. Fig. 2-20). Dies ermöglicht eine Abschätzung zu erwartender Starkniederschläge für jede beliebige Stelle der Schweiz.

Die extremsten Niederschlagsintensitäten treten ausser- und voralpin auf. In den Alpen nimmt die Konvektionsleistung und damit die Intensität der Schauer ab. Das Abregnen anströmender, feuchter Luftmassen (Gebirgseffekt) kann dagegen für ergiebige Tagesniederschlagsmengen sorgen. Im Südtessin werden an jährlich rund 10 Tagen Niederschlagsmengen von mehr als

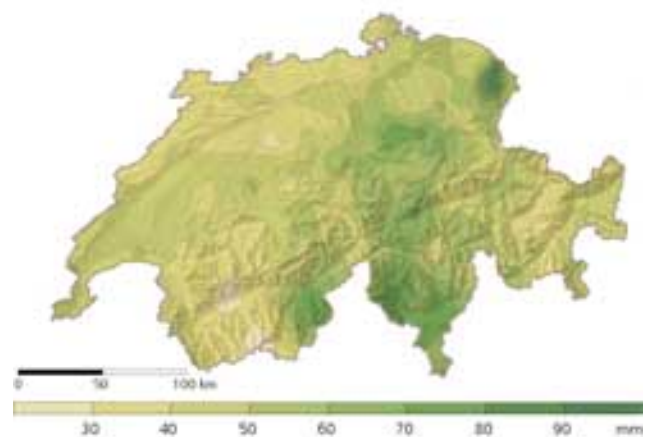


Fig. 2-20: Extreme 100-jährliche Punktniederschläge von 1 Stunde Dauer (nach JENSEN et al. 1997).

50 mm gemessen. Dieselbe Tagesmenge fällt im nördlichen Alpenvorland nur 1 bis 2 mal pro Jahr.

Die hohen Niederschlagsintensitäten während Starkniederschlagsereignissen wirken sich positiv auf die Genauigkeit der Messungen aus. Die Grösse der Regentropfen nimmt zu, so dass diese weniger vom Messgerät abgelenkt werden. Bei den statistisch ermittelten 100jährigen Werten in einem Niederschlags-Intensitäts-Diagramm muss mit einem mittleren Fehler von ± 10 bis 30 % gerechnet werden (GEIGER et al. 1991).

2.4.2 Trockenheit

Zur Identifikation von Trockenperioden eignen sich, nebst dem Abfluss (vgl. Abschnitt 5.2.3), auch rein meteorologische Indizes. Je nach den verfügbaren Daten können niederschlagsarme Perioden oder Trockenperioden bestimmt werden.

Niederschlagsarme Perioden können definiert werden als Zeitraum von mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen, in denen die Tagesniederschlagsmenge weniger als 0,5 mm beträgt. Einzelne Tage mit mehr als 0,5 mm sind in einer längeren niederschlagsarmen Periode möglich. Fällt an einem Tag mehr als 1 mm Niederschlag, wird die niederschlagsarme Periode in jedem Fall als beendet betrachtet (MAURER 1975). Bestimmend für den Wasserhaushalt ist vor allem das Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung. Da die Gefahr von Trockenheit nur dann besteht, wenn deutlich mehr Wasser verdunstet als durch den Niederschlag zugeführt werden kann, ist für eine Bestim-

mung sogenannter Trockenperioden der Einbezug weiterer Daten nötig. Bisher liegen zu den Trockenperioden in der Schweiz keine flächendeckenden Untersuchungen vor. Punktuell Analysen von MÜHLETHALER (2004) zeigen aber, dass Trockenperioden vor allem im Sommerhalbjahr auftreten, wenn die Verdunstung hohe Werte erreicht.

Niederschlagsarme Perioden kommen dagegen in allen Jahreszeiten etwa gleich häufig vor. Pro Jahr können in weiten Teilen der Alpen und des Juras 8 bis 10, im Mittelland und einigen Alpentälern 11 bis 15 und in einzelnen Regionen im Tessin bis zu 18 niederschlagsarme Perioden beobachtet werden (Periode 1961–1989). Addiert man die einzelnen Perioden zur mittleren jährlichen Gesamtdauer, so fallen je nach Region zwischen 68 und 188 Tage in eine niederschlagsarme Periode (vgl. Fig. 2-21) (MÜHLETHALER 2004).

Extreme Trockenheit herrscht in der Schweiz nur selten. Das Jahr 2003 stellt diesbezüglich eine Ausnahme dar. In weiten Landesteilen dauerte die Phase mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen von Februar bis September. Gesamtschweizerisch war vor allem die erste Jahreshälfte aussergewöhnlich niederschlagsarm, in einigen Regionen wurden sogar die tiefsten Werte seit 1901 registriert (vgl. Fig. 2-22). Im 20. Jahrhundert waren die Jahre 1921, 1929 und 1944 zu Beginn ähnlich trocken; noch weniger Niederschlag wurde lediglich in der ersten Jahreshälfte 1976 gemessen. Das Sommerhalbjahr 2003 war im oberen Wallis, im Gotthardgebiet, im Tessin sowie im Bündnerland trockener als im bisher extremsten Sommer 1947 (BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

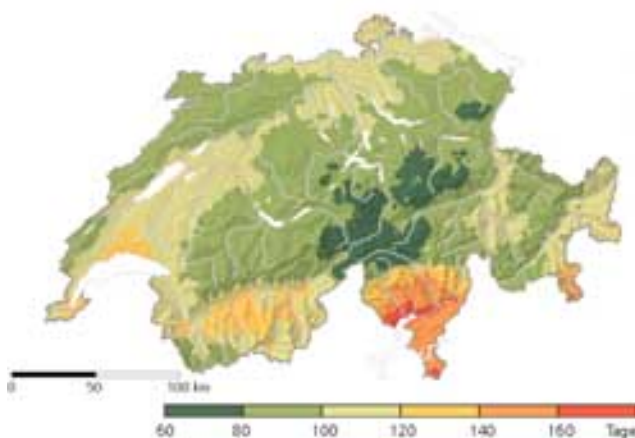


Fig. 2-21: Mittlere jährliche Gesamtdauer niederschlagsarmer Perioden zwischen 1961 und 1989 (nach MÜHLETHALER 2004).

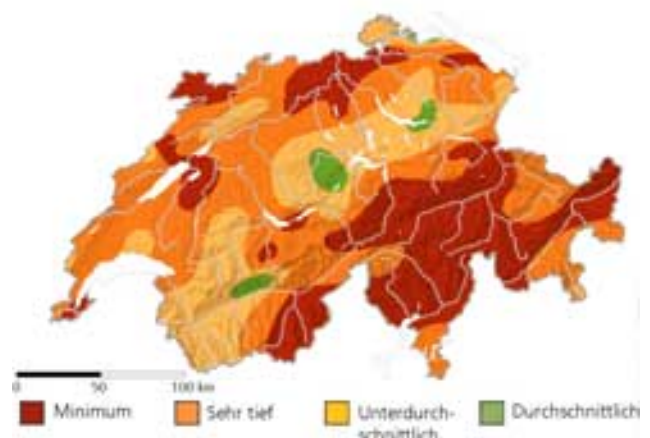


Fig. 2-22: Niederschlagssumme Januar–Juni 2003 verglichen mit den Halbjahressummen seit 1901 (nach ZBINDEN 2003).

2.5 Vertiefende Aspekte

In den vorangehenden Abschnitten wurde meist der flüssige Niederschlag (Regen) als wichtigste Form des Niederschlags thematisiert. Nebst dem Niederschlag in Form von Schnee (vgl. Kap. 3) müssen verschiedene Spezialfälle des Niederschlags beachtet werden: Bestandesniederschlag, Nebelniederschlag und Hagel.

2.5.1 Bestandesniederschlag

Unter einer Vegetationsdecke ist der Niederschlagseintrag in der Regel geringer als im Freiland, da ein Teil des Wassers an den Pflanzen hängen bleibt und den Boden nicht erreicht (Interzeption). Die Höhe der Interzeptionsverluste ist vom Bewuchs, der Dauer und Intensität des Niederschlags sowie den Bedingungen für die Verdunstung abhängig. Der Bestandesniederschlag, also der am Boden messbare Niederschlag, setzt sich aus Stammabfluss, durchfallendem und abtropfendem Niederschlag zusammen (vgl. Fig. 2-23).



Fig. 2-23: Erläuterungsskizze zum Begriff des Bestandesniederschlags.

Figur 2-24 zeigt die Niederschlagsverteilung auf einer bewaldeten, rund 100 m² grossen Testparzelle am 31. August 2003. Im Freiland fallen an diesem Tag 54,4 mm Niederschlag. Der Verlust durch die Interzeption beträgt durchschnittlich 18,4 mm (33,8 %). Einige Niederschlagsmesser stehen unter einer Krautschicht, was die starke Abschirmung einzelner Standorte erklärt. Im umgekehrten Fall kann die Vegetation aber auch zu einer Konzentration des Niederschlags und damit zu höheren Niederschlagsmengen als im Freiland führen. Mit einem Anteil in der Grössenordnung

von 10–50 % des Jahresniederschlags (GEIGER 1985) muss die Interzeption als wichtiger Prozess im Wasserhaushalt vegetationsbedeckter Flächen berücksichtigt werden.

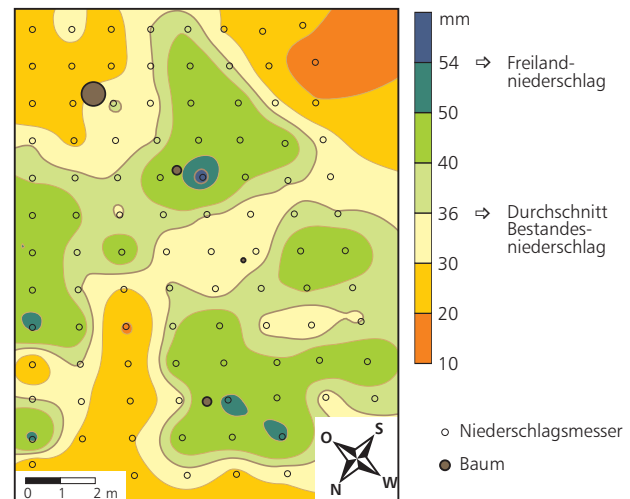


Fig. 2-24: Variabilität des Bestandesniederschlags am 31. August 2003 auf einer Testparzelle im Sperbelgraben (BE) bei einem Freilandniederschlag von 54,4 mm (nach KÖNITZER 2004).

2.5.2 Nebelniederschlag

An exponierten Vegetationsstandorten kommt dem Wassereintrag durch Nebel grosse Bedeutung zu. Mit dem Wind treibende Wassertropfen lagern sich an festen Objekten ab. Eine dichte Vegetation kämmt die Nebeltropfen wirksam aus. Als abtropfender Niederschlag oder Stammabfluss wird der Nebelniederschlag nicht von den normalen Niederschlagsmessnetzen erfasst.



Fig. 2-25: Wald als Nebelfilter, Sperbelgraben (BE) am 8. September 2003.

Nebel ist definiert als die Trübung der Sichtweite aufgrund schwebender Wassertröpfchen. Sobald die horizontale Sichtweite weniger als 1 km beträgt, wird (meteorologisch) von Nebel gesprochen. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Bodennebel oder eine dem Boden aufliegende Wolke handelt. Nebel kommt also überall vor, nicht nur in den typischen Nebelgebieten des Mittellands, wie sie in Figur 2-26 dargestellt sind. Maximale Nebelhäufigkeit ergibt sich in höheren und exponierten Lagen durch das häufige Auftreten von Wolken (vgl. Fig. 2-27). Messungen in nebelarmen, inneralpinen Lagen haben einen zusätzlichen Niederschlagsabsatz aus Nebel von 5–25 % ergeben (TURNER 1985). An windausgesetzten Stellen in den Hauptnebelzonen muss noch mit weit höheren Werten gerechnet werden.

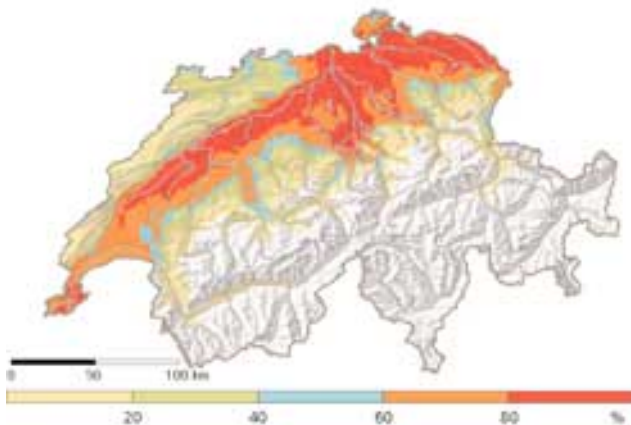


Fig. 2-26: Mittlere Häufigkeit des Auftretens von Nebel im Alpenvorland (prozentuale Auftrittshäufigkeit auf 80 ausgewerteten Satellitenbilder der Periode 1989–1991, Winterhalbjahr) (nach BACHMANN & BENDIX 1993).

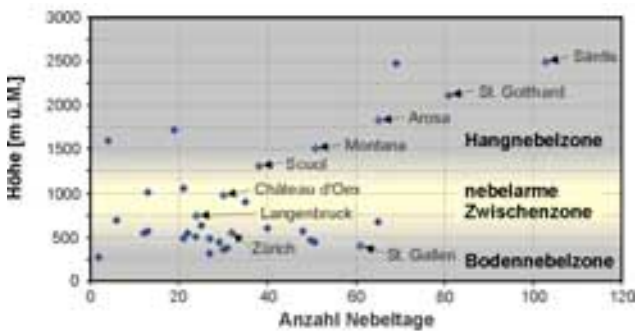


Fig. 2-27: Mittlere Nebelhäufigkeit im Winterhalbjahr von 34 Stationen (Periode 1970–1975) mit vereinfachter Zoneneinteilung (nach TROXLER & WANNER 2000).

2.5.3 Hagel

Die Schweiz gehört zu den Ländern mit der grössten Hagelgefahr Europas. Gewitterstürme mit Hagel verursachen jährlich Schäden in zweistelliger Millionenhöhe (2003: 46 Mio Franken). Innerhalb der Schweiz ist die Gefahr von Hagelgewittern unterschiedlich gross. Am stärksten betroffen sind die Voralpengebiete beidseits der Alpen (vgl. Fig. 2-28). Als Hagel werden Eiskörner mit einem Durchmesser grösser als 5 mm bezeichnet. Hagelgewitter sind regionale Ereignisse von hoher Niederschlagsintensität. Durch das grosse Volumen der Hagelkörner kann die Aufnahmekapazität der Messgeräte überschritten werden, was zu einer Verfälschung der Niederschlagsmessung führt.

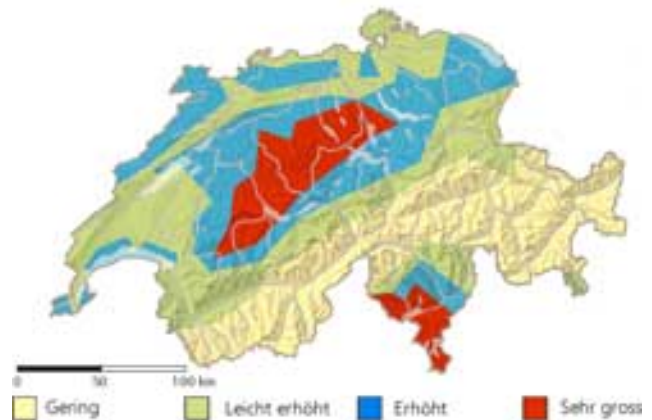


Fig. 2-28: Gefahr von Hagel (Periode 1956–1999) (Quelle: Schweizerische Hagel-Versicherungs-Gesellschaft).



Fig. 2-29: Hagelschäden in Aathal-Seegräben (ZH) am 12. August 2004.

2.6 Niederschlag Schweiz – Europa – Welt

Die Schweiz wird oft als «Wasserschloss Europas» bezeichnet. Das legt die Vermutung nahe, dass hier mehr Niederschlag fällt als in den umgebenden Ländern. Wie steht die Schweiz im europäischen und im globalen Vergleich?

Niederschlag entsteht durch Abkühlung von relativ wasserdampfreicher Luft. Die wichtigsten Wasserdampfquellen sind die Weltmeere. Von dort werden die feuchten Luftmassen durch atmosphärische Zirkulationssysteme auch über die Kontinente transportiert, wo sie vor allem an den Gebirgsbarrieren wieder abregnen. Die niederschlagsreichsten Gebiete der Erde liegen daher an den Kontinentalrändern in der Nähe der Hauptverdunstungsquellen. Hohe Niederschlagsmengen im Innern der Kontinente können an Gebirgsmassiven und über Feuchtgebieten auftreten (vgl. Fig. 2-30).

Rekordniederschläge in der Schweiz erreichen bei Ereignissen kurzer Dauer maximal die Hälfte der Weltrekordmengen, über längere Zeiträume rund ein Viertel (vgl. Fig. 2-31). Das bedeutet allerdings nicht, dass in den Alpen keine höheren Niederschlagsintensitäten möglich wären. Die Weltrekordmenge für die Dauer von drei Stunden von 635 mm wurde am 16.7.1913 in der Steiermark (Österreich) gemessen.

Innerhalb Europas nehmen die Gebirgsregionen und v.a. die Alpen eine Sonderstellung ein. Nicht weit von drei Meeren (Atlantik, Mittelmeer und Nordsee) und in der Westwindzone gelegen, wird reichlich feuchte Luft gegen die Alpen geführt. Die hohen Niederschläge bilden die Voraussetzung für ihren Wasserreichtum (vgl. Tab. 2-6). Doch erst der Anteil des Niederschlags, der zum Abfluss gelangt, entscheidet darüber, ob die Alpen und damit die Schweiz der Bezeichnung «Wasserschloss» gerecht werden (vgl. Kap. 10.3).

	Erde	Landflächen	Europa	Alpen
Niederschlag	973	746	780	1460

Tab. 2-6: Mittlere Jahresniederschlagsmengen in mm (Quellen: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990; MOUNTAIN AGENDA 1998).

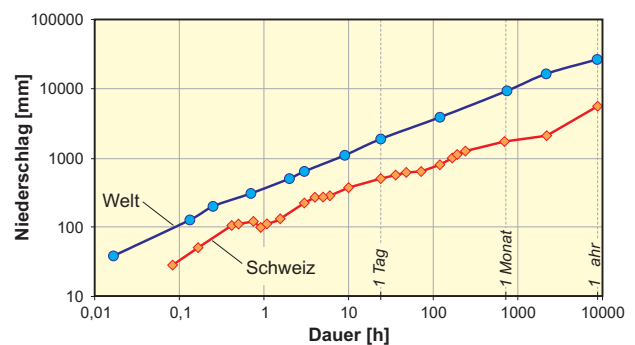


Fig. 2-31: Vergleich beobachteter Niederschlagsrekorde: Schweiz – Welt (nach GEIGER et al. 1991).

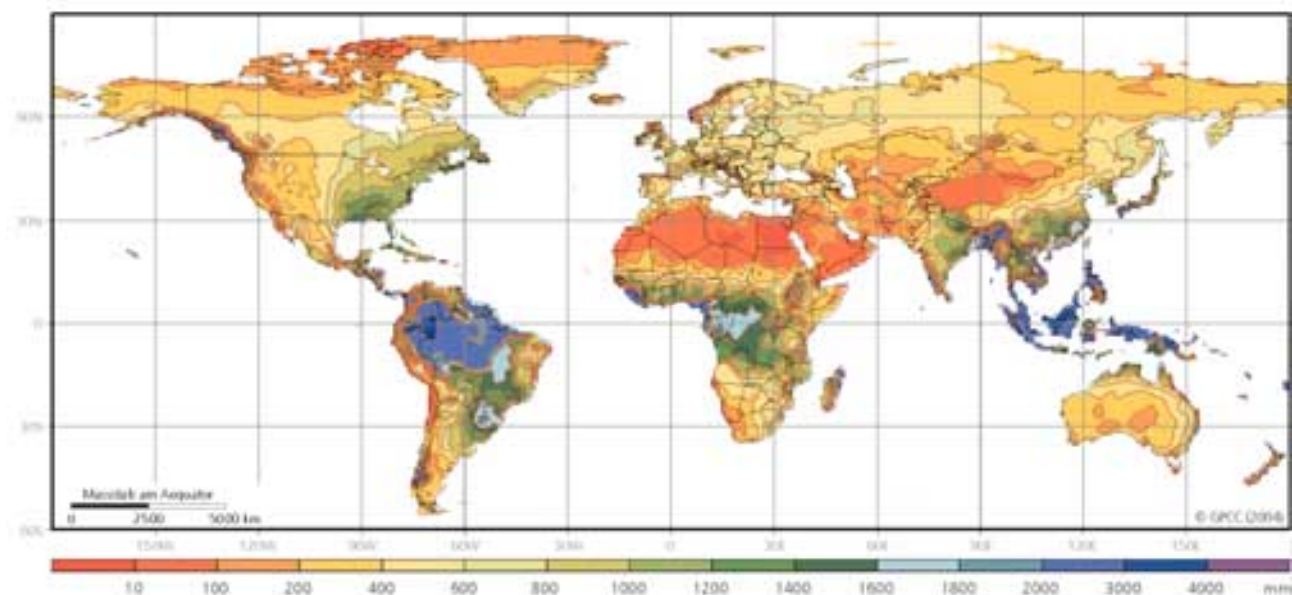


Fig. 2-30: Globale Verteilung der Jahresniederschlagssummen 2003 (Daten: www.dwd.de).

2.7 Entwicklung und Aussichten

Die beobachtete Klimaänderung gibt Anlass zur Rück- und Vorausschau. Haben sich die Niederschlagsmengen im letzten Jahrhundert verändert und auf welche müssen wir uns in Zukunft einstellen?

In der Schweiz wird vor allem im Winter eine signifikante Niederschlagszunahme gemessen (vgl. Fig. 2-32). In den übrigen Jahreszeiten und bei den Jahressummen (vgl. Fig. 2-33) sind keine signifikanten Trends feststellbar. Verändert hat sich die Niederschlagsintensität und nicht die Anzahl niederschlagsbringender Wetterlagen. Zugenommen hat dagegen die Häufigkeit derjenigen Wetterlagen, die typischerweise mit Hagelniederschlag verbunden sind (BADER &

KUNZ 1998). Eine leichte Zunahme zeichnet sich auch bei der Dauer von Trockenperioden ab. Gesicherte Trends für das 20. Jahrhundert liegen bislang für die alpinen Stationen Davos und Säntis vor (MÜHLETHALER 2004).

Für die Zukunft muss mit einem Anstieg der kontinentalen Sommertrockenheit und der damit verbundenen Dürregefahr gerechnet werden. Klimasimulationen (vgl. Fig. 2-34) zeigen, in welchen Regionen möglicherweise eine Zu- oder Abnahme der mittleren Jahresniederschlagsmengen erwartet werden muss. Die für Europa berechnete Zunahme bei der mittleren Niederschlagsintensität und die Häufung intensiverer Tagesniederschläge können für die Schweiz zurzeit noch nicht bestätigt werden (OCCC 2003).



Fig. 2-32: Signifikante Niederschlagsänderung für die Wintermonate während der Periode 1901–1990 (nach WIDMANN & SCHÄR 1997).

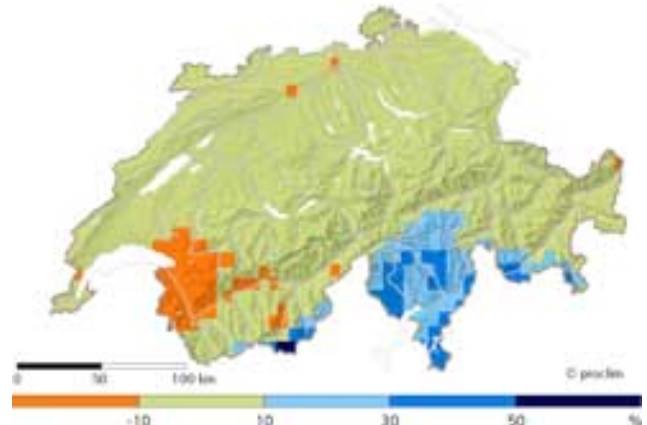


Fig. 2-34: Prozentuale Abweichung des mittleren Jahresniederschlags um 2050 vom Durchschnitt der Periode 1931–1980 bei einer verdoppelten CO₂-Konzentration der Atmosphäre. Klimasimulation des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (ECHAM1-T21/LSG-GCM) (nach www.proclim.ch).

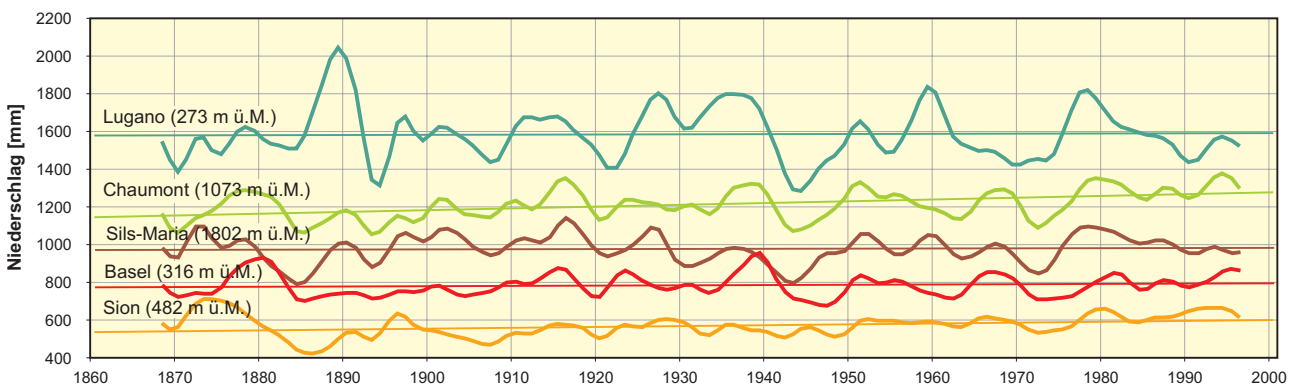


Fig. 2-33: Geglättete Jahressummen der Niederschläge und lineare Trends ausgewählter Stationen. Schwach signifikante Zunahmen zeigen die Stationen Chaumont und Sion (Daten: MeteoSchweiz).

3 Schnee und Eis

Kennziffern

Grösste Neuschneemenge in 24 Stunden	160 cm	Simplon (VS), 15.3.1980	Quelle: SLF
Grösste je gemessene Schneehöhe	690 cm	Grimsel Hospiz (BE), 3.5.1970	Quelle: SLF
Mittlere Anzahl Tage mit Schneedecke auf 500 m ü.M.	48 Tage	Zürich	Quelle: MeteoSchweiz
Mittlere Anzahl Tage mit Schneedecke auf 2500 m ü.M.	287 Tage	Weissfluhjoch (GR)	Quelle: SLF
Mittlere Anzahl Schadenlawinen pro Winter	138		Quelle: SLF
Anzahl Schadenlawinen im Jahr 1999	1200		Quelle: SLF
Gletscher in den Schweizer Alpen (1973/2000)	ca. 2000	(registrierte Gletscher)	Quelle: MAISCH et al. 1999, 2004
Gletscherbedeckung der Schweiz (1850)	1800 km ²	(4,4 % der Fläche der Schweiz)	Quelle: MAISCH et al. 1999
Gletscherbedeckung der Schweiz (1973)	1300 km ²	(3,1 % der Fläche der Schweiz)	Quelle: MAISCH et al. 1999
Gletscherbedeckung der Schweiz (2000)	1050 km ²	(2,5 % der Fläche der Schweiz)	Quelle: MAISCH et al. 2004
Gletscherschwund (1850–1973)	500 km ²		Quelle: MAISCH et al. 1999
Gletscherschwund (1850–2000)	750 km ²		Quelle: MAISCH et al. 2004
Gletschervolumen (1850)	ca. 110 km ³		Quelle: MAISCH et al. 2004
Gletschervolumen (1973)	ca. 75 km ³		Quelle: MAISCH et al. 2004
Gletschervolumen (2000)	ca. 55 km ³		Quelle: MAISCH et al. 2004
Längster Gletscher (2003)	23,95 km	Grosser Aletschgletscher	Quelle: GK/SANW & VAW/ETHZ 2003
Gletscherschwund im Jahr 2003	> 5 %	(Volumen)	Quelle: HAEBERLI et al. 2004

3.1 Bedeutung des Schnees

Weite Teile der Schweiz liegen während des Winterhalbjahres unter einer Schneedecke. Die festen Niederschläge bilden im Rahmen des Wasserkreislaufes eine bedeutende temporäre Rücklage. Die Dauer dieser Speicherung ist sehr unterschiedlich: Während der Rückhalt im Mittelland vielleicht Wochen, Tage oder gar nur Stunden anhält, dauert die Speicherung in den Alpen meist Monate. Im Hochgebirge kann der Schnee zu festem Gletschereis umgeformt und so über Jahre hinweg gespeichert werden (vgl. Kap. 3.7).

Der Schnee beeinflusst den Lebensraum des Menschen. Schneemassen können im Gebirge Verkehrswege versperren und ganze Transitachsen lahm legen. Schneelawinen können Siedlungen gefährden, Strassen verschütten und auch am Schutzwald grosse Schäden anrichten. Andererseits ist eine geschlossene Schneedecke eine wesentliche Voraussetzung für den Wintertourismus. Zudem ist eine schützende Schneedecke im Jahreszyklus vieler (Gebirgs-) Pflanzen überlebenswichtig.

Der systematischen Messung des Schnees und seiner Eigenschaften kommen vielfältige Bedeutungen zu. Mit langen Messreihen von Schneeparametern lassen sich Aussagen über mittlere und extreme Verhältnisse sowie über klimatische Veränderungen machen. Schneeuntersuchungen sind auch von praktischem Nutzen etwa in der Wetterprognose, bei der Lawinewarnung oder bei der hydrologischen Abflussmodellierung.

3.2 Entwicklung der Messnetze

Früheste Schneemessungen reichen bis ins 18. Jahrhundert zurück. Mit der Zeit entwickelte sich ein Netz von Stationen, von denen die längsten mittlerweile über tägliche Schneemessungen von mehr als 100 Jahren verfügen, so zum Beispiel die Station am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium in Davos (1560 m ü.M.). Die Daten aller Stationen werden am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) gesammelt und ausgewertet.

Die Geschichte der Datenerhebung von Schneeparametern ist stark mit der Entwicklung des SLF verbunden. Im Herbst 1936 nahm ein siebenköpfiges Forscherteam in einer Holzbaracke auf dem Weissfluhjoch (Kt. Graubünden) seine Arbeit auf. Zur gleichen Zeit wurde die erste spezifisch forschungsbezogene Schneemessstation auf dem Versuchsfeld des SLF etwas unterhalb der Bergstation der Davoser Parsennbahnen auf einer Höhe von 2540 m ü.M. eingerichtet. Mit dem Aufbau des Lawinendienstes der Armee Anfang der Vierzigerjahre folgten weitere Stationen wie z.B. Trübsee oder Andermatt.

1942 wurde das SLF offiziell gegründet und auf dem Weissfluhjoch wurde ein Institutsgebäude errichtet. Der verheerende Lawinenwinter 1950/51, der in der Schweiz gegen hundert Todesopfer forderte, war Anlass, die Forschung praxisbezogen auszurichten. In der Folge wurde ein Messnetz mit Messstellen (MS) und Vergleichsstationen (VG) errichtet. Die Daten dieser konventionellen Stationen sind in den Winterberichten

(SLF 1936–1998) publiziert. Zur Erhebung von Schnee- und Meteodaten aus abgelegenen und hochalpinen Regionen wurden zu Beginn der Neunzigerjahre in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz die ersten schnee-relevanten automatischen Stationen (ENET) entwickelt. Speziell für die Lawinenforschung wird seit 1996 das IMIS-Messnetz (Interkantonales Mess- und Informationssystem, s. Fig. 3-1) eingerichtet.

Die Messdaten der verschiedenen Messnetze (vgl. Tab. 3-1 und Fig. 3-3) werden am SLF gesammelt, ausgewertet, analysiert und archiviert. Im Weiteren werden Schneeparameter auch von kantonalen und privaten Institutionen (z.B. Rhätische Bahn, Kraftwerke) erhoben.



Fig. 3-1: IMIS-Schneestation im Unterwallis. Die Station «Donin du Jour» (2390 m ü.M.) liegt im Vallée de la Sionne und ist seit 1998 in Betrieb.

3.3 Grundlagen bei der Erhebung von Schneedaten

Den Schneemessungen liegt ein bei naturwissenschaftlich Erhebungen allgemein übliches Messprinzip zugrunde. Es geht im Wesentlichen darum, festzulegen wo (Station), wann (Zeit), was (Parameter) von relevanter Bedeutung ist. Für die Schneemessungen hat sich das nachfolgend kurz beschriebene System als nützlich erwiesen. Mit den Kommunikationsmöglichkeiten der letzten Jahre sind die Messnetze zu Informationssystemen ausgebaut worden (RUSSI et al. 2003).

3.3.1 Das Basisdreieck Station – Zeit – Parameter

Der Messnetzaufbau richtet sich im Wesentlichen nach den Wechselbeziehungen im Basisdreieck Station – Zeit – Parameter (vgl. Fig. 3-2). Anzustreben ist ein möglichst dichtes Messnetz, an dem in zeitlich kurzen Abständen alle relevanten Parameter gemessen werden.

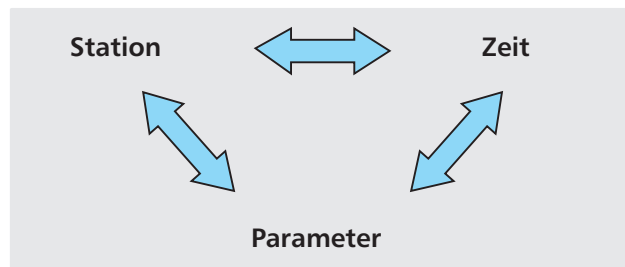


Fig. 3-2: Das Basisdreieck bei naturwissenschaftlichen Beobachtungen.

Station

Stationen sind so anzulegen, dass sie ein möglichst grosses Gebiet repräsentieren. Zum Beispiel sollte die Schneeverfrachtung durch den Wind an der Messstation möglichst ausgeschlossen werden können. Wichtig sind ebenso ausgeglichene Strahlungs- und Abschattungsverhältnisse. Deshalb werden Schneemessstationen nicht in Mulden oder auf Kuppen, sondern in windgeschützten Flachfeldern installiert.

Man unterscheidet zwischen konventionellen (von einem Beobachter betreuten) und automatischen (mit Sensoren ausgerüsteten, autonomen) Stationen.

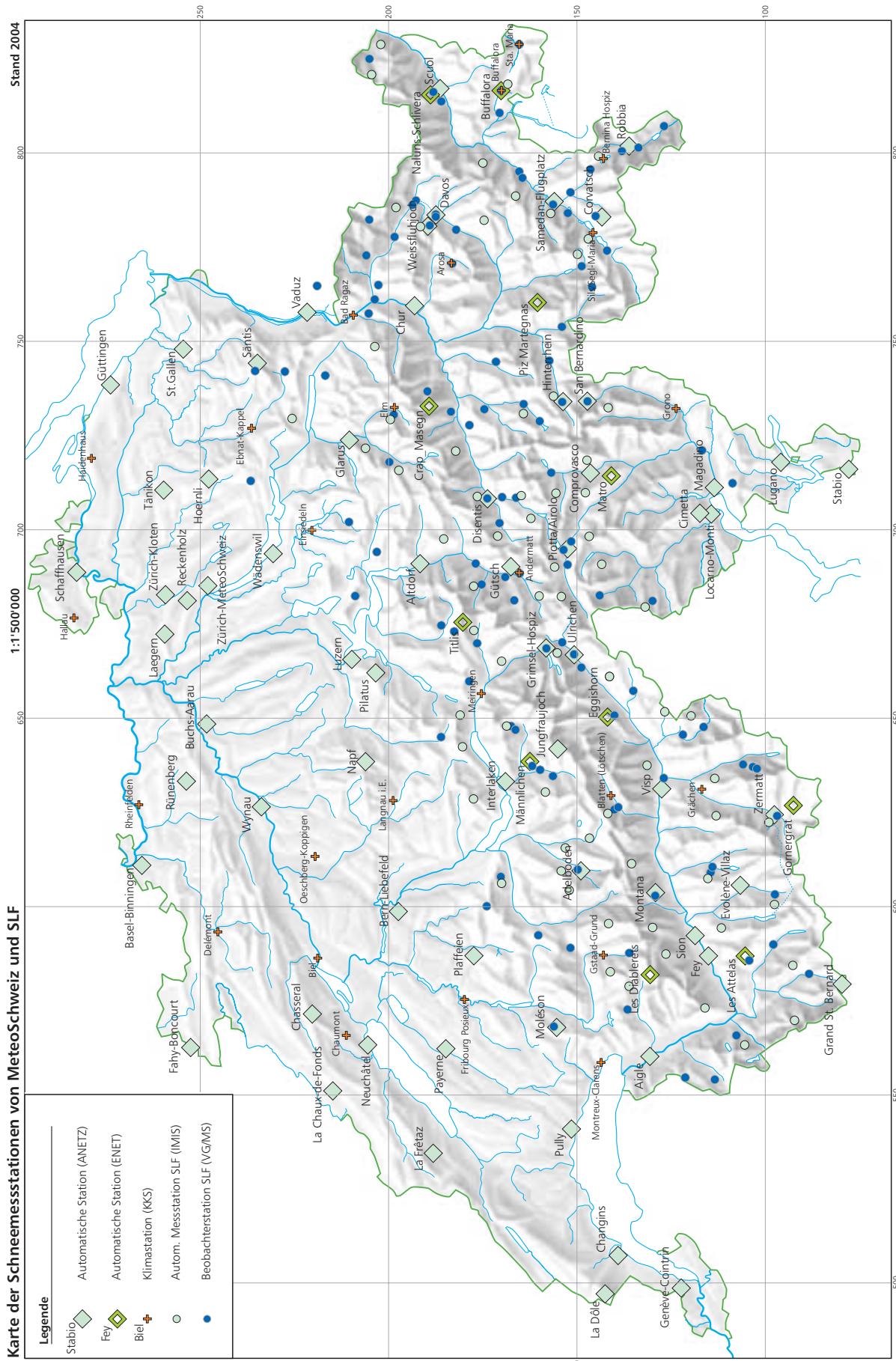


Fig. 3-3: Karte der Schnee-Messtationen von MeteoSchweiz und SLF (Daten SLF).

Da die konventionellen Stationen manuell betrieben werden, ist ihre Lage an Siedlungen gebunden. Nur vereinzelt werden solche Messstationen im Hochgebirge in der Nähe von Bergbahnen und Kraftwerken unterhalten. Speziell für die Lawinenprognose sind aber möglichst flächendeckende Schneeeinformationen auch aus Höhenlagen und Expositionen der potentiellen Hauptanrisszonen von Lawinen, also oberhalb von rund 2000 m ü.M., von grosser Wichtigkeit. Mit der Entwicklung von zum Teil solarbetriebenen, automatischen Messstationen im Hochgebirge, welche seit 1993 die gemessenen Daten über Funk und Telefon übermitteln, konnten Lücken im Messnetz geschlossen werden.

Zeit

An den konventionellen Schneemessstationen werden die Schneeparameter von Anfang Oktober bis Ende Mai einmal täglich jeweils um ca. 8 Uhr gemessen. Seit 1997 erfolgen an ausgewählten Stationen Zusatzmessungen um 13 Uhr. Die automatischen Stationen sind dauernd in Betrieb; ihre Messungen werden zu halbstündlichen Mittelwerten zusammengefasst.

Parameter

Die beiden wichtigsten Parameter sind die Schneehöhe (HS) und der Schneeniederschlag in Form von Neuschnee (HN). Zusätzlich werden weitere Parameter gemessen etwa der Wasserwert des Neuschnees, Schnee- und Schneeoberflächentemperaturen, Schneebeschaffenheit, Einsinktiefe, aber auch Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftfeuchtigkeit und Strahlung.

An den konventionellen Stationen werden ausserdem nach einem vereinfachten Code Wetterbeobachtungen

durchgeführt. Die festgestellten Lawinen werden erhoben; eine Einschätzung der Lawinengefahr wird vorgenommen und im vierzehntägigen Rhythmus wird ein Schneeprofil untersucht.

3.3.2 Messgeräte und -methoden

Schneehöhe (HS)

Zur Bestimmung der Schneehöhe auf den konventionellen Stationen (MS, VG, KKS) eignen sich graduierte Stangen oder Latten mit 1-cm-Einteilung, an welchen die Schneehöhe abgelesen werden kann (Pegelmessung). Dasselbe gilt für die ANETZ-Stationen von MeteoSchweiz: Obwohl es sich um automatische Stationen handelt, werden die Schneeparameter hier manuell abgelesen.

Die übrigen automatischen Stationen (IMIS, ENET) messen die Totalschneehöhe mittels der Laufzeit eines Ultraschall-Wellenpaketes vom Sender, der lotrecht über der Schneedecke montiert ist, zur Schneeoberfläche und zurück (vgl. Fig. 3-1). Der mittlere Fehler beträgt dabei 2 bis 3 cm.

Schneeniederschlag (HN)

Die Neuschneemenge wird mit dem Neuschneebrett erhoben: Jeden Morgen erfolgt der Abstich mit dem Doppelmeter. Anschliessend wird das Brett gereinigt und wieder auf die ungestörte Schneeoberfläche gelegt. Aus der Differenz zweier Pegelablesungen darf nicht auf den Schneeniederschlag geschlossen werden, da die Neuschneeaufgabe eine nicht zu vernachlässigende Setzung der Gesamtschneedecke bewirkt. Die Direktmessung der Neuschneemenge an den automatischen Stationen ist noch nicht möglich.

Netz	Auflösung	Anzahl Stationen	Parameter
MS Messstelle (SLF)	Tageswerte	35	Schneehöhe, Neuschneehöhe
VG Vergleichsstation (SLF)	Tageswerte	78	Schneehöhe, Neuschneehöhe, Wasserwert des Neuschnees, Wetterbeobachtungen, Schneeoberflächen- und Schneetemperatur, Einsinktiefe, Oberflächenbeschaffenheit, Lawinenbeobachtungen und -beurteilung
IMIS Interkantonales Mess- und Informationssystem (SLF)	30-Minuten-Intervalle	71	Schneehöhe, Luft- und Schneetemperatur, Schneeoberflächentemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftfeuchtigkeit, Strahlung
ENET Automatische Station (SLF)		11	Luftfeuchtigkeit, Strahlung
KKS Konventionelle Klimastation (MeteoSchweiz)	Tageswerte	26	u.a. Schneehöhe, Neuschneehöhe
ANETZ Automatisches Messnetz (MeteoSchweiz)		67	
Total		288	

Tab. 3-1: Messstationen mit Schneedaten von SLF und MeteoSchweiz (Stand 2004).

Wasseräquivalent der Schneedecke

Vor allem für hydrologische Analysen interessiert die Frage, wie hoch die Wassersäule einer Schneedecke wäre, wenn man den Schnee schmelzen würde. Die gebräuchlichste Methode zur Bestimmung des Wasserwertes ist der Schneeausstich mit einem Zylinder aus Aluminium. Die Sondenrohre sind typischerweise 20 bis 50 cm lang und haben eine Grundfläche von 20 bis 70 cm². Das Wasseräquivalent wird aus Volumen und Gewicht des Schneeinhalts berechnet. Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung des Schneewasserwertes sind Druckkissen, Neutronensonden und umfassende Mikrowellensysteme.

Schneetemperaturen

Die Messung erfolgt mit einem Thermometer. Die Schneetemperatur wird 10 cm unter der Schneeoberfläche gemessen, wobei das Thermometer horizontal eingeführt und nach einer Anpassungszeit von rund einer Minute abgelesen wird.

Schneeprofil

Die Beschreibung der Eigenschaften der Schneeschichten in der Schneedecke sind vor allem für die Beurteilung der Lawinengefahr und für schneehydrologische Berechnungen von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund werden von ausgebildeten Beobachtern alle 14 Tage sogenannte Schneeprofil-aufnahmen gemacht, welche aus einem Ramm- und einem Schichtprofil bestehen.

Die Rammsonde liefert eine kontinuierliche Härtemessung über die gesamte Schneedecke. Da es sich dabei um eine Messung mit einem geeichten Messinstrument handelt, sind Rammprofile direkt und quantitativ miteinander vergleichbar.

Beim Schichtprofil muss ein Schneeschacht ausgehoben werden. An der lotrechten Profilwand werden die folgenden Untersuchungen vorgenommen:

- Die Schneetemperaturen werden im obersten Meter jeweils in Abständen von 10 cm, darunter in Abständen von 20 cm gemessen.
- Die Schichtgrenzen werden festgelegt. Dies geschieht entweder durch die Bezeichnung der sichtbaren Grenzen (Helligkeit, vgl. Fig. 3-4) oder aufgrund von Härte- und Konsistenzunterschieden.
- Jeder Schicht werden in codierter Form die Schneehärte, die dominierende Kornform, der mittlere Korndurchmesser und die Feuchte zugeordnet.
- Der Wasserwert der Gesamtschneedecke wird gemessen.

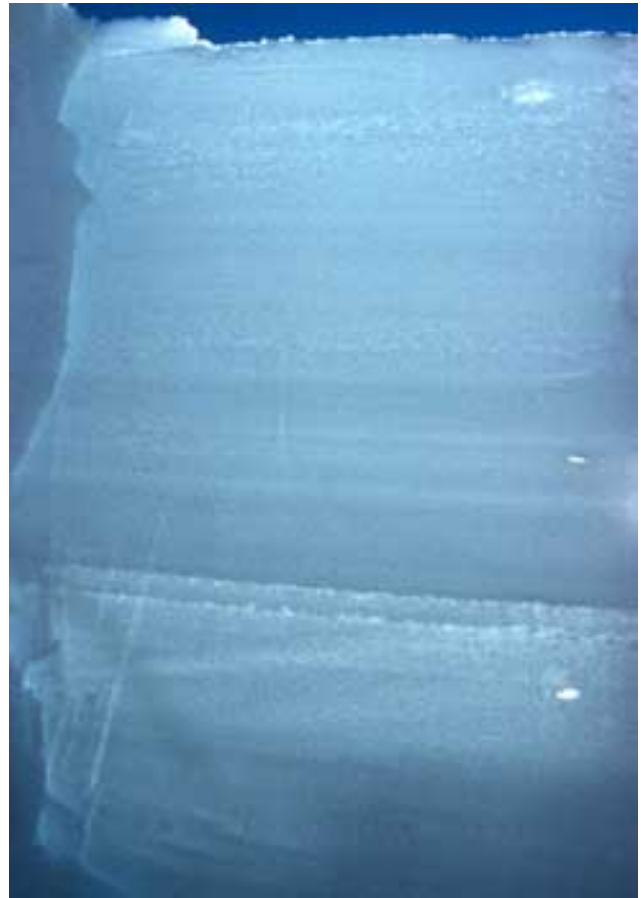


Fig. 3-4: Durchscheinendes Schneeprofil. Die einzelnen Schneeschichten sind gut sichtbar.

Mit dem neuentwickelten «SnowMicroPen» können die Schichteigenschaften noch genauer bestimmt werden: Ein Stab mit Metallspitze wird langsam in den Schnee getrieben. Die für die Eindringtiefe von vier Mikrometern benötigte Kraft wird gemessen und im Computer registriert. Auch schwache, dünne Schichten, die für die Lawinenauslösung oft von grosser Bedeutung sind, können mit dem SnowMicroPen ausgeschieden werden (PIELMEIER 2003).

Lawinenbeobachtungen

Die Beobachter melden die in ihrem Gebiet abgegangenen Lawinen. Diese werden dabei morphologisch und genetisch klassifiziert. Zudem sind geographische und geometrische Angaben von Bedeutung. Die morphologische Lawinenklassifikation erfolgt nach einem internationalen Codierschlüssel und unterscheidet zwischen mehreren paarigen Kriterien separat für Anriss-, Durchlauf- und Ablagerungsgebiet (UNESCO 1981). Im Anrissgebiet wird z.B. nach Lockerschnee- und Schnee-

brettlawinen unterschieden, je nach Aussehen der Anrissfront (vgl. Fig. 3-6 und Fig. 3-7).

Bei der genetischen Lawinenklassifikation ist die Beschreibung der Bildungsbedingungen und deren Auswirkungen wichtig. Geographisch interessieren Höhenlage, Exposition und Hangneigung der Lawinenabgänge. Auch eine Umrisskartierung oder zumindest Angaben zu Länge und Breite können von Bedeutung sein.

Lawinenbeurteilung

Aufgrund all dieser Messungen und Beobachtungen kann der Lawinenfachmann oder die Lawinenexpertin

Gefahrenstufe	Hinweise für das freie Schneesportgelände
1 gering	Allgemein günstige Verhältnisse. Extrem steile Hänge einzeln befahren! Frische Triebsschneeansammlungen in den extremen Hangpartien meiden! Absturzgefahr beachten!
2 mässig	Mehrheitlich günstige Verhältnisse. Extrem steile Hänge der im Bulletin angegebenen Expositionen und Höhenlagen sowie frische Triebsschneeansammlungen meiden! Sehr steile Hänge vorsichtig und einzeln befahren!
3 erheblich	Teilweise ungünstige Verhältnisse. Erfahrung in der Lawinenbeurteilung ist erforderlich! Unerfahrene bleiben deshalb auf der Piste oder schliessen sich einer professionell geführten Gruppe an! Sehr steile Hänge meiden!
4 gross	Ungünstige Verhältnisse. Beschränkung auf mässig steiles Gelände, Steilhänge meiden! Lawinenauslaufbereiche beachten (Fernauslösungen, spontane Lawinen)! Besser auf der Piste bleiben.
5 sehr gross	Sehr ungünstige Verhältnisse. Verzicht empfohlen. Unbedingt auf den markierten und geöffneten Pisten bleiben!
Steilhänge > 30°, sehr steile Hänge > 35°, extrem steile Hänge > 40°. Die Einteilung in die fünf Gefahrenstufen wird in den Alpen einheitlich verwendet.	

Fig. 3-5: Fünfstufige Lawinengefahrenskala (STOFFEL & MEISTER 2004).



Fig. 3-6: Mehrere feuchte Lockerschneelawinen mit punktförmigem Anriss unterhalb des Radüner Rothorns im Flüelagebiet.

die aktuelle Lawinengefahr beurteilen. Die Beurteilung erfolgt täglich. Dazu braucht es viel Erfahrung, die man sich an Kursen und mit Übung aneignen kann. Die Gefahrenabstufung erfolgt nach einem einheitlichen Schlüssel. In den Alpenländern existiert dazu eine fünfstufige Lawinengefahrenskala (vgl. Fig. 3-5). Sie ist seit 1993 im Einsatz und hat sich europaweit etabliert (STOFFEL & MEISTER 2004).

3.4 Modelle

Vereinfacht gesprochen dienen Modelle dazu, im oben dargestellten Basisdreieck (vgl. Fig. 3-2) Lücken zu füllen. Das heisst, mit Hilfe von theoretischen Überlegungen und Berechnungen sollen dort fehlende Daten ergänzt werden, wo keine Messungen existieren. Auch fehlende Parameter können unter Zuhilfenahme von physikalischen Gesetzmässigkeiten theoretisch modelliert werden. Ziel ist es, möglichst flächen- und zeitdeckende Aussagen machen zu können. Im Folgenden werden einige in der Schnee- und Lawinenforschung entwickelte Modelle kurz vorgestellt. Sie basieren alle auf der umfangreichen Datengrundlage der beschriebenen Schneemessnetze.

3.4.1 SNOWPACK – das Schneedeckenmodell

Ähnlich wie heute die Wettervorhersage aufgrund von numerischen Rechenmodellen erstellt wird, entwickelt das SLF Modelle, welche die Entwicklung der Schneedecke beschreiben.



Fig. 3-7: Trockene Schneebrettlawine mit scharfer Anrisskante bei Pischcha, Davos. Die Anrisshöhe beträgt bis zu 2,2 m.

Die Schweiz ist in der komfortablen Lage, über ein dichtes Messnetz zu verfügen, welches Wetter- und Schneeeinformationen liefert. Allerdings kann der Zustand innerhalb der Schneedecke nicht automatisch gemessen werden. Diese Informationslücke versucht das Schneedeckenmodell SNOWPACK (LEHNING et al. 2002) zu schliessen, indem es ausgehend von den Daten der automatischen Stationen den Zustand der Schneedecke berechnet. Das Haupteinsatzgebiet liegt in der Verbesserung der Lawinenwarnung.

In Figur 3-8 ist als Beispiel die mit Hilfe des Modells berechnete Entwicklung von Kornformen, Schneesichten und Schneedeckenstabilität an einer IMIS-Station dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind in rot die Instabilitätsbereiche gekennzeichnet, die zur Auslösung eines Schneebretts führen können. Im unteren Teil sind die Kornformen (codierte Signaturen) sichtbar.

SNOWPACK wird auch zur Beantwortung allgemeiner

ökologischer, klimatologischer, hydrologischer oder für den Schneesport relevanter Fragestellungen eingesetzt.

3.4.2 AVAL-1D – dynamische Lawinenberechnung

Die umfangreichen Messungen auf den Beobachstationen bilden auch die Voraussetzung für die Festlegung von Gefahrenzonen. Der Lawinenwinter 1999 hat deutlich gezeigt, dass Siedlungsgebiete und Verkehrswege in den Schweizer Alpen der Gefahr von Lawinen ausgesetzt sind (SLF 2000). Am SLF wurde daher in den letzten Jahren intensiv an der Verbesserung der computergestützten Berechnung von Fliess- und Staublawinen gearbeitet (CHRISTEN et al. 2002).

Von entscheidender Bedeutung bei der Berechnung von Lawinen sind die maximalen Schneedeckenwachswerte. Auch der Wind, der den Schnee verfrachtet und damit einen zusätzlichen Eintrag in potentielle Anrisszonen liefert, muss berücksichtigt werden.

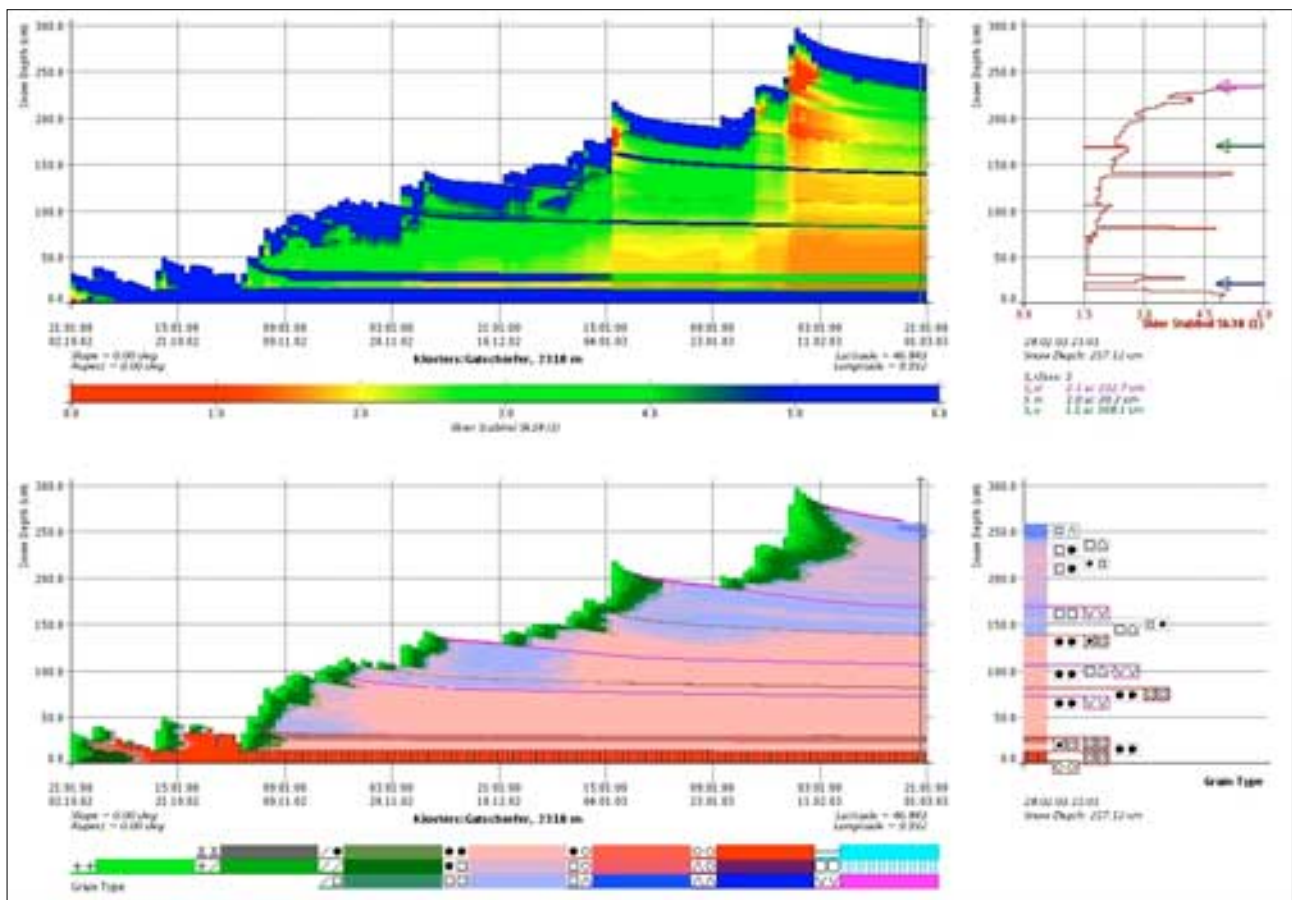


Fig. 3-8: SNOWPACK-Darstellung: Zeitentwicklung und Profile von Schneedeckenstabilität und Schneearten auf der IMIS-Station Gatschiefer, Klosters, 2310 m ü.M. (aus LEHNING et al. 2002).

Das eindimensionale Lawinenberechnungsmodell AVAL-1D bewährt sich für solche Berechnungen seit seiner Einführung Ende 1999. Es ersetzt teilweise das rund 50 Jahre alte Modell von VOELLMY (1955). Mit AVAL-1D lassen sich die Fließhöhe, die Geschwindigkeit und der Druck entlang der gesamten Lawinenbahn berechnen und die Auslaufdistancen und die Massenverteilung der Lawinenablagerung modellieren.

Da es sich bei Lawinen jedoch um flächige Prozesse handelt, stösst ein eindimensionales Modell bei gewissen Fragestellungen an Grenzen, beispielsweise:

- Wo genau fließt die Lawine durch?
- Wie breit ist die Lawine?
- Welcher Teil der Lawine fließt durch Couloir A, welcher durch Couloir B?

Um solche Fragen besser beantworten zu können, wird gegenwärtig am SLF das zweidimensionale Fließlawinenmodell AVAL-2D entwickelt, das die genaue Fließbahn und die Breite der Lawine bis ins Tal hinunter ebenfalls berechnet (vgl. Fig. 3-10).

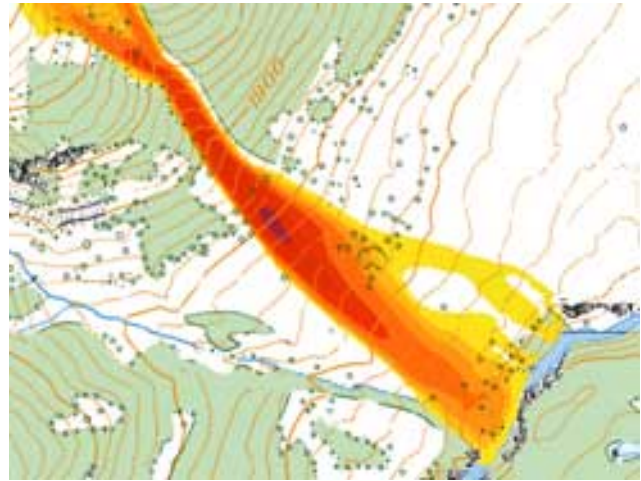


Fig. 3-10: Nachrechnung einer Lawine mit AVAL-2D. Die Farben zeigen die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten von 40 m/s (violett) bis zu 5 m/s (hellgelb) (aus CHRISTEN et al. 2002).

Wesentliche Grundlagen für die Berechnung der Lawinenkenngrößen sind Geländeparameter (z.B. die



Fig. 3-9: Künstlich ausgelöste Staublawine am Walenstadterberg, Januar 2003.

Hangneigung), qualitative und quantitative Schneeangaben (z.B. maximale Schneedeckenzuwachswerte, Schneedichten) und physikalische Stoffgesetze. Ziel ist es auch, künstliche Hindernisse wie etwa Ablenkdamme ins Geländemodell zu integrieren und somit deren Ablenkwirkung zu überprüfen.

3.4.3 NXD – Lawinoprognosemodelle

Operationelle, d.h. der aktuellen Situation angepasste Verwendung finden die Daten der Messstationen bei den Lawinoprognosemodellen. Das SLF hat dafür das Computerprogramm «NXD-Lawinen» entwickelt, welches die Beurteilung der Lawinengefahr in einem lokal begrenzten Gebiet unterstützt. Das Modell hilft, Entscheidungen wie «Die Strasse bleibt offen» oder «Der Lawinenzug muss durch künstliches Wegsprengen der Schneemassen gesichert werden» zu treffen.

Der Modellansatz beruht darauf, dass die aktuelle Wetter- und Schneesituation mit denjenigen früherer Jahre vergleichbar ist. Das Programm sucht ähnliche Situationen aus der Datenbank heraus und listet das damals beobachtete Lawinengeschehen auf. Unter der Annahme, dass die Lawinengefahrsituation am aktuellen Tag ähnlich ist wie an diesen «nearest neighbours», können direkt Massnahmen ergriffen werden.

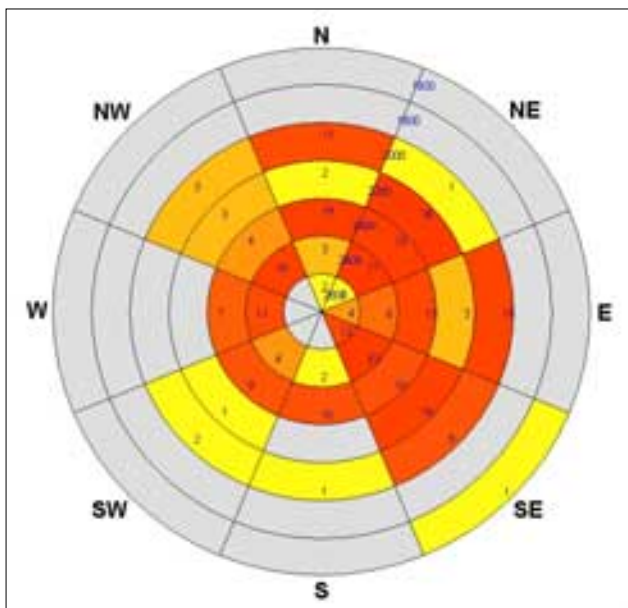


Fig. 3-11: Beispiel einer Auswertung mit NXD: Expositions-Höhen-Diagramm. Die Verteilung der Lawinenhäufigkeit in Abhängigkeit des Sektors und der Höhe über Meer wird in diesem Diagramm ersichtlich (aus HEIERLI 2003).

Die Modellzuverlässigkeit steigt mit einer möglichst langen Beobachtungsreihe und mit möglichst vollständigen Beobachtungen. Von primärem Interesse sind Anzahl und Grösse von Lawinen. Höhenlage und Hangneigung weisen auf mögliche Gefahrenstellen hin (vgl. Fig. 3-11) (HEIERLI 2003). Die Lawinenverantwortlichen können mit «NXD-Lawinen» ihre eigene Beurteilung mit den aufgezeigten Lawinenereignissen vergleichen.

3.5 Schneehöhenverteilung in der Schweiz

Im Alpenraum fällt der Niederschlag oberhalb von 2000 m ü.M. zu rund 80 Prozent als Schnee. Die Schneehöhenverteilung ist in der Schweiz sehr heterogen. Dabei spielen die regionalklimatischen Eigenheiten eine zentrale Rolle. Mit den langjährigen Messreihen der Schneemessstationen lassen sich klimatologische Kenngrössen ausarbeiten, von denen einige wenige hier vorgestellt werden.

3.5.1 Schneebedeckungsdauer

An der Vergleichsstation Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) werden schon seit fast 70 Jahren tägliche Schneemessungen vorgenommen. Während durchschnittlich 265 Tagen ist auf dem Weissfluhjoch eine permanente Schneedecke anzutreffen. Mit der relativ langen Zeitreihe (vgl. Fig. 3-12) lässt sich anhand der übergreifenden Mittelwerte kein Trend zu kürzeren Winterperioden feststellen. Im Gegenteil, auf dieser Höhe sind die Winter in den letzten Jahren generell etwas länger geworden als zu Beginn der Messungen. Markant anders

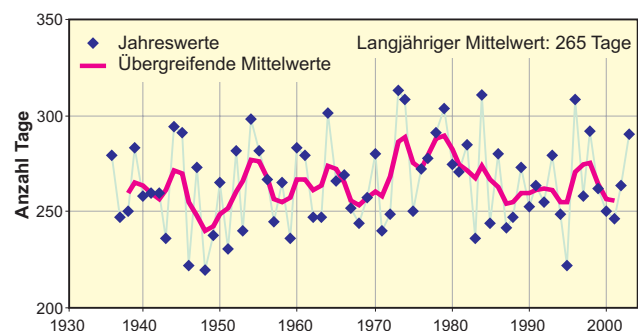


Fig. 3-12: Dauer der permanenten Schneedecke auf dem Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) zwischen 1936 und 2004. 1940 meint dabei den Winter 1939/40, mit dem Einschneien im Herbst/Frühwinter 1939 und dem Ausapern im Frühling/Frühsummer 1940 (Daten: SLF).

ist dies in tieferen Lagen. Dort nimmt die Schneebedeckungsdauer ab. Allen Höhenlagen gemeinsam ist, dass die Schneebedeckungsdauer von einem Winter zum nächsten grossen Schwankungen unterliegt.

3.5.2 Abhängigkeit der Schneehöhe von der Höhe über Meer

Anhand des mittleren Zeitpunktes des Eintretens der winterlich grössten mittleren Schneehöhe kann die Höhenabhängigkeit gut nachgewiesen werden. In den Gebieten unterhalb rund 1300 m ü.M. wird die grösste mittlere Schneehöhe im Februar erreicht, zwischen 1500 und 1800 m ü.M. im März und oberhalb von 1800 m ü.M. gar erst im April (vgl. Fig. 3-14).

3.5.3 Schneehöhenkarten

Schneehöhenkarten dienen als Grundlage für die Lawinenwarnung und sind für touristische Aussagen bezüglich Schneesicherheit, für hydrologische Abflussmodellierungen und für Klimadarstellungen wichtig.

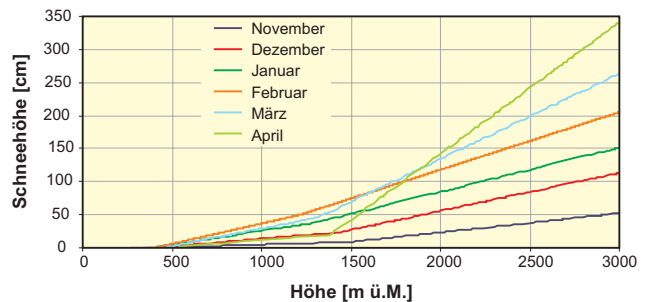


Fig. 3-14: Lineare Abhängigkeit der Schneehöhe von der Höhe über Meer für die Monate November-April (nach AUER 2003).

Um von den Schneehöhen einzelner Stationen auf die Verhältnisse im ganzen Gebiet zu schliessen, braucht es eine modellhafte Umsetzung. Den Schneehöhenkarten liegt ein Modell zugrunde, das die regionalen, höhenabhängigen und zeitlichen Unterschiede der Schneebedeckung berechnet. Fig. 3-13 zeigt die mittleren jährlichen Schneehöhen in der Schweiz als Mittelwerte der Monate November bis April.

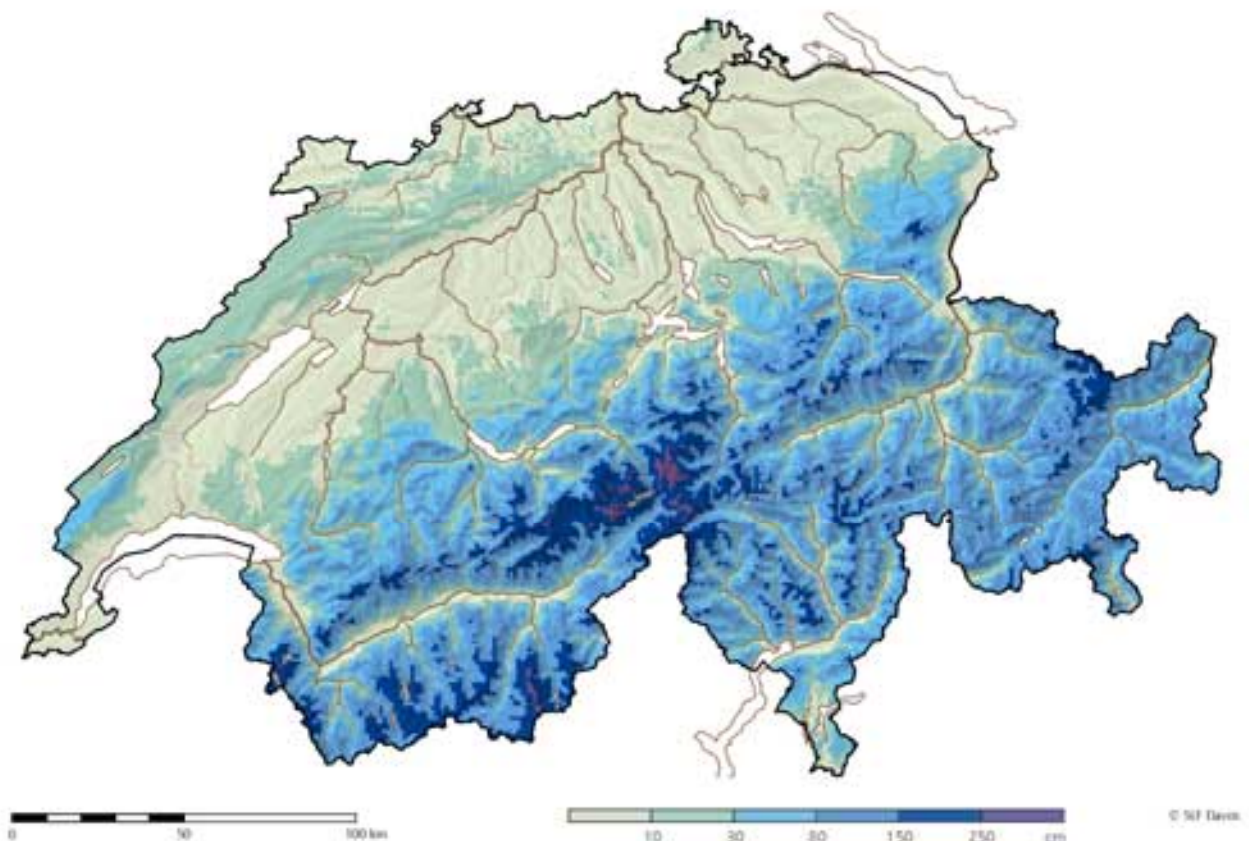


Fig. 3-13: Mittlere Schneehöhen in der Schweiz (Wintermittel November bis April, 1983–2002) (nach AUER 2003).

Das Hochgebirge hebt sich als schneereiches Gebiet deutlich von den schneearmen Tälern und dem Mittelland ab. Die mittlere Schneehöhe liegt im Mittelland unterhalb von 10 cm, während in Gebieten oberhalb von 2000 m ü.M. Wintermittelwerte von mehr als 100 cm erreicht werden.

3.5.4 Regionale Schneehöhenverteilung

Indem in Figur 3-15 die relativen Schneehöhen im Vergleich zum gesamtschweizerischen Mittel dargestellt werden, kommen die regionalklimatologischen Unterschiede in der Schneehöhenverteilung deutlich zur Geltung. Es lassen sich Gebiete erkennen, die im Vergleich zum Mittelwert überdurchschnittliche (positive Abweichungen, in blauer Farbe) oder unterdurchschnittliche (negative Abweichungen, in roter Farbe) Schneehöhen aufweisen.

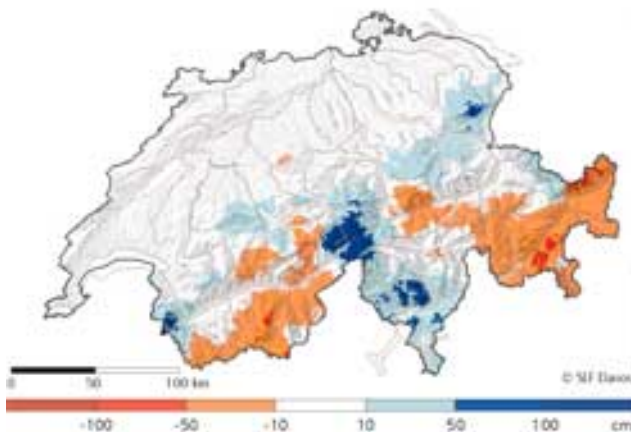


Fig. 3-15: Regionalklimatologische Unterschiede in der Schneehöhenverteilung (Abweichung vom gesamtschweizerischen Mittel) (nach AUER 2003).

Ein auffallend schneereicher Bogen erstreckt sich vom Tessin über die Gotthard- und Grimselregion, das Goms, die Zentralschweiz, die Glarner Alpen gegen das Toggenburg und den Alpstein. Weitere schneereiche Gebiete sind das Prättigau, das Chablais im Unterwallis, das Saanenland sowie die Berner Voralpen. Regionen, deren Schneehöhen unter dem schweizerischen Mittel liegen, sind die Bündner Südtäler, das Engadin, Mittelbünden und das Bündner Oberland, die Jungfrau- und die Aletschregion sowie das Wallis südlich der Rhone, also vor allem die inneralpiner Täler. Ein Beispiel zeigt diese Unterschiede eindrücklich auf: Während in Grächen (VS) auf 1550 m ü.M. im

langjährigen Wintermittel nur etwa 21 cm Schnee liegen, beträgt das Wintermittel im mit 1510 m ü.M. ähnlich hoch gelegenen St. Antönien (GR) mit 62 cm fast das Dreifache.

3.6 Weitere Schwerpunkte der aktuellen Schneeforschung

Die Schneeforschung leistet einen wichtigen Beitrag zur sicheren Nutzung der Berggebiete. Forschungsarbeiten in den Bereichen Schneesport, Schutzwald und Permafrost haben direkte Auswirkungen auf das Leben und Arbeiten im Alpenraum.

3.6.1 Schneesport

Beim Gleiten auf Schnee wird durch Reibungswärme Schnee aufgeschmolzen und es bildet sich eine Schmierung durch Wasser aus. Obwohl viel zum Thema Reibung zwischen Ski und Schnee geforscht worden ist, bleiben wichtige Fragen unbeantwortet, beispielsweise diejenige der Menge und der Verteilung des schmierenden Wassers. Ein Gemeinschaftsprojekt von SLF (Team Schneesport) und Partnern aus der Industrie untersucht das Phänomen der Ski-Schnee-Reibung. Aufgrund neuer Erkenntnisse können später Verbesserungen am System Ski-Belag-Wachs vorgenommen beziehungsweise neue Technologien zur Oberflächenbehandlung von Skis gefunden werden.

Skipisten sind im Breiten- und Rennsport eine wesentliche, wenn nicht entscheidende Grundlage für den Wintersport. Ihre Erstellung und Pflege erfordert einen



Fig. 3-16: Mobile Wetterstation an der Weltcup piste in St. Moritz (GR).



Fig. 3-17: Der wohl berühmteste Bannwald der Schweiz oberhalb Andermatt (UR).

grossen Einsatz an technischen Mitteln und ist mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden. Die Forschung am SLF im Bereich Schneesport hat zum Ziel, die Anforderungen an die Skipisten genau zu definieren sowie die Präparations- und Pflegemethoden zu optimieren und weiter zu entwickeln (FAUVE et al. 2002).

In Zusammenarbeit mit dem Schweizer Skiverband werden am SLF weitere Projekte verfolgt: Ein Projekt untersucht die Belagsstrukturen von Langlaufskis. Die Strukturen werden weiterentwickelt und für die unterschiedlichen Schneearten optimiert. Dabei ist es wichtig, dass bei den Feldtests alle Einflussparameter wie Temperatur, Strahlung, Schneehärte und Kornform der Schneeunterlage charakterisiert und analysiert werden.

3.6.2 Schutzwald

Dichter Wald kann an steilen Hängen Schneedecke und Boden stabilisieren. Ohne diesen Schutz wären weite Teile des Berggebietes nicht bewohnbar und Verkehrsachsen den Lawinen ausgesetzt (vgl. Fig. 3-17).

Der Schnee wird durch die Baumkronen aufgefangen, von wo er zurück in die Atmosphäre sublimiert oder tropfen- und klumpenweise auf den Boden gelangt. Dadurch werden weit weniger instabile Schneeschichten gebildet als im Freiland. Zudem wirken das gemässigte Waldinnenklima (wenig Wind) und die Stützung durch stehende und liegende Stämme einer Lawinenauslösung entgegen. Im offenen, lockeren Wald ist die Schutzwirkung hingegen reduziert.



Fig. 3-18: Aktiver Blockgletscher am Piz d'Err (GR), 2001.

Lawinen, die oberhalb der Waldgrenze anreissen, können den darunter liegenden Wald zerstören. Mit Hilfe von Langzeitbeobachtungen und Jahrringanalysen kann man Lawinenereignisse rekonstruieren und Informationen über die Resistenz verschiedener Bäume gewinnen.

Wald bietet nicht nur einen optimalen Schutz vor Lawinen, sondern er leistet auch einen wertvollen Beitrag bei der Regulation weiterer Naturgefahren wie etwa Steinschlägen, Erdbeben oder Murgängen.

3.6.3 Permafrost

Böden, die ständig gefroren bleiben, werden als Permafrost bezeichnet. Permafrost ist in erster Linie über die Temperatur definiert. Das Eis im Permafrost, das sich aus unterkühltem Wasser bildet, ist lediglich eine Folgeerscheinung. Dementsprechend gibt es auch trockenen Permafrost, welcher kaum Eis enthält.

Permafrost erkennt man besonders gut, wenn er sich im Lockermaterial gebildet hat, das vom Eis in den Porenräumen auseinandergedrückt wird. Bei geneigter Topographie kriecht dieses Schutt-Eis-Gemisch langsam talwärts und bildet deutlich erkennbare Formen in der Landschaft (vgl. Fig. 3-18). Diese werden Blockgletscher genannt, obschon sie weder ihre Entstehung noch ihr Verhalten mit Gletschern gemein haben.

Generell muss oberhalb der Waldgrenze mit Permafrost gerechnet werden, aber erst ab einer Höhe von 3000–3500 m ü.M. werden die Permafrostböden zu-

sammenhängend. Die Verbreitung von Permafrost wird vor allem durch die mittlere jährliche Lufttemperatur und die einfallende Strahlung bestimmt. Permafrost umfasst rund 4 bis 6 % der Fläche der Schweiz, was etwa der doppelten Gletscherfläche entspricht (VONDER MÜHLL & KOORDINATIONSGRUPPE PERMAFROST 1999). Die Hydrologie wird durch den praktisch undurchlässigen Permafrostkörper wesentlich beeinflusst. Weiter bewirkt Permafrost eine Verzögerung bei der Ausaperung. So findet die Schneeschmelze in Permafrostgebieten etwa 15–20 Tage später statt.

Infolge steigender Temperaturen – die Untergrenze des Permafrosts ist in den letzten 100 Jahren um schätzungsweise 150 bis 250 m angestiegen (BADER & KUNZ 1998) – stellen Permafrostböden eine potentielle Gefahr für bewohnte Gebirgsgebiete dar. Permafrostzonen sind zudem als Baugrund problematisch (PHILLIPS 2000). Befinden sich Lawinenverbauungen, Seilbahnmasten oder sogar ganze Seilbahnstationen auf dieser instabilen Unterlage, müssen sie durch aufwendige Sicherungsarbeiten saniert werden.

3.7 Gletscher

Die Gletscher und ihre Veränderungen sind wichtige Zeugen für den Nachweis gegenwärtiger klimatischer Veränderungen und vergangener Klimaschwankungen. Seit dem letzten Gletscherhochstand am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 weichen die Gletscher in der Schweiz generell zurück. Zwischen 1850 und 2000 verminderte sich dabei die Fläche um über 40 % und das Volumen aller Gletscher um rund die Hälfte.

3.7.1 Messnetze

1874 wurde am Rhonegletscher (Fig. 3-19) mit Vermessungsuntersuchungen begonnen. Seither findet in der Schweiz ununterbrochen Gletscherbeobachtung im Sinne von wissenschaftlicher Grundlagenforschung statt (MARTINEC et al. 1992). Das Schweizerische Gletschermessnetz (vgl. Fig. 3-20) wird durch die Glaziologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (GK/SANW, neu SCNAT) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Hochschulinstituten (Abt. Glaziologie VAW-ETH Zürich, Geographisches Institut der Universität Zürich) betrieben. Es bezweckt die langfristige Dokumentation und Erforschung der Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen. 2003 wurden 98 (von 120 im Messnetz erfassten) Gletscher vermessen. Sämtliche Zungen zeigten einen deutlichen Rückgang (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>).



Fig. 3-19: Rhonegletscher mit Zugang zur Gletschergrotte (September 2004).

Innerhalb dieses Messnetzes werden rund ein Dutzend Gletscher zusätzlich bezüglich Massenänderung und Gletscherbewegung untersucht. Weiter werden 84 gefährliche Gletscher der Schweiz, welche bereits Schadenereignisse verursacht haben oder verursachen könnten, in einem Inventar erfasst. 37 Gletscher werden jährlich oder bei Bedarf mittels Vermessungsflügen überwacht (<http://glacierhazards.ch>).

3.7.2 Untersuchungsmethoden

Die Rekonstruktion ehemaliger Gletscherstände, die noch während der letzten Eiszeit bis ins Alpenvorland reichten (vgl. Fig. 3-24), erfolgt mit Hilfe von Moränenablagerungen. Für den Nachvollzug von historischen Hochständen werden auch alte Zeichnungen,



Fig. 3-20: Lage der 120 beobachteten Gletscher des Schweizerischen Gletschermessnetzes (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>) (nach MAISCH et al. 2004).



Fig. 3-21: Rhonegletscher in den Jahren 1856 und 1998 (HOLZHAUSER & ZUMBÜHL 1999).

Gemälde und Photographien beigezogen. Figur 3-21 zeigt den Rhonegletscher in den Jahren 1856 und 1998. Teile der Stirnmoräne des 1856er Standes können noch heute bei Gletsch gefunden werden.

Aktuelle Längenänderungen der Gletscher werden aus der Verlagerung des Zungenendes ermittelt. Fließverhalten und Veränderungen der Eisdicke können vor Ort mittels Steinreihen und (genauer) mit Pegelstangen bestimmt werden. Luftphotogrammetrisches Vermessen der Oberfläche wird zur Bestimmung des Eisvolumenschwundes in längeren zeitlichen Abständen eingesetzt.

Massenbilanzen von Gletschern werden mit Hilfe verschiedener methodischer Ansätze bestimmt, beispielsweise mit dem glaziologischen oder dem hydrologischen Modell. Im glaziologischen Modell ergeben sich Massenänderungen als Bilanz über Zuwachs im Nährgebiet (Firnakkumulation) und Abtrag im Zehrgebiet (Eisablation). Im hydrologischen Modell wird die Massenänderung aus der Bilanz über Niederschlag, Abfluss und Verdunstung im vergletscherten Einzugsgebiet abgeleitet (MARTINEC et al. 1992).

3.7.3 Glaziale Prozesse

Die Gletscherfläche wird unterteilt in Nähr- und Zehrgebiet (vgl. Fig. 3-22). Im höhergelegenen Nährgebiet schmilzt im Sommer nicht der gesamte Schneezuwachs des vergangenen Winters ab. Er wird laufend

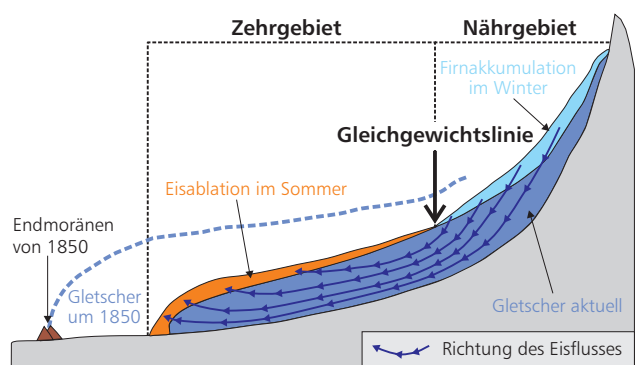


Fig. 3-22: Schematische Darstellung eines Gletschers (nach MAISCH et al. 1999).

mit Neuschnee zugedeckt und komprimiert. Die Umwandlung von Schnee über Firn zu Eis dauert in den Alpen etwa 15 bis 20 Jahre (VEIT 2002). Im Zehrgebiet dagegen schmilzt mehr Material ab als durch die winterliche Schneezufuhr ersetzt werden kann (Eisablation). Bei ausgeglichener Massenbilanz ist die Fläche der Akkumulationszone am Ende der sommerlichen Schmelzperiode rund doppelt so gross wie jene der Ablationszone.

Im Übergangsbereich von Nähr- und Zehrgebiet befinden sich Akkumulation und Ablation im Gleichgewicht (Gleichgewichtslinie). Verschiebt sich die Gleichgewichtslinie bergwärts, so schmilzt ein Gletscher ab.

Verharrt sie mehrere Jahre auf einer tiefen, talwärtigen Lage, so vermag ein Gletscher Masse zuzulegen, anzuwachsen und mittelfristig vorzustossen.

Ob ein Gletscher vorstösst oder schwindet, wird generell durch den Witterungsverlauf und insbesondere durch folgende Faktoren massgeblich beeinflusst (vgl. dazu MAISCH et al. 1999):

- die Lufttemperatur,
- die Luftfeuchtigkeit,
- die Zufuhr von Schnee im Winter und
- die direkte Sonneneinstrahlung.

In den schweizerischen Gletscherregionen liegen die Gleichgewichtslinien durchwegs oberhalb von 2000 m ü.M. und – je nach Niederschlagsangebot – bei mittleren Jahrestemperaturen zwischen –4 und +1 °C (vgl. Fig. 3-23).

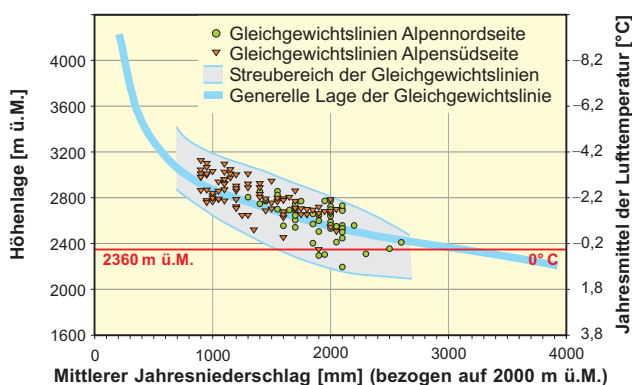


Fig. 3-23: Lage der Gleichgewichtslinie der schweizerischen Gletscherregionen in Funktion von Temperatur und Niederschlag (Kryosphärenmodell) (nach MAISCH et al. 2004).

3.7.4 Resultate

Die seit Mitte des 19. Jahrhunderts feststellbare Erwärmung (für die Schweiz: 1,0–1,6 °C im 20. Jh., OcCC 2002) hat dazu geführt, dass die Gesamtvergletscherung in der Schweiz zwischen 1850 und 1973 von rund 1800 km² auf 1300 km² abgenommen hat. Bis ins Jahr 2000 hat sie sich um weitere 250 km² verringert. Dabei weisen grosse Gletscher im Allgemeinen deutlich geringere prozentuale Verluste auf als kleine (vgl. Tab. 3-2).

Parallel zum Flächenschwund in den Schweizer Alpen hat auch die Länge der Gletscher seit 1850 deutlich abgenommen. Je nach Grösse, Typ und Exposition des Gletschers verlief der Längenschwund regelmässig, oder er war durch kurzfristige Vorstösse unterbrochen.

Nr.	Gletscher	1850 [km ²]	1973 [km ²]	2000 [km ²]	1850–2000 [%]
1	Grosser Aletsch	105,6	96,1	90,1	–14,7
2	Gorner	66,0	59,7	57,1	–13,5
3	Fiescher	37,4	34,2	31,3	–16,3
4	Unteraar	33,4	29,5	26,7	–20,1
5	Oberaletsch	26,6	22,8	19,8	–25,6
6	Unterer Grindelwald	23,2	20,8	19,3	–16,8
7	Findelen	20,0	17,4	17,0	–15,0
8	Corbassière	20,7	18,3	16,8	–18,8
9	Gauli	22,6	17,7	16,5	–27,0
10	Morteratsch	19,3	16,4	16,1	–16,6
11	Rhone	20,2	17,6	16,1	–20,3
12	Trift	19,3	16,6	16,0	–17,1
13	Zmutt	19,8	16,9	15,0	–24,2
14	Zinal	17,9	15,4	14,3	–20,1
15	Otemma	20,5	17,5	14,1	–31,2
16	Kander	16,0	13,9	13,2	–17,5
17	Hüfi	15,1	13,6	13,2	–12,6
18	Turtmann-Brunegg	15,0	12,8	11,5	–23,3
19	Mont Miné	12,5	11,0	10,3	–17,6
20	Arolla	16,4	13,2	9,8	–40,2

Tab. 3-2: Entwicklung der Flächenwerte der 20 grössten Gletscher zwischen 1850 und 2000 (Lage der einzelnen Gletscher s. Fig. 3-24) (MAISCH et al. 2004).



Fig. 3-24: Gletscherflächen in der Schweiz im Jahr 2000 (MAISCH et al. 2004) und während der letzten Eiszeit (vor ca. 20'000 Jahren, nach VEIT 2002). (Nummern der Gletscher s. Tab. 3-2.)

In Figur 3-25 ist die Längenentwicklung des Grossen Aletschgletschers und des Oberen Grindelwaldgletschers dargestellt. Während die Gletscherzunge des allgemein träge reagierenden Aletschgletschers kontinuierlich zurückschmolz, stiess der Obere Grindelwaldgletscher im Verlauf des 20. Jahrhunderts zweimal deutlich vor, dies als Reaktion auf kurzfristig kühlere, gletschergünstigere Witterungskonstellationen.

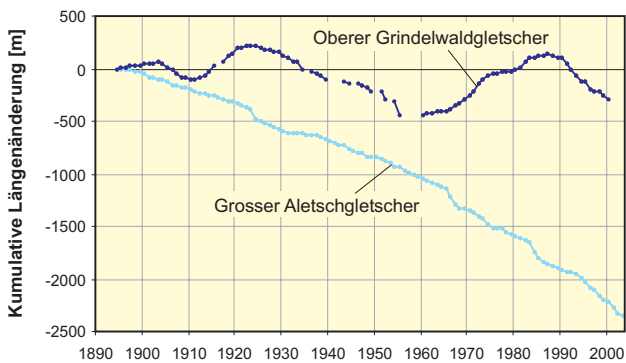


Fig. 3-25: Entwicklung der Längenausdehnung von Grosse Aletschgletscher und Oberem Grindelwaldgletscher 1894–2003 (GK/SANW & VAW/ETHZ 2003).

Mehrere Wachstumsphasen in neuerer Zeit sind auch vom Findelengletscher (VS) bekannt. Während der bedeutendsten (1978–1986) ist dieser Gletscher rund 250 m vorgestossen (IKEN 1995). In Figur 3-26 ist die Ausdehnung des Findelengletschers in den Jahren 1850, 1973 und 2000 dargestellt. Seit dem Beginn der

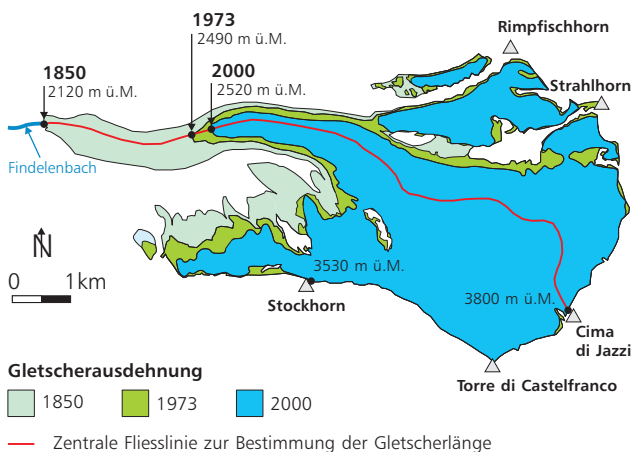


Fig. 3-26: Ausdehnung des Findelengletschers und seiner Teilgletscher 1850, 1973 und 2000 (nach MAISCH et al. 2004).

Längenmessungen im Jahr 1885 hat sich die Gletscherzunge um 1845 m auf eine Gesamtlänge von 7,8 km (2003) zurückgebildet (GK/SANW & VAW/ETHZ 2003).

3.7.5 Gletscher als Wasserspeicher

Gletscher sind kurz- und langfristig wirksame Wasserspeicher. Die im Sommer auch nach Abschluss der Schneeschmelze anhaltende Gletscherschmelze hat zur Folge, dass die Gebirgsbäche auch während längerer Trockenperioden ausreichende Wassermengen führen. Das 1850 in den Schweizer Gletschern gespeicherte Wasser (rund 107 km³ Eis) würde, gleichmässig über die Schweiz verteilt, einer Wasserschicht von 2300 mm entsprechen. Dies bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt gut 1,6 Jahresniederschläge als Gletschereis gespeichert waren (vgl. Kap. 2). Bis 1973 sind davon 33 km³ Eis (entsprechend rund 700 mm Wasserschicht oder rund ein halber Jahresniederschlag) und bis ins Jahr 2000 weitere knapp 20 km³ (entsprechend rund 500 mm Wasser) abgeschmolzen. Allein in der Region des Grossen Aletschgletschers (vgl. Fig. 3-27) haben sich seit 1850 rund 4 km³ Eis verflüssigt. Das im Gletschereis gespeicherte Wasser entspricht – mit abnehmender Tendenz – noch rund einem Sechstel des gesamthaft in der Schweiz gespeicherten Wassers (MAISCH et al. 1999, 2004).



Fig. 3-27: Illustration des zwischen 1850 und 2001 abgeschmolzenen Eiskörpers am Grossen Aletschgletscher.

4 Verdunstung

Kennziffern

Mittlerer Jahresverdunstung Schweiz	484 mm	(Berechnung aus Energiebilanz)	Quelle: MENZEL et al. 1999
Mittlere Nettostrahlung Schweiz	44 W/m ²		Quelle: Z'GRAGGEN & OHMURA 2002
Höchste Jahresverdunstung	1029 mm	(Lago Maggiore)	Quelle: MENZEL et al. 1999
Verdunstungsgradient Schweiz	-22 mm/100m	(< 3000 m ü.M.)	Daten: MENZEL et al. 1999
Maximale Verdunstungswerte	7 mm/Tag		Quelle: LANG 1978

4.1 Die Verdunstung – das Kühlsystem der Erde

Zur Verdunstung von Wasser wird weltweit mehr als 80 % der von der Sonne eingestrahnten Energie benötigt. Dadurch wird die Erdoberfläche vor übermässiger Erwärmung bewahrt.

4.1.1 Energiehaushalt

Die Sonne gibt Energie in Form kurzwelliger Strahlen ab (Solarkonstante = 1366,5 W/m²). Da jeweils nur die Hälfte der Erde beschienen wird und da die Erde kugelförmig ist, beträgt die mittlere solare Einstrahlung ein Viertel der Solarkonstanten, also 342 W/m². Die Strahlung wird in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche mehrfach reflektiert und umgewandelt. Letztlich steht an der Erdoberfläche im globalen Mittel eine Nettostrahlung von 30 % der mittleren solaren Einstrahlung oder 102 W/m² zur Verfügung (Z'GRAGGEN & OHMURA 2002).

In der Schweiz beträgt die mittlere Nettostrahlung 44 W/m². Für die Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten werden rund 20 % dieser Energie verwendet, der Rest treibt über die Verdunstung den Wasserkreislauf an (Z'GRAGGEN & OHMURA 2002). Die Lufttemperatur an der Erdoberfläche ist damit stark von der Verdunstung abhängig. «Würde während einer sommerlichen Dürreperiode die Verdunstung infolge ausgetrockneter Böden auf Null absinken, könnte sich theoretisch in unserem Alpenvorland an einem sonnigen Tag die unterste Luftschicht bis 1000 Meter Höhe um etwa 10 Grad stärker erwärmen als bei optimalen Verdunstungsbedingungen.» (BADER & KUNZ 1998)

4.1.2 Verdunstung – Evapotranspiration

Verdunstung bezeichnet den Übergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand. Als unsichtbares Gas wird der Wasserdampf von der Luft aufgenommen. Der maximale Wasserdampfgehalt der Luft ist stark temperaturabhängig (vgl. Fig. 4-1).

Die Verdunstung (Evapotranspiration) umfasst die Verdunstung von unbelebten Oberflächen (Evaporation) und die Verdunstung durch Pflanzen (Transpiration).

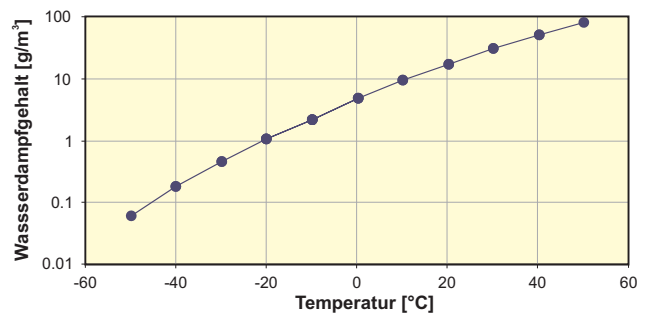


Fig. 4-1: Maximaler Wassergehalt der Luft in Abhängigkeit der Temperatur.

Aus der Nettostrahlung an der Erdoberfläche kann die maximal mögliche Verdunstung direkt abgeleitet werden.

$$ETM = \frac{N \cdot t}{r_v}$$

- mit: ETM Maximal mögliche Verdunstung [mm]
- N Nettostrahlung [W/m² = J/(m²·s)]
- t Zeit [s]
- r_v Verdunstungswärme des Wassers [2,446 · 10⁶ J/kg bei 20 °C]

Figur 4-2 zeigt die aus der Nettostrahlung berechnete maximal mögliche Verdunstung. An tiefer gelegenen und südexponierten Stellen treten Werte von über 1000 mm auf. Die auffällige Abnahme der Nettostrahlung und damit der Verdunstung mit der Höhe ist in erster Linie eine Folge der Schneebedeckung. Schneebedeckte Flächen reflektieren im Mittel 71 % der einfallenden kurzwelligigen Strahlung, apere Flächen dagegen weniger als 20 %. Oberhalb von ca. 3000 m ü.M. fällt die Jahresenergiebilanz schliesslich negativ aus.

Während des Tages treten aber auch hier Zeitabschnitte mit positiver Nettostrahlung und damit Verdunstung auf (vgl. Fig. 4-9).

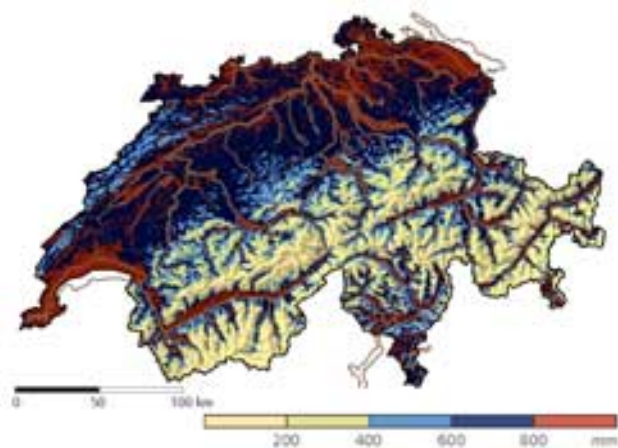


Fig. 4-2: Aus der Nettostrahlung (Periode 1984–1993) abgeleitete maximal mögliche Jahresverdunstung; Mittelwert für die Schweiz: 600 mm (nach Z'GRAGGEN & OHMURA 2002).

4.1.3 Potentielle und reale Verdunstung

Bei optimalen Feuchteverhältnissen an der Erdoberfläche wird die Verdunstung im Rahmen der zur Verfügung stehenden Energie vom Zustand der Atmosphäre bestimmt. Sie wird als potentielle Verdunstung bezeichnet; ihre Höhe wird verstärkt durch:

- ein hohes Feuchtedefizit der Luft,
- Wind und
- Luftdruck.

Die effektiv verdunstete Wassermenge (reale oder aktuelle Verdunstung) wird zusätzlich durch das verfügbare Wasserangebot limitiert und liegt in den meisten Fällen unter den potentiellen Verdunstungswerten (vgl. Fig. 4-3). Praktisch identisch sind aktuelle und potentielle Verdunstungshöhen über Gewässern.

Die reale Verdunstung wird weitgehend von Bodenbedeckung und Bodenwassergehalt bestimmt. Unbelebte Oberflächen trocknen nach Niederschlägen rasch ab, die Verdunstung geht stark zurück und die Erwärmung nimmt zu. Auf pflanzenbedeckten Flächen kann die aktive Verdunstung (Transpiration) den Rückgang bei der Evaporation ausgleichen, wenn der Boden genügend pflanzenverfügbares Wasser enthält. Waldflächen weisen höhere Transpirationsleistungen auf als Wiesenstandorte (vgl. Fig. 4-8). In der Schweiz erreicht

die reale Verdunstung im Jahresmittel rund 80 % der maximal möglichen Verdunstung und beträgt 484 mm pro Jahr (MENZEL et al. 1999).

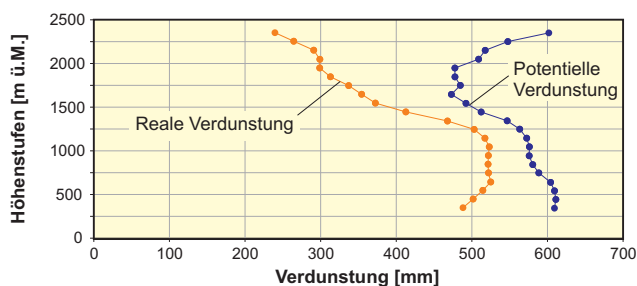


Fig. 4-3: Reale und potentielle mittlere Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet Thur – Andelfingen (Periode 1993–1994) (nach GURTZ et al. 1997).

4.2 Verdunstung messen

Die direkte Messung des effektiv verdunsteten Wassers ist nur für kleine Versuchsf lächen möglich. Die potentielle Verdunstung kann mit einfachen Geräten erfasst werden. Zur Messung der aktuellen Verdunstung müssen Testbodenkörper mit natürlicher Vegetation in die Messvorrichtung eingebaut werden.

4.2.1 Messung der potentiellen Verdunstung

Geräte zur Messung der potentiellen Verdunstung ermöglichen die Verdunstung unter kontrollierbaren Bedingungen. Probekörper (Atmometer und Evapometer) messen das von feuchten Oberflächen, Evaporimeter das von freien Wasserflächen verdunstende Wasser.

Ein Evaporimeter (Class A Pan) wird weltweit als Standardgerät der World Meteorological Organization (WMO) zur Erfassung der Verdunstung eingesetzt (vgl. Fig. 4-4). Das Gerät besteht aus einem Kessel mit 122 cm Durchmesser und einer Randhöhe von 25 cm. Die Verdunstung wird über die gleichzeitige Messung von Wasserstand (in Fig. 4-4 mittels Ultraschallgerät) und Niederschlag bestimmt. Da diese Messgeräte Feuchteinseln in einer normalerweise trockeneren Umgebung darstellen (Oaseneffekt), ist die gemessene Verdunstung im Mittel zu hoch. Die Class A Pan ist zudem der vollen Sonneneinstrahlung ausgesetzt, was meist eine Erwärmung gegenüber der Umgebung bedeutet. Die gemessenen Verdunstungswerte müssen deshalb mit einem «Kesselkoeffizienten» (um 0,75) korrigiert werden (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990).



Fig. 4-4: Evaporimeter (Class A Pan) mit Niederschlagsmesser Ott-Pluvio (Hintergrund) im hydrologischen Testgebiet Rietholzbach (SG) der ETHZ.



Fig. 4-6: Lysimeter und zwei bodeneben installierte Niederschlagsmesser (Hintergrund) im hydrologischen Testgebiet Rietholzbach (SG) der ETHZ.

4.2.2 Messung der realen Verdunstung

Für die Messung der Evapotranspiration (E) unter annähernd natürlichen Bedingungen werden Versickerungsmesser (Lysimeter) eingesetzt. Ein Lysimeter besteht aus einem Bodenmonolithen mit natürlicher Vegetation, bei dem die Wasserflüsse kontrolliert werden können (vgl. Fig. 4-5, Fig. 4-6). Über die Kontrolle der Gewichtsänderungen (δS) und die Messung von Niederschlag (P) und Sickerwasserabfluss (R) kann die exakte Wasserbilanz ermittelt werden ($E = P - R - \delta S$). Die Messung mittels Lysimeter gilt als genaueste Methode zur Bestimmung der realen Verdunstung.

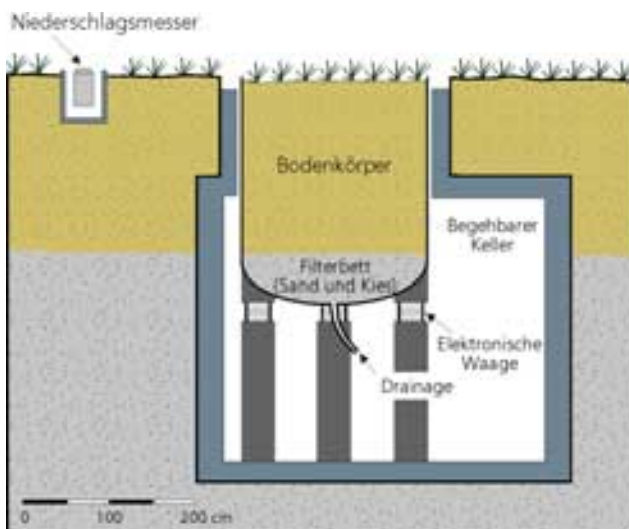


Fig. 4-5: Querschnittsskizze durch das Lysimeter der ETHZ im hydrologischen Testgebiet Rietholzbach (SG) (nach www.iac.ethz.ch).

4.3 Verdunstung berechnen

Die potentielle Verdunstung einzelner Punkte oder ganzer Gebiete wird aus den verdunstungsrelevanten meteorologischen Messgrößen berechnet. Der klassische Weg zur Bestimmung der realen Verdunstung führt über die Wasserbilanz ganzer Einzugsgebiete. Mit Wasserhaushaltsmodellen kann die reale Verdunstung sowohl für kleine Flächen als auch für grosse Einzugsgebiete berechnet werden.

4.3.1 Berechnung der potentiellen Verdunstung

Die potentielle Verdunstung kann mit empirischen Formeln annähernd bestimmt werden. In Tabelle 4-1 sind die nötigen Parameter einiger ausgewählter Formeln dargestellt. Je kürzer das berechnete Zeitintervall,

	Thornthwaite (1948)	Penman (1948)	Haude (1958)	Turc (1961)	Primault (1962)	Penman-Monteith (Monteith 1981)
Temperatur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Strahlung		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Luftfeuchte		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Weitere		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
Zeitintervall	M	S	T	T	> 5 T	S

Tab. 4-1: Messgrößen zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung (Zeitintervall: M = Monat, T = Tag, S = Stunde).

desto mehr Informationen müssen bekannt sein. HAUDE (1958) z.B. berechnet die mögliche Verdunstung eines Tages aus dem Feuchtedefizit um 14 Uhr.

$$ETP = k \cdot (E_{14} - e_{14})$$

mit: ETP Potentielle Evapotranspiration [mm/d]
 k Jahreszeitlicher Koeffizient [mm/hPa]
 E_{14} Sättigungsdampfdruck um 14 Uhr [hPa]
 e_{14} Effektiver Dampfdruck um 14 Uhr [hPa]
 $E_{14} - e_{14}$ Feuchtedefizit um 14 Uhr [hPa]

4.3.2 Berechnung der realen Verdunstung

Die mittlere Jahresverdunstung ist als Restglied aus der Wasserbilanz berechenbar (vgl. Kap. 10). Dabei addieren sich aber die Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten zum Gesamtfehler, was in einzelnen Regionen zu beträchtlichen Fehlabschätzungen führen kann (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b). Vor allem die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Niederschläge und der unterirdischen Abflüsse aus Karstgebieten stellen grosse Fehlerquellen dar.

Entsprechend der beeinflussenden Faktoren (vgl. Kap. 4.1) muss bei der Berechnung der realen Verdunstung der naturräumliche Zustand des Zielgebiets berücksichtigt werden. Mit speziellen Computerprogrammen können Einzugsgebiete modelliert und relevante physikalische Prozesse simuliert werden. Die resultierenden Verdunstungskarten (vgl. Fig. 4-9) ermöglichen eine hydrologische «Neuinterpretation» der Wasserbilanzmethode (vgl. Kap. 10.2).

4.4 Verdunstungsverhältnisse

Die guten Ausgangsdaten lassen Modellierungen hoher räumlicher Auflösung (< 1 km²) für das gesamte Gebiet der Schweiz zu. Diese erlauben detaillierte Aussagen zur horizontalen und vertikalen Verteilung der jährlich rund 470 mm verdunstenden Wassers.

4.4.1 Jahresverdunstung

Die in Kapitel 4.1 besprochenen Prozesse führen dazu, dass die Verdunstung als einzige Grösse der Wasserbilanz mit zunehmender Höhe abnimmt (vgl. Fig. 4-7). Zusätzlich wird die Verdunstung im Gebirge, ungeachtet der tendenziell höheren Niederschlagsmengen, oftmals durch das Wasserangebot limitiert. Flachgrün-

digere Böden und hohe Gefällewerte führen dazu, dass weniger Wasser gespeichert werden kann.

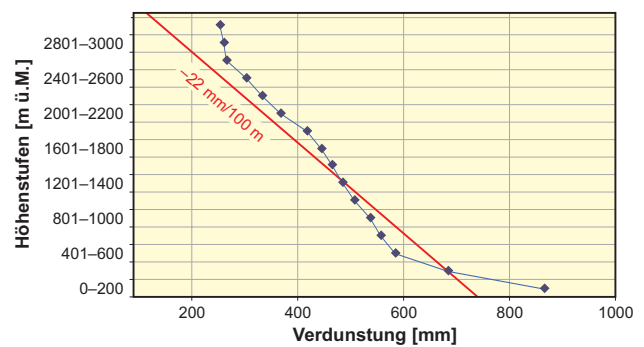


Fig. 4-7: Mittlere Jahresverdunstung der einzelnen Höhenstufen und linearer Verdunstungsgradient, berechnet für das Gebiet der Schweiz (Daten: MENZEL et al. 1999).

Die Höhenabhängigkeit der Verdunstung bestimmt auch das Kartenbild (vgl. Fig. 4-9). Daneben fallen besonders die hohe Verdunstung der Seeflächen und die grossen Unterschiede innerhalb kurzer Distanzen auf. Diese hohe räumliche Variabilität ist durch die jeweilige Bodenbedeckung bedingt (vgl. Fig. 4-8). In Nord-Süd-Profilen kann die Variabilität der Verdunstung weiter differenziert werden. Die tiefste mittlere Jahresverdunstung in Profil 1 (Fig. 4-9) wird für die Gipfelregionen der Alpen und den Siedlungsraum Bern errechnet. Die höchsten Werte in Profil 2 sind auf die Verdunstung des Zürichsees und des Lago Maggiore zurückzuführen.

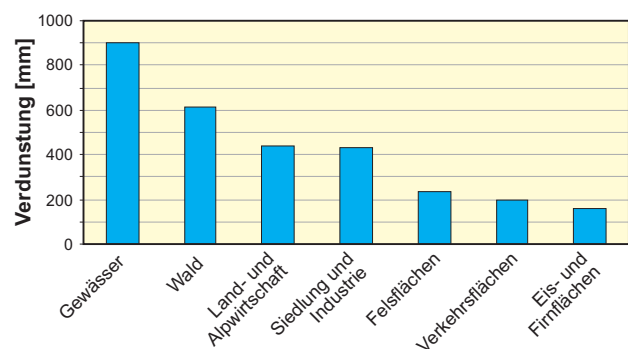


Fig. 4-8: Mittlere Jahresverdunstung von Flächen unterschiedlicher Bodenbedeckung (Periode 1973–1992) (nach MENZEL et al. 1999).

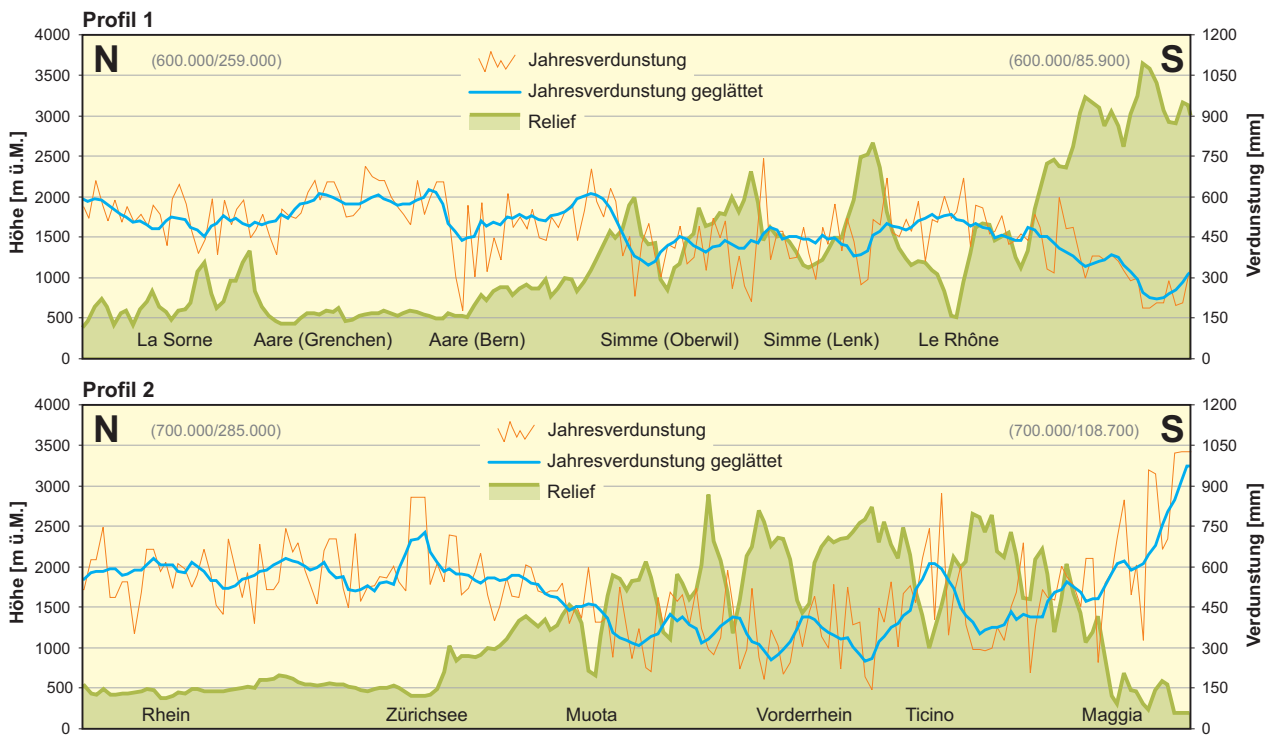
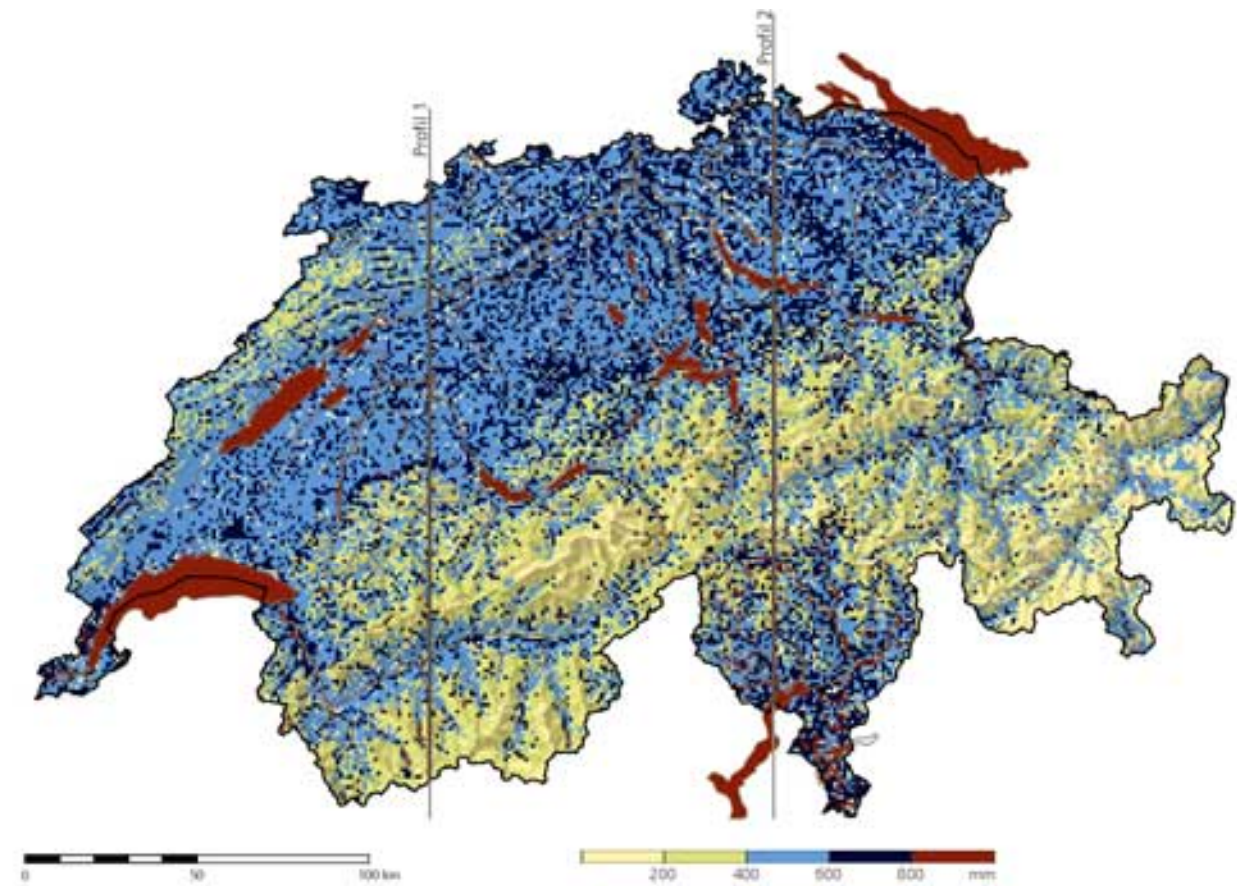


Fig. 4-9: Karte der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstungshöhen (Periode 1973–1992) mit zwei Profilschnitten (Daten: Menzel et al. 1999).

4.4.2 Verdunstung im Jahresverlauf

Figur 4-10 zeigt den Jahresverlauf der Tagesverdunstung auf drei Flächen mit unterschiedlicher Bodenbedeckung. In den Wintermonaten erfolgt von den landwirtschaftlich genutzten Flächen im Mittelland praktisch keine Verdunstung. Während der Hauptwachstumsphase der Vegetation in den Monaten April/Mai steigen die Tageswerte dann aber stark an; ab Juli nehmen sie wieder ab. Waldflächen verdunsten während der meisten Zeit erheblich mehr Wasser als landwirtschaftlich genutzte Flächen. Im Winter liefert die Evaporation von feuchten Oberflächen den Hauptteil der Verdunstung.

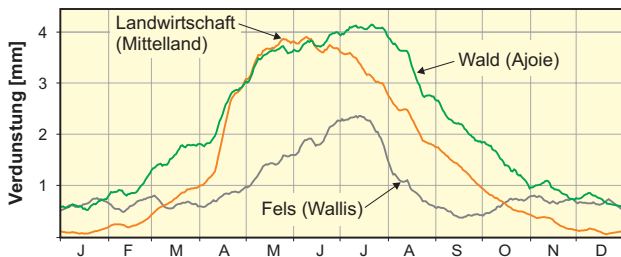


Fig. 4-10: Beispiele für mittlere tägliche Verdunstungshöhen verschiedener Oberflächen (nach MENZEL et al. 1999).

Für einen regionalen Überblick werden Flächen mit einheitlicher Landnutzung verglichen. In Figur 4-12 ist die Verdunstung von Waldgebieten der Höhenzone zwischen 800 und 1000 m ü.M. aus verschiedenen Landesteilen zusammengefasst. Sommerliche Spitzenwerte erreichen die Wälder im östlichen Mittelland.

Dagegen ist die Transpiration der Waldflächen im Jura, im Kanton Graubünden und im Tessin während des Sommers eingeschränkt, ein Hinweis auf die vergleichsweise ungünstigen Bodenverhältnisse. Im Winterhalbjahr ist die Waldverdunstung aufgrund der Klimabedingungen im Tessin am höchsten.

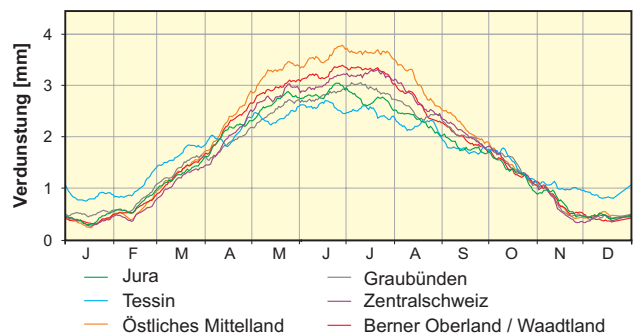


Fig. 4-12: Mittlere tägliche Verdunstungshöhen von Waldflächen (Höhenlage 800–1000 m ü.M.) in verschiedenen Regionen (Periode 1973–1992) (nach MENZEL et al. 1999).

4.4.3 Trend im 20. Jahrhundert

Bei den Verdunstungswerten im 20. Jahrhundert ist eine signifikante Zunahme festzustellen (vgl. Fig. 4-11). Obschon Modellrechnungen für das Einzugsgebiet der Thur eine weitere Zunahme der Verdunstung von rund 12 % im 21. Jahrhundert erwarten lassen, sollten daraus keine einfachen Beziehungen der Art «höhere Mitteltemperaturen bedeuten mehr Verdunstung» abgeleitet werden (GURTZ et al. 1997).

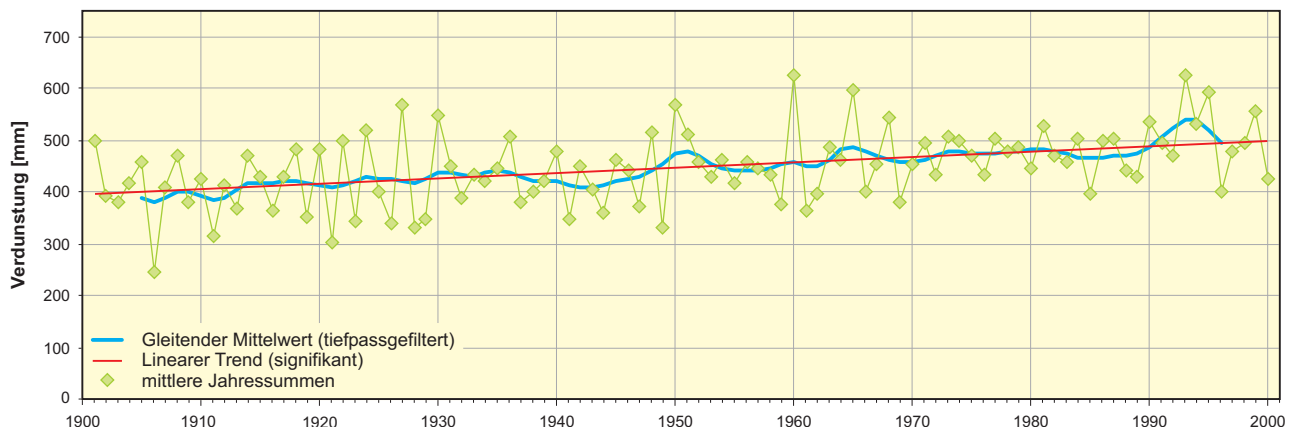


Fig. 4-11: Mittlere Jahresverdunstung für das Gebiet der Schweiz im 20. Jahrhundert (Daten: B. SCHÄDLER, BWG).

5 Abfluss

Kennziffern

Mittlere Jahresabflusshöhe Schweiz (1961–1990)	991 mm		Quelle: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a
Mittlere Jahresabflussspende Schweiz (1961–1990)	31 l/s·km ²		Quelle: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a
Mittlere Jahresabflussmenge Schweiz (1961–1990)	1297 m ³ /s		Quelle: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a
Grösster gemessener Abfluss	5090 m ³ /s	Rhein – Basel, 1999	Quelle: BWG
Längste Abflussmessreihe	ab 1808	Rhein – Basel	Quelle: SIGRIST 1988

5.1 Abfluss messen

Mit Messungen an fest installierten Messstationen und Einzelmessungen an temporären Standorten erheben die Landeshydrologie, einige Kantone, Forschungsinstitutionen und Private Wasserstände und Abflüsse. Bei Hochwasser werden die Spitzenabflusswerte bestimmt, in Trockenperioden die Minimalabflüsse erfasst. Dabei kommen entsprechend der unterschiedlichen Gewässertypen und der grossen Variationsbreite der Messwerte verschiedenartige Messgeräte und -methoden zum Einsatz.

5.1.1 Wasserstand und Abfluss

Das Ziel der Abflussmessung in einem Fließgewässer besteht darin, die in einem Zeitintervall von einer Sekunde durch einen ausgesuchten Querschnitt fließende Wassermenge zu bestimmen (vgl. Fig. 5-1).

Aus praktischen Überlegungen setzt man vielfach die bei unterschiedlicher Wasserführung gemessenen Abflussmengen in Beziehung zum jeweiligen, an einem Pegel beobachteten Wasser- resp. Pegelstand. Diese Beziehung wird als Abflusskurve bezeichnet (vgl. Fig. 5-2).

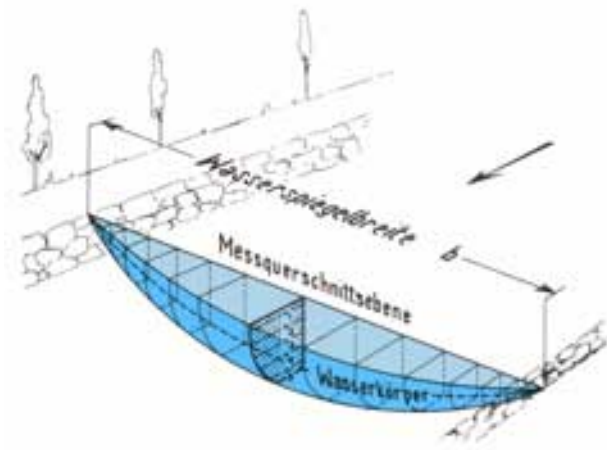


Fig. 5-1: Erläuterungsskizze Abflussmessung: Wassermenge, welche pro Sekunde durch den Messquerschnitt fließt (LH 1982).

Ist die Abflusskurve einmal aufgestellt, so sind nur noch periodisch weitere Abflussmengenmessungen durchzuführen, um die Abflusskurve zu verifizieren und eventuelle Änderungen feststellen zu können. Mit Hilfe der Abflusskurve kann die abgeflossene Wassermenge zu jedem beliebigen Zeitpunkt aus dem beobachteten Wasserstand bestimmt werden.

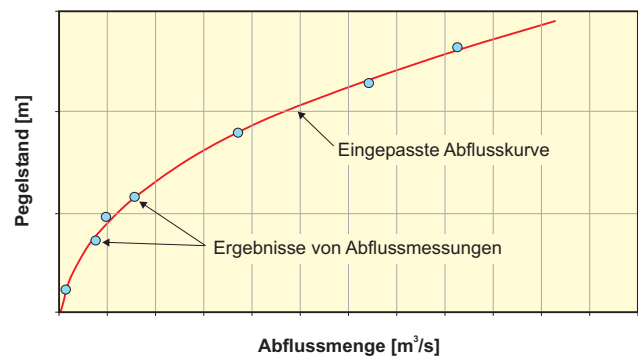


Fig. 5-2: Erläuterungsskizze Abflusskurve: Beziehung zwischen Abfluss und Pegelstand (nach LH 1982).

5.1.2 Messung des Wasserstands

Es werden sowohl nichtregistrierende als auch registrierende Messeinrichtungen eingesetzt. Heute werden zunehmend Geräte mit elektronischer Datenerfassung installiert. Übermittlung und Bearbeitung der Daten können so praktisch nahtlos an die Messung anschließen. Bestehende mechanische Registriergeräte wie Limnigraphen mit Schwimmer können durch ein Digitalisiergerät (Winkelcodierer, vgl. Fig. 5-6) ergänzt werden.

Bei der ältesten Art der Wasserstandsmessung wird die Höhe des Wasserspiegels an einer fest installierten Pegellatte abgelesen. Lattenpegel (s. Fig. 5-3) werden je nach Form und Beschaffenheit der Flussufer und der Strömungsverhältnisse in Messschächten, Ufernischen, an Messstegen oder direkt an Ufermauern und Böschungen befestigt.

Hochwassergrenzwertpegel (s. Fig. 5-4 und Fig. 5-17) messen nur den höchsten Wasserstand während eines Hochwassers. Sie werden vorwiegend bei Wasserüberfällen installiert. Die Messungen erlauben eine Abschätzung des Abflusses mit hydraulischen Berechnungen. Im Innern des unten geöffneten Rohrs ist ein Massstab installiert, auf dem ein wasserlösliches Farbband klebt. Das während eines Hochwassers ins Rohr einströmende Wasser wäscht die Farbe ab, so dass später der höchste Wasserstand abgelesen werden kann.



Fig. 5-3: Lattenpegel, Riale di Pincascia – Lavertezzo (TI).

Die kontinuierliche Aufzeichnung des Pegels erfolgt mit Schwimmern, hydrostatischen Messgeräten oder Radar. Die berührungslos messenden Radareinrichtungen (vgl. Fig. 5-5) bieten den Vorteil, dass kein Einbau ins Wasser erforderlich ist. Geräte und Messungen werden nicht durch Treibholz, Geschiebe etc. beeinträchtigt. Sehr weit verbreitet sind weiterhin pneumatische Anlagen und Pegel mit Schwimmern (s. Fig. 5-6). Installation und Betrieb dieser Messgeräte sind vergleichsweise aufwendig. Die Messstellen sollten bei allen Wasserständen repräsentativ und gleichzeitig vor Beeinträchtigungen durch Pflanzen, Geschiebe etc. möglichst geschützt sein.



Fig. 5-5: Pegelmessung mit Pulsradar, Alp – Einsiedeln (SZ).

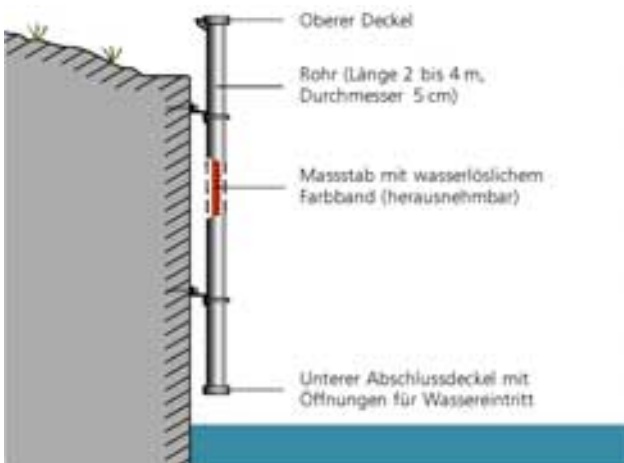


Fig. 5-4: Hochwassergrenzwertpegel (Skizze aus KAN 2002).



Fig. 5-6: Pegel mit Schwimmerregistriergerät, Inn – St. Moritz Bad (GR).

5.1.3 Messung des Abflusses

Eine breite Palette von Messgeräten steht für die manuelle bis elektronische Messung des Abflusses zur Verfügung.

Hydrometrische Flügel (s. Fig. 5-7) sind die meistverwendeten Messgeräte. Gemessen wird die Fließgeschwindigkeit über dem gesamten Flussquerschnitt. Aus vielen Einzelmessungen kann die pro Zeiteinheit abgeflossene Wassermenge berechnet werden (vgl. Fig. 5-1). Der Flügel wird vom Ufer oder von einem Messsteg aus an einer Stange oder am Seil eingesetzt. Seilflügelanlagen ermöglichen den Einsatz da, wo andere Installationen zu aufwendig oder alternative Messmethoden zu gefährlich sind. Analog zur Flügelmessung erfolgt die Messung mit dem magnetisch-induktiven Messgerät (s. Fig. 5-8).

Der «Acoustic Doppler Current Profiler» (ADCP, vgl. Fig. 5-9) ist ein Messgerät neuester Messtechnologie. Vier Akustiksensoren messen die Wassertiefe, die integrale Fließgeschwindigkeit über die Tiefe und die Verschiebung des Gerätes relativ zur Flusssohle. Die Einsatzmöglichkeiten sind dieselben wie beim hydrometrischen Flügel. Da das Messgerät aber nicht unter Was-



Fig. 5-8: Magnetisch-induktives Messgerät.

ser getaucht werden muss und schnellere Messungen erlaubt, ist es bestens für die Messung von Hochwassern geeignet.

Mit dem Tauchstab nach Jens (s. Fig. 5-10) kann die Fließgeschwindigkeit in kleinen Fließgewässern integrierend über die Wassertiefe erfasst werden. Messun-



Fig. 5-7: Hydrometrischer Flügel an einer Seilflügelanlage.



Fig. 5-9: Trimaran-Schwimmkörper mit Akustik-Doppler-Messgerät (ADCP).

gen mit dem Tauchstab erreichen im Allgemeinen nicht die Genauigkeit von Flügelmessungen; sie bedeuten aber eine grosse Einsparung an Zeit, Personal und Material.



Fig. 5-10: Jensstab: Aus dem Wasserdruck auf den Stab kann die mittlere Fließgeschwindigkeit abgeleitet werden.

Bei der Abflussbestimmung mit Hilfe der Verdünnungsmethode (s. Fig. 5-11) wird dem Fluss eine genau bestimmte Menge eines Markierstoffes (Tracer) beigegeben. Als Tracer werden vor allem Salz und fluoreszierende Stoffe verwendet. Anhand der flussabwärts gemessenen Konzentration kann die zur Verdünnung benötigte Wassermenge berechnet werden. Je nach Methode erfolgt die Berechnung direkt nach Abschluss der Messung oder aber erst später im Labor.

Künstliche Einbauten wie z.B. Venturikanäle oder Überfälle (vgl. Fig. 5-12 und Fig. 5-18) erzeugen im Fließgewässer einen Fließwechsel, so dass der Abfluss zum Wasserstand in einer eindeutigen Beziehung steht. Die Abflussmenge kann hier direkt aus dem Wasserstand abgeleitet werden.



Fig. 5-11: Verdünnungsverfahren: Einspeisung eines Fluoreszenztracers mit der Mariott'schen Flasche.



Fig. 5-12: Künstlicher Überfall, Massa – Blatten (VS).

5.1.4 Messtationen

Die schweizerischen Abflussmessnetze umfassen heute rund 200 Stationen des Bundes, 300 kantonale Stationen an kleineren Gewässern und 30 Stationen Privater (vgl. Fig. 5-20). Nebst den permanent messenden Abflussstationen werden an 107 Hochwassermessstationen die Grenzwertpegel nach grösseren Hochwassern abgelesen (vgl. Fig. 5-17). Aufbau und technische Ausrüstung von Abflussmessstationen sind an das jeweilige Gewässer angepasst (vgl. Beispiele Seite 51). Um bei Flüssen mit grossen Schwankungen in der Wasserführung auch tiefe Wasserstände messen zu können, wird nach Möglichkeit eine Niedrigwasserrinne eingebaut (s. Fig. 5-13 und Fig. 5-14).



Fig. 5-13: Messstation Goneri – Oberwald (VS)
 Messung Wasserstand Radar
 Messung Abfluss Flügel
 (mit Niedrigwassergerinne)



Fig. 5-16: Messstation Gürbe – Burgistein (BE)
 Messung Wasserstand Pneumatische Pegelmessung
 Messung Abfluss Flügel



Fig. 5-14: Messstation Orbe – Le Chenit (VD)
 Messung Wasserstand Schwimmer
 Messung Abfluss Flügel
 (mit Niedrigwassergerinne)



Fig. 5-17: Messstation Bütschlibach – Bumbach (BE)
 Messung Wasserstand Hochwassergrenzwertpegel
 Messung Abfluss Hydraulische Berechnung



Fig. 5-15: Messstation Aare – Bern (BE)
 Messung Wasserstand Pneumatische Pegelmessung
 Messung Abfluss Flügel an Seiflügelanlage



Fig. 5-18: Messstation Rotenbach – Plaffeien (FR)
 Messung Wasserstand Schwimmer
 Messung Abfluss Dreiecküberfall, volumetrisch

5.1.5 Messnetze

Die systematische Beobachtung der Wasserstände an Seen und Flüssen in der Schweiz beginnt mit der Gründung der Schweizerischen Hydrometrischen Kommission 1863. Die ursprünglich reinen Wasserstandsmessungen wurden mit der Zeit durch die Bestimmung der Abflussmengen ergänzt. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde das eidgenössische Messnetz durch kantonale und private Stationen wesentlich erweitert (vgl. Fig. 5-19 und Fig. 5-20). Die kantonalen Stationen erfassen in erster Linie kleinere Fließgewässer (durchschnittliche Einzugsgebietsgrösse 26 km²), während das Messnetz der Landeshydrologie alle grösseren Flüsse abdeckt (durchschnittliche Einzugsgebietsgrösse 210 km²). Fig. 5-21 zeigt die aktuell in Betrieb stehenden Stationen des eidgenössischen Messnetzes.

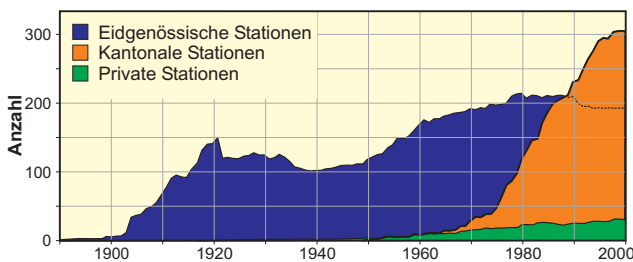


Fig. 5-19: Entwicklung der Abflussmessnetze von Bund, Kantonen und Privaten bis ins Jahr 2000 (nach KAN 2002).



Fig. 5-20: Messnetze im Jahr 2000 (nach KAN 2002).

5.1.6 Messfehler

Die Genauigkeit der Abflussmessung ist vom Gewässertyp, der Messstation, der Messmethode und dem Messgerät abhängig. Normalerweise sind Messungen bei Mittelwasserabfluss genauer als bei Hochwasserabfluss. Der totale zufällige Fehler der Abflussmessung (f_Q) mit dem hydrometrischen Flügel kann mit Hilfe der Formel

$$f_Q = \pm \sqrt{(f_V)^2 + \frac{1}{X} [(f_B)^2 + (f_T)^2 + (f_E)^2 + (f_P)^2 + (f_C)^2]}$$

abgeschätzt werden. Bei einem Fluss mit natürlichem Gerinne und Mittelwasserabfluss können für eine Messung mit Messflügel beispielsweise die folgenden Einzelfehler angenommen werden:

f_V : Fehler an der mittleren Fließgeschwindigkeit im Messquerschnitt in Funktion der Anzahl Vertikalen X

$$f_V = \pm 3 \% \text{ bei } X = 20$$

f_B : Fehler bei der Bestimmung der Lage der Messvertikalen

$$f_B = \pm 1 \%$$

f_T : Fehler bei der Bestimmung der Wassertiefe in den Messvertikalen

$$f_T = \pm 1 \%$$

f_E : Fehler bei der Bestimmung der Geschwindigkeit in einem Messpunkt (v_m)

$$f_E = \pm 4 \% \text{ bei } v_m = 0,5 \text{ m/s, Messdauer } 1 \text{ min}$$

f_P : Fehler in der mittleren Fließgeschwindigkeit in der Vertikalen in Funktion der Anzahl Messpunkte pro Vertikale

$$f_P = \pm 2 \% \text{ bei } 5\text{-Punkt-Methode}$$

f_C : Fehler an der mittleren Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eichung des Messflügels

$$f_C = \pm 1 \%$$

Dies ergibt einen totalen zufälligen Fehler von $f_Q = \pm 3,2 \%$ für das gewählte Beispiel. Bei der Hochwassermessung kann der Messfehler in Abhängigkeit der örtlichen Verhältnisse weit höher sein.

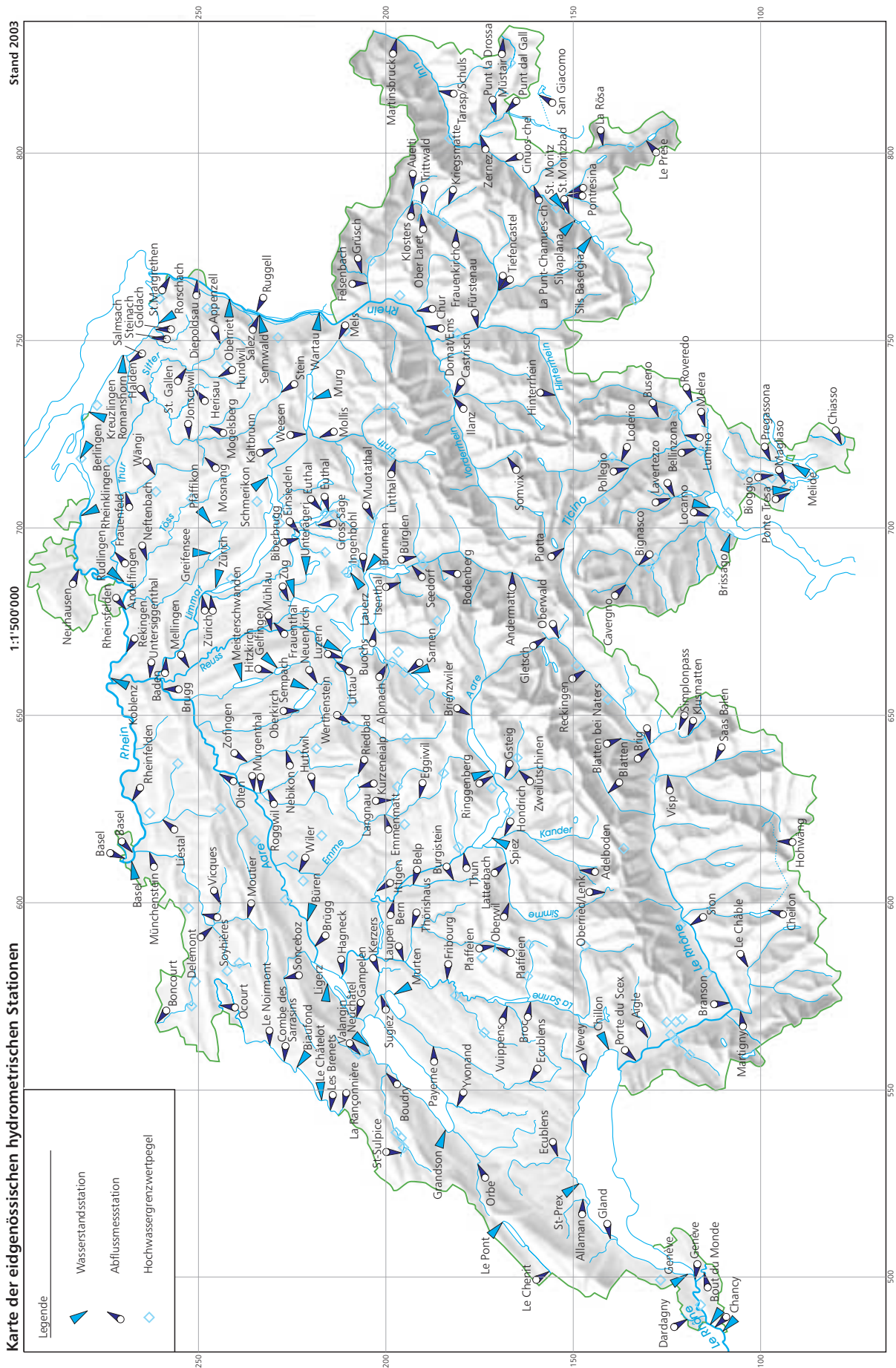


Fig. 5-21: Karte der eigenössischen hydrometrischen Stationen (Daten BWG).

5.2 Abfluss schätzen

Wo nicht gemessen werden kann, wird versucht, den Abfluss zu schätzen.

5.2.1 Abschätzung von langjährigen Monatsmitteln des Abflusses

Vielfach werden zur Bestimmung von monatlichen Abflussmengen in ungemessenen Gebieten Regressionsbeziehungen verwendet. Die Messung und Aufbereitung der entscheidenden klimatischen Grössen bietet im Gebirge jedoch auch heute noch derart grosse Schwierigkeiten, dass ein solches Verfahren nicht zu empfehlen ist. Deshalb wurde eine Methode entwickelt, welche die Abschätzung der Monatsmittel des Abflusses (MQ (Monat)) aufgrund der Abschätzung der mittleren jährlichen Abflüsse (MQ (Jahr)) und der Bestimmung des Abflussregimes bzw. der Pardé-Koeffizienten (vgl. Abschnitt 5.3.2) ermöglicht. In Figur 5-22 ist das Vorgehen dargestellt. Die Bestimmung der jährlichen mittleren Abflüsse erfolgt mit den Regressionsbeziehungen, welche in ASCHWANDEN (1985) beschrieben sind. Die Pardé-Koeffizienten (PK) der schweizerischer Gewässer sind in ASCHWANDEN & WEINGARTNER (1983) dargestellt. Das Verfahren und alle notwendigen Unterlagen finden sich in WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992).

5.2.2 Abschätzung von Hochwasserabflüssen

Eine mögliche Gliederung der Hochwasserabschätzverfahren, die sich primär an der Verfügbarkeit der vorhandenen Abflussdaten und an den Gebietskenntnissen orientiert, ist in Figur 5-23 dargestellt.

Liegen in einem Einzugsgebiet Abflussmessungen vor, können diese mit Hilfe der Extremwertstatistik ausgewertet werden. Beispielsweise kann aus den jährlichen Hochwasserspitzen mit Hilfe von empirischen und theoretischen Verteilungsfunktionen die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines Hochwasserabflusses bestimmt werden. Dabei ist wie folgt vorzugehen:

- Bereitstellung einer möglichst genauen und homogenen Messreihe der jährlichen Hochwasserspitzen.
- Wahl der Verteilungsfunktionen und des Parameterschätzverfahrens.
- Darstellung der empirischen Verteilung der Stichprobenwerte und der Verteilungsfunktionen. Berechnung der Vertrauensintervalle für unterschiedliche Signifikanzniveaus.

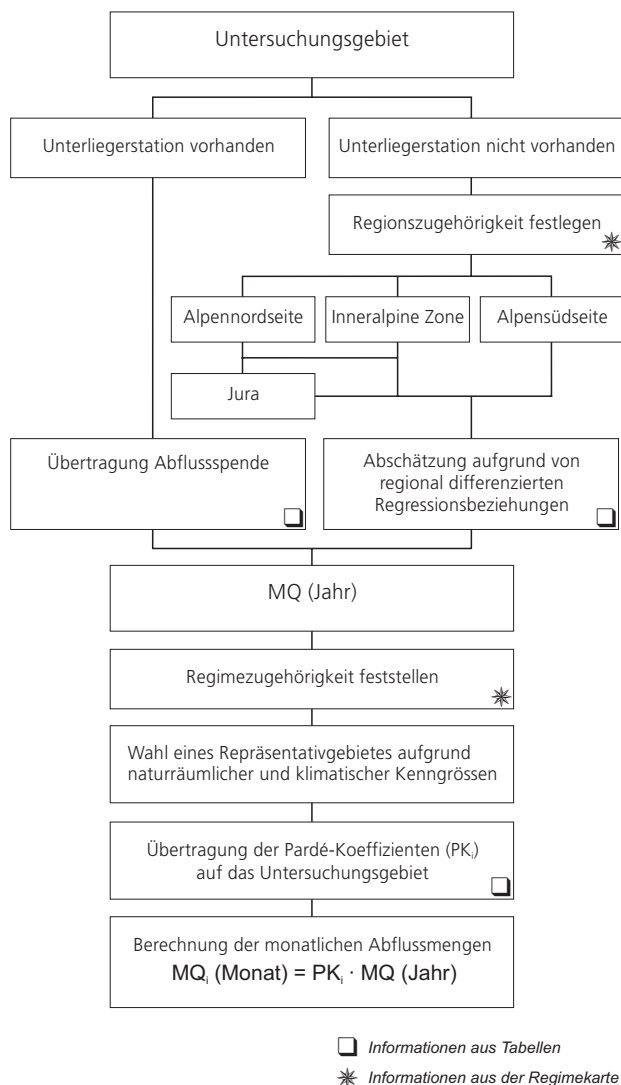


Fig. 5-22: Vorgehen bei der Abschätzung von langjährigen Monatsmitteln des Abflusses (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992).

Figur 5-24 zeigt das Resultat einer Extremwertstatistik der jährlichen Hochwasserspitzen von 1972–2002 an der Station Necker – Mogelsberg. Als analytische Verteilungsfunktion wurde die Allgemeine Extremwertverteilung gewählt und die Parameterschätzung erfolgte mithilfe der Momentenmethode. Für die Berechnung des Vertrauensintervalls wurde ein Signifikanzniveau von 90 % gewählt. Im Allgemeinen sollten Abschätzungen nicht weiter als bis zur dreifachen Dauer der Beobachtungsperiode (hellgelber Bereich) gemacht werden. Aus der Extrapolation ergibt sich ein HQ_{50} (Hochwasserabfluss, der im Mittel über eine lange Zeitperiode alle 50 Jahre auftritt) von $327 \text{ m}^3/\text{s}$.

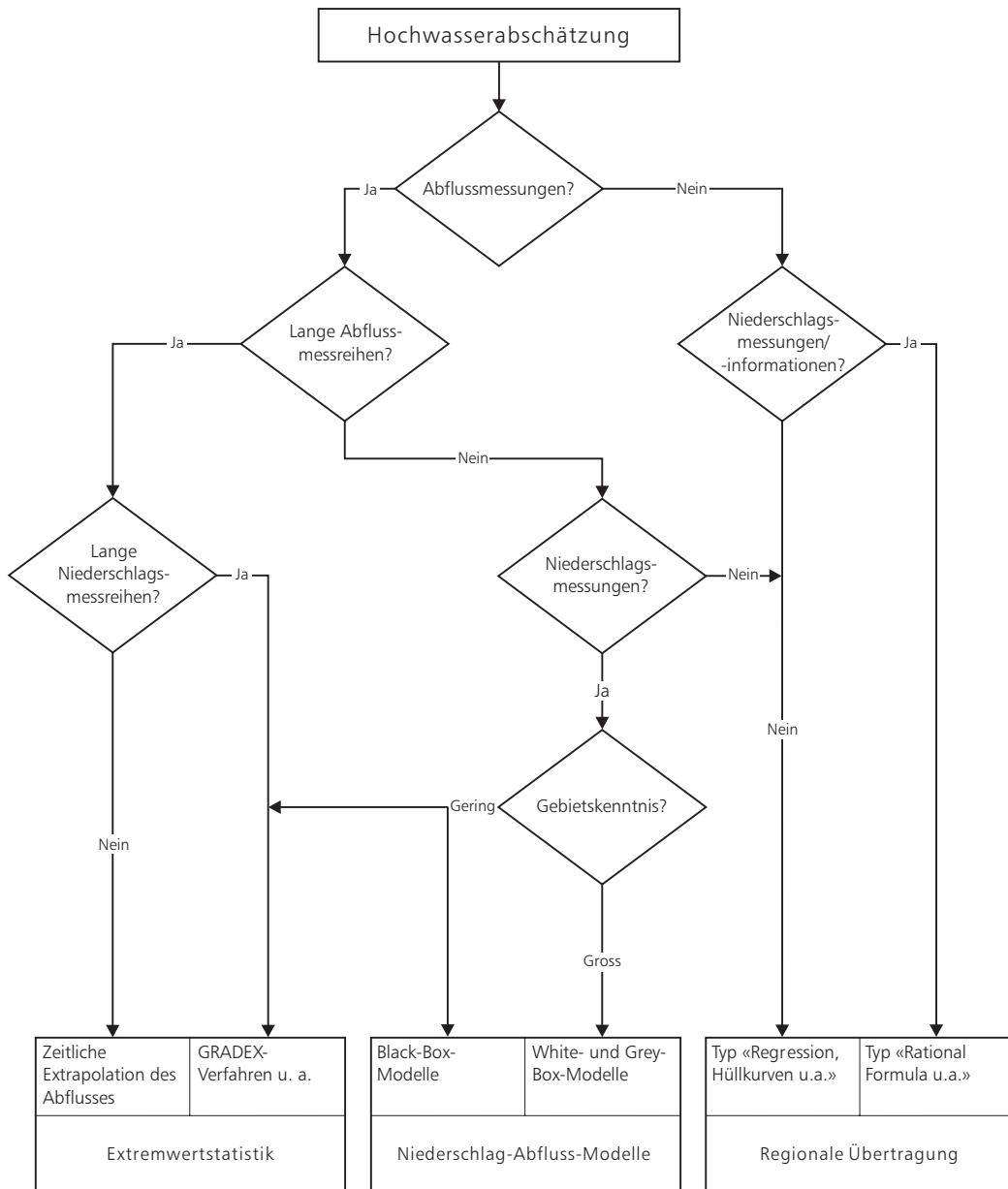


Fig. 5-23: Einordnung der Abschätzverfahren für Hochwasserabflüsse (SPREAFICO et al. 2003).

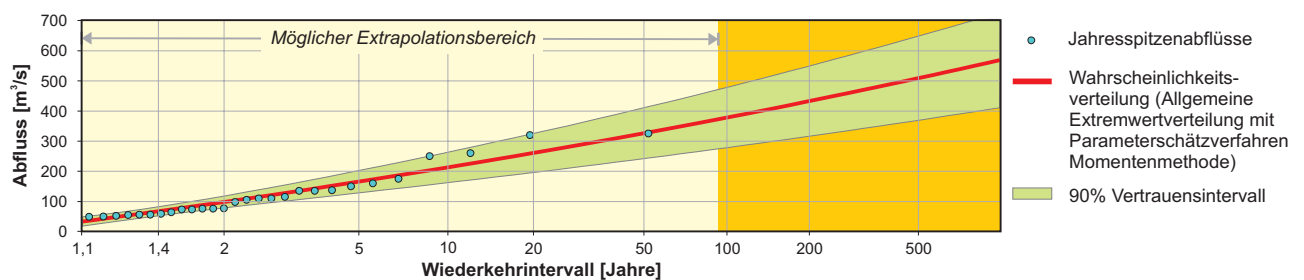


Fig. 5-24: Extrapolation der jährlichen Hochwasserspitzen an der Station Necker – Mogelsberg (Periode 1972–2002) (Daten: BWG).

Nach heutigem Ermessen wird der Necker aufgrund des Vertrauensintervalles wahrscheinlich einmal in 50 Jahren zwischen 240 und 420 m³ Wasser pro Sekunde führen.

Die Verfahren der Niederschlag-Abfluss-Modelle transformieren einen Niederschlag rechnerisch in einen Abfluss. Je nach Detaillierungsgrad, mit dem die physikalischen Prozessabläufe abgebildet werden, unterscheidet man zwischen Black-Box-, Grey-Box- und White-Box-Modellen. Da für ihren Einsatz meist umfassende Informationen über das Einzugsgebiet und hochaufgelöste Messwerte (Meteorologie und Abfluss) benötigt werden, sind N-A-Modelle in vielen Fällen keine Alternative zu den Verfahren der regionalen Übertragung.

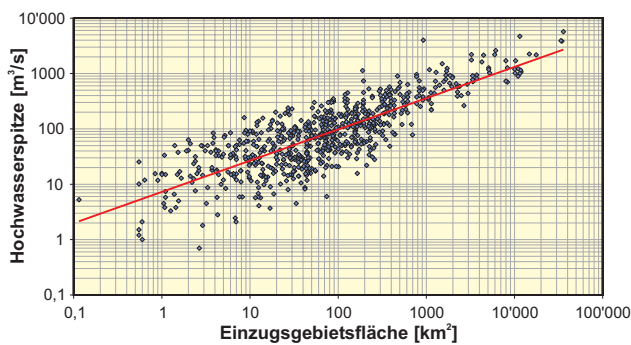


Fig. 5-25: Die höchsten in der Schweiz bis 1990 beobachteten Abflüsse (nach WEINGARTNER 1999).

Die Verfahren der regionalen Übertragung nutzen bekannte Zusammenhänge zwischen der hydrologischen Zielgrösse und verschiedenen Gebietskenngrössen aus den Bereichen Klima, Topographie, Boden, Geologie und Bodennutzung.

Zum Beispiel ist in Figur 5-25 der Zusammenhang zwischen den höchsten, in der Schweiz beobachteten Abflüssen und der Fläche des jeweiligen Einzugsgebietes dargestellt. Mit der daraus abgeleiteten Regressionsbeziehung lassen sich aufgrund der Einzugsgebietsfläche die Schwankungen der Hochwasserabflüsse zu etwa 70 % erklären. Die verwendeten Hochwasserbeobachtungen stammen aus der ganzen Schweiz. Durch das Ausscheiden von Regionen mit ähnlichem Hochwasserverhalten (vgl. Fig. 5-26) kann die grosse landschaftliche Heterogenität besser berücksichtigt werden, so dass der Erklärungsgehalt der Regressionen in einzelnen Regionen auf über 90 % steigt.

Das auf diesen Grundlagen basierende Hochwasserabschätzmodell GIUB'96 (WEINGARTNER 1999) ergibt trotz des einfachen Aufbaus vergleichsweise sehr gute Resultate (vgl. Fig. 5-27). Von zehn untersuchten Modellen beurteilt BARBEN (2003) nur vier Modelle als «gut geeignet», darunter zwei Versionen von GIUB'96. Allerdings kann kein Hochwasserabschätzverfahren in jedem Fall zuverlässige Ergebnisse garantieren. Allenfalls sind zusätzlich detaillierte prozessorientierte Untersuchungen für die Abschätzung notwendig.



Fig. 5-26: Hochwasserregionen der Schweiz und Lage der beobachteten Hochwasserabflüsse aus Fig. 5-25 (nach KAN 1995).

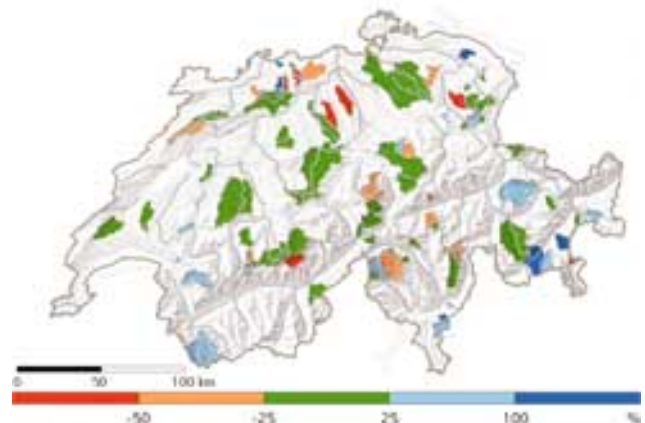


Fig. 5-27: Güte der Abschätzung 100jähriger Hochwasserspitzen mit dem Modell GIUB'96 (Fn). Die Farben zeigen die Abweichung der Modellwerte von den aus Messergebnissen extrapolierten Referenzwerten in %. Mehr als die Hälfte der Abschätzungen darf als gut betrachtet werden (grüne Gebiete) (nach BARBEN 2003).

Die Wahl der Abschätzverfahren wird durch verschiedene Fragen beeinflusst:

- Wofür wird die Hochwasserschätzung benötigt?
- Welche Hochwassergrösse (Spitze, Volumen, ...) ist mit welcher Genauigkeit gesucht?
- Welche Messstationen und Messungen sind im Gebiet vorhanden?
- Wie gross ist das Einzugsgebiet?
- Wieviel Zeit und Geld sind für die Abschätzung verfügbar?

Um die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in der Praxis zu erleichtern, wurde eine Praxishilfe mit der Beschreibung ausgesuchter Modelle erarbeitet (SPREAFICO et al. 2003). Für die Anwendung der Modelle in kleinen (unter 10 km²) und mittelgrossen Gebieten (10–500 km²) stehen zwei benutzerfreundliche Computerprogramme zur Verfügung (vgl. Fig. 5-28).



Fig. 5-28: Hauptbildschirm (oben) und Ergebnisdigramm (unten) des Hochwasser-Abschätzprogramms HQx_meso_CH für Gebiete von 10–500 km².

5.2.3 Abschätzung von Niedrigwasserabflüssen

In der Schweiz sind zahlreiche Oberflächengewässer durch verschiedenste wasserwirtschaftliche und bauliche Eingriffe beeinflusst (vgl. Kap. 5.4). Die wachsende Bevölkerung und deren Bedürfnisse und Ansprüche führen zur vermehrten Nutzung der Ressource Wasser. Dem steht die Anforderung gegenüber, die Wasservorräte nur soweit zu nutzen, als dies ökologisch vertretbar ist. Befürchtungen, welche – angesichts drohender Klimaveränderungen – von einer Zunahme der Häufigkeit hydrologischer Extremsituationen ausgehen, haben das Interesse am Niedrigwasser im Hinblick auf mögliche Szenarien der Bewirtschaftung und des Schutzes endgültig geweckt.

Niedrigwasser können mit verschiedenen Kenngrössen beschrieben werden (z.B. NMxQ = niedrigster mittlerer Abfluss über x Tage innerhalb eines Niedrigwasserjahres). Der Gesetzgeber hat sich für die Abflussmenge Q₃₄₇ entschieden, ein statistisch zu ermittelnder Wert, welcher standardmässig in hydrologischen Jahrbüchern veröffentlicht wird. Das Gewässerschutzgesetz (GSchG, Art. 4) definiert Q₃₄₇ als «Abflussmenge, die gemittelt über 10 Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauungen, Entnahmen oder Zuleitungen von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist». Diese Definition impliziert, dass

1. die Abflussmenge Q₃₄₇ aus Messungen hergeleitet wird,
2. die Wasserführung nicht wesentlich beeinflusst sein darf, und lässt
3. die zeitliche Fixierung der Beobachtungsperiode vorerst unbeantwortet.

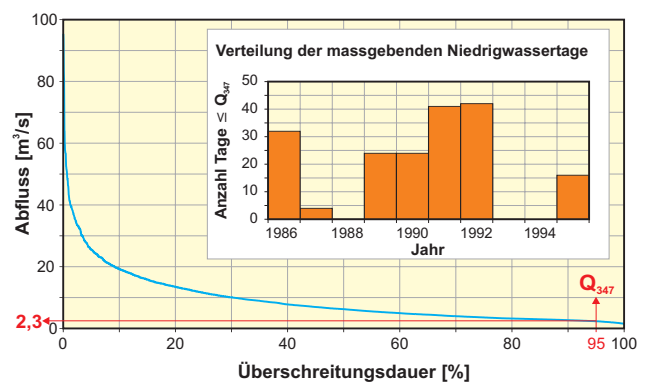


Fig. 5-29: Dauerlinie der Station Sense – Thörishaus (Periode 1986–1995) und Anzahl Tage pro Kalenderjahr, an denen der Dekadenmittelwert Q₃₄₇ von 2.3 m³/s unterschritten wird (nach ASCHWANDEN & KAN 1999).

Die Abflussmenge Q_{347} wird mit Hilfe einer Dauerkurve, auch Dauerlinie oder Summenhäufigkeitsverteilung genannt, ermittelt. Sie entspricht der Wassermenge, die in 95 % aller Fälle erreicht oder überschritten und dementsprechend in nur 5 % der Fälle unterschritten wird (vgl. Fig. 5-29). Figur 5-31 zeigt auf, dass das Q_{347} einzelner Jahre massiv über oder unter dem Dekadenmittelwert liegen kann.

Wenn keine oder zu kurze Messreihen vorliegen, muss Q_{347} geschätzt werden. Bundesstellen erlassen hierzu fachtechnische Weisungen. Die Landeshydrologie hat Verfahren für die Grobabschätzung der Abflussmenge Q_{347} entwickelt und diese zusammen mit dem BUWAL publiziert (ASCHWANDEN & KAN 1999, BUWAL 2000). Als Praxishilfe wurde eine Karte der Q_{347} entwickelt. Figur 5-30 beschreibt die Vorgehensweise bei der Abschätzung.

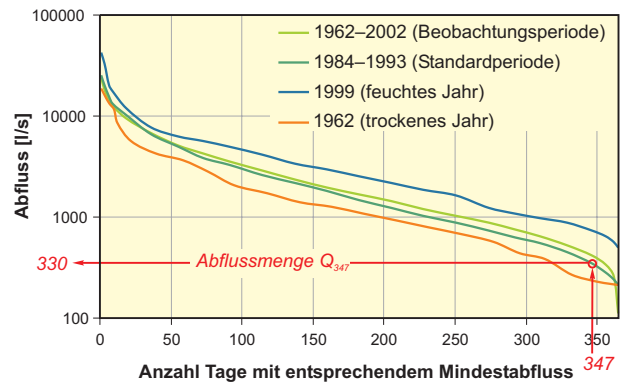


Fig. 5-31: Dauerlinien der Station Urnäsch – Hundwil (AR) (Daten: BWG).

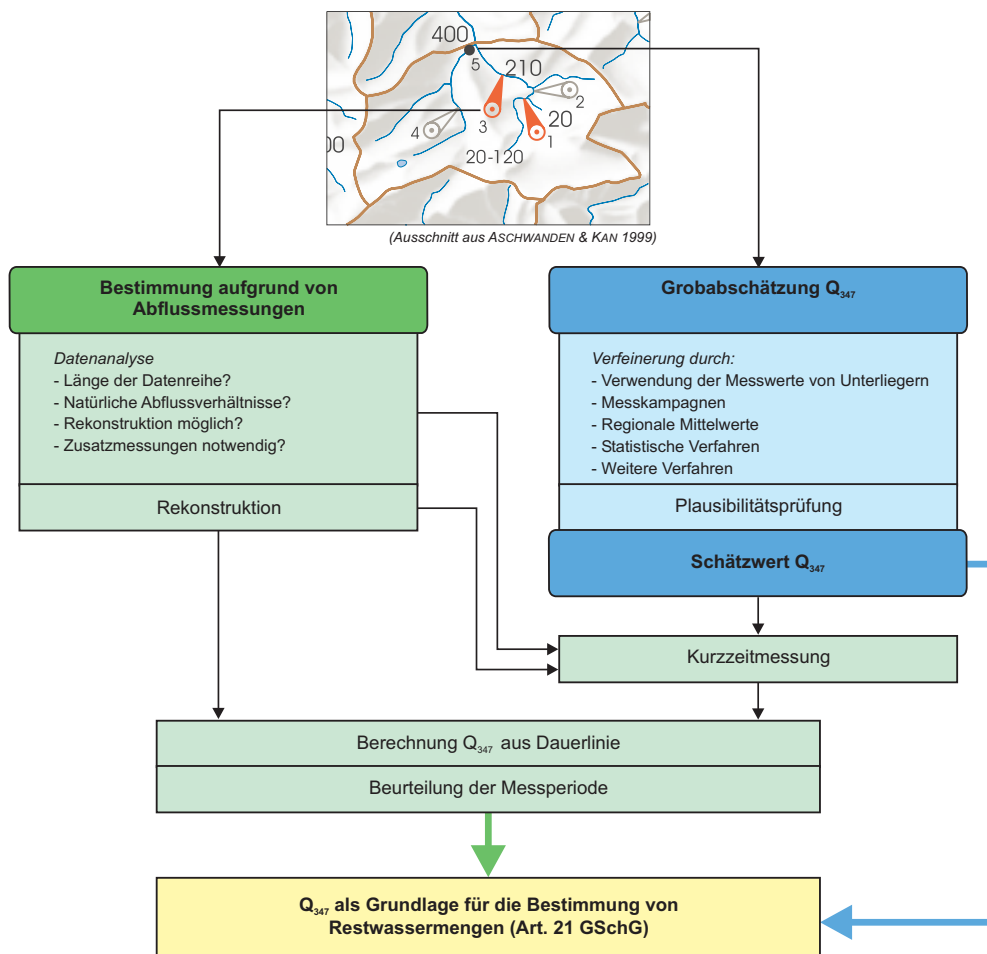


Fig. 5-30: Anleitung zur Bestimmung der Abflussmenge Q_{347} (nach ASCHWANDEN & KAN 1999).

5.3 Abflussverhältnisse in der Schweiz

Bedingt durch die natürlichen Variabilitäten können die Abflüsse von Jahr zu Jahr und von Gebiet zu Gebiet sehr verschieden sein. Dennoch ergeben sich Regelmässigkeiten in Verbindung mit der Höhe des Einzugsgebietes.

5.3.1 Jährliche Abflussmengen

54'460 Mio m³ Wasser verlassen die Schweiz pro Jahr. 13'575 Mio m³ sind zuvor aus dem Ausland zugeflossen; die restlichen 40'885 Mio m³ entsprechen dem eigentlichen Abfluss aus dem Gebiet der Schweiz (Periode 1961–1990) (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

Der mittlere Jahresabfluss aus der Schweiz beträgt ohne Zuflüsse 1296 m³/s (vgl. Tab. 5-1). Gleichmässig auf die Einzugsgebietsfläche von 41'285 km² verteilt entspricht das einer 991 mm hohen Wasserschicht. Die Abflusshöhe wird als anschauliche Masseinheit beim Vergleich von Gebietsabflüssen verwendet.

Figur 5-32 zeigt die Gebietsabflüsse aus den schweizerischen Bilanzierungsgebieten.

Flussgebiet	Fläche [km ²]	Abflusshöhe [mm/a]	Abfluss [m ³ /s]
Rhein	27'823	952	840
Rhone	7691	910	222
Ticino	3352	1458	155
Inn	1818	964	56
Adda	475	1360	20
Adige	126	836	3
Schweiz	41'285	991	1296

Tab. 5-1: Mittlere Jahresabflüsse aus den schweizerischen Flussgebieten (Periode 1961–1990) ohne Zuflüsse aus dem Ausland (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

Die abflussreichsten Gebiete entlang des Alpenhauptkamms erreichen Abflusshöhen von über 2000 mm. Weniger Abfluss erzeugen die inneralpinen Täler und das Mittelland. Entlang des Juras und im Norden der Schweiz sinken die Abflüsse auf unter 300 mm pro Jahr.

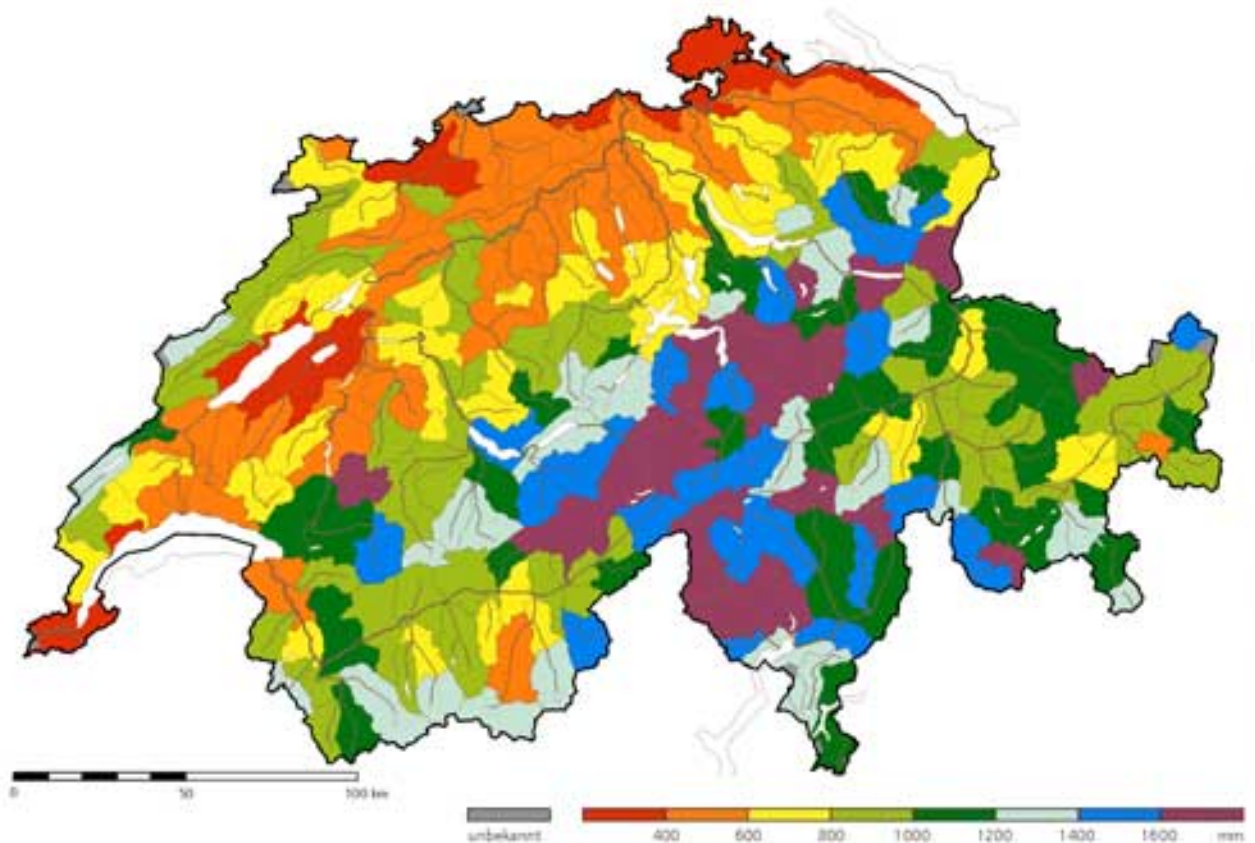


Fig. 5-32: Mittlere jährliche Gebietsabflüsse der Periode 1961–1990 (nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

5.3.2 Saisonale Verteilung der Abflüsse

Anhand der saisonalen Verteilung lässt sich der komplexe Prozess der Abflussbildung nachvollziehen. Bei den Flüssen, deren Einzugsgebiet grossteils im Gebirge liegt, wird das Abflussverhalten von Akkumulation und Schmelze des Schnees oder Gletschereises geprägt. Das Abflussminimum der Massa (VS) (mittlere Gebietshöhe 2945 m ü.M.) z.B. liegt im Winter, wenn der grösste Teil der Niederschläge gespeichert wird; die Abflussspitze mit hohem Schmelzwasseranteil wird im Sommer erreicht (vgl. Fig. 5-33, links). Der Abfluss der Venoge (VD) (mittlere Gebietshöhe 700 m ü.M.) dagegen geht während der Sommermonate – trotz tendenziell höherer Niederschläge – kontinuierlich zurück. Die Ursache dafür liegt im gesteigerten Wasserbedarf der Vegetation. Im Frühling, wenn sich die abflussverstärkenden Prozesse (hohe Niederschläge, Schmelzwasser-

beitrag, kleine Verdunstung) überlagern, erreicht der Abfluss sein Maximum (vgl. Fig. 5-33, rechts).

Die monatlichen Abflüsse unterliegen im saisonalen Verlauf charakteristischen Schwankungen, die durch die sogenannten Abflussregimes beschrieben werden (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992). 16 Regimetypen umfassen die ganze Bandbreite der schweizerischen Fließgewässer. Eingipflige Regimes sind typisch für den Alpenraum, wo Schnee und Eis den saisonalen Gang dominieren. Mehrgipflige Regimes zeigen den wechselnden Einfluss von Schnee, Niederschlag und Verdunstung. Sie sind typisch für Einzugsgebiete nördlich der Alpen unterhalb von rund 1500 m ü.M. Auf der Alpensüdseite werden die klimatischen Besonderheiten durch vier eigene Regimetypen beschrieben. Das Abflussregime längerer Flüsse kann zwischen Quelle und Mündung mehrmals wechseln (vgl. Fig. 5-34).

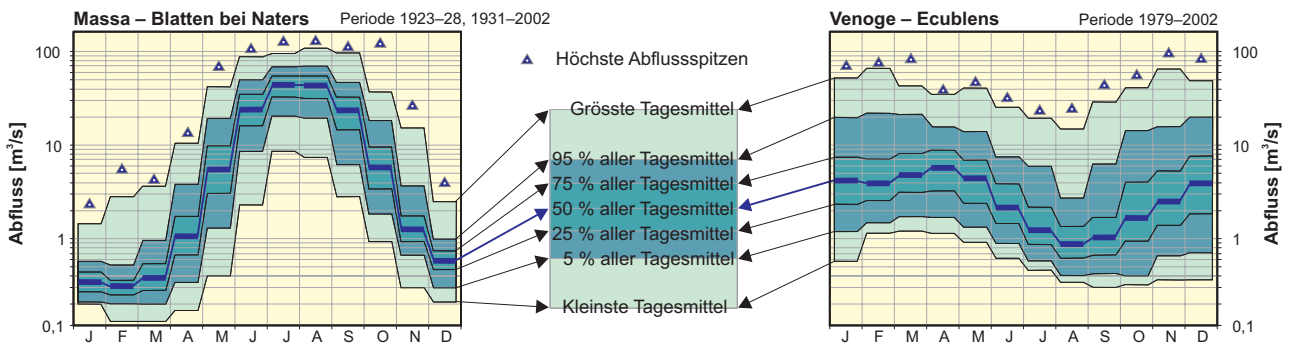


Fig. 5-33: Monatliche Verteilung der Tagesmittel des Abflusses und höchste Abflussspitzen (nach BWG 2003).



Fig. 5-34: Ausschnitt aus der Karte der Abflussregimes (nach WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992).

Das Regime wird über die Bestimmung der Pardé-Koeffizienten der einzelnen Monate (PK_i) definiert. Der Pardé-Koeffizient zeigt das Verhältnis zwischen dem mittleren Abfluss im betreffenden Monat (MQ_i (Monat)) und dem mittleren Jahresabfluss (MQ (Jahr)).

$$PK_i = \frac{MQ_i \text{ (Monat)}}{MQ \text{ (Jahr)}}$$

Die Pardé-Koeffizienten schweizerischer Gewässer bewegen sich zwischen etwa 0,02 und 3,4.

5.4 Eingriffe ins Abflussgeschehen

Die Gewässer werden seit Jahrhunderten als Transportwege und zum Antrieb von Maschinen genutzt und entsprechend beeinflusst.

Die meisten grossen Flusskorrekturen und Seeregulierungen wurden im 19. Jahrhundert ausgeführt (vgl. Fig. 5-35, Fig. 5-36). Die Entsumpfung der Talböden und die Verbauung der Zuflüsse dauerte vielerorts bis ins 20. Jahrhundert an. Von den grösseren Seen sind Boden-, Walen-, Sempacher- und Hallwiler See bis heute unreguliert. Mit der Eindämmung und Begradi-

gung der Fliessgewässer und der Bewirtschaftung der Seeabflüsse wurden mehrere Ziele verfolgt:

- Verbesserter Schutz vor Hochwasser,
- Erschliessung urbanisierbarer Flächen,
- Verringerung der Seuchengefahr,
- Optimierung der Nutzung von Gewässern zu Transportzwecken.



Fig. 5-36: Flusskorrekturen und Seeregulierungen im 19. Jahrhundert (nach GÖTZ 1988).

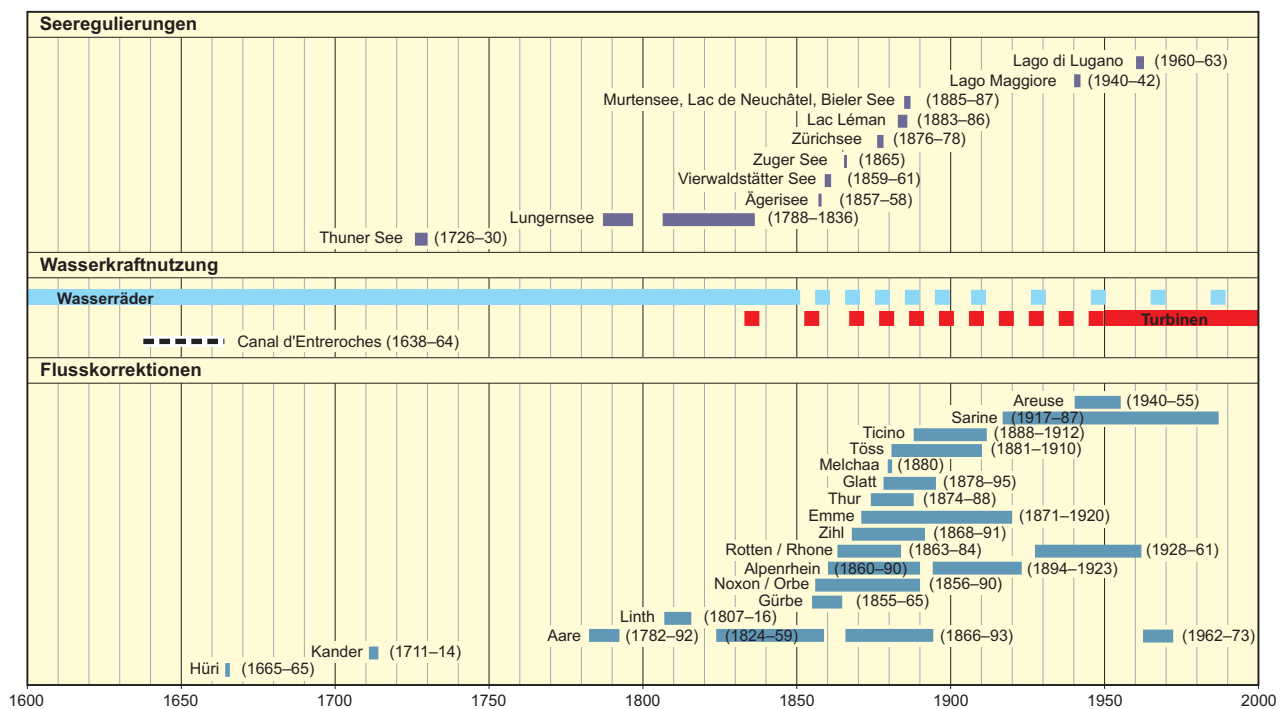


Fig. 5-35: Bedeutende Eingriffe in das Abflussgeschehen schweizerischer Gewässer zwischen 1600 und 2000 (Quellen: HÜGLI 2002, SCHNITZER 1992, VISCHER 1986).

Trink- und Brauchwassernutzung sowie die Wasserkraftnutzung zählen in vielen Gewässern zu den mengenmässig bedeutenden Eingriffen in das Abflussgeschehen. Die Wasserkraftnutzung wurde in den Alpen und Voralpen zwischen 1950 und 1970 stark ausgebaut. Ein wesentlicher Aspekt der Beeinflussung ist die Veränderung des natürlichen Abflussverhaltens durch die Entnahme und Rückgabe von Wasser. Figur 5-37 zeigt den Grad der Beeinflussung nach der Inbetriebnahme von Kraftwerken.

Die grossen Flüsse im Mittelland zeigen eine leichte Verlagerung der Abflüsse vom Sommer zum Winter

(Typ D in Fig. 5-37) als Folge der Speicherung von bis zu 3500 Mio m³ Wasser in Stauseen und Ausgleichsbecken (Nutzinhalt 1990). Oberhalb der Alpenrandseen ist diese Verlagerung noch ausgeprägter (Typ C). Gross ist die Beeinflussung da, wo die Wasserrückgabe unterhalb der Messstelle oder in einem anderen Gewässer erfolgt (Typ B und Typ A).

Der am Strombedarf orientierte Betrieb der Kraftwerke beeinflusst auch den Tagesgang der Abflüsse. Bei Schwallbetrieb können in einigen Gewässern unterhalb der Wasserrückgabestellen kurzfristige Wasserstandsänderungen von bis zu einem Meter auftreten.

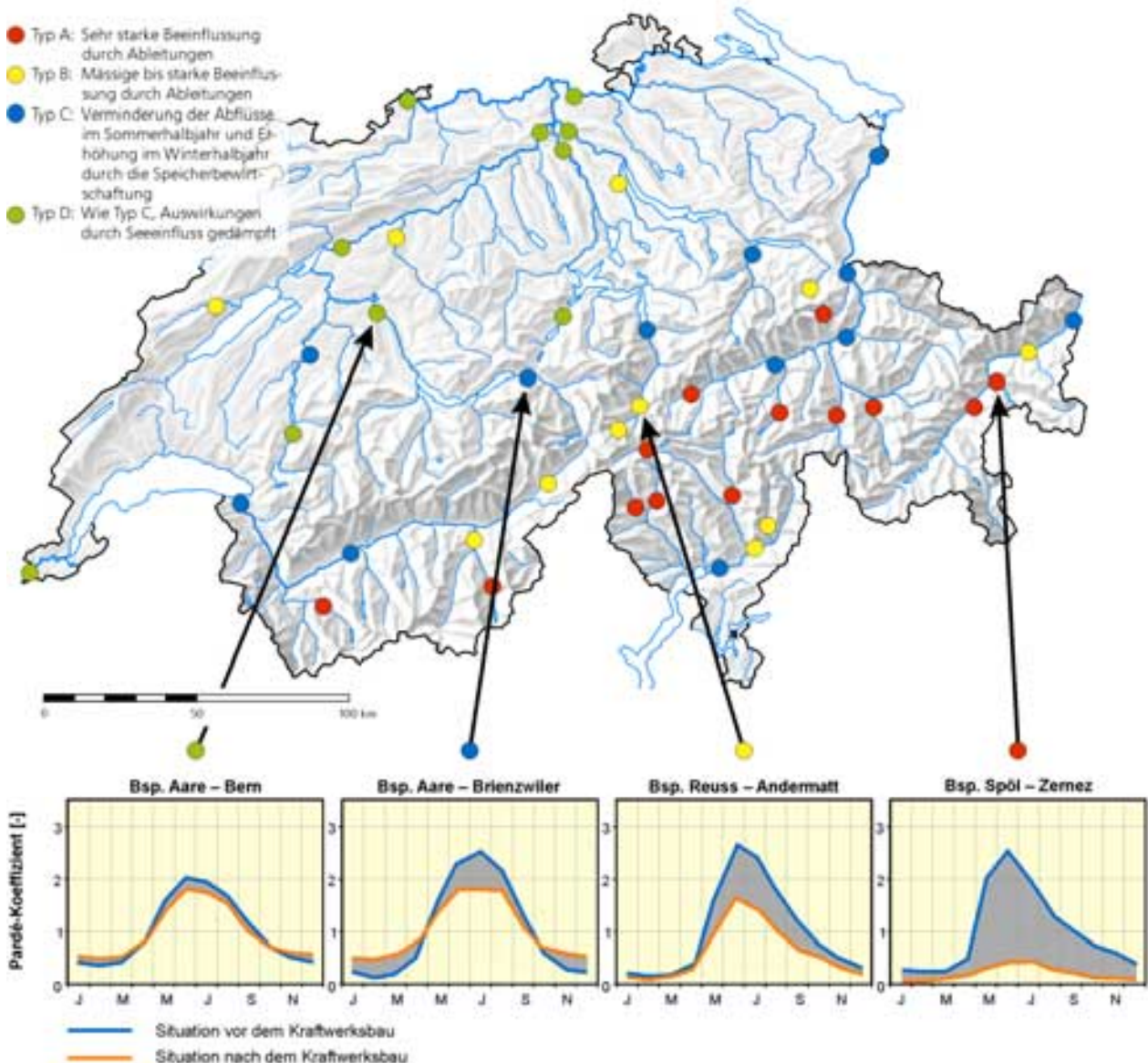


Fig. 5-37: Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (nach MARGOT et al. 1992).

5.5 Hochwasser

Bei extremen Abflusssituationen werden die mittleren Abflusswerte deutlich übertroffen. Unverzichtbar ist die Kenntnis von Extremereignissen bei der Planung wasserbaulicher Massnahmen. Extreme Hochwasser können in der Schweiz einige Jahrhunderte zurückverfolgt werden.

5.5.1 Kenntnis von Hochwasserabflüssen

Die Kenntnis von Hochwasserabflüssen bildet eine unentbehrliche Grundlage für das Leben und Bauen am Wasser. Hochwassermarken (vgl. Fig. 5-40) und eine Vielzahl von historischen Berichten zeugen von dem Versuch, das Wissen um Extremereignisse vor dem Vergessen zu bewahren und kommende Generationen auf die Möglichkeit sehr seltener Wassergrössen vorzubereiten (vgl. Fig. 5-38). Seit dem 19. Jahrhundert werden empirische Formeln zur Abschätzung des höchsten, in einem beliebigen Einzugsgebiet zu erwartenden Abflusses (Q_{\max}) eingesetzt. Fig. 5-39 zeigt eine Auswahl solcher Hüllkurven, die alle das Q_{\max} aus der Einzugsgebietsfläche (F_n) ableiten. Unter diesen «traditionellen» Ansätzen scheint die Umhüllende nach HOFBAUER (1916) für eine Beschreibung der schweizerischen Verhältnisse am besten geeignet zu sein:

$$Q_{\max} = 42 \cdot F_n^{0,5}$$

Innerhalb des vom Q_{\max} vorgegebenen Rahmens werden weitere statistische Kennwerte der Hochwasserwahrscheinlichkeit berechnet oder geschätzt (vgl. 5.2.2). Mit der Länge einer Messreihe wächst die Wahrscheinlichkeit, dass sie auch sehr seltene Ereignisse enthält. Bei der 99 Jahre umfassenden Messreihe Emme – Emmenmatt (Periode 1897–1995) lag das extremwertstatistisch ermittelte HQ_{100} bei $396 \text{ m}^3/\text{s}$ (GEES 1997). Dieser Wert wurde im 20. Jahrhundert zweimal

übertroffen (vgl. Fig. 5-38). Der Einbezug der neuesten Hochwasserabflüsse (Periode 1897–2003) hebt das HQ_{100} auf den plausiblen Wert von rund $450 \text{ m}^3/\text{s}$.

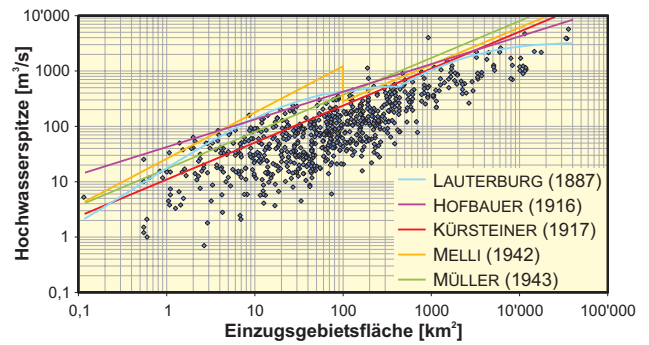


Fig. 5-39: Hüllkurven der höchsten zu erwartenden Hochwasserspitzen (Q_{\max}) nach verschiedenen Autoren im Vergleich mit dem Kollektiv der höchsten, in der Schweiz beobachteten Abflussspitzen (nach WEINGARTNER 1999).



Fig. 5-40: Hochwassermarken am Vierwaldstättersee (LU).

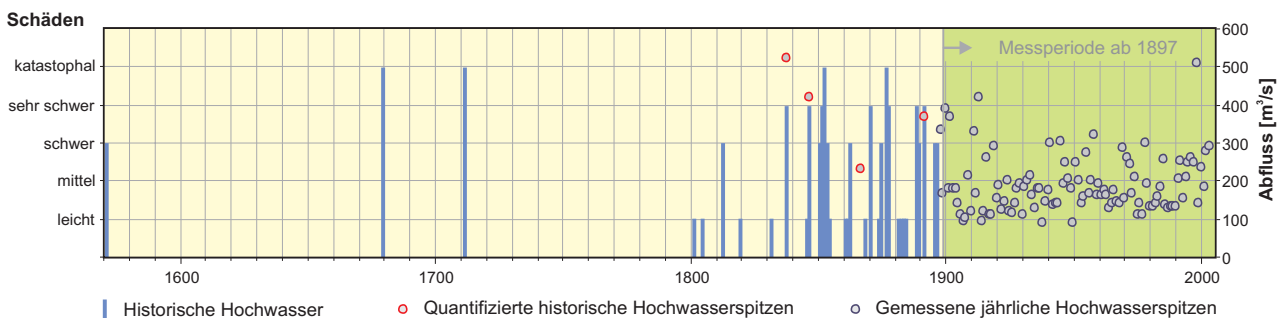


Fig. 5-38: Hochwasser der Emme: Historische Hochwasser mit überlieferter Schadensgrösse im Einzugsgebiet oder bekanntem Spitzenabfluss und gemessene jährliche Hochwasserspitzen der Station Emmenmatt (Daten: BWG, GEES 1997).

5.5.2 Entstehung grosser Hochwasser

Mit Ausnahme von Schwallwellen, wie sie z.B. beim Ausbruch von aufgestautem Wasser entstehen, sind natürliche Hochwasser eine Reaktion auf Niederschläge. Ob es allerdings infolge eines Niederschlagsereignisses zu einem Hochwasserabfluss kommt, hängt in hohem Mass von der Vorgeschichte und dem sich daraus ergebenden hydrologischen Zustand des Einzugsgebiets ab.

Hochwasser grosser Flüsse werden meist durch grossflächige, langanhaltende Niederschläge verursacht. Ein eindrückliches Beispiel ist das «Jahrhunderthochwasser» der Aare vom Mai 1999 (vgl. Fig. 5-41). Die vom 11. bis 15. Mai 1999 dauernden Niederschläge entlang des Alpennordrandes lösten in vielen Gewässern aussergewöhnliche Hochwasser mit Jährlichkeiten grösser als 20 Jahre aus. An 32 Messstationen wurden neue Höchstwerte gemessen; der Abfluss der Aare in Thun beispielsweise lag mit $570 \text{ m}^3/\text{s}$ 40 % über dem bisherigen Höchstwert.

Für die Hochwasser vom Mai 1999 entscheidend war die Vorgeschichte. Im April fielen an 20 Regentagen zwischen 50 und 100 % mehr Niederschlag als im langjährigen Durchschnitt. Dies führte zu einer starken Durchfeuchtung der Böden. In der Zeit vom 25. April bis zum 10. Mai wurden die Abflüsse durch die bis in grosse Höhen intensive Schneeschmelze dominiert. Zu Beginn der Niederschläge am 11. Mai waren die Böden wassergesättigt und einzelne Seen bereits bis zur Schadensgrenze gefüllt (BWG 2000).

Der Abfluss aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten spricht stärker auf intensive Gewitterniederschläge kur-

zer Dauer an. Auch das Hochwasser im Biembach (BE) am 1. Juli 1987 wurde durch die ungünstige Vorgeschichte bestimmt. Infolge der Witterung der vorangegangenen Wochen war die Speicherkapazität der Böden im Einzugsgebiet nahezu erschöpft. Von dem intensiven Starkniederschlag, der mit dem Zusammentreffen zweier Gewitterzellen über dem Einzugsgebiet des Biembach (rund 10 km^2) kurz vor 14 Uhr begann, konnte nur ein kleiner Teil zurückgehalten werden. Der Abfluss im Biembach reagierte umgehend und erreichte seine Spitze mit rund $50 \text{ m}^3/\text{s}$ noch vor 15 Uhr (s. Fig. 5-42) (GEMEINDE HASLE B. BURGDORF 1992).

5.6 Abflussbildung

Der Boden ist eine Schlüsselgrösse bei der Abflussbildung. Die Verteilung von Böden mit dominantem Abflussprozess (vgl. 5.6.1) bestimmt die Abflussreaktion eines Gebietes (vgl. 5.6.2). Im Gerinne wird die Ganglinie der Abflüsse von der Rauigkeit (vgl. 5.6.3) und der Retention (vgl. 5.6.4) verformt.

Die ersten paar Millimeter Niederschlag bleiben im Allgemeinen noch vor Erreichen des Bodens an der Vegetation hängen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Nur schon zur Befechtung des Bodens unter einem trockenen Nadelbaum sind im Sommer mehr als 5 mm Niederschlag nötig. Um die Speicher an der Bodenoberfläche und im Boden so weit zu füllen, dass sie Wasser abgeben können, ist ein bestimmtes Benetzungsvolumen nötig. Dieses hängt von der Niederschlagsintensität, dem aktuellen hydrologischen Zustand und von den Eigenschaften des Einzugsgebiets ab (KÖLLA 1987). Ist mehr Wasser vorhanden, als Pflanzen, Oberfläche und Boden zu speichern vermögen, kommt es zum Abfluss.



Fig. 5-41: Hochwasser im Mai 1999 in Bern.



Fig. 5-42: Hochwasser im Biembach (BE) am 1. Juli 1987.

5.6.1 Abflussprozesse

Anhand schematischer Bodenprofile lassen sich die wichtigsten Abflussprozesse unterscheiden (vgl. Fig. 5-43). Hortonscher Oberflächenabfluss tritt auf, wenn der Niederschlag die Infiltrationskapazität des Bodens übersteigt. Dies ist auf vegetationsbedeckten Böden selten der Fall, ausser an verdichteten oder zeitweise wasserabstossenden (hydrophoben) und deshalb nur schwach durchlässigen Standorten. Gesättigter Oberflächenabfluss tritt nach Sättigung des Bodens auf. Auf flachgründigen oder feucht-nassen Böden mit geringem Speichervermögen ist dies besonders rasch der Fall. Beim Abfluss im Boden muss zwischen einer langsamen, weitgehend durch Kapillarkräfte bestimmten Bewegung des Wassers (allgemeine Sickerung) und einem schnellen, von gravitativen Kräften dominierten Abfluss entlang von Makroporen (z.B. Gänge von Tieren, Wurzelhohlräume) unterschieden werden. Rascher Abfluss im Boden tritt auch dann auf, wenn über einer Stauschicht hoch durchlässige Schichten liegen.



Fig. 5-43: Abflussprozesse und Reaktionsweisen bei Starkregen (nach SPREAFICO et al. 2003).

Ist der Boden gut durchlässig und liegt er über durchlässigem geologischem Untergrund, kann über die Tiefensickerung viel Wasser eindringen und gespeichert werden. Dieses Wasser kann mit entsprechender Verzögerung an Quellen oder Grundwasseraufstößen wieder als Abfluss in Erscheinung treten.

5.6.2 Abflussreaktion von Gebieten

In einem Einzugsgebiet laufen die verschiedenen Abflussprozesse gleichzeitig ab und überlagern sich. Zudem ändert sich der hydrologische Zustand des Bodens im Verlauf eines Niederschlagsereignisses, mit entsprechenden Auswirkungen auf den jeweils dominanten Abflussprozess. Aber auch Tropfengrösse, Intensität

und Dauer der Niederschläge beeinflussen den weiteren Verlauf der Abflussbildung. Auf Testflächen kann der Anteil der einzelnen Prozesse quantifiziert und in Abflussreaktionskurven dargestellt werden.

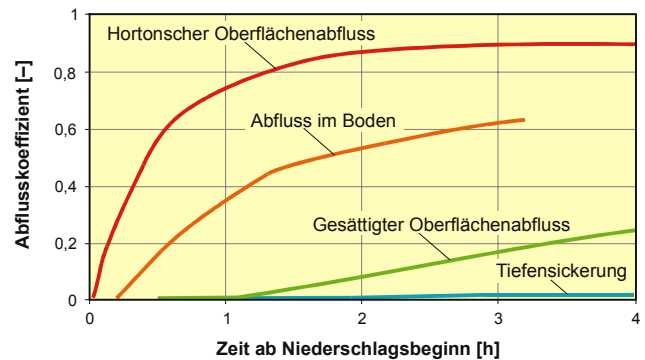


Fig. 5-44: Abflussreaktionskurven an vier Standorten mit typischen Abflussreaktionen (nach NAEF et al. 1999).

In Figur 5-44 werden die Abflussreaktionen aus vier Testflächen mit dominantem Prozess dargestellt. Der Abflusskoeffizient gibt das Verhältnis vom Abfluss zum Niederschlag an. Bei einem Koeffizienten von 0,6 fliesen 60 % des Niederschlags ab.

- Hortonscher Oberflächenabfluss – sehr rasch reagierende Flächen mit geringer Retention, wie sie in vernässten, bachnahen Zonen vorkommen.
- Abfluss im Boden – mässig rasche Abflussreaktion und mässige Retention. Vorkommen z.B. in steilen Hanggebieten oberhalb von Gerinnen.
- Gesättigter Oberflächenabfluss – verzögernd reagierende Flächen mit grosser Retention, wie sie typischerweise gerinneferne Hanggebiete aufweisen.
- Tiefensickerung – sehr verzögert reagierende Flächen mit sehr grosser Retention – eine typische Reaktion wenig geneigter, tiefgründiger Flächen fernab der Gerinne.

Die Übertragung der Abflussreaktionen der Testflächen auf grössere Flächen ermöglicht eine Abschätzung der Abflussreaktion ganzer Einzugsgebiete (vgl. Fig. 5-45).

5.6.3 Fliesswiderstand

Hydraulische Berechnungen müssen die Rauigkeitswerte des Gerinnes berücksichtigen. Im Gegensatz zu den künstlichen Gerinnen, für die Rauigkeitswerte aus Tabellen entnommen werden können, braucht die Abschätzung bei den natürlichen Gerinnen langjährige

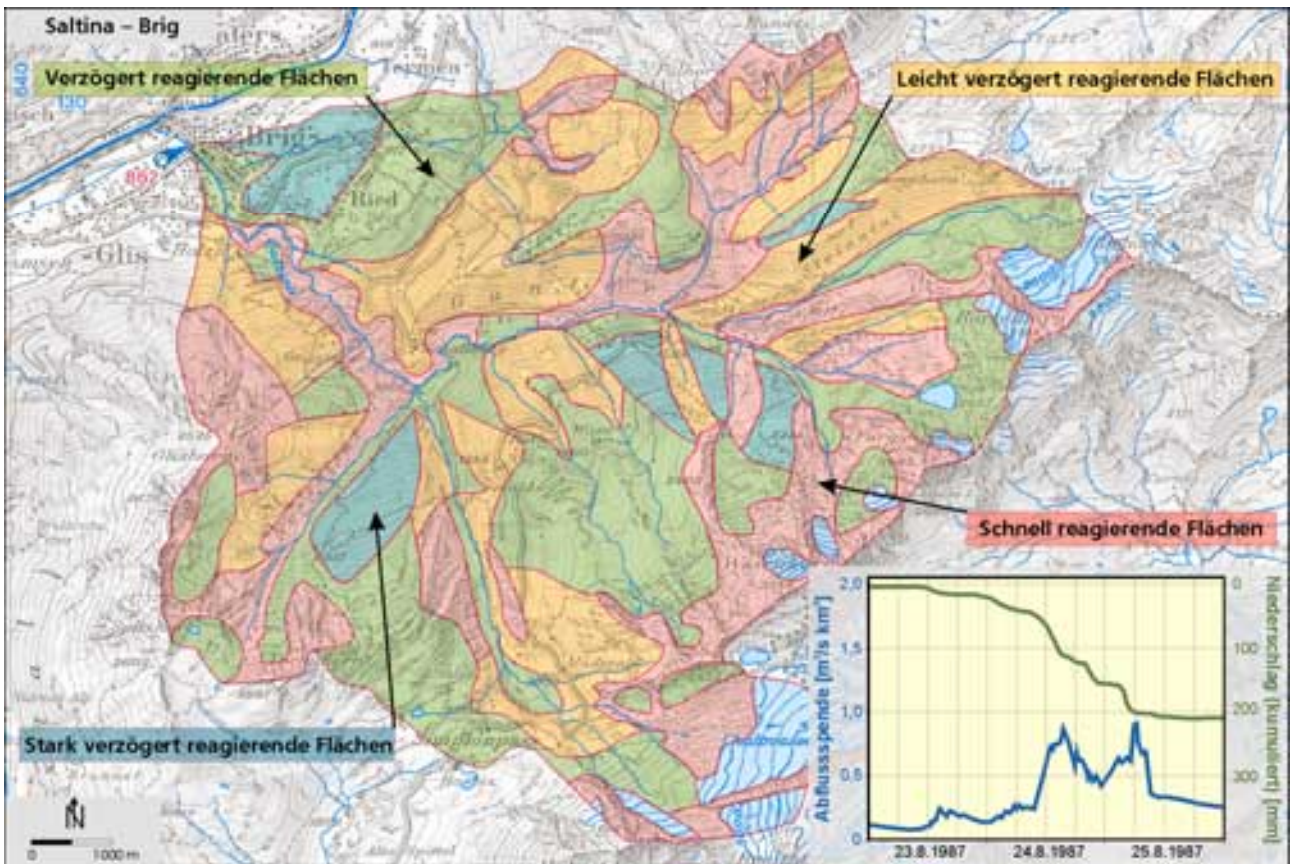


Fig. 5-45: Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Saltina bei Brig (VS). Abflussreaktion des Gesamtgebietes verzögert und mässig (vgl. Diagramm des gemessenen Hochwasserereignisses im August 1987) (nach NAEF et al. 1999).

Erfahrung. Für die Schweiz existiert seit 2001 eine Reihe ausgesuchter Fließstrecken, deren Rauigkeitskoeffizienten (k_{st}) für verschiedene Abflussmengen exemplarisch bestimmt worden sind. 8 kleinere Flüsse und 4 Gerinnestrecken in Bergbächen wurden untersucht (vgl. Fig. 5-46). Die 8 Versuchsstrecken der kleineren Flüsse liegen in annähernd prismatischen Gerinnen ohne Vorländer. Die Ufer sind mehrheitlich verbaut und teilweise bewachsen. Das Gefälle, die Uferverbauungen und die Zusammensetzung des Geschiebes sind unterschiedlich. Gewählt wurden Strecken, in denen gleichförmige Fließverhältnisse herrschen und keine örtlichen Verluste, wie sie bei Brückenpfeilern oder Aufweitungen vorhanden sind, auftreten.

Hohe Fließwiderstände äussern sich in kleinen k_{st} -Werten. Der Widerstandskoeffizient in ein und demselben Gewässer kann in Abhängigkeit der Abflussmenge variieren (vgl. Tab. 5-2). In Flüssen mit Gebirgscharakter nehmen die k_{st} -Werte mit steigendem Abfluss tendenziell zu, was eine Verringerung der

Fließwiderstände bedeutet. In Flüssen mit kleinem Gefälle nehmen die k_{st} -Werte bei grösserer Wasserführung dagegen eher ab (grössere Fließwiderstände).



Fig. 5-46: Fließgewässer mit Versuchsstrecken zum Fließwiderstand (nach Spreafico et al. 2001).

Versuchsstrecke	Abfluss [m ³ /s]	k _{St} [m ^{1/3} /s]
Minster – Euthal	30	36
	60	38
	100	38
	140	38
Suze – Sonceboz	10	29
	20	29
	40	36
Emme – Burgdorf	100	32
	250	31
Gürbe – Belp	4,3	32
	20	33
	30	31
	40	30
	50	28
Lütschine – Gsteig	60	24
	90	26
	120	27

Tab. 5-2: Beispiele für Fließwiderstände bei verschiedenen Abflussmengen (SPREAFICO et al. 2001).

5.6.4 Retention

Der Rückhalt eines Teils des abfließenden Wassers im Einzugsgebiet bewirkt eine Abminderung des Spitzenabflusses (Retention). Die typischste Retention ist die Überflutung der Vorländer (vgl. Fig. 5-47), unter bestimmten Umständen kann aber auch das Gerinne selbst einen dämpfenden Einfluss auf die Hochwasserspitze haben.

Vorlandüberflutungen stellen die effektivste Form der Retention dar. Dennoch dürfen sie in ihrer Wirkung nicht überschätzt werden (NAEF & THOMA 2002). Hochwasserabflüsse grosser Flüsse können mehrere Tage



Fig. 5-47: Überflutung der Vorländer: Doubs bei Ocourt (JU) am 13. März 2001.

dauern. Eine effektive Retention über diesen Zeitraum bedingt Flächen, welche in der Schweiz nicht zur Verfügung stehen.

Eine wirkungsvolle Retention im Gerinne ist in folgenden Fällen möglich:

- Gefälle kleiner als 1 ‰ – In steilen Gerinnen ist eine Verminderung der Fließgeschwindigkeit nur an der Hochwasserfront zu beobachten. Das nachfolgende Wasser fließt beschleunigt ab und bei ausreichend langen Fließstrecken türmt sich sogar eine senkrechte Wasserfront auf.
- Rauigkeitskoeffizient (k_{St}) kleiner als rund 25 – Ein rauhes Gerinne erhöht die Retention.
- Anstiegszeit bis zu 1 Stunde – Je rascher der Abfluss ansteigt, desto stärker wird die Abflussspitze im Gerinne gedämpft.

Diese Voraussetzungen sind in erstaunlich wenigen Gebieten erfüllt, so dass grosse Hochwasser nur selten durch die natürliche Retention wirksam gedämpft werden (NAEF & THOMA 2002).

Eine Ausnahme stellt das Hochwasser der Gürbe (BE) am 29. Juli 1990 dar. Innerhalb weniger Stunden fielen im oberen Teil des Einzugsgebietes 240 mm Niederschlag. Im steilen Oberlauf reagierte der Abfluss sofort (vgl. Fig. 5-48, Pegel Burgistein). Im flachen Unterlauf zwischen Burgistein und Belp wirkte die Gerinneretention, so dass die Abflussspitze bis Belp kleiner wurde. Im Juli 1990 wurden zudem grössere Flächen überflutet, was die Hochwasserspitze zusätzlich dämpfte. Der Anteil der Gerinneretention an der gesamten Dämpfung von 51 m³/s kann auf 5 m³/s, derjenige der Überflutungen auf 46 m³/s geschätzt werden.

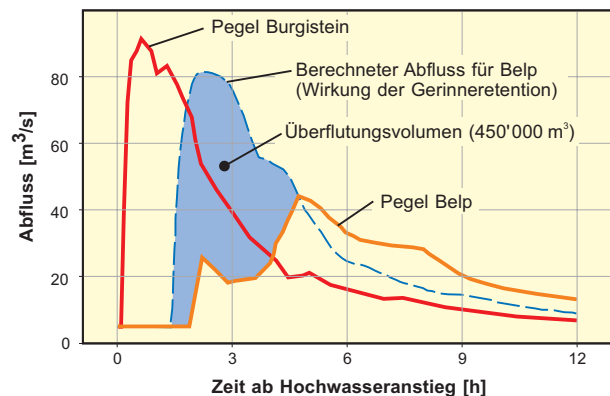


Fig. 5-48: Dämpfung der Hochwasserspitze vom 29. Juli 1990 im Unterlauf der Gürbe (BE) (nach NAEF & THOMA 2002).

Während das Hochwasser im oberen Teil der Gürbe ein ganz ausserordentliches Ereignis darstellt, wurde es in Belp dank der Dämpfung durch die Retention kaum wahrgenommen.

5.7 Hochwasser vorhersagen

Hydrologische Vorhersagen sind heute eine wichtige Grundlage für die Planung der Bewirtschaftung des Abflusses zur Stromerzeugung sowie für die Planung und Organisation von Transporten wichtiger Versorgungsgüter auf dem Rhein. Die flussabwärts liegenden Staaten verwenden die Resultate der schweizerischen Vorhersagen als Eingangsgrösse in ihre eigenen Vorhersagemodelle.

Die Landeshydrologie berechnet mit dem Modell HBV3-ETHZ Abflussvorhersagen für das Rheineinzugsgebiet unterhalb der Alpenrandseen. Eine Ausdehnung

auf das gesamte Rheineinzugsgebiet ist in Bearbeitung. Für kleinere Flussgebiete und Bäche wird keine Vorhersage veröffentlicht.

Datenbasis für die Vorhersage bilden die gemessenen Stundenmittelwerte der Abflüsse, die gemessenen Stundenwerte von Temperatur und Niederschlag des automatischen Messnetzes von MeteoSchweiz sowie für die Vorhersageperiode die stündlichen Daten der hochauflösenden numerischen Wettervorhersagemodelle. Damit wurde erstmals in der Schweiz ein operationelles Abflussvorhersagemodell mit einem numerischen Wettervorhersagemodell gekoppelt.

Alle Daten werden in eine Datenbank eingegeben, kontrolliert, plausibilisiert und für den Modellinput aufbereitet (vgl. Fig. 5-49). Die Berechnung der Abflüsse erfolgt im Normalfall täglich. Bei extremen Hochwassersituationen werden alle zwei Stunden neue Vorhersagen für die Stationen Rhein – Rheinfelden,

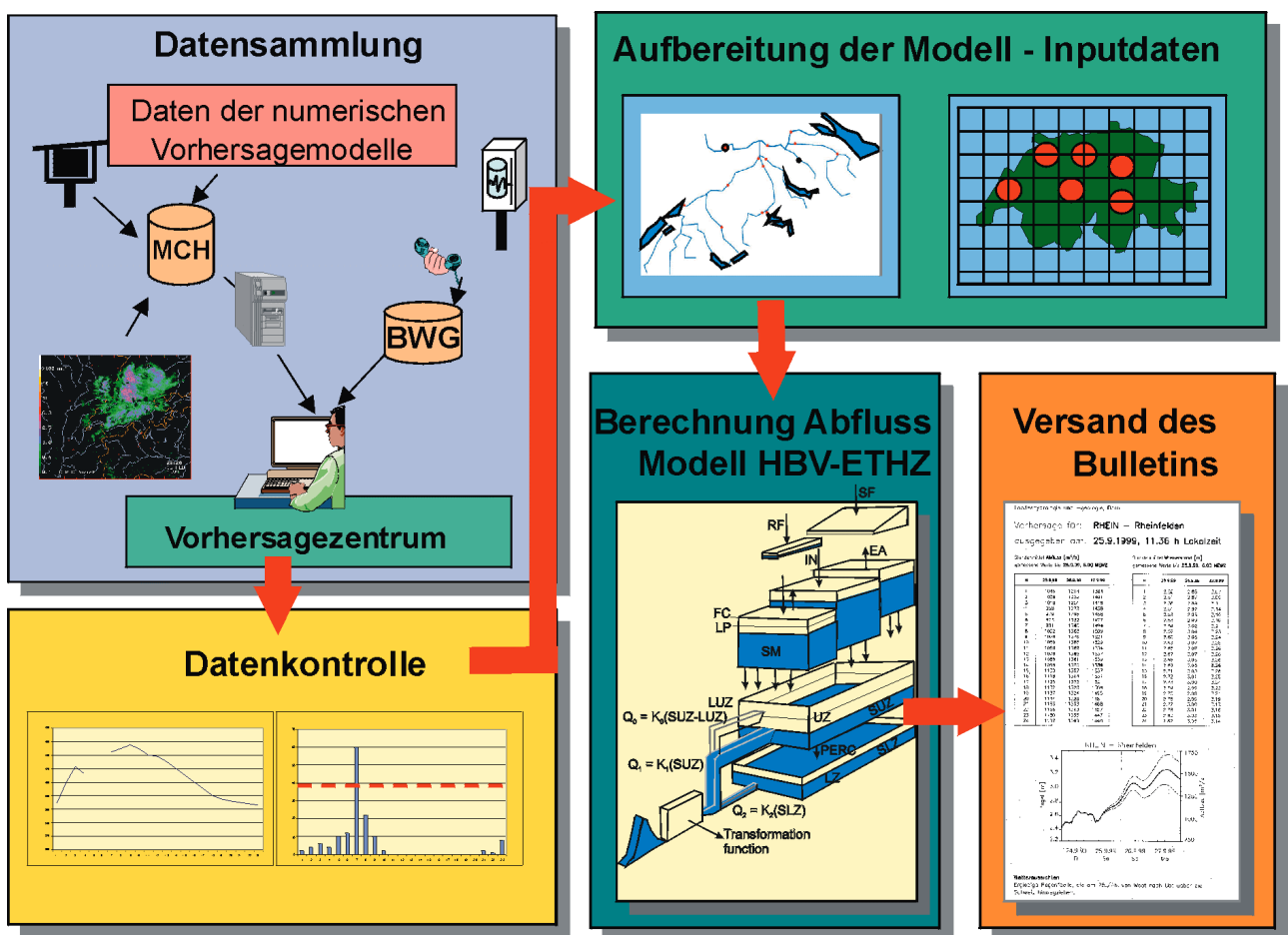


Fig. 5-49: Ablauf der operationellen Abflussvorhersage (Grafik: Th. Bürgi, BWG).

Rhein – Rekingen, Thur – Andelfingen, Reuss – Mellingen, Aare – Brugg und Aare – Murgenthal erstellt.

Die Bulletins der Wasserstands- und Abflussvorhersagen zeigen einen tabellarischen und grafischen Überblick über die in den vergangenen Stunden gemessenen Daten im Fluss und über die voraussichtliche Entwicklung von Wasserstand und Abfluss. Diese Informationen werden als Stundenmittel für jeweils drei Kalendertage dargestellt (vgl. Fig. 5-50). Das Vorhersagebulletin ist auf www.bwg.admin.ch allen Nutzerinnen und Nutzern frei zugänglich.

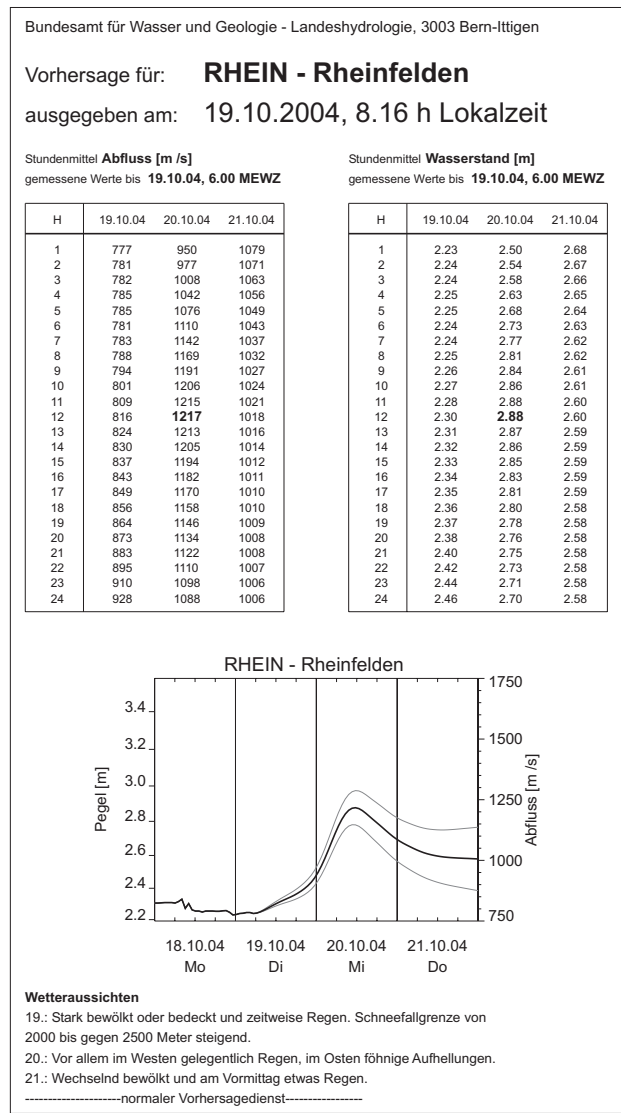


Fig. 5-50: Beispiel Vorhersagebulletin (www.bwg.admin.ch).

6 Seen

Kennziffern

Grösste Oberfläche	581,3 km ²	Le Léman	Quelle: BWG
Grösste Tiefe	310 m	Le Léman	Quelle: BWG
Grösstes Volumen	89'900 Mio m ³	Le Léman	Quelle: BWG
Grösstes Stauvolumen	401 Mio m ³	Grande Dixence (VS)	Quelle: BWG
Längste theoretische Aufenthaltsdauer des Wassers	15 Jahre	Sempacher See	Quelle: LIECHTI 1994
Älteste Regulierung	1592	Zuger See	Quelle: VISCHER 2003

6.1 Seen – Weiher – Teiche

Seen sind stehende Gewässer, in welchen im Sommerhalbjahr über längere Zeit eine stabile Temperaturschichtung besteht. Ab einer mittleren Wassertiefe von 14 Metern ist dies im Allgemeinen der Fall. Natürliche stehende Gewässer mit einer geringen Wassertiefe werden Weiher, künstlich gestaute Gewässer Stauseen oder Teiche genannt. Auch grössere Stauseen können im Sommer eine Temperaturschichtung aufweisen.

6.1.1 Bereiche von Seen

In Figur 6.1 sind Ufer-, Freiwasserzone und Seegrund dargestellt. Der Uferzone (Litoral) kommt als Übergangszone zwischen Land und Wasser und durch die geringe Wassertiefe eine wichtige Funktion zu. In keinem anderen Bereich des Sees ist die Artenvielfalt von Tieren und Pflanzen grösser als hier. Zugleich ist die Gefährdung dieser Flächen durch Uferbefestigungen, künstlichen Wellenschlag und Übernutzung durch den Badetourismus sehr gross.

Als Freiwasserzone (Pelagial) werden die Bereiche bezeichnet, in welchen aufgrund der grossen Wassertiefe keine Bodenvegetation wächst. In der lichtdurchfluteten obersten Schicht dieser Zone lebt eine Vielzahl von

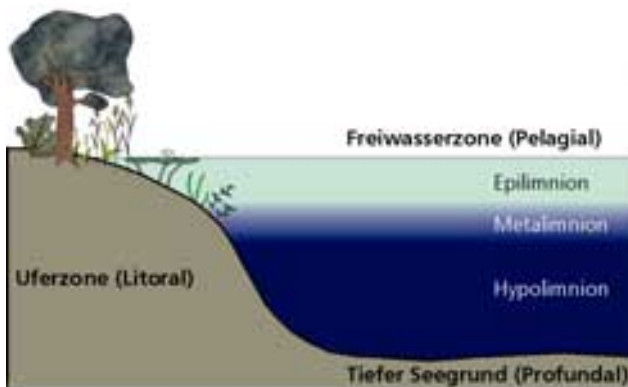


Fig. 6-1: Skizze der verschiedenen Bereiche in einem See (nach LIECHTI 1994).

Kleinstlebewesen (Plankton), welche die Nahrungsgrundlage vieler Fische bilden. Abgestorbenes Plankton sinkt teilweise auf den Seegrund (Profundal) ab. Dort wird es von Mikroorganismen oder Bodentieren abgebaut. Die mineralisierten Nährstoffe stehen für die Primärproduktion wieder zur Verfügung oder werden in die Sedimente eingebaut.

6.1.2 Schichtung und Zirkulation

Wasser ist bei einer Temperatur von vier Grad Celsius am schwersten (vgl. Fig. 6-2). Während im Frühjahr das gesamte Seewasser meist gleich warm ist, erwärmt sich im Sommer die oberflächennahe Schicht (Epilimnion) stark und schwimmt in der Folge auf dem weiterhin kühlen Tiefenwasser (Hypolimnion) auf. Zwischen den beiden Wasserkörpern kommt es zur Ausbildung einer Temperatursprungschicht (Metalimnion), in welcher die Temperatur von oben nach unten stark abnimmt. Zwischen Epi- und Hypolimnion ist der Wasser- und Gasaustausch stark eingeschränkt (Stagnation) (vgl. Fig. 6-3).

Mit zunehmend kühleren Temperaturen im Herbst beginnt sich der See von oben her abzukühlen. Kräftige Winde begünstigen die Durchmischung der abgekühlten Wassermassen. Erst wenn die Wassertemperatur überall gleich ist, wird eine vollständige Zirkulation möglich. Das gesamte Seebecken wird dann wieder gleichmässig mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt.

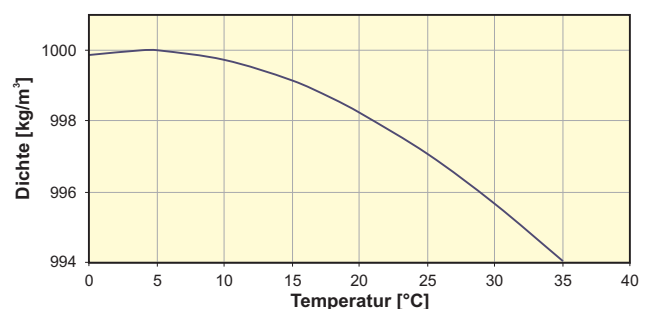


Fig. 6-2: Dichte von Wasser.

Dauert der Prozess der Abkühlung weiter an, bildet sich eine inverse Temperaturschichtung aus: Wasser mit einer Temperatur unter vier Grad ist leichter und schwimmt auf dem wärmeren Wasser. Erreicht die Oberflächentemperatur null Grad, beginnt der See von oben her zuzufrieren. Sogenannte «Seegrörnli» (vgl. Fig. 6-5) sind bei den Seen in tieferen Lagen relativ seltene Ereignisse. Die Wassertemperatur am Seegrund verbleibt bei vier Grad und ermöglicht so das Überleben von Fauna und Flora. Mit dem Einsetzen der Frühlingswärme beginnt der Kreislauf erneut (LIECHTI 1994).

Nicht alle Seen zirkulieren jedes Jahr vollständig (vgl. Abschnitt 6.5.3). Im Genfer See z.B. geht die letzte vollständige Durchmischung auf das Jahr 1986 zurück (CIPEL 2004). In Figur 6-4 ist die stark saisonal ausgeprägte Temperaturschichtung in den obersten rund 60 m des Genfer Sees gut zu erkennen.

Neben der temperaturbedingten kann auch eine chemisch bedingte Schichtung auftreten: Die chemische Zusammensetzung zweier Wasserkörper kann so unterschiedlich sein, dass sie sich nicht mehr mischen. Im Nordbecken des Luganer Sees zirkulieren aus diesem Grund höchstens die oberen rund 100 Meter, das tieferliegende Wasser wird nicht mit Sauerstoff versorgt (vgl. auch Fig. 6-13) (LIECHTI 1994).

6.2 Vorkommen von Seen

Verschiedene Faktoren können zur Bildung von Seen (Seegenese) beitragen. Häufig wirken mehrere Ursachen zusammen. Mit der Entstehung eines Sees beginnt der Prozess der Verlandung.

6.2.1 Seegenese

Die meisten Schweizer Mittellandseen sind durch Gletschervorstöße im Verlauf der Eiszeiten entstanden. Dabei sind bestehende Mulden durch die Erosion der Eismassen vertieft und überformt worden. Die Längsrichtung der Seen entspricht in der Regel der Flussrichtung der eiszeitlichen Gletscher. Während des Abschmelzens der Gletscher füllten sich diese Mulden mit Schmelzwasser. Hinter Endmoränen konnten sich die Wassermassen zusätzlich aufstauen, so z.B. bei Bodensee und Sempacher See (LIECHTI 1994).

Im alpinen Raum finden sich Seen, die im Anschluss an Bergstürze hinter der Sturzmasse aufgestaut wurden. Der Lac de Derborence z.B. ist nach dem in historischer Zeit grössten Bergsturz der Schweiz (23.6.1749) entstanden.

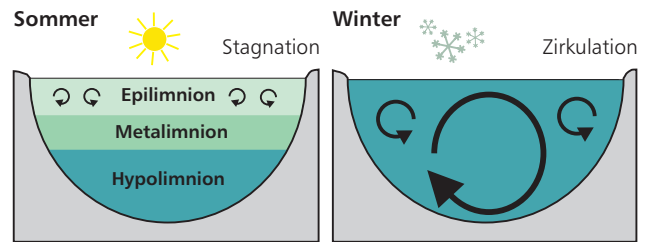


Fig. 6-3: Erläuterungsskizze Zirkulation und Temperaturschichtung (nach www.gewaesserschutz.zh.ch)

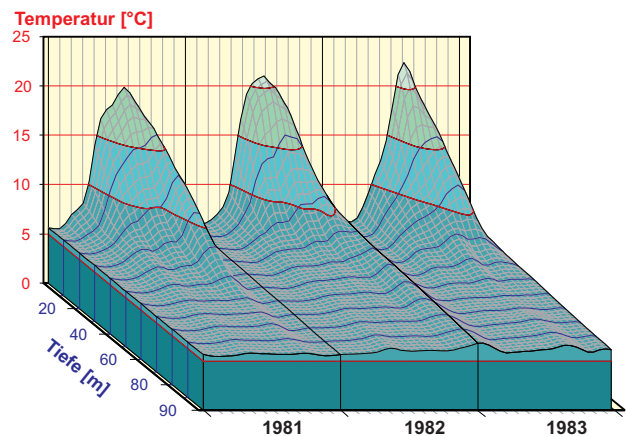


Fig. 6-4: Temperaturprofile des Genfer Sees in den Jahren 1981–1983 (nach DE MONTMOLLIN & JAKOB 1995).



Fig. 6-5: «Seegrörnli» 2002 (Pfäffiker See).

Die ältesten Seen der Schweiz wurden vor einigen 10'000 Jahren geformt; der Ursprung der meisten Seen ist aber deutlich jünger. Demgegenüber wird das Alter des Baikalsees in Sibirien auf 20–25 Millionen Jahre geschätzt. Tabelle 6-1 zeigt eine Auswahl möglicher Ursachen und entsprechende Beispiele der Seegenese.

Ursache	Beispiel
Tektonische Prozesse	
See in tektonischer Bruchlinie	Baikalsee (Sibirien)
Synklinaltalsee	Lac de Joux (VD)
Vulkanismus	
Kratersee	Lago Albano (Italien)
Meteorkrater	
Kratersee	Lake Manitoba (Kanada)
Lösungsvorgänge	
Höhlensee	Lac St-Léonard (VS)
Glaziale Prozesse	
Erosionsbecken	Thuner See (BE)
Erosion und Stau hinter Stirnmoräne	Greifensee (ZH)
Stau hinter Seitenmoräne	Übeschisee (BE)
Toteissee	Burgäschisee (SO/BE)
Aufschüttungsprozesse	
Bergsturz	Lago di Poschiavo (GR)
Menschliche Aktivitäten	
Stausee	Lac de Gruyères (FR)
Baggersee	Baggersee Meienried (BE)

Tab. 6-1: Seegenetische Faktoren und Beispiele (nach DOKULIL et al. 2001, ergänzt).

6.2.2 Verlandung

Mit der Bildung eines Sees beginnt auch dessen Verlandungsprozess. Durch die Zuflüsse werden Feststoffe und Schwebstoffe in die Seen eingetragen (vgl. Kap. 8). Als Folge davon entstehen in den Mündungsbereichen Deltas; die Seen werden kleiner und flacher. Zum Beispiel erstreckte sich im heutigen Gebiet von Thuner- und Briener See am Ende der letzten Eiszeit (vor rund 10'000 Jahren) ein einziger See von Meiringen bis weit über Thun hinaus. Die Zuflüsse haben mit ihren Feststoffen seither schon grosse Teile der ursprünglichen Seefläche aufgefüllt, und in weiteren ca. 36'000 Jahren wird der Thuner See vollständig verlandet sein (vgl. Tab. 6-2).

Bei natürlich aufgestauten Seen kann die Tiefenerosion im Bereich des Ausflusses den Seespiegel rasch absenken und so zu einer Verkleinerung des Sees führen. Figur 6-6 zeigt die morphologische Entwicklung des Greifensees

in den letzten rund 11'000 Jahren. Die sukzessive Verkleinerung der Seefläche ergab sich aus:

- der Tiefenerosion im Ausflussbereich um 18 Meter; erodiert wurde die Endmoränen eines Seitenarms des eiszeitlichen Rhein-Linth-Gletschers,
- den Schuttlieferungen von Bächen und
- der künstlichen Seespiegelabsenkung um 40–90 cm im Rahmen der Glattkorrektur 1890/91 (MEIER BÜRGISSER & KELLER 2004).

See	Seevolumen [Mio m ³]	Jährlicher Sediment- zuwachs [Mio m ³]	Zuschüttungs- dauer [1000 Jahre]
Bodensee	48'000	3,3	14–15
Genfer See	89'900	1,8–3,0	30–50
Thuner See	6500	0,18	36
Walensee	2490	0,2	12–13
Bieler See	1240	0,36	3–4
Pfäffiker See	58	0,0038	15
Oeschinensee	37	–	2,6

Tab. 6-2: Geschätzte Verlandungszeiten. Berücksichtigt sind nur Einträge über die grossen Zuflüsse (Daten: BWG, GUTHRUF et al. 1999, IGKB 2004, LIECHTI 1994).

Neben dem Eintrag von Geschiebe und Schwebstoffen wird auch im See produziert organisches Material in die Sedimente eingebaut und trägt so zum Verlandungsprozess bei. Gegen Ende seiner Existenz wird der See von Ufer- und Bodenvegetation überwuchert. Er ist

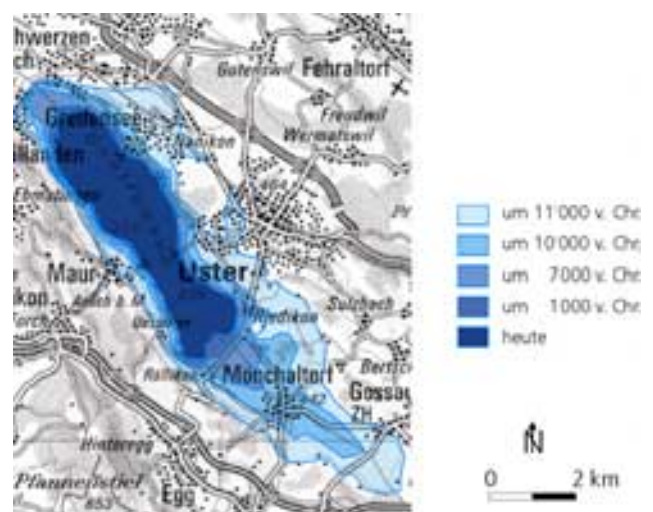


Fig. 6-6: Formveränderung des Greifensees im Laufe der Zeit (nach MEIER BÜRGISSER & KELLER 2004).

verlandet, wenn sich die gesamte Seefläche in ein Flachmoor verwandelt hat (BINDERHEIM-BANKAY 1998).

6.2.3 Seen der Schweiz

In der Schweiz liegen 70 natürliche Seen mit einer Fläche grösser als 0,1 km². 1422 km² oder knapp 3,5 % der Fläche der Schweiz sind durch stehende Gewässer bedeckt (www.statistik.admin.ch). In Figur 6-7 sind die grössten natürlichen Seen aus Tabelle 6-3 dargestellt. Der Gesamtposphorgehalt wird als Parameter für die Wasserqualität verwendet (vgl. Abschnitt 6.5.1).

6.3 Funktionen von Seen

Seen werden von alters her von den Menschen auf vielfältige Weise genutzt.

Fischerei

Die Fischerei stellt eine der ältesten Nutzungsformen der Seen überhaupt dar. Aus dem Mittelalter sind Schutzbestimmungen und Fangbeschränkungen überliefert (DOKULIL et al. 2001). Obschon die Bedeutung

Nr.	See	Oberfläche [km ²]	Volumen [Mio m ³]	grösste
				Tiefe [m]
1	Le Léman	581,3	89'900	310
2	Bodensee (Ober- u. Untersee)	536,0	48'000	254
3	Lac de Neuchâtel	217,9	14'170	153
4	Lago Maggiore	212,3	37'100	372
5	Vierwaldstätter See	113,6	11'800	214
6	Zürichsee (Ober- u. Untersee)	90,1	3900	143
7	Lago di Lugano (sud e nord)	48,7	6560	288
8	Thuner See	48,4	6500	217
9	Bieler See	39,8	1240	74
10	Zuger See	38,3	3210	198
11	Brienzer See	29,8	5170	261
12	Walensee	24,1	2490	150
13	Murtensee	23,0	600	46
14	Sempacher See	14,5	660	87
15	Hallwiler See	10,3	215	47
16	Greifensee	8,6	161	34
17	Sarner See	7,5	244	52
18	Ägerisee	7,2	357	82
19	Baldegger See	5,3	178	66
20	Lej da Segl (Silser See)	4,1	137	71
21	Pfäffiker See	3,3	58	35

Tab. 6-3: Die 21 grössten natürlichen Seen der Schweiz (nach BWG; IGKB 2004). Die Nummer bezieht sich auf Fig. 6-7.

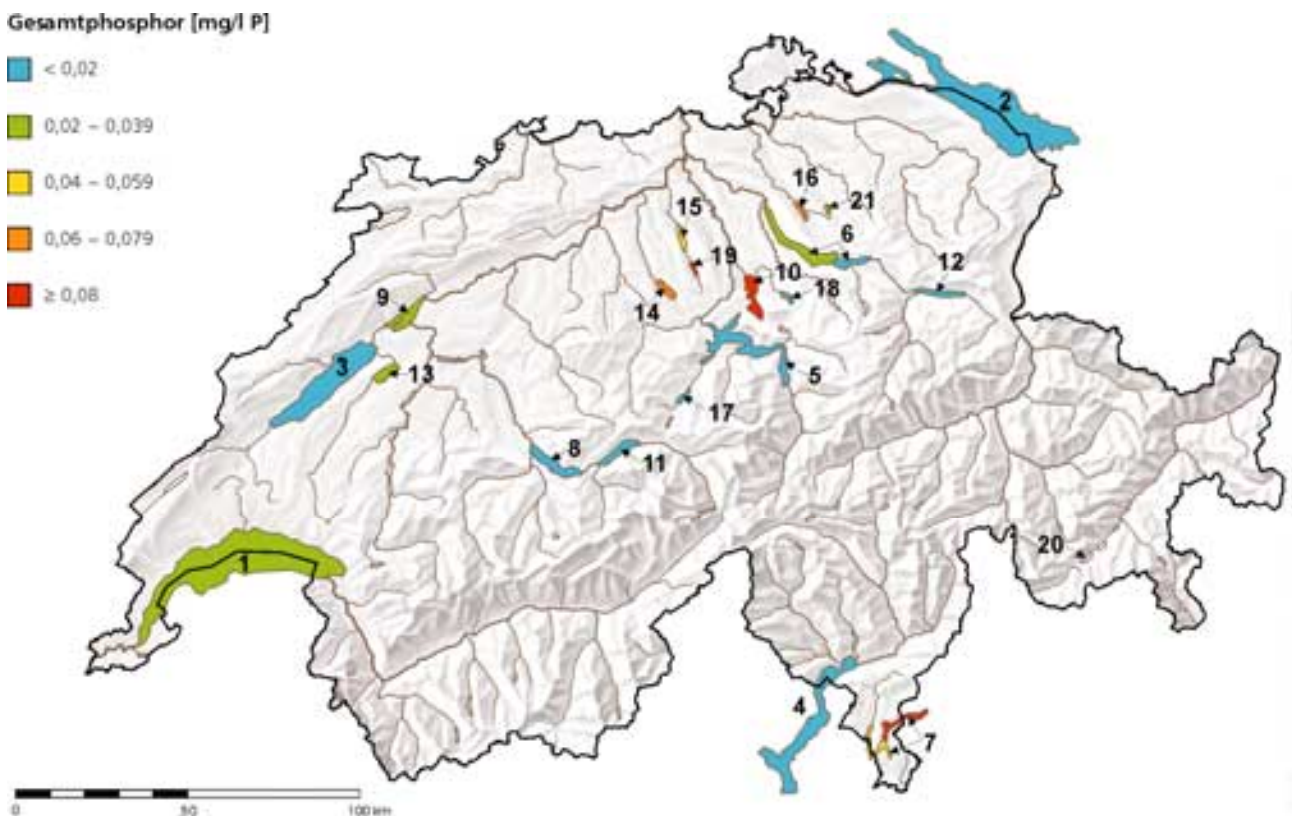


Fig. 6-7: Lage der 21 grössten natürlichen Seen (vgl. Tab. 6-3) mit dem Gesamtposphorgehalt der Periode 1996–2000 (nach JAKOB et al. 2004).

der Binnenfischerei seit den 1970er Jahren zurückgeht, sind auch heute noch 349 Berufsfischer auf rund 20 Seen in der Schweiz tätig (Stand 2004; www.umweltschweiz.ch).

Verkehr

Bis zum Aufkommen der Eisenbahn im 19. Jahrhundert wurden Flüsse und Seen intensiv als Transportwege genutzt. Heute beschränkt sich der Transportverkehr auf Seen weitgehend auf Fährbetriebe, den hauptsächlich touristisch bedingten Personentransport und den Abtransport von im oder am See gewonnenen Baumaterialien.

Energiegewinnung

Das in Stauseen (vgl. Fig. 6-8) gesammelte Wasser wird grösstenteils zur Produktion von elektrischer Energie verwendet. Die Speicherkraftwerke erzeugen mit 16'700 GWh rund 30 % der jährlich in der Schweiz produzierten elektrischen Energie (www.bwg.admin.ch).

Hochwasserrückhalt

Seen wirken als natürliche Hochwasserrückhaltebecken. Die grossen Alpenrandseen des Rheineinzugsgebietes z.B. hielten zwischen dem 10. und 15. Mai



Fig. 6-8: Der Gebidem-Stausee (VS) fasst 9,2 Mio m³ Wasser.

1999 gesamthaft 950 Mio m³ Wasser zurück, was einem Abfluss von ca. 2200 m³/s in Rheinfeldern entsprechen würde. Dieser Rückhalt war natürlich, da einerseits der Bodensee unreguliert ist und andererseits bei den übrigen Seen der Einfluss der Regulierung vernachlässigbar ist, weil die Wehre zu diesem Zeitpunkt ganz geöffnet waren (BWG 2000). Wo keine natürlichen Seen bestehen, kann der Schutz vor Hochwasser in einigen Fällen durch künstlich erstellte Hochwasserrückhaltebecken verbessert werden.

Trinkwassergewinnung

Einigen natürlichen Seen wird Trinkwasser entnommen (www.trinkwasser.ch). In gegen 30 Seewasserwerken werden rund 20 % (entspricht 200 Mio m³) des gesamten Wasserverbrauchs der Schweiz gewonnen.

Erholung

Die Nutzung der Seen als Erholungsraum hat in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen. Aktivitäten am, auf und im Wasser sind zu wichtigen Bereichen der Tourismusbranche geworden.

Klima

Die ausgleichende Wirkung der Seen auf das lokale und regionale Klima wird seit Jahrhunderten in der Landwirtschaft genutzt: Weinbau ist auf der Alpen-nordseite auf klimatische Gunststandorte – vor allem entlang von Seen – beschränkt. Weinberge prägen bis heute das Bild vieler Sonnenhänge an Voralpen- und Mittellandseen.

6.4 Stoffhaushalt und Wasserqualität

Die Nährstoffsituation in einem See ist ein Spiegel der Aktivitäten in seinem Einzugsgebiet (GSA 2003). Seen mit schwach besiedelten und naturnahen Einzugsgebieten sind nährstoffarm, während Seen mit einer hohen Siedlungsdichte oder intensiver Landwirtschaft im Einzugsgebiet nährstoffreich sind. Der Gesamtzustand der meisten Schweizer Seen kann heute wieder als gut bezeichnet werden. Trotzdem besteht vielerorts noch Handlungsbedarf.

6.4.1 Phosphor und Sauerstoff

Unter natürlichen Bedingungen kommt Phosphor in den Seen in so geringen Mengen vor, dass er der limitierende Faktor für die Primärproduktion ist. Der überwiegende Teil der Primärproduktion besteht aus freischwebenden Algen, dem Phytoplankton (s. Fig. 6-9).

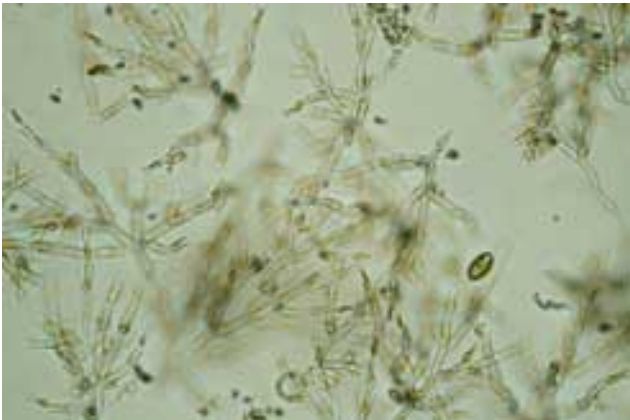


Fig. 6-9: Phytoplankton (Dinobryon).



Fig. 6-11: Algenblüte im Baldegger See (LU), aufgenommen im Mai 1982.

Im Sommerhalbjahr werden in Oberflächennähe viele Algen produziert, welche als Stoffwechselprodukt Sauerstoff freisetzen. Der Sauerstoffgehalt im Epilimnion nimmt dadurch im Verlauf des Sommers zu. Ein Teil des absterbenden Phytoplanktons wird bereits im Metalimnion abgebaut.

Die restliche abgestorbene Biomasse sinkt ab und wird unter Sauerstoffverbrauch in den tieferen Wasserschichten zersetzt, wodurch die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser abnimmt (vgl. Fig. 6-10). Weil eine Nachlieferung von Sauerstoff vom Epilimnion her aufgrund der Schichtung nicht möglich ist, kann es dabei zu einer vollständigen Sauerstoffzehrung kommen. Die Folge davon ist ein sauerstofffreier Abbau organischer Materialien mit Bildung von reduzierten Verbindungen

(Ammonium, Schwefelwasserstoff, Methan etc.), die z.T. giftig sind. Weiter kann dabei in den Sedimenten gebundener Phosphor rückgelöst werden, was einer internen Düngung des Sees gleichkommt. Die Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff erfolgt erst bei der nächsten Zirkulation des Sees. Dabei wird auch der Phosphor wiederum im gesamten Wasserkörper verteilt.

6.4.2 Der Phosphorgehalt in Seen – eine Erfolgsgeschichte des Gewässerschutzes

Steigende Bevölkerungszahlen, die Einführung von Wasserklosetts und deren Ableitung in die Oberflächengewässer, die Industrialisierung sowie die Intensivierung der Landwirtschaft führten ab dem 19. Jahr-

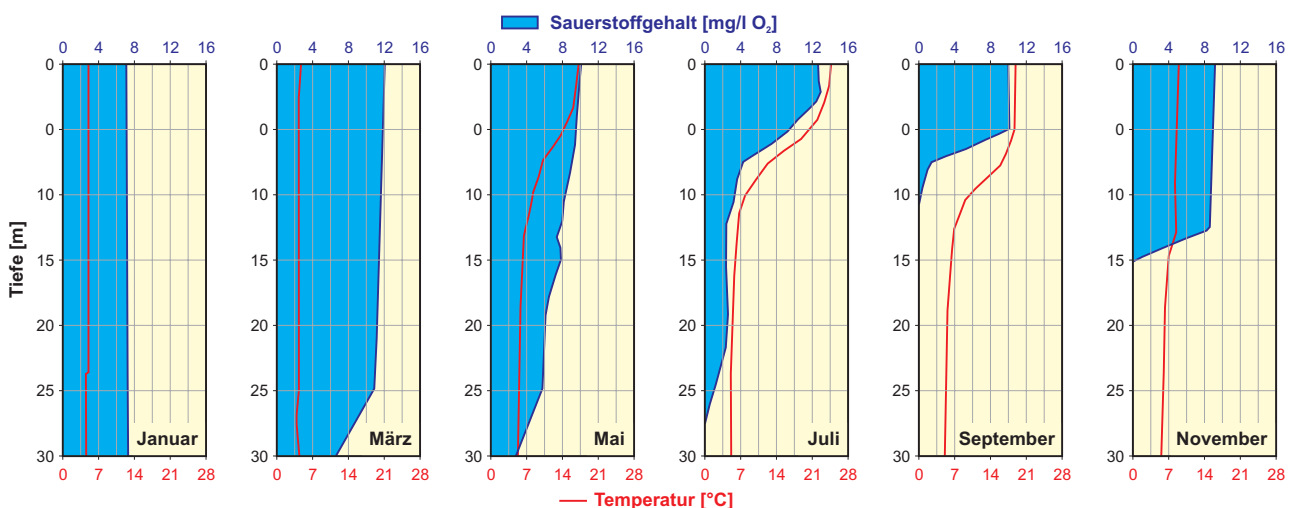


Fig. 6-10: Sauerstoff- und Temperaturprofile des Greifensees im Jahr 2003 (nach www.gewaesserschutz.zh.ch).

hundert in vielen Schweizer Seen zu einem Ansteigen der Nährstoffgehalte. Der Zustand der Oberflächengewässer verschlechterte sich unter der zunehmenden Belastung fortwährend und machte gesetzliche Massnahmen zum Schutz der Gewässer unumgänglich. So wurde 1953 der Gewässerschutzartikel in der Bundesverfassung verankert (vgl. Kap. 9).

Das reichliche Nährstoffangebot führte in den betroffenen Seen zu einer gesteigerten Primärproduktion. Im Sommer bildeten sich auf vielen Seen ausgedehnte Algenteppeiche (vgl. Fig. 6-11). In den 1970er Jahren wurde der Höhepunkt dieser Entwicklung erreicht (vgl. Fig. 6-12). Seither konnten die Phosphateinträge in die Seen hauptsächlich dank der folgenden seeexternen Massnahmen gesenkt werden:

- Mit dem Bau von Abwasserreinigungsanlagen konnte der Anteil der ungereinigt in die Seen gelangenden Haushalts- und Industrieabwässer zunehmend vermindert werden.
- Als zusätzliche Reinigungsstufe wurde in bestehenden Abwasserreinigungsanlagen die Phosphatfällung eingeführt, womit das Phosphat grösstenteils im Klärschlamm zurückgehalten werden kann.
- Das 1986 in Kraft getretene Phosphatverbot für Textilwaschmittel zeigte grosse Wirkung.

Ergänzend wird daran gearbeitet, die diffusen Nährstoffeinträge aus den Landwirtschaftsflächen in die Gewässer zu verringern. Diese machen heute den entscheidenden Anteil der Nährstoffeinträge aus.

Heute kann der Zustand der meisten grossen Seen bezüglich Phosphor als gut bezeichnet werden. Problematisch bleiben Seen in Gebieten mit intensiver Landwirtschaft. In einigen dieser Seen, z.B. im Baldegger-

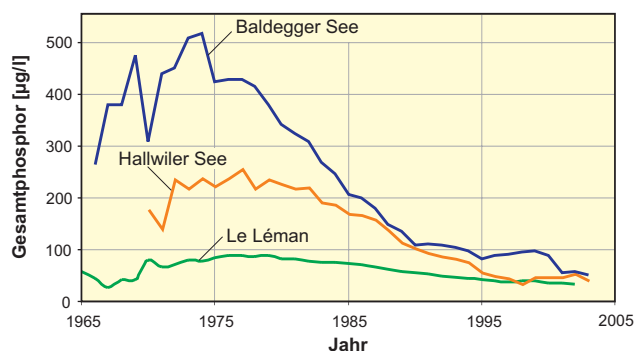


Fig. 6-12: Entwicklung des Gesamtphosphorgehalts ausgewählter Seen. Zielwert 10–25 mg/l (Daten: P. Liechti, BUWAL).

und im Sempacher See, ist das Überleben von Pflanzen und Tieren bis heute nur dank seeinterner Massnahmen wie künstlicher Belüftung und Zirkulationshilfen möglich.

6.4.3 Die Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff

Die natürliche Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff ist aufgrund der Temperaturschichtung im Sommer auf das Winterhalbjahr beschränkt. Stark windexponierte Seen mit einem flachen und breiten Becken zirkulieren regelmässig vollständig, relativ windgeschützte und schmale, tiefe Seen oft nur bis in bestimmte Tiefen. Beispielsweise zirkuliert der Briener See nicht jedes Jahr vollständig. In solchen Seen hat auch die Erdwärme einen gewissen Einfluss auf die Temperatur des Tiefenwassers. Durch die allmähliche wenn auch nur geringfügige Erwärmung des Tiefenwassers wird die Schichtungsstabilität reduziert, so dass nach einigen Jahren in einem kalten Winter eine Zirkulation bis in grosse Tiefen einsetzen kann. Im Briener See wurde dies nach 1991 erst im Winter 1998/1999 wieder beobachtet (GSA 2003).

Mit dem Absinken des Gesamtphosphorgehalts hat in vielen Seen auch eine Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse während der Stagnationsphase stattgefunden. Figur 6-13 zeigt die Entwicklung der Sauerstoffgehalte einiger ausgewählter Seen über 20 Jahre. Neben positiv verlaufenden Entwicklungen (z.B. Le Léman, Lac de Neuchâtel) gibt es auch Seen, deren Sauerstoffgehalt noch weit von der gesetzlichen Anforderung (4 mg Sauerstoff pro Liter, unter Vorbehalt besonderer natürlicher Verhältnisse) entfernt sind. Im Nordbecken des Luganer Sees sind aufgrund der chemischen Schichtung in grösseren Tiefen nur leichte Verbesserungen feststellbar. Bei Sempacher- und Baldegger See sind die positiven Auswirkungen der seeinternen Massnahmen deutlich zu erkennen.

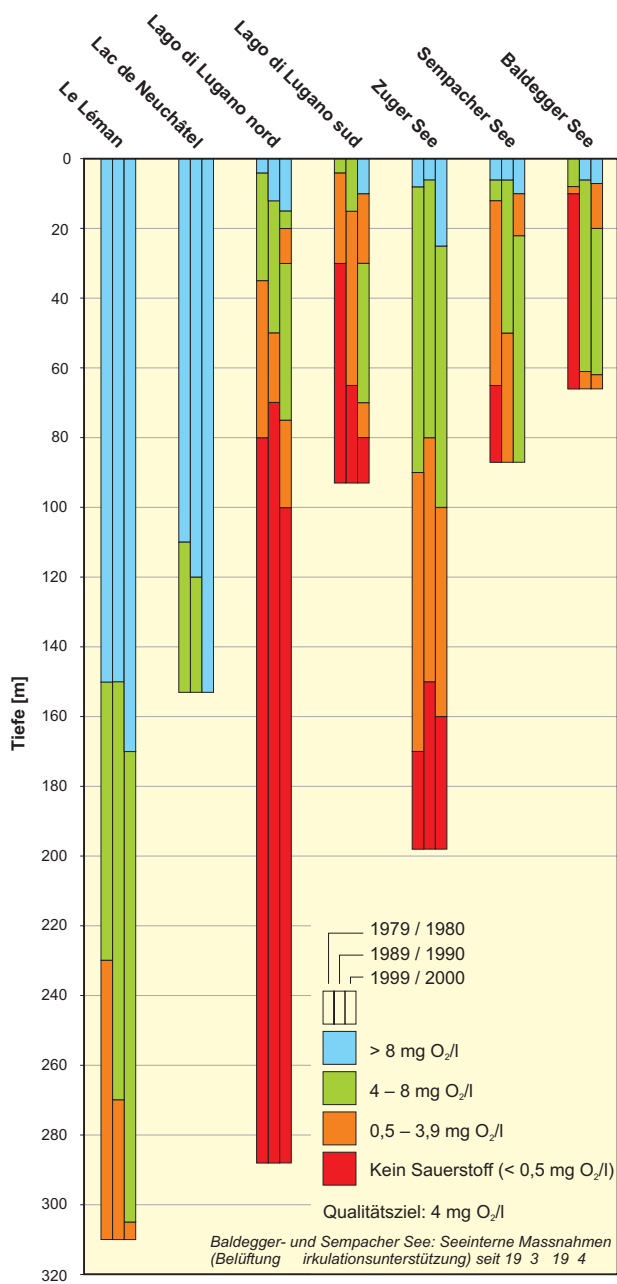


Fig. 6-13: Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse in ausgewählten Seen am Ende der sommerlichen Stagnationsphase (nach JAKOB et al. 2004).

7 Grundwasser

Kennziffern

Trink- und Brauchwassergewinnung in der Schweiz im Jahr 2001

Quelle: SVGW 2004

Herkunft	Volumen	Anteil
Grundwasser aus Förderbrunnen	377 Mio m ³	36 %
Grundwasser aus Quellen	491 Mio m ³	48 %
Seewasser	168 Mio m ³	16 %
Total	1036 Mio m ³	100 %

Grundwasservorkommen in der Schweiz

Quellen: BITTERLI et al. 2004, DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998, GUILLEMIN & ROUX 1992, POCHON & ZWAHLEN 2003, SVGW 2004

Grundwasserleiter	Flächenanteil	Anteil an Wassergewinnung	Fließdauer pro 1 km
Lockergesteins-Grundwasserleiter	ca. 6 %	36 %	6 Monate bis 2 Jahre
Karst-Grundwasserleiter	ca. 16 %	18 %	5 bis 50 Stunden
Kluftgesteins-Grundwasserleiter	ca. 78 %	30 %	2 Tage bis 1 Jahr

7.1 Wasser im Untergrund

Das Grundwasser ist der unterirdische, weitgehend unsichtbare Teil des natürlichen Wasserkreislaufs; Wissenschaft des Grundwassers ist die Hydrogeologie. Gesteinsabfolgen, die Grundwasser enthalten und geeignet sind es weiterzuleiten, werden als Grundwasserleiter bezeichnet.

7.1.1 Grundwasser und Hydrogeologie

Grundwasser ist das Wasser, das Hohlräume (Poren, Trennflächen, Klüfte) im Gestein zusammenhängend ausfüllt. Grundwasser wird vor allem durch Versickerung von Niederschlagswasser und Wasser aus Fließgewässern gebildet. Es bewegt sich ausschliesslich unter dem Einfluss der Schwerkraft und kann Tiefen von mehreren Tausend Metern erreichen. Das Grundwasser fließt von den Infiltrationsgebieten in Richtung

der Exfiltrationsgebiete (vgl. Fig. 7-1). Grundwasser kann unterirdisch in Oberflächengewässer übertreten, an der Oberfläche natürlich austreten (Quellen) oder künstlich gefasst werden (Förderbrunnen). Quellen sind damit eine besondere Erscheinungsform des Grundwassers. Eine direkte Messung der Eigenschaften des Grundwassers und des entsprechenden Grundwasserleiters an jedem Punkt der Erdkruste ist unmöglich. Hydrogeologische Studien benötigen deshalb weitgehend indirekte Methoden sowie Interpretationen.

Die Kenntnis der geologischen und hydrologischen Verhältnisse und der physikalischen Gesetze bezüglich Herkunft, Vorkommen, Bewegung und Eigenschaften des Grundwassers ist Aufgabe der Hydrogeologie. Sie stellt auch die Anwendung und Nutzung dieser Kenntnisse für die Erkundung, die Erschliessung und den Schutz des Grundwassers sicher (CASTANY & MARGAT 1977, GHO 1982, HÖLTING 1996, MÜLLER 1999).

7.1.2 Grundwasserleiter

Viele Gesteine sind geeignet, Grundwasser zu enthalten und weiterzuleiten. Unter den Grundwasserleitern werden drei Haupttypen unterschieden: Lockergesteins-, Karst- sowie Kluft-Grundwasserleiter (BUWAL 2004).

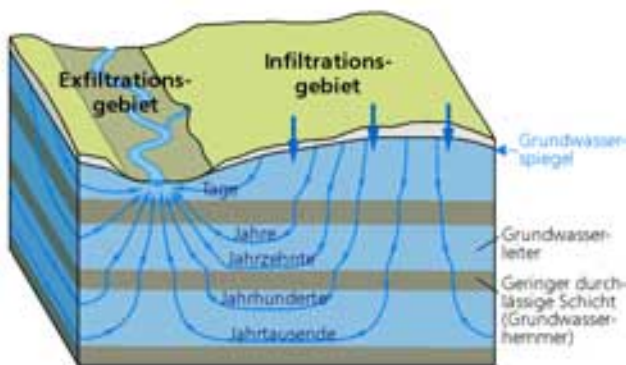


Fig. 7-1: Erläuterungsskizze Grundwasser: Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete, Fließrichtungen und Verweilzeiten (nach BOUZELBOUDJEN et al. 1997).

Gesteinsart	Durchlässigkeit	
	K-Wert	Beschreibung
Kiesig-sandiger Schotter	10^{-2} – 10^{-3}	hoch
Schotter, sandig bis siltig	10^{-4}	mittel
Lehmreicher Schotter	10^{-5}	mittel bis gering
Feinsand, Silt, Ton, Lehm	$< 10^{-5}$	gering bis sehr gering

Tab. 7-1: Durchlässigkeit von Lockergesteinen: Größenordnung (K-Wert) in m/s und Beschreibung (nach: SGK ab 1972).

Bei Lockergesteins-Grundwasserleitern (z.B. Kies, Sand) fließt das Grundwasser durch die Poren im Gefüge. Die Fließgeschwindigkeit beträgt in der Regel wenige Meter pro Tag. Die Eignung eines Gesteins, das Wasser zu leiten, wird vom Gesetz von Darcy beschrieben (vgl. z.B. HÖLTING 1996). Entscheidend sind das Gefälle und die Durchlässigkeit (K-Wert) (s. Tab. 7-1 und Fig. 7-2).

$$Q = K \cdot S \cdot i$$

mit: Q Durchfluss durch einen Grundwasserquerschnitt [m³/s]
 S Querschnittsfläche [m²]
 i Hydraulischer Gradient (Gefälle) [-]
 K Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Eine Zusammenstellung der geschätzten Durchlässigkeiten der geologischen Schichtabfolgen zwischen Jura und Alpen und unter dem Molassebecken ist in PFIFFNER et al. (1997) sowie BOUZELBOUDJEN et al. (1997) aufgeführt.

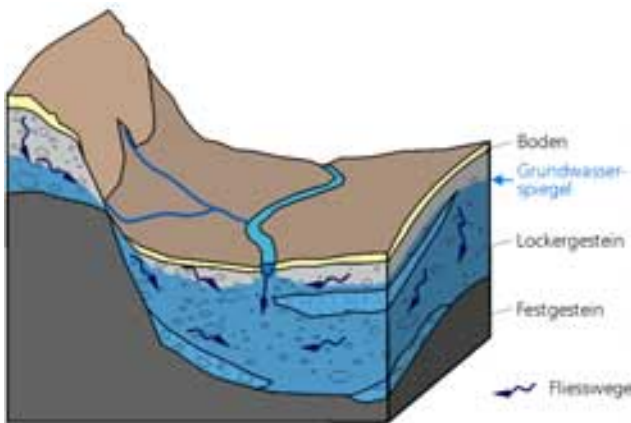


Fig. 7-2: Lockergesteins-Grundwasserleiter.

Gewisse Gesteine (z.B. Kalk) können verkarsten, d.h. bestehende Trennflächen können durch Lösungsprozesse erweitert werden und sich schliesslich zu einem dreidimensionalen Netz von offenen Klüften, Röhren und Höhlen entwickeln (vgl. Fig. 7-3). In solchen Karst-Grundwasserleitern sind die Fließgeschwindigkeiten räumlich und zeitlich sehr heterogen und können über mehrere zehn Meter pro Stunde betragen. Deshalb sind Grundwasservorkommen in Karst-Grundwasserleitern besonders empfindlich gegenüber Verschmutzungen.

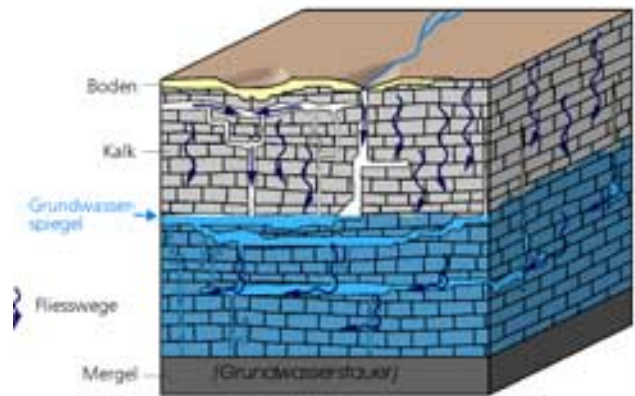


Fig. 7-3: Karst-Grundwasserleiter (Skizze nach DEMATTEIS et al. 1997).

Bei den Kluff-Grundwasserleitern (z.B. Molassesandsteine, Flysche, Granite) fließt das Grundwasser entlang von Trennflächen wie Klüften und Schichtfugen, je nach Gestein (z.B. Sandsteine) auch in Poren (vgl. Fig. 7-4). Die Fließgeschwindigkeit ist von der Öffnungsweite der Trennflächen und vom Vernetzungsgrad der Klüfte abhängig und kann von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern pro Tag betragen.

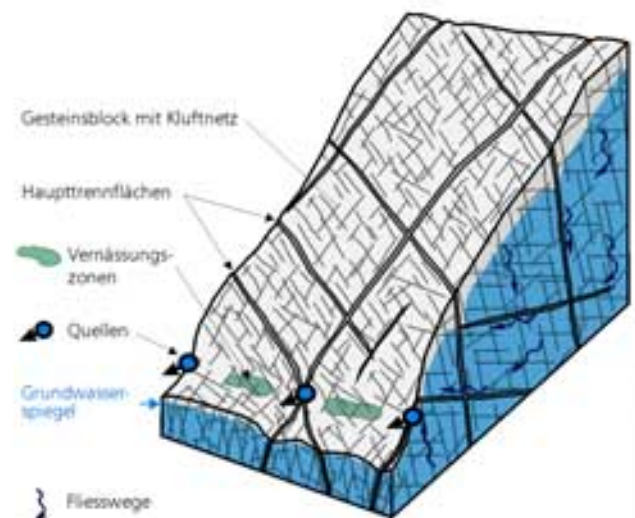


Fig. 7-4: Kluff-Grundwasserleiter (nach POUCHON & ZWAHLEN 2003).

7.2 Grundwasserstände und Quellschüttungen messen

Um quantitative Veränderungen der Grundwasserressourcen, die durch natürliche oder menschliche Einflüsse bedingt sein können, frühzeitig zu erkennen, ist eine langfristige, quantitative Beobachtung des Grundwassers notwendig. Diese stellt eine Grundlage für eine landesweite nachhaltige Wasserversorgung dar. Zu diesem Zweck ist das Nationale Beobachtungsnetz der Grundwasserstände und Quellschüttungen seit 1975 in Betrieb.

Im Allgemeinen wird der Grundwasserstand in einem gelochten Rohr (Piezometer, Förderbrunnen), das im Grundwasserleiter eingebaut ist, manuell (mit einem Lichtlot) oder automatisch gemessen (s. Fig. 7-5).

Die automatischen Messungen erfolgen mit Hilfe eines Schwimmers, eines Pneumatikpegels (Einperleinrichtung) oder einer Drucksonde. Die Daten werden entweder analog auf Papier (Umlauftrommel) aufgezeichnet oder digital auf einem Modul gespeichert. In einem Piezometer wird in der Regel der natürliche Grundwasserstand gemessen, in einem Förderbrunnen ist der Wasserstand durch den Förderbetrieb beeinflusst.

Die Quellschüttung wird möglichst nahe beim Quellaustritt an einem natürlichen Querschnitt oder mit Hilfe eines künstlichen Überlaufs gemessen. Analog zur Abflussmessung an Oberflächengewässern wird der Wasserstand erfasst; die Schüttung (Abfluss) wird daraus mit Hilfe der Abflusskurve bestimmt (vgl. Kap. 5).

Das nationale Beobachtungsnetz der Grundwasserstände und Quellschüttungen (NABESS) umfasst derzeit 41 Piezometer und 2 Quellen und erlaubt eine allgemeine nationale Übersicht (vgl. Fig. 7-6). Eine erste Synthese über die Ergebnisse des Messnetzes NABESS haben BUTTET & EBERHARD (1995) erstellt. Die Tagesmittelwerte stehen dem interessierten Publikum zur Verfügung (s. www.bwg.admin.ch; s. auch «Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz», z.B. BWG 2004). Quantitative Grundwasserdaten werden auch gezielt von Kantonen, Hochschulen und privaten Organisationen erhoben; rund 1000 Stationen (Piezometer, Förderbrunnen, Quellen) konnten gesamtschweizerisch bei einer Bestandaufnahme identifiziert werden (SCHÜRCH et al. 2004; s. auch www.bwg.admin.ch).

Nebst der Messung der Grundwassermenge ist die Kontrolle seiner Qualität von entscheidender Wichtigkeit für die Trinkwassernutzung. Fragen der Wasser-

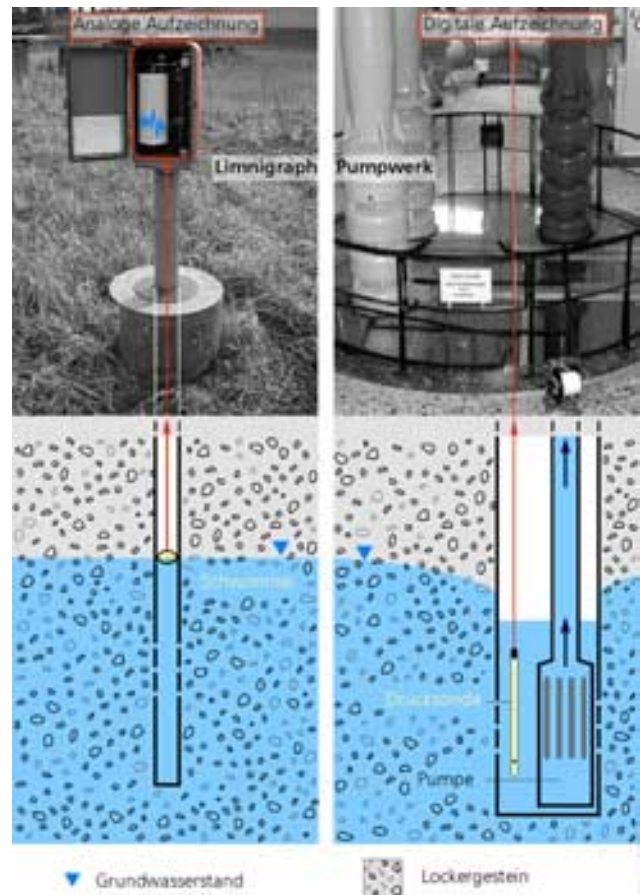


Fig. 7-5: Messprinzip und Datenerfassung mittels Piezometer (links) und Förderbrunnen (rechts) (nach SCHÜRCH et al. 2004).



Fig. 7-6: Eidgenössische Stationen zur Messung von Grundwasserständen und Quellschüttungen (Stand 2003) vor dem Hintergrund der dominierenden Grundwasserleitertypen (Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz).

qualität im Allgemeinen werden in Kapitel 9, die Qualität des Grundwassers im Besonderen in Kapitel 7.4 behandelt.

7.3 Grundwasserregime

Die Grundwasserneubildung ist durch einen jahreszeitlichen Rhythmus geprägt. Dies führt zu Schwankungen des Grundwasserspiegels und der Quellschüttungen. Bei den sehr ergiebigen Grundwasservorkommen in gut durchlässigen Schottern der ausgedehnten Flusstäler z.B. erfolgt die Grundwasserneubildung überwiegend durch die Flussinfiltration, mit Maxima meist im Frühling und Sommer.

Bei den grossen alpinen Flüssen Aare, Reuss, Rhein, Rhone und Inn wird das Grundwasser vor allem im Frühling und Sommer durch das Schnee- und Gletscherschmelzwasser gespeist. Aus diesem Grund lagen die Grundwasserstände in den Talschottern dieser Flüsse selbst im ausgeprägt trockenen Sommer 2003 zwar generell tief, aber über dem langjährigen Minimum, wie z.B. bei Wartau (SG) (BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004) (vgl. Fig. 7-9).

Abflüsse und Grundwasserneubildung kleinerer Einzugsgebiete des Mittellandes sind durch den Verlauf

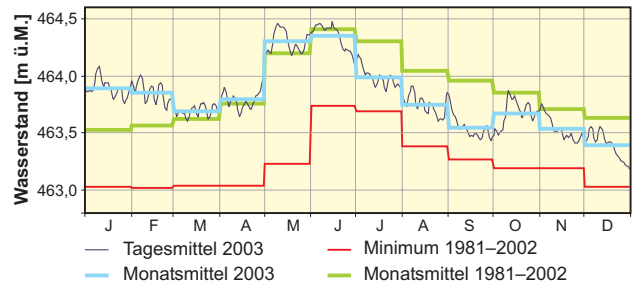


Fig. 7-9: Saisonale Grundwasserstände im Flussschotter: Rhein – Wartau Weite B (SG) (nach BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

der Niederschläge und der Evapotranspiration bestimmt. Überdurchschnittlich trockene Perioden können hier zu einem Defizit bei der Grundwasserneubildung führen, wie aus dem Vergleich der Ganglinie der Monatsmittel mit dem langjährigen mittleren Jahresgang des Grundwassers bei Nebikon (Wiggertal, LU) ersichtlich ist (vgl. Fig. 7-7).

In einem Karst-Grundwasserleiter bewegt sich das Grundwasser sowohl in einem zusammenhängenden Netz von Karströhren (Karstnetz) wie auch in zerklüfteten und im Allgemeinen gering durchlässigen Gesteinsmassen. Das Karst-Grundwasser tritt an der Oberfläche meistens als Quelle aus, deren Ergiebigkeit stark in

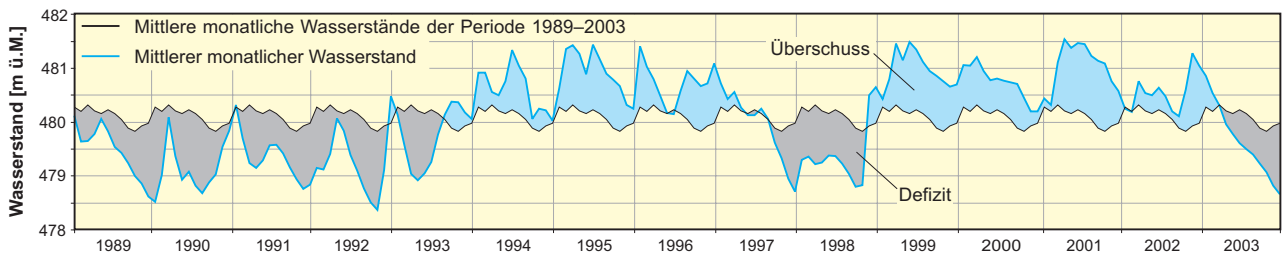


Fig. 7-7: Grundwasserbilanz Nebikon – Winkel (LU). Vergleich der mittleren monatlichen Grundwasserstände der Einzeljahre mit denjenigen der Periode 1989–2003 (nach SCHÜRCH et al. 2004).

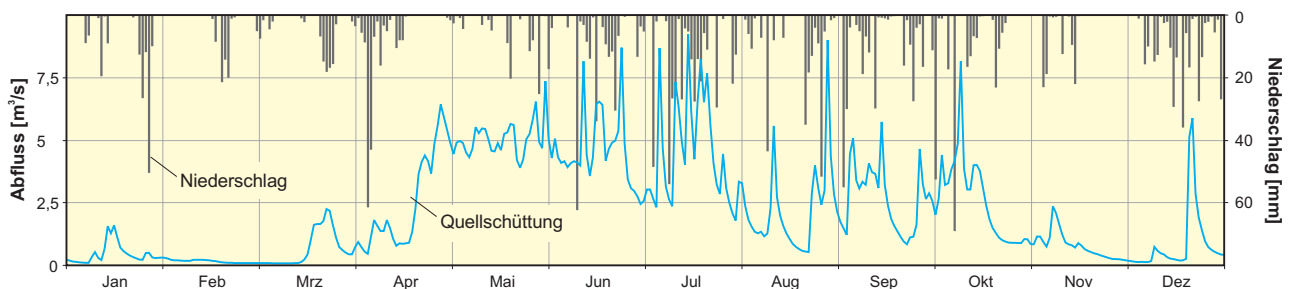


Fig. 7-8: Quellschüttung aus Karst-Grundwasserleiter im Jahr 1993: Schlichenden Brünnen, Muotathal (SZ) mit Niederschlägen der Station Bisisthal (nach SCHÜRCH et al. 2004).

Abhängigkeit der Witterungsbedingungen variiert. Die Ganglinie der Tagesmittel für die Quelle Schlichenden Brünnen (SZ) (Fig. 7-8) illustriert die typischen Hydrogramme dieser Quellen mit einer raschen und starken Zunahme bei Niederschlagsereignissen bzw. einer raschen Abnahme der Schüttungsmenge danach sowie einer langsamen Abnahme in Zeiten mit wenig Niederschlag (vgl. Periode vom 9. Oktober bis 21. Dezember 1993 in Fig. 7-8).

7.4 Die Qualität des Grundwassers

Über 80 % der Trink- und Brauchwasserversorgung der Schweiz wird aus Grundwasser gedeckt. Grundwasser muss somit im Hinblick auf seine langfristige Erhaltung nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ landesweit beobachtet werden. Das Nationale Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität soll diese Anforderung erfüllen.

7.4.1 Instrumente der landesweiten Beobachtung

Die Umsetzung von Grundwasserschutzmassnahmen verlangt ausreichende und langjährige Datenreihen über den Grundwasserzustand. Bis anhin erhoben kantonale Labors, Wasserversorgungen und zunehmend auch kantonale Gewässerschutzämter solche Daten im Hinblick auf ihre spezifischen Fragestellungen. Datenreihen wurden auch von Hochschulen erhoben (KILCHMANN 2001).



Fig. 7-10: Messstellen NAQUA_{TREND} (Stand 2003) mit hauptsächlich Bodennutzung im hydrogeologischen Einzugsgebiet (Daten aus Messnetz NAQUA_{TREND}).

Da auch eine nationale Übersicht gewährleistet werden muss, wurde 1997 das Nationale Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität NAQUA ins Leben gerufen. Im Endausbau wird das Modul NAQUA_{TREND} fünfzig möglichst repräsentativ über die ganze Schweiz verteilte Messstellen zur langfristigen Beobachtung umfassen; Ende 2003 waren davon 48 in Betrieb (vgl. Fig. 7-10). Das Modul NAQUA_{SPEZ} erlaubt an ca. 500 Messstellen gezielte Kampagnen zu speziellen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Qualität des Grundwassers.

7.4.2 Vorgehensschritte zur Datenbeschaffung

Wahl der NAQUA-Messstellen, Probenahme und Analytik müssen strenge Anforderungen erfüllen (BUWAL / BWG 2002 und 2004, GREBER et al. 2002). Für die Auswahl der Messstellen wurde auf bereits bestehende Förderbrunnen, Quellwasserfassungen und Piezometer zurückgegriffen. Das Messprogramm ist modulartig im Baukastensystem aufgebaut (vgl. Fig. 7-11). Es basiert auf einem Grundprogramm und zusätzlichen, jederzeit anpassbaren Zusatzprogrammen. Der Einsatz der Zusatzprogramme hängt von der potentiellen anthropogenen Belastungssituation (z.B. Landwirtschaft, Verkehr), den natürlichen Einflussfaktoren der jeweiligen Station und den vorhergehenden Analyseergebnissen ab. Die vom beauftragten Labor abgelieferten Analyseergebnisse werden umgehend einer ersten Auswertung unterzogen, so dass auch kurzfristig Anpassungen bei den Zusatzprogrammen künftiger Messungen eingeleitet werden können. Grundwasserproben werden – bei den Brunnen und Piezometern – erst nach ausreichendem Vorpumpen und nach Erreichen konstanter Werte der kontinuierlich aufgezeichneten Feldparameter abgefüllt.

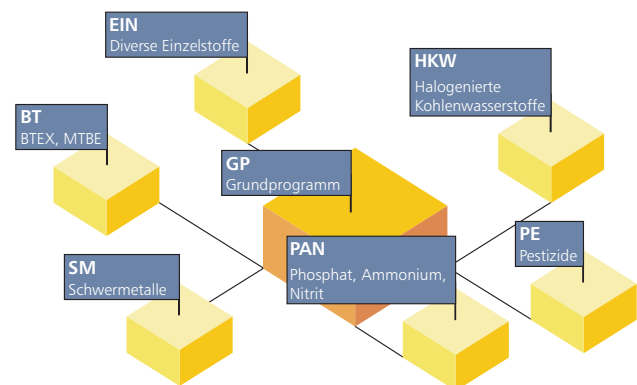


Fig. 7-11: Modulaufbau NAQUA – Das Grundprogramm kann mit bis zu sechs Zusatzprogrammen kombiniert werden (nach GREBER et al. 2002).

7.4.3 Darstellung ausgewählter Messreihen

Die dichte Besiedlung der Schweiz und die intensive Nutzung des Landes hinterlassen ihre Spuren im Grundwasser. Die Befunde zeigen, dass das schweizerische Grundwasser und damit das Trinkwasser eine sehr gute Qualität aufweisen, denn die gefundenen Werte liegen nach heutigem Stand des Wissens in einer Gröszenordnung, in welcher keine Gesundheitsgefährdung zu erwarten ist. Die Werte sind hingegen als deutlicher Hinweis darauf zu werten, dass mit den Bemühungen zum Schutz der Grundwasservorkommen intensiv weitergefahren werden muss (BUWAL / BWG 2004).

Von den Hauptinhaltsstoffen des Grundwassers ist Nitrat der markanteste Indikator zur Beobachtung des Einflusses der Bodennutzung. Als Hauptquelle des Nitrats im Grundwasser ist die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung zu bezeichnen. Das Nitrat gelangt durch Auswaschung des Bodens und über das infiltrierende Niederschlagswasser ins Grundwasser. Figur 7-12 zeigt beispielhaft die mittleren und die maximalen Nitratwerte für alle NAQUA-Messstellen in den Jahren 2002–2003, gruppiert nach der Hauptbodennutzung. Die Graphik belegt, dass die Bodennutzung markant die Nitratgehalte im Grundwasser und somit auch dessen Qualität bestimmt. Die verfügbaren Daten lassen zudem den Schluss zu, dass zwischen den Perioden 1989–1991 (kantonale Daten) und 2002–2003 (NAQUA-Daten) der mittlere Nitratgehalt in den schweizerischen Grundwasservorkommen abgenommen hat.

Einen wichtigen Grund für die beobachtete durchschnittliche Abnahme dürften generelle Veränderungen in der Landwirtschaft darstellen. Seit 1999 unterstützt der Bund zudem Sanierungsprojekte, um die unerwünschte Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser

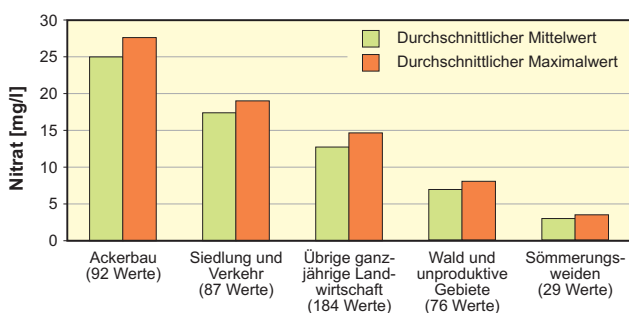


Fig. 7-12: Durchschnittlicher mittlerer und maximaler Nitratgehalt in Abhängigkeit der Hauptbodennutzung für die beprobten NAQUA-Messstellen (Periode 2002–2003) (nach BUWAL / BWG 2004).

zu vermindern. Dabei verpflichten sich die Betriebe zu besonders wasserschonenden Produktionsmethoden (z.B. Umstellung von Ackerflächen auf Dauergrünland mit extensiver Beweidung) (MEYLAN 2003). Die beiden in Figur 7-13 dargestellten exemplarischen Ganglinien zeigen mögliche Entwicklungen des Nitratgehaltes, je nach lokalen Verhältnissen. Während die Messstelle mit Nitratprojekt seit ca. 1995 eine deutliche Abnahme des Nitratgehaltes zeigt, erhöhte sich dieser in der Messstelle ohne Nitratprojekt bis 1996 deutlich und konnte seither, insbesondere durch die tiefgreifenden Veränderungen in der Landwirtschaft, etwa auf das Niveau von 1989 gesenkt werden.

Im Rahmen des Spezialprogrammes NAQUA_{SPZ} (Phase 2002) wurden Pflanzenschutzmittel (am häufigsten

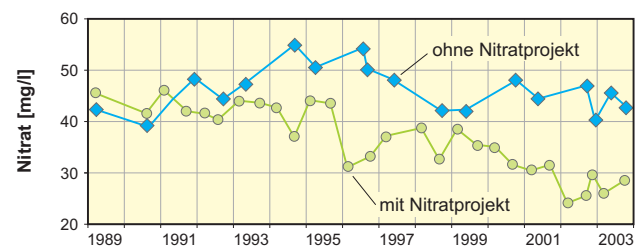


Fig. 7-13: Zwei Förderbrunnen im östlichen Mittelland (Schotter ausserhalb des Einflussbereichs eines Fließgewässers). Hauptbodennutzung Ackerbau (nach BUWAL / BWG 2004).

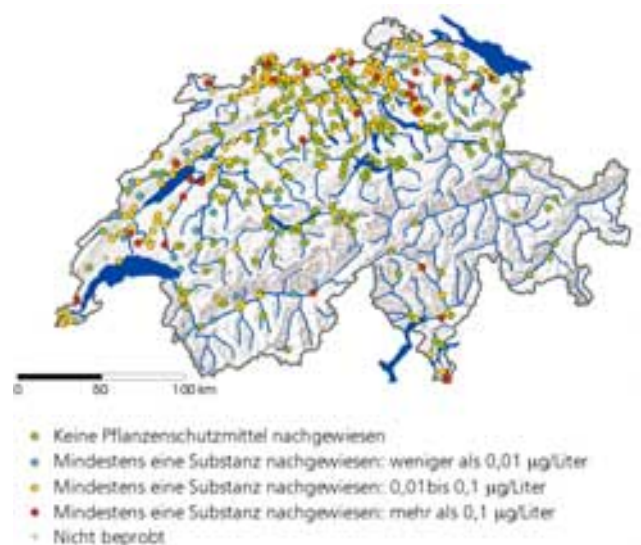


Fig. 7-14: Maximale Gehalte an Pflanzenschutzmitteln im Grundwasser im Jahr 2002. Die Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) legt als Anforderung für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird, eine maximale Konzentration an Pflanzenschutzmitteln von 0,1 µg/l je Einzelstoff fest (nach BUWAL / BWG 2003).

das Totalherbizid Atrazin und sein Abbauprodukt Desethylatrazin) in einer grossen Zahl von Messstellen nachgewiesen (vgl. Fig. 7-14). Nach heutigem Wissensstand handelt es sich dabei um gesundheitlich unbedenkliche Spuren. Ihr Auftreten im Grundwasser muss aber aufmerksam verfolgt werden (BUWAL / BWG 2003, 2004).

Der Spurenstoff Bor kann geogenen und/oder anthropogenen Ursprungs sein. In der Natur ist er u.a. in zahlreichen Mineralien enthalten. Im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten befindet er sich in der Schweiz vor allem im kommunalen Abwasser (Waschmittel und Medikamente), aber auch in zahlreichen industriellen Produkten, Düngemitteln und Insektiziden. Deshalb kann er als Indikator für allgemeine anthropogene Beeinflussungen wie z.B. Deponieeinflüsse verwendet werden. Beim gegenseitigen Vergleich von Bor und Natrium – ein Hauptinhaltsstoff, der ebenfalls geogenen oder anthropogenen Ursprungs sein kann – ergibt sich eine positive Korrelation (vgl. Fig. 7-15). Bei gleichzeitigem Nachweis höherer Konzentrationen von Bor und Natrium (GREBER et al. 2002, MATTHESS 1994, MERKEL & SPERLING 1996) ist die Wahrscheinlichkeit anthropogener Verunreinigung gross.

7.5 Grundwasser als Lebensraum

In den Grundwasserleitern lebt eine Vielzahl unterschiedlichster einzelliger Mikroorganismen wie Bakterien und Protozoen. In speziellen Grundwasserhabitaten können auch kleine vielzellige tierische Lebewesen beobachtet werden. Diese Fauna besteht mehrheitlich aus Mikrokrustazeen. Alle autochthonen mikrobiellen Arten sind harmlos und diese natürliche Lebensgemeinschaft (Biozönose) verstärkt die Reinigungsfunktion in den Grundwasserleitern. Gemäss Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 soll die Biozönose unterirdischer Gewässer «naturnah und standortgerecht» sein sowie «typisch für nicht oder nur schwach belastete Gewässer». Gegenwärtige Studien haben zum Ziel, Beurteilungskriterien für natürliche Biozönosen im Grundwasserbereich zu definieren.

7.5.1 Lebewesen im Grundwasserbereich

Untersuchungen über Mikroorganismen im Grundwasser konzentrierten sich bisher meist auf zwei Aspekte: das Vorkommen und den Transport von pathogenen Mikroorganismen und die Rolle von Bakterien beim Schadstoffabbau. Durch die rasanten methodischen Fortschritte im Bereich der molekularen Mikrobiologie

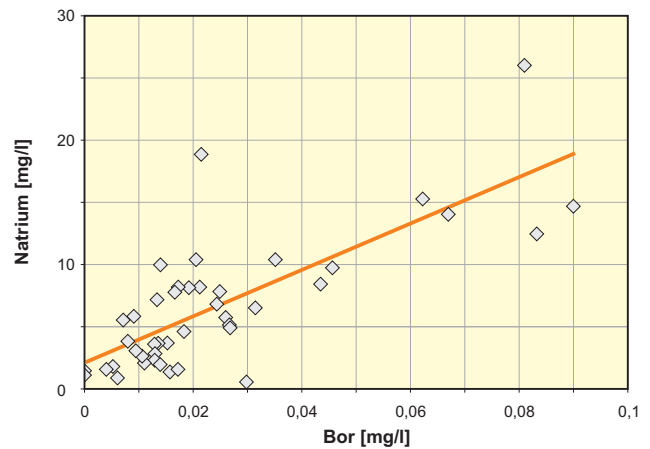


Fig. 7-15: Korrelation zwischen Bor und Natrium als Indikator möglicher anthropogener Beeinflussung (Daten aus Messnetz NAQUA_{TREND}, Periode 1999–2002).

wurde jedoch zunehmend erkannt, dass auch in unverschmutzten Grundwasserleitern eine Vielzahl unterschiedlichster Mikroorganismen lebt, vor allem Bakterien, aber auch Archebakterien, Protozoen und Bakteriophagen (GIBERT et al. 1994, GRIEBLER & MÖSSLACHER 2003, HUNKELER et al. in Vorb.). Wie die Bakterien bilden die Archebakterien eine wichtige Gruppe primitiver einzelliger Lebewesen, deren Zellen keinen Zellkern aufweisen; beide Gruppen sind genetisch grundlegend verschieden. Protozoen sind ebenfalls einzellige Lebewesen, die jedoch einen Zellkern besitzen. Bakteriophagen sind eine Art Viren, deren Wirtszellen Bakterien sind; die Viren brauchen für ihre Entwicklung eine lebende Zelle. Die Grösse einer Bakterie beträgt mehrheitlich 0,5 bis 2 Mikrometer, diejenige der Protozoen, je nach Art, mehrheitlich 2 bis 200 Mikrometer.

Diese Mikroorganismen können natürlicherweise und dauerhaft im Grundwasserbereich leben oder von ausserhalb stammen (autochthoner bzw. allochthoner Charakter). Die Herkunft der allochthonen Arten kann anthropogen oder natürlich sein. Zahlreiche Arten sind harmlos; die Bedeutung der pathogenen Arten ist vor kurzem analysiert worden (AUCKENTHALER & HUGGENBERGER 2003). Es scheint so zu sein, dass alle autochthonen Arten harmlos sind, während alle pathogenen Arten allochthon sind (HUNKELER et al. in Vorb.).

Neben den Mikroorganismen kann im Karstgrundwasser sowie in gewissen Lockergesteins-Grundwasserleitern auch eine Fauna beobachtet werden. Mit wenigen Ausnahmen sind diese Lebewesen sehr klein (kleiner als 3 mm). Auch diese Kleintiere können autochthonen

bzw. allochthonen Charakters sein. Die in der Schweiz bekannten, ausschliesslich im Grundwasserbereich lebende Arten sind vor allem Krustazeen, Insekten, Nematoden und Mollusken; dabei stellen die Krustazeen den Grossteil der bekannten Arten dar (HUNKELER et al. in Vorb., persönliche Mitteilung P. Moeschler). In der Schweiz leben gewisse Arten, die jeweils nur in einer beschränkten Region bekannt (endemische Arten) und deswegen besonders schützenswert sind; z.B. die Mikrokrustazee *Gelyella monardi* (s. Fig. 7-16).



Fig. 7-16: Die Mikrokrustazee *Gelyella monardi* wurde zum ersten Mal im Karst-Grundwasserleiter, der die Quelle Combe-Garot (NE) speist, identifiziert. Sie lebt ausschliesslich im Grundwasser und ist 0,3 mm lang (Zeichnung C. Marendaz nach MOESCHLER & ROUCH 1988).

Die Grundwasserfauna kann als natürlicher Indikator für hydrogeologische Untersuchungen verwendet werden; z.B. haben MOESCHLER et al. (1982, 1988) diese Fauna, insbesondere Mikrokrustazeen, für die Analyse der hydrodynamischen Verhältnisse in Karst-Grundwasserleitern verwendet. Dabei wurde Quellwasser kontinuierlich beprobt, die Individuen der Mikrofauna gezählt und dann deren Anzahl mit der Ganglinie der Quellschüttung verglichen und interpretiert (Fig. 7-17).

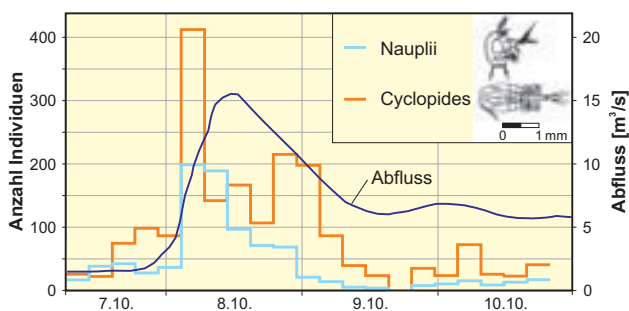


Fig. 7-17: Häufigkeit verschiedener Mikrokrustazeen in der Quelle der Areuse (NE) während des Hochwasserereignisses vom 8. Oktober 1980 (nach MOESCHLER et al. 1982).

7.5.2 Der Grundwasserbereich als Ökosystem

Die Bundesgesetzgebung verlangt die Erhaltung natürlicher Lebensräume für die einheimische Tier- und Pflanzenwelt (Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 1991) und legt fest, dass für unterirdische Gewässer die Biozönose naturnah und standortgerecht sein soll sowie zudem typisch für nicht bzw. nur schwach belastete Gewässer (Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998). Die gegenwärtige Gesetzgebung stellt demnach nicht nur Anforderungen an die chemische und mikrobiologische Wasserqualität, sondern definiert auch ökologische Ziele für das Grundwasser, was einer Neuorientierung im Grundwasserschutz gleichkommt. Diese Situation ist auch eine wissenschaftliche Herausforderung: Eindeutige Beurteilungskriterien und Methoden für die Definition und den Nachweis natürlicher Biozönosen im Grundwasserbereich müssen erst noch entwickelt werden. Entsprechende Studien sind im Gange (HUNKELER et al. in Vorb.). Bei dieser interdisziplinären Fragestellung werden die Erd-, Wasser- und Lebenswissenschaften gemeinsam gefordert.

In HUNKELER et al. (in Vorb.) sind die Merkmale mikrobieller Gemeinschaften im Grundwasser zusammengestellt. Der Lebensraum Grundwasser zeichnet sich durch die Abwesenheit von Licht sowie meist durch einen Mangel an organischem Kohlenstoff und Nährstoffen aus. Die Mikroorganismen befinden sich teils in einem Zustand reduzierter Aktivität. Die Bakterien finden die für sie essentiellen Elemente wie Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff sowie ihre Nährstoffe, z.B. Stickstoff, Phosphor, Kalium oder Schwefel, im Grundwasserbereich. Zwischen den Bakterien und den Mineralkörnern des Gesteins bzw. den im Grundwasser transportierten gelösten und ungelösten Substanzen finden vielfältige Wechselwirkungen statt. Bakterien können die Oberfläche der Mineralkörner besiedeln. Diese natürliche Lebensgemeinschaft verstärkt die Reinigungsfunktion im Grundwasserleiter. Organischer Kohlenstoff wird von gewissen Bakterien konsumiert, welche von Protozoen vertilgt werden, die wiederum die Nahrungsgrundlage für die Mikrofauna bilden. Die räumliche geochemische Heterogenität der Grundwasserleiter spiegelt sich in der Heterogenität der mikrobiellen Gemeinschaften wider. Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Bereichen der Grundwasserleiter (z.B. Kapillarsaum als Grenzbereich zwischen wassergesättigter und -ungesättigter Zone, Grenzflächen zwischen unterschiedlichen lithologischen Einheiten wie Tonlinsen und Kies oder Grundwasserleiter und -stauer) zeichnen sich oft durch besonderen Artenreichtum aus und werden als Ökotope bezeichnet.

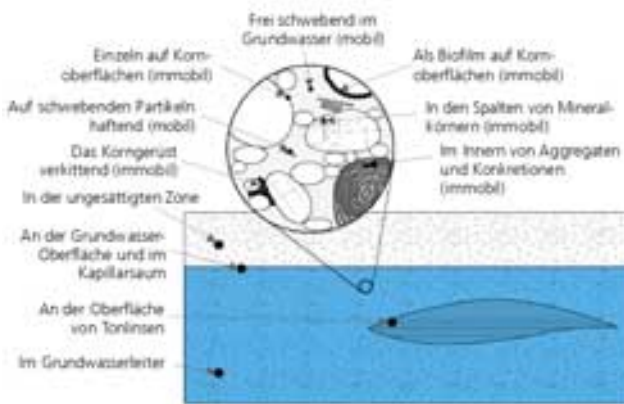


Fig. 7-18: Vorkommen von Mikroorganismen (Habitate und Mikrohabitate) in einem Lockergesteins-Grundwasserleiter (nach HUNKELER et al. in Vorb.).

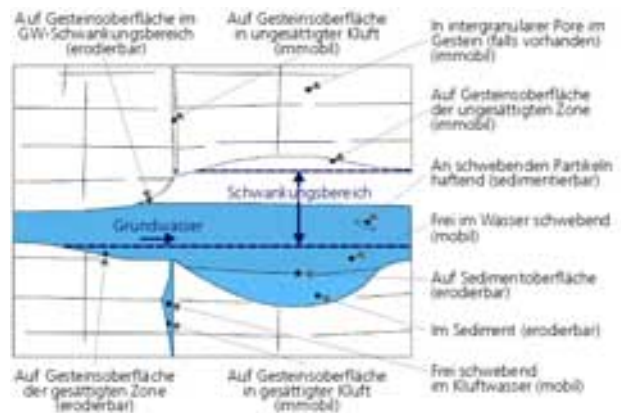


Fig. 7-19: Karst-Grundwasserleiter bieten eine Vielzahl unterschiedlicher Habitate für Mikroorganismen (nach HUNKELER et al. in Vorb.).

Typische Habitate für Mikroorganismen im Grundwasserbereich sind in den Figuren 7-18 und 7-19 dargestellt. Bei manchen Grundwasserhabitaten sind auch starke zeitliche Variationen in der Besiedlung durch Mikroorganismen zu beobachten.

7.6 Anwendung von Tracern im Grundwasser

In der angewandten Hydrogeologie werden verschiedene Methoden wie geologische Kartierung, geophysikalische Untersuchungen, Bohrungen und Markierung des Grundwassers eingesetzt. Zur Markierung werden künstliche oder natürliche Tracer verwendet. Der Entwicklungsstand dieser Methodik entspricht den heute gestellten, hohen Ansprüchen bei der Untersuchung der Stoffausbreitung im Untergrund und beim Grundwasserschutz im Allgemeinen.

7.6.1 Einsatz künstlicher Tracer

Das Prinzip ist einfach: Mit Hilfe eines noch bei grosser Verdünnung nachweisbaren Markierstoffes (engl. Tracer) wird Wasser markiert, um seine Ausbreitung verfolgen zu können (vgl. Fig. 7-20). Die Tracerankunft wird durch eine geeignete Beprobung an den möglichen Wiederaustrittsstellen beobachtet und analytisch im Feld oder im Labor quantitativ ermittelt. Die am häufigsten verwendeten Substanzen sind wasserlösliche Markierstoffe (Fluoreszenztracer und Salze) (BÄUMLE et al. 2001, SCHUDEL et al. 2002).

Die Markiertechnik ermöglicht es, folgende Fragen zu beantworten:

- Wohin fliesst das Wasser?
- Woher kommt es?
- Besteht zwischen zwei Punkten eine Verbindung?
- Wie breiten sich Stoffe im Wasser aus?
- Wie lange bleibt das Wasser im Untergrund?
- Wie gross ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Untergrund?

Mit dieser Methode können z.B. die Begrenzung des hydrogeologischen Einzugsgebietes einer Quelle oder hydraulische Parameter des Grundwasserleiters bestimmt werden. Die vorliegenden Tracerdurchgangskurven – auch Durchbruchkurven genannt – zeigen



Fig. 7-20: Markierversuch in einem Karstsystem, Covatanne-Schlucht (VD).

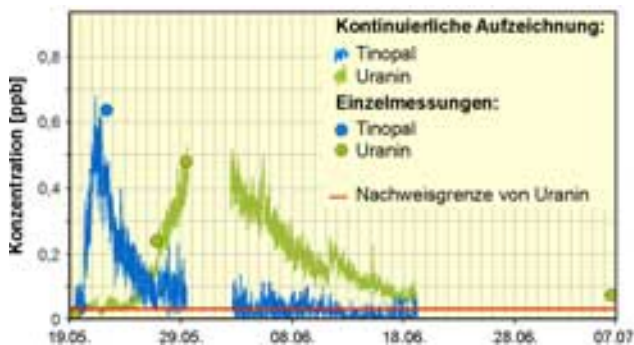


Fig. 7-21: Markierversuche an der Quelle von Livurcio (TI). Distanz Impfstelle-Quelle: 25 m (Tiopal), 80 m (Uranin), Einspeisung am 19.05.2000 (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

beispielhaft die Ergebnisse von Markierversuchen, die für die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern im Tessin durchgeführt wurden (vgl. Fig. 7-21 und Fig. 7-22).

Seit der Inbetriebnahme von INFO-TRACER, der zentralen Koordinationsstelle für Markierversuche im Grundwasser (www.bwg.admin.ch) im Jahre 1984, werden in der Schweiz jährlich 100–500 Versuche gemeldet.

7.6.2 Anwendung natürlicher Tracer

Die künstlichen Tracer eignen sich besonders für die Untersuchung von Grundwässern mit beschränkter Verweilzeit (z.B. einige Stunden bis einige Wochen), während die natürlichen Tracer (z.B. gelöste Stoffe, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Mikrobiologie, Isotope) eher ein Langzeitbild oder eine grossräumige Information ergeben.

Die Isotope, die im Wasserkreislauf natürlich vorhanden sind, ohne dass eine künstliche Anreicherung für den Bedarf einer Studie vorgenommen wird, werden als Umweltisotope bezeichnet. In der angewandten Hydrologie und Hydrogeologie werden sie oft als natürliche Tracer verwendet. Dabei sind Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium als Bestandteile des Wassermoleküls ideale Tracer. Sie werden keinen Wechselwirkungen mit der Umwelt unterzogen und ihre Bewegung ist identisch mit jener des Wassers. Sauerstoff-18 und Deuterium sind stabile Isotope; ihre Konzentration variiert mit den Phasenänderungen des Wassers. Tritium ist radioaktiv. Diese Eigenschaften sind Grund für die vielseitige Anwendbarkeit von Isotopen-Methoden (ETCHEVERRY 2002, PARRIAUX et al. 2001, SIEGENTHALER et al. 1983) (vgl. Kap. 10.5).

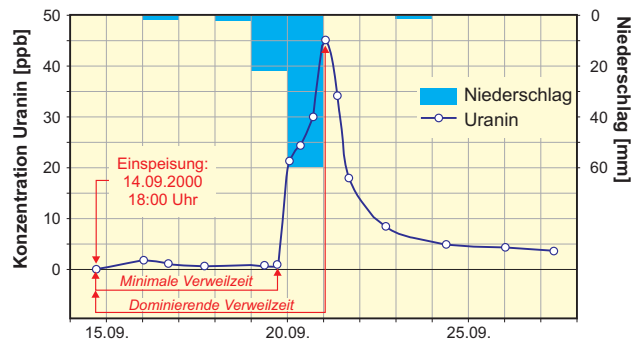


Fig. 7-22: Markierversuch an der Quelle Borgnone (TI), 14.–27.09.2000. Distanz Impfstelle-Quelle: 90 m (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

Figur 7-23 zeigt beispielhaft die Anwendung von Sauerstoff-18 als natürlichem Tracer für die quantitative Analyse der Grundwasserneubildung durch Flussinfiltration im Bereich Kappelen (Seeland). Das Grundwasser wird teilweise direkt durch die lokalen Niederschläge gespeist, teilweise durch Flussinfiltration. Das Einzugsgebiet des infiltrierenden Oberflächengewässers liegt bedeutend höher als dasjenige des Seelands. Somit hinterlässt Sauerstoff-18 einen unterschiedlichen «Fingerabdruck» im Niederschlag bzw. im Aarewasser. Durch die Anwendung eines Mischmodells mit zwei Komponenten kann der Anteil an infiltrierendem Aarewasser im Grundwasser ermittelt werden (WEA 1989).

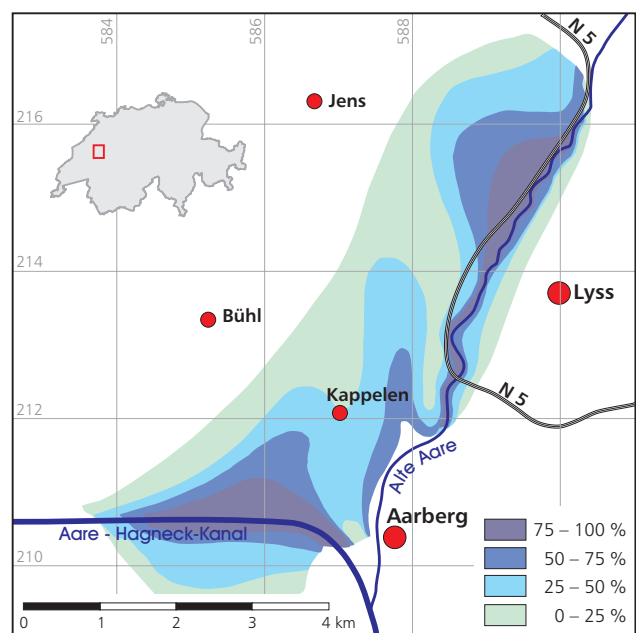


Fig. 7-23: Anteil Aareinfiltrat im Grundwasser, bestimmt aufgrund des Sauerstoffisotopen-Verhältnisses (Probenahmestellen – Piezometer – sind nicht dargestellt) (nach WEA 1989).

7.7 Wasser in geringdurchlässigen Gesteinen

Eine Herausforderung für die zeitgemässe Hydrogeologie, vor allem seit den achtziger Jahren, stellt die Untersuchung der geringdurchlässigen Gesteine dar. Die Entwicklung der Kenntnisse in diesem Bereich ist mit der Problematik der konventionellen Abfallentsorgung sowie der Endlagerung der radioaktiven Abfälle nötig geworden. In den letzten Jahren konnte in der Schweiz von neuen Untertagebauprojekten und Bohrungen Nutzen gezogen werden, um wichtige hydrogeologische Daten über diese Gesteine zu beschaffen. Das Felslabor Mont Terri z.B. wurde in der Abzweigung eines Autobahntunnels erstellt.

7.7.1 Geringe Durchlässigkeiten und Messanforderungen

Die geringdurchlässigen Gesteine kommen in Sediment- (z.B. Tonformationen) und in Kristallingesteinen (z.B. Granit) vor. Sie stellen keine eigentlichen Grundwasserleiter dar, da sie es nicht ermöglichen, Grundwasser in ausreichenden Mengen zu fördern. Sie sind jedoch in der Regel wassergesättigt und dieses Wasser, obschon in extrem langsamer Bewegung, ist Teil eines Grundwasserströmungssystems. Aus Figur 7-24 und Tabelle 7-2 ist ersichtlich, dass die Durchlässigkeit dieser Gesteine – z.B. des Opalinustons – ein Milliarden mal geringer als jene eines ergiebigen Grundwasserleiters sein kann. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die hydrogeologisch relevanten Messgrössen extrem klein sind und dass die Messung der Eigenschaften dieser Gesteine sowie die Entnahme von Wasserproben sehr hohe Anforderungen an die Mess- und Beprobungs-

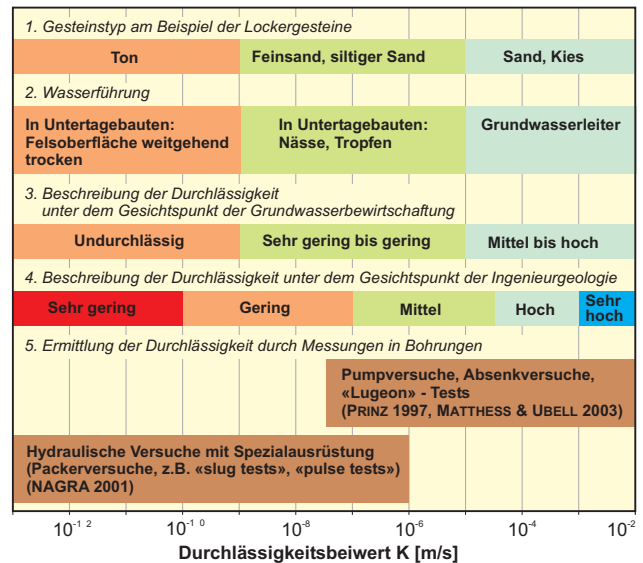


Fig. 7-24: Durchlässigkeit: Größenordnungen und Beschreibungen (nach TRIPET et al. 1990).

technologie stellt. Die Beeinflussung der natürlichen Gesteinsverhältnisse durch die Untersuchungsvorgänge (z.B. durch Bohrarbeiten) bzw. die Verformung der Messausrüstungen (z.B. durch mechanische oder thermische Beanspruchung) müssen bei der Versuchskonzipierung und -durchführung mit der grössten Aufmerksamkeit berücksichtigt werden.

7.7.2 Art der Grundwasserzirkulation – ein Beispiel

Wichtige Parameter, die zur hydrogeologischen Charakterisierung geringdurchlässiger Gesteine relevant

Gesteinsart	Standort bzw. Gebiet	K-Wert [m/s]	Referenz
Untere Süsswassermolasse			
Mittel- und Grobsandstein (Typ «Rinnengürtel»)	Bohrung, Burgdorf (BE)	$4 \cdot 10^{-8}$ – $4 \cdot 10^{-6}$	AMMANN et al. 1993
Fein- bis Mittelsandstein (Typ «Durchbruchflächen»)	Grauholztunnel (BE)	$< 5 \cdot 10^{-10}$ – $5 \cdot 10^{-6}$	DOLLINGER 1997
Palfris-Formation (Untere Kreide)			
Mergelig-tonige Schiefer	Wellenberg (NW) oberflächennah	10^{-11} – 10^{-8}	NAGRA 1997
Mergelig-tonige Schiefer	Wellenberg (NW) > 300 m Tiefe	10^{-13} – 10^{-11}	NAGRA 1997
Opalinuston (Aalénien)			
Tonstein	Felslabor Mont Terri (JU)	2 – $9 \cdot 10^{-13}$	PEARSON et al. 2003
Lockergesteine in den Talsohlen			
Sandiger Kies (sehr ergiebiger Grundwasserleiter)	Grundwasserleiter der Aare zwischen Thun und Bern (BE)	$2 \cdot 10^{-3}$ – $2 \cdot 10^{-2}$	PASQUIER et al. 1999
Kies (z.T. siltig) und Sand (ergiebiger Grundwasserleiter)	«Oberer Grundwasserleiter» des Gürbetals (BE)	$3 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3}$	PASQUIER et al. 1999

Tab. 7-2: Durchlässigkeit (K-Wert) von geringdurchlässigen, sedimentären Gesteinen anhand ausgewählter Beispiele (oben). Zum Vergleich sind K-Werte von zwei Lockergesteins-Grundwasserleitern aufgeführt (unten).

sind, stellen vor allem die Lithologie (Gesteinsart), die Durchlässigkeit (vgl. Tab. 7-2), die Porosität, die Porengeometrie, die Grundwasserbeschaffenheit, die Faktoren der Transportprozesse (z.B. Schwerkraft, Diffusion), die Herkunft und das Alter des Wassers dar. Die Figur 7-25 zeigt beispielhaft ein Profil des Chloridgehaltes in einer Abfolge von Tonformationen (Opalinuston und Lias-Mergel).

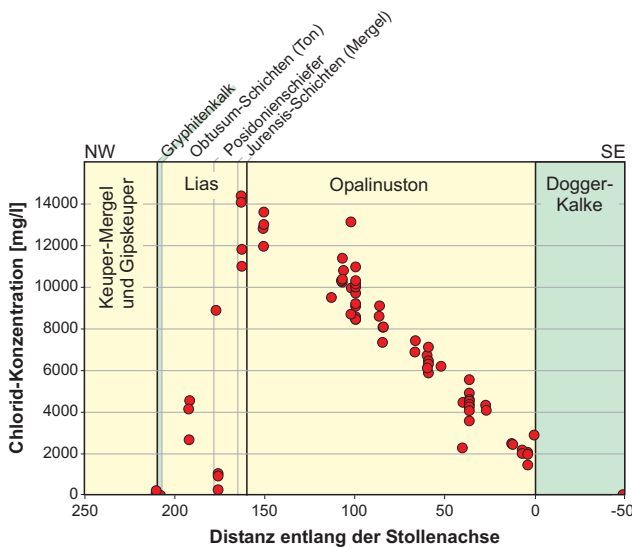


Fig. 7-25: Profil der Chlorid-Konzentration im Porenwasser des Opalinustons (nach PEARSON et al. 2003).

Die Proben wurden im Felslabor Mont Terri (JU) entnommen. Die Tonformationen liegen zwischen zwei wasserführenden, rund 45° nach Südosten einfallenden Kalkabfolgen: unten der Gryphitenkalk (links in Fig. 7-25), oben die Dogger-Kalke (rechts in Fig. 7-25). Der Chloridgehalt ist als «Fingerabdruck» des ursprünglichen Meerwassers aus der Zeit der Ablagerung der Sedimente, vor ca. 180 Millionen Jahren, zu interpretieren. Die höchste Konzentration erreicht mit rund 14'000 mg/l ungefähr zwei Drittel der Konzentration von Meerwasser. Die Abnahme des Chloridgehaltes gegen die untere bzw. obere Formationsgrenze ist durch diffusen Abtransport von NaCl vom Opalinuston in die benachbarten durchlässigeren Kalkabfolgen entstanden. Diese Abnahme der Salinität dürfte vor ca. 2,5 Millionen Jahren eingesetzt haben, als die Erosion der Jurakette eine Wasserinfiltration in die aufliegenden Dogger-Kalke ermöglicht hat (BOSSART & WERMEILLE 2003); die Salinitätsabnahme hat noch kein Gleichgewicht erreicht und schreitet immer noch voran. Die gegenwärtig beobachtete, langsame Wasserzirkulation

in den Tonformationen gegen das Felslabor (Stollen und Bohrungen) wird jedoch auf die Drainagewirkung des Stollensystems zurückgeführt. Eine Synthese über die hydrogeologischen Verhältnisse des Opalinustons am Standort Mont Terri ist in HEITZMANN (2004) präsentiert.

7.8 Grundwasser als Gefahrenpotential

Das Grundwasser kann auch ein Gefahrenpotential bilden. Die konsequente Messung der relevanten Parameter liefert die unentbehrliche Grundlage zur Planung geeigneter präventiver Massnahmen zur Verminderung der potentiellen Schäden.

7.8.1 Grundwasser und Überschwemmungen

Wie die katastrophalen Hochwasser von 1999 und 2000 in der Schweiz gezeigt haben, sind die jeweiligen Grundwasserverhältnisse vor und während der Hochwasserperiode oft entscheidend für die Intensität von Überschwemmungen. Je nach den örtlichen Verhältnissen kann der Anstieg der Grundwasseroberfläche für Überschwemmungen und Schäden verantwortlich sein. In Locarno löste der extrem hohe Seewasserstand vom 14.–15. Oktober 2000 einen Grundwasseranstieg aus; Heizöltanks wurden infolge des Auftriebs aus ihrer Verankerung gerissen und verursachten eine Verschmutzung (vgl. Fig. 7-26). Im Hinblick auf die Vermeidung einer solchen Situation sind bauliche Massnahmen (Sicherung der Tanks, Gebäudekonzipierung) möglich.

Durch eine Studie im Rhonetal (VS) wurde gezeigt, wie die von einem Grundwasseranstieg gefährdeten Zonen ausgeschieden werden können (FAGERLUND 2001). Bei



Fig. 7-26: Hochwassersituationsskizze Locarno, Oktober 2000 (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

Bedarf können somit geeignete raumplanerische Massnahmen getroffen werden. Für diese Studie wurden ebenfalls die Daten aus dem hundertjährigen Hochwasser vom Oktober 2000 ausgewertet (vgl. Fig. 7-27). Die Analyse beruht auf dem dichten Messnetz zur Beobachtung des Grundwasserstandes im Rhonetal zwischen dem Genfersee und Visp (www.crealp.ch).



Fig. 7-27: Hochwasserereignis vom Oktober 2000 im Rhonetal: Ausschnitt aus der Karte der maximalen Amplitude des Grundwasserstandes, am 16.10.2000 (nach FAGERLUND 2001).

7.8.2 Grundwasser und Massenbewegungen

Grundwasser stellt einen der massgebenden Faktoren bei der Auslösung und dem Verlauf von Massenbewegungen – wie Rutschungen, Felsstürze, Hangmuren – dar. Das Grundwasser hat einen ungünstigen Einfluss auf die hydraulischen sowie fels- und bodenmechanischen Verhältnisse innerhalb der instabilen Masse. Bei der Rutschung von La Frasse (nordöstlich Aigle, VD) wurden die Verschiebungsbeträge einerseits mit dem Niederschlag, andererseits mit dem Grundwasserzufluss verglichen (NCG+EPFL 2004). Dabei wurde kein direkter Zusammenhang zwischen Verschiebungen und Niederschlägen beobachtet; diese Situation wird bei den meisten Rutschungen, die durch eine tiefere Gleitfläche gekennzeichnet sind, festgestellt. Hingegen besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den Verschiebungen und dem Grundwasserzufluss, der seitlich entlang der Ränder der Rutschmasse stattfindet (vgl. Fig. 7-28).

Die Rutschung liegt im Flysch, ist ca. 2 km lang und 500 bis 1000 m breit. Die ersten Verschiebungsmessungen wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts im Zusammenhang mit dem Bau der Kantonsstrasse vorgenommen. Erste präventive Massnahmen durch Drainage wurden Anfang der 1920er Jahre durchgeführt.

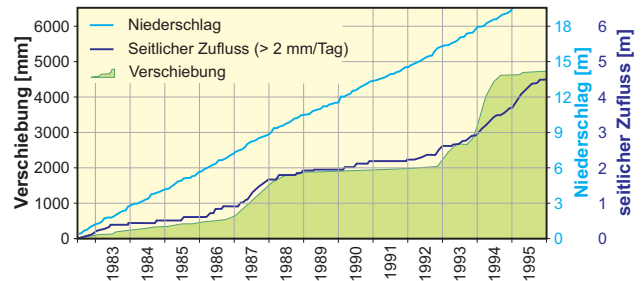


Fig. 7-28: Rutschung von La Frasse, Zusammenhang zwischen seitlichem Grundwasserzufluss und Verschiebungsbeträgen, kumuliert von Juli 1982 bis Dezember 1995. Die Übereinstimmung wurde verbessert, indem die niedrigen täglichen Zuflusswerte (< 2 mm/Tag) vor der Kumulierung ausgeklammert wurden (nach NCG+EPFL 2004).

Einen wichtigen Beitrag zur dauerhaften Sanierung der Rutschung kann eine Absenkung der Wasserdrücke leisten, da diese Drücke den massgebenden Faktor für die Gleitbewegungen der Rutschung bilden. Zu diesem Zweck wird ein Drainagesystem empfohlen mit einem ca. 1 km langen Drainagestollen unterhalb der Rutschfläche und vom Stollen her nach oben gerichteten Drainagebohrungen. Ein ähnliches System wurde in den Jahren 1993 bis 1996 zur Sanierung der Rutschung von Campo Vallemaggia (TI) ausgeführt (vgl. Fig. 7-29). Die bisherigen Kontrollmessungen deuten auf eine deutliche Wasserdruck-Absenkung und eine befriedigende Stabilisierung der Gleitmasse hin.

Die Rutschung von Campo Vallemaggia liegt in Kristallingesteinen (Metamorphiten) auf einer Fläche von mehr als 5 km² mit einer Mächtigkeit von bis zu 250 m und einem Gesamtvolumen von rund 800 Mio m³

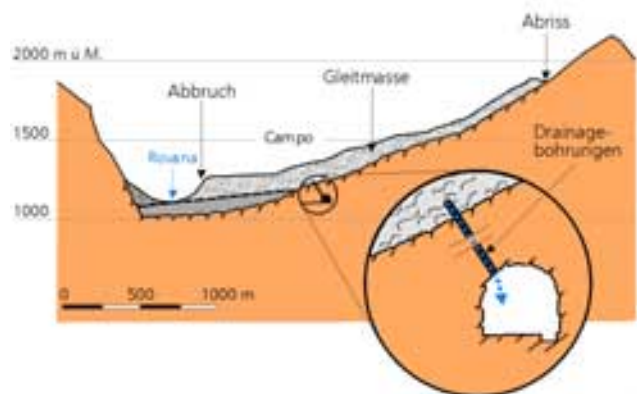


Fig. 7-29: Rutschung von Campo Vallemaggia, schematischer Längsschnitt mit Detail des Drainagesystems (nach LOMBARDI 1996).

(BONZANIGO 1998 und 1999, LOMBARDI 1996). Sie stellt eine der grossen Rutschungen Europas dar. Die ersten Bohrungen zur Untersuchung der Rutschung wurden im Jahre 1962 abgeteuft.

7.9 Grundwassernutzung

Das Grundwasser ist unser wichtigster Rohstoff. Der Trink- und Brauchwasserbedarf der Schweiz wird mehrheitlich aus dem Grundwasser gedeckt. Die Fassungsanlagen liefern ein Wasser guter Qualität, wovon der grösste Teil mit einer einfachen oder sogar ohne Behandlung zu den Verbrauchern gelangt. Das Grundwasser ist aber auch ein ausserordentlich guter Wärmelieferant für unterschiedliche Heizzwecke und bildet somit eine einheimische und umweltfreundliche Energiequelle.

7.9.1 Grundwasser für die Wasserversorgung

In der Schweiz fördern die rund 3000 öffentlichen Wasserversorgungen jährlich über 1000 Mio m³ Trinkwasser, wovon mehr als 80 % aus dem Grundwasser gedeckt werden. Im Jahre 2001 stammten 48 % aus Quellen und 36 % aus Förderbrunnen, 16 % waren aufbereitetes Seewasser (BFS 2002, SVGW 2004). In Gemeinden mit weniger als 10'000 Einwohnerinnen und Einwohnern, wo 54 % der Schweizer Bevölkerung leben, hängt die Trinkwasserversorgung sogar zu 98 % vom Grundwasser ab (MEYLAN 2003, SVGW 2002). Rund 46 % des Grundwassers aus Quellen und Förderbrunnen können ohne jegliche Aufbereitung oder Desinfektion an die Verbraucher abgegeben werden und 40 % benötigen lediglich eine einfache Aufberei-

tung (z.B. Behandlung mit Chlor, UV-Licht oder Ozon) (BUWAL 1993).

Das Grundwasser wird in speziell dafür geeigneten, den hydrogeologischen Verhältnissen am Fassungsstandort und dem Wasserbedarf angepassten Anlagen gefasst. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Förderbrunnen (Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen) (vgl. Fig. 7-30), Quellfassungen (vgl. Fig. 7-31) (BUWAL 2004) und Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Wasserversorgung (z.B. in Genf, Basel, Zürich, vgl. Abschnitt 7.11.2). Ein Horizontalfilterbrunnen besteht aus mehreren Filtersträngen, die von einem vertikalen Fassungsloch aus horizontal in den Grundwasserleiter gebohrt sind.

Etwa die Hälfte des genutzten Grundwassers kommt aus Förderbrunnen in den Talschotterebenen, die grösstenteils durch wichtige Flüsse – u.a. durch die grossen alpinen Flüsse – gespiesen werden. In den alpin beeinflussten Grundwasserleitern treten die Maxima des Grundwasserstandes meist im Frühling und Sommer auf, wobei die Schneeschmelze verstärkend wirkt. Somit findet dort eine genügende natürliche Grundwasseranreicherung im Prinzip auch bei anhaltender Trockenheit statt.

Hingegen kommt die andere Hälfte des genutzten Grundwassers aus Quellen; wenn diese durch oberflächennahes Grundwasser gespiesen werden, kann eine anhaltende Trockenheit zum ausgeprägten Rückgang der Quellschüttungen führen. Deshalb ist bei den Gemeinden, wo eine solche Situation regelmässig wiederkehren kann, ein Anschluss an grössere Wasserverbundnetze von Vorteil (BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).



Fig. 7-30: Blick in einen Förderbrunnen, Lockergesteins-Grundwasserleiter (Pumpwerk von Lenzburg in Niederlenz, AG).



Fig. 7-31: Stollen zur Quellfassung, Karst-Grundwasserleiter (Source de la galerie des Moyats, Quelle der Stadt La Chaux-de-Fonds, NE).

7.9.2 Grundwasser als Wärmelieferant

Unterhalb der Erdoberfläche ist natürliche Energie in Form von Wärme gespeichert. Im Schnitt nimmt die Temperatur ab Erdoberfläche pro 100 m Tiefe um etwa 3 °C zu. Diese Energie (geothermische Energie, auch als Erdwärme bezeichnet) ist u.a. im Grundwasser gespeichert und kann für unterschiedliche Heizzwecke genutzt werden. Drei Nutzungsmethoden können unterschieden werden (BFE 1998), wobei unterirdische Wärmetauscher, bei denen kein Grundwasser gefördert wird (z.B. Erdwärmesonden, die zum Teil auch bis ins Grundwasser reichen), ausgeklammert sind.

Die erste Methode bildet die Wärmenutzung der «untiefen» (d.h. Tiefe von max. 400 m) Grundwasservorkommen (BURGER et al. 1985). Grundwassertemperaturen betragen in der Schweiz im oberflächennahen Bereich (5 bis 20 m) im Mittel 8 bis 12 °C und unterliegen nur sehr geringen jahreszeitlichen Schwankungen. Bei dieser Methode wird durch einen Förderbrunnen Grundwasser entnommen und dessen Wärme von einer Wärmepumpe entzogen (vgl. Fig. 7-33). Allein im Kanton Bern z.B. sind mehr als 900 solcher Anlagen mit einer thermischen Leistung von insgesamt über 50 MW in Betrieb (SVG 2002b).

Die zweite Methode entspricht der Nutzung von Subthermal- bzw. Thermalquellen (Temperatur von 15 bis 20 °C bzw. > 20 °C) oder von tiefen Grundwasservorkommen mittels Bohrungen (Singletten- oder Doubletten-Anlagen). In der Schweiz fördern sechs Tiefbohrungen (Tiefe ca. 550 bis 1550 m, Auslauftemperatur 23 bis 69 °C) mit einer thermischen Leistung von insgesamt über 10 MW warmes Grundwasser für Heiz-

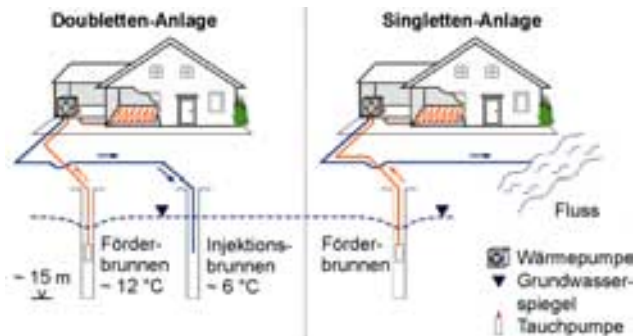


Fig. 7-33: Beheizung eines Einfamilienhauses mit der Wärme von Grundwasser (nach SVG 2002b).

zwecke, wie z.B. die geothermische Heizanlage in Riehen (BS) oder Thermalbäder. Dreizehn Thermalzentren nutzen warmes Grundwasser mittels Quell- und Brunnenfassungen oder Tiefbohrungen (BFE 1998, SVG 2003, VUATAZ & FEHR 2000) (s. Fig. 7-32, Fig. 7-34).

Die dritte Methode bildet die Nutzung von warmen Tunnelwässern. Das gesamte geothermische Potential von fünfzehn untersuchten Tunnels beläuft sich auf gegen 30 MW, was dem Wärmebedarf von etwa 4000 Haushalten entspricht; davon sind fünf Strassen- und Eisenbahntunnels bereits an eine geothermische Heizanlage gekoppelt – z.B. die Tunnels von Ricken (SG), von Mapo-Moretina (TI) und der Furka (VS) (SVG 2002a).



Fig. 7-32: Pumpversuch in der Tiefbohrung von Lavey-les-Bains (VD). Die Austrittstemperatur des Wassers beträgt 68 °C.



Fig. 7-34: Thermalquelle im Bäderpark von Val d'Illeiez (VS). Die Austrittstemperatur des Wassers beträgt maximal 30 °C.

7.10 Grundwasserschutz

Der Trink- und Brauchwasserbedarf der Schweiz wird zu mehr als 80 % durch die Grundwasservorkommen aus durchlässigen Locker- und Festgesteinen gedeckt. Grundwasser ist aber auch ein wesentlicher Bestandteil des natürlichen Wasserkreislaufes und vieler Ökosysteme. Die in den 1990er Jahren revidierte Gewässerschutzgesetzgebung bezweckt unter anderem den quantitativen und qualitativen Schutz des Grundwassers vor nachteiligen Einwirkungen und soll dessen nachhaltige Nutzung unter Berücksichtigung ökologischer Ziele ermöglichen.

7.10.1 Grundwassergefährdung

Die Beschaffenheit des Grundwassers hängt unter natürlichen Bedingungen wesentlich vom durchflossenen geologischen Substrat ab (DEMATTEIS et al. 1997). Gewisse für die Wasserversorgung unerwünschte Eigenschaften wie z.B. eine hohe Mineralisation oder ein niedriger Sauerstoffgehalt (BITTERLI et al. 2004) können die Folge von besonderen lokalen geologischen Verhältnissen sein. Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit wird aber auch durch menschliche Aktivitäten verändert oder ist zumindest dadurch gefährdet. Beispiele sind die Auswaschung von Nährstoffen (z.B. Nitrat) und Pflanzenschutzmitteln (z.B. Herbizide) aus landwirtschaftlichen Nutzflächen, Gärten und Sportanlagen, die mikrobiellen Belastungen als Folge von falsch ausgebrachter Gülle, der Sickerverluste aus undichten Abwasserkanalisationen und Güllegruben oder die Gefährdung durch Tankanlagen (BUWAL 2004). In Figur 7-35 sind die verschiedenen Arten von Verschmutzungsquellen aufgeführt. In mengenmässiger Hinsicht besteht auch eine Gefährdung durch gewisse unerwünschte Eingriffe wie z.B. durch Bauwerke unterhalb des Grundwasserspiegels (drainierende Wirkung oder Verringerung des Grundwasserdurchflussprofils) oder durch eine intensive Überbauung (Bodenversiegelung).

7.10.2 Grundsätze des Grundwasserschutzes

Angesichts möglicher negativer Umwelteinflüsse ist der Grundwasserschutz gemäss Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 einerseits flächendeckend umzusetzen. Andererseits ist aber durch den speziellen (nutzungsorientierten) Schutz für das genutzte und zur Nutzung vorgesehene Grundwasser jederzeit und dauerhaft eine einwandfreie Trinkwasserversorgung sicherzustellen (vgl. Fig. 7-36) (BUWAL 2004).

Herkunft der Verschmutzung	Diffuses räumliches Auftreten	Punktueller räumlicher Auftreten
Landwirtschaft, Gartenbau	Ausbringen von Düngemitteln und Pestiziden	Undichte Jauchegruben Leerung von Jauchegruben, nicht vorschriftsgemässe Entsorgung gefährlicher Stoffe
Wohngemeinden	Diffuse Verluste aus defekten Abwasserleitungen	Verluste aus Heizöltanks Überlaufen von Heizöltanks
Industrie, Gewerbe	Kontinuierliche Verluste schädlicher Substanzen in grossen Industriegebieten	Ungesicherte Lagerung schädlicher Stoffe Ereignishaft Freisetzung schädlicher Stoffe, nicht vorschriftsgemässe Entsorgung gefährlicher Stoffe
Verkehrswege	Salzeinsatz im Winter, Abfließen von Öl und Metallverbindungen, Verdunstung von Treibstoffbestandteilen, Unkrautbekämpfung an Eisenbahnlinien	Strassen- und Bahnunfälle
Belastete Standorte		Ehemalige Industrie- und Deponiestandorte, Schiessplätze, Unfallorte

Fig. 7-35: Auftreten von kontinuierlichen (gelb) und ereignishaften (orange) Schadenereignissen (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

flächendeckend	Naturnahe Grundwasserqualität und Biozönose sicherstellen	Naturnahe hydraulische Verhältnisse im Grundwasserleiter erhalten
	Trinkwasserqualität gewährleisten	Ausreichendes Trinkwasserangebot sichern
nutzungsorientiert	qualitativ	quantitativ

Fig. 7-36: Ziele des Gewässerschutzes (BUWAL 2004).

Die hauptsächlichen Instrumente, um den qualitativen Gefährdungen des Grundwassers zu begegnen, sind:

- numerische Grundwasser-Qualitätsanforderungen; die Überschreitung dieser physikalisch-chemischen Indikatorwerte weist in der Regel auf eine mögliche anthropogen bedingte Belastung und auf einen Handlungsbedarf (Abklärung oder Massnahme) hin;

- Gewässerschutzbereiche, Grundwasserschutzzonen und -areale (Instrumente des planerischen Schutzes des Grundwassers, s. Abschnitt 7.10.3);
- technische, bauliche und organisatorische Massnahmen, beispielsweise bei der Lagerung, dem Transport und dem Gebrauch wassergefährdender Stoffe (DUPASQUIER & PARRIAUX 2002) sowie bei der Durchführung von Bauarbeiten bzw. beim Materialabbau in Gewässerschutzbereichen und Grundwasserschutzzonen.

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers vor quantitativen Gefährdungen sind Massnahmen u.a. in den folgenden Bereichen festgelegt:

- Grundwassernutzung und -bewirtschaftung (z.B. Vorbeugung der Übernutzung);
- Bauarbeiten, die Grundwasser beeinflussen können (z.B. Auflagen bei Untertagebauten und Stauanlagen).

Die weiter oben aufgeführte Strategie beruht grundsätzlich auf der Prävention – für alle Typen von Grundwasserleitern, im Lockergestein und in verkarsteten oder geklüfteten Festgesteinen – und soll einen nachhaltigen Grundwasserschutz gewährleisten.

7.10.3 Planerischer Schutz

Bei den Massnahmen der Raumplanung werden vor allem die folgenden Elemente definiert (vgl. Fig. 7-37 und Fig. 7-39; BUWAL 2004):

- Der Gewässerschutzbereich A_u umfasst die bedeutenden Grundwasservorkommen.
- Mit dem Gewässerschutzbereich A_o können oberirdische Gewässer mit besonderer Nutzung geschützt werden.
- Der Zuströmbereich Z_u dient zum Schutz vor schwer abbaubaren Substanzen (gezielter Schutz der Wasserqualität).
- Die Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 dienen dazu, die Fassungsanlage und das Grundwasser unmittelbar vor seiner Nutzung als Trinkwasser zu schützen.
- Die Grundwasserschutzareale sichern den vorsorglichen Schutz dort, wo eine zukünftige Grundwassernutzung vorgesehen ist.

Zu jedem Element des planerischen Schutzes – Bereich, Zone oder Areal – gehört eine dem Schutzbedarf entsprechende Liste von Schutzmassnahmen bzw. Nutzungsbeschränkungen.

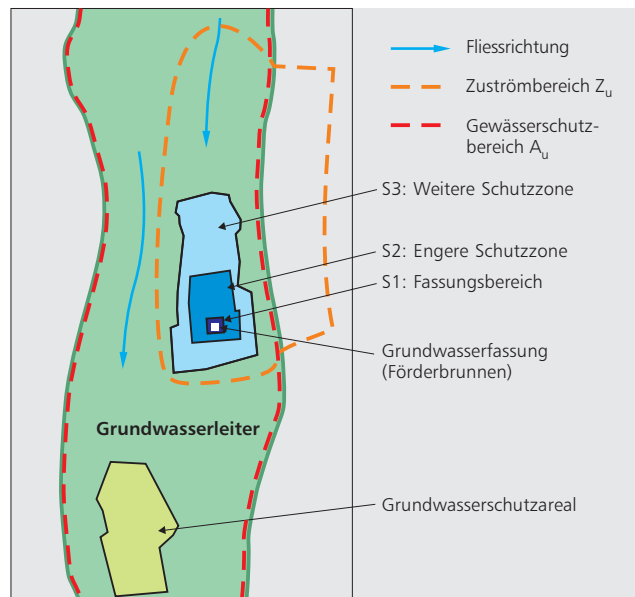


Fig. 7-37: Planerische Instrumente des Grundwasserschutzes (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

Bei Lockergesteins-Grundwasserleitern werden die Schutzzonen S konzentrisch um die Fassung ausgeschieden, wobei das Kriterium für die Bemessung der Zone S2 der Verweilzeit des Grundwassers entspricht: die Verweilzeit vom äusseren Rand der Zone S2 bis zur Grundwasserfassung soll mindestens 10 Tage betragen. Für die Bemessung der Schutzzonen S in Karst- und Kluft-Grundwasserleitern ist die Vulnerabilität (Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers, s. EUROPEAN COMMISSION 1995, ZWAHLEN 2004) im Einzugsgebiet der Grundwasserfassung gemäss GSchV massgebend. Entsprechende Bemessungskriterien sind in neuen Praxishilfen ausgeführt (DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998, POCHON & ZWAHLEN 2003); diese hydrogeologisch fundierten, nachvollziehbaren Kriterien sollen einen gesamtschweizerisch harmonisierten, nachhaltigen Grundwasserschutz ermöglichen. Bei stark heterogenen Grundwasserleitern (in Karst- und in gewissen Kluft-Grundwasserleitern) nimmt der Schutzbedarf nicht mit dem Abstand zur Fassung regelmässig ab, so dass die Schutzzonen nicht mehr konzentrisch gestaltet sind (vgl. Fig. 7-38).

Die Kantone erstellen Gewässerschutzkarten, in der Regel im Massstab 1:25'000, die eine Übersicht über die Elemente des planerischen Schutzes – Bereiche, Zonen oder Areale – sowie über die Fassungsanlagen (Förderbrunnen, gefasste Quellen) darstellen (vgl. Fig. 7-39). Eine gesamtschweizerische, digitale

Gewässerschutzkarte wurde in einem Geographischen Informationssystem (GIS) erstellt und ist für das interessierte Publikum teilweise via Internet zugänglich (Übersichtskarte der Grundwasserschutzzonen sowie der Gewässerschutzbereiche, www.ecogis.admin.ch bzw. www.umwelt-schweiz.ch).

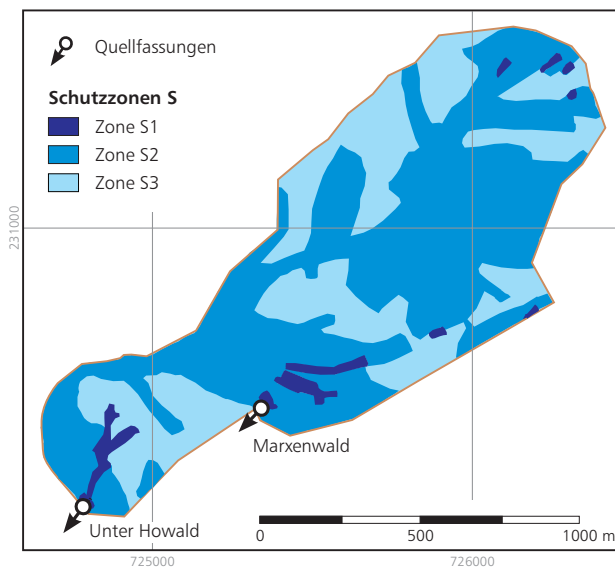


Fig. 7-38: Bemessungsvorschlag der Schutzzonen für zwei gefasste Quellen in Rieden (SG). Grundwasserleiter: Nagelfluh, Sandstein und Mergel der Subalpinen Molasse (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

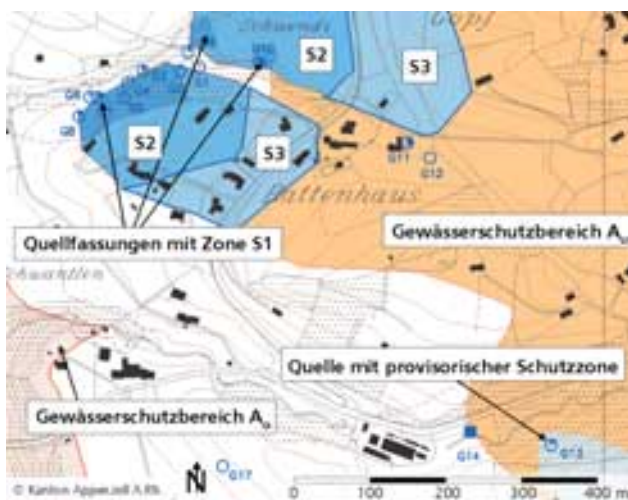


Fig. 7-39: Ausschnitt aus der Gewässerschutzkarte des Kantons Appenzel A.Rh. 1:10'000 (Beschriftung ergänzt).

7.11 Grundwasser und Wald

Die Ergebnisse der Beobachtung der Grundwasserqualität sowie die Statistik der Grundwasserschutzzonen unterstreichen die grosse Bedeutung der bewaldeten Einzugsgebiete für die Trinkwasserversorgung. Der Wald sorgt für sauberes Trinkwasser. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Waldgebiete als Trinkwasserlieferanten bedingt jedoch nicht nur eine sorgfältige Umsetzung der Gewässerschutzgesetzgebung sondern auch eine effiziente Luftreinhaltung und eine angemessene Waldbewirtschaftung.

7.11.1 Wenig Fremdstoffe und optimale Reinigungsprozesse im Wald

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Nutzflächen gibt es in Waldgebieten praktisch keinen direkten Eintrag von umweltgefährdenden Stoffen in den Boden. Der Einsatz von Düngemitteln wie Mineraldünger, Gülle, Mist oder Kompost ist dort nicht erforderlich und zudem stark eingeschränkt bzw. verboten. Anders als in Siedlungsgebieten führen auch kaum Kanalisationsrohre durch den Wald, aus denen Fäkalbakterien und unerwünschte Stoffe ins Grundwasser austreten könnten. Zudem besteht hier ein weit geringeres Verschmutzungsrisiko durch Unfälle und den fahrlässigen Umgang mit wassergefährdenden Substanzen wie Brenn- und Treibstoffen oder Chemikalien. Aufgrund der eingeschränkten wirtschaftlichen Aktivitäten sind Quellen und Förderbrunnen im Wald insgesamt einer viel geringeren Gefährdung durch Schadstoffe ausgesetzt als Grundwasserfassungen in Landwirtschaftszonen oder in Siedlungsgebieten (vgl. Fig. 7-12). Zudem garantieren der hohe Humusgehalt vieler Waldböden, die damit verbundene Vielfalt an Bodenorganismen sowie die gute Durchwurzelung fast überall im Wald eine zuverlässige Filterfunktion. Auch mit seinem speziellen Mikroklima schafft der Wald Bedingungen, die für den biologischen Reinigungsprozess im Boden optimal sind. So werden die mineralischen und organischen Stoffe, die nicht ins Trinkwasser gehören, weitgehend ausgefiltert oder abgebaut (IVB ohne Datum, MEYLAN 2003, SCHÜRCH et al. 2003a).

7.11.2 Der Wald als Trinkwasserlieferant

Aufgrund der Vorteile, die der Wald als Trinkwasserlieferant bietet, befinden sich viele Grundwasserfassungen (Quellen oder Förderbrunnen) in bewaldeten Gebieten (vgl. Fig. 7-40). In der Schweiz befinden sich rund 42 % aller Grundwasserschutzzonen in geschlossenen Wäldern. Dieser Wert liegt deutlich über dem



Fig. 7-40: NAQUA-Messstation an einer öffentlichen Quelfassung, deren Einzugsgebiet im Wald liegt (Freienstein-Teufen, ZH).

Anteil des Waldareals an der Landesfläche von ca. 27 % (MEYLAN 2003).

Grosse Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Trinkwasserversorgung nutzen nach Möglichkeit bewaldete Bodenareale zur Versickerung des Wassers. Beim Grundwasserwerk Lange Erlen (BS) z.B. wird Rheinwasser in vierzehn bewaldeten Bodenarealen mit einer Gesamtfläche von ca. 22 ha zur Versickerung und zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers gebracht (IWB ohne Datum). Die Sickeranlagen und die Förderbrunnen des Grundwasseranrei-

cherungssystems der Stadt Basel in der Hard bei Muttenz (BL) liegen in einem Wald von 240 ha (vgl. Fig. 7-41) wo eine reiche Artenmischung erhalten wird (HARDWASSER AG ohne Datum). An den beiden erwähnten Standorten besitzt das geförderte Grundwasser beste Trinkwasserqualität.

7.11.3 Lufts Schadstoffe und Nitratbelastung: potentielle Gefahren und Lösungen

Die Vorzüge des Waldes als Trinkwasserlieferant werden aber zunehmend durch den übermässigen Eintrag von Lufts Schadstoffen und eine allmähliche Versauerung bedroht. Eine häufig zu hohe Stickstoffkonzentration in den Wäldern stammt mehrheitlich aus der Landwirtschaft, aber auch aus Verkehr und Feuerungen. Durch die Filterwirkung der hohen Baumkronen, in denen neben Staubpartikeln auch gasförmige Lufts Schadstoffe hängen bleiben, werden die Wälder viel stärker belastet als alle anderen Landschaftsformen – wobei die Laubbäume generell günstigere Eigenschaften als die Nadelbäume aufweisen. Zudem führt die hohe Verdunstungsrate im Wald dazu, dass der Anteil des Regenwassers, der den Waldboden erreicht, eine erhöhte Konzentration an gelösten Stoffen aufweist. Übermässige Stickstoffeinträge ihrerseits führen zu höheren Nitratauswaschungen; damit wächst das Risiko einer zunehmenden Nitratbelastung des Grundwassers – auch aus Waldeinzugsgebieten.



Fig. 7-41: Sickerkanal der Grundwasser-Anreicherungsanlage in der Hard (BL).

Obwohl zum Schutz des Grundwassers primär bei den Emissionsquellen von Stickstoffverbindungen angesetzt werden muss (u.a. Luftreinhaltung), kann mit einer speziell auf den Grundwasserschutz ausgerichteten Waldbewirtschaftung ein wichtiger Beitrag geleistet werden, um die Belastung des Sickerwassers mit Nitrat und anderen unerwünschten Fremdstoffen zu verringern. Besonders relevant sind in diesem Zusammenhang die Wahl der Baumarten, Verjüngerungsmassnahmen, Aufforstungen sowie ein angemessener Umgang mit grossflächigen Rodungen im Einzugsgebiet von Trinkwasserfassungen (COMBE & ROSSELLI 2002, MEYLAN 2003). Die Aufrechterhaltung des Waldes als Lieferant von sauberem Trinkwasser setzt eine vermehrt interdisziplinäre Betrachtung des Systems Wald-Boden-Grundwasserleiter bei der Untersuchung des Wasserkreislaufs im Wald sowie die Gewährleistung der systematischen, langfristigen Beobachtung der Grundwasserqualität voraus (vgl. Fig. 7-12 und Fig. 7-42). Diese gewährleistet das nationale Messnetz zur Beobachtung der Grundwasserqualität (NAQUA) (vgl. Kap. 7.4).



Fig. 7-42: Lutry-Quelle in Savigny (NISOT-Messnetz): Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf.

7.12 Hydrogeologische Karten

Eine hydrogeologische Karte gibt Auskunft über die Grundwasserverhältnisse; somit sind dabei Angaben einerseits über die Grundwasserleiter und andererseits über das eigentliche Grundwasser dargestellt. Inhalt und Massstab der Karte hängen grundsätzlich von der Zielsetzung und von den potentiellen Nutzern ab.

7.12.1 Die Darstellung von hydrogeologischen Daten

Eine hydrogeologische Karte gibt Auskunft über das Vorkommen und die Art der Zirkulation des Grundwassers (z.B. Poren-, Kluft- oder Karstgrundwasser), die Eigenschaften der Grundwasserleiter (vor allem Durchlässigkeit) sowie die Lage der Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete (vgl. Fig. 7-1) und der wichtigeren Quellen. Die Karte stellt eine Synthese der vorhandenen hydrogeologischen Daten dar (IAH 1989). Eine unerlässliche Grundlage dazu bildet die geologische Karte. Eine hydrogeologische Karte kann durch Profile ergänzt werden, um Auskunft über die Verhältnisse in drei Dimensionen zu geben; Beispiele von gross- und kleinmassstäblichen hydrogeologischen Profilen sind in BUTTET et al. (1992) und BOUZELBOUDJEN et al. (1997) ersichtlich.

Im erweiterten Sinne kann auch die Darstellung von ausgewählten hydrogeologischen Daten als hydrogeologische Karte bezeichnet werden. Als Beispiel können folgende Karten erwähnt werden: Karte mit Lage und Form der Grundwasseroberfläche; Situationskarte der Quellen, Piezometer und Förderbrunnen; Karte der Markierversuche mit Angabe der unterirdischen Wasserläufe; Karte der Verbreitung und der Konzentration eines bestimmten gelösten Stoffes im Grundwasser (Grundwasserhärte-, Nitrat-, Kohlenwasserstoff-Karte).

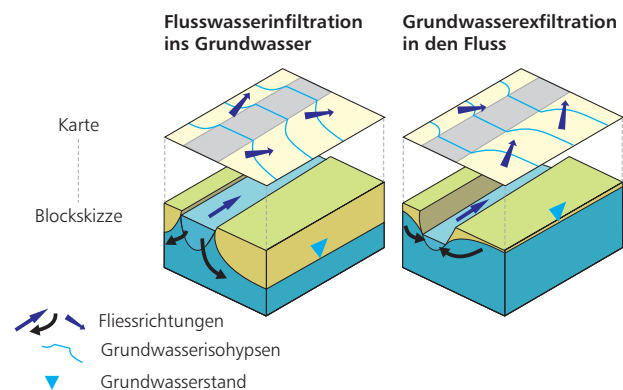


Fig. 7-43: Erläuterungsskizze Grundwasseroberfläche (nach SCHÜRCH et al. 2004).

Die Auswertung der Grundwasserstandsmessungen durch Interpolation und Extrapolation, unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse, ermöglicht die Ermittlung der Grundwasseroberfläche (vgl. Fig. 7-43). Diese wird in einer Karte mittels Grundwas-

serisohypsen (oder Grundwassergleichen) dargestellt, d.h. als Kurven gleicher und gleichzeitiger Höhe der Grundwasserstände, bezogen auf eine waagrechte Ebene. Aus diesen Isohypsen können die Fliessrichtungen abgeleitet werden; die Fliessrichtung des Grundwassers ist meistens senkrecht zu den Isohypsen. Wenn ein Grundwasserleiter im Zusammenhang mit einem Fluss steht, können anhand der Grundwasserisohypsen und -fliessrichtungen die Strecken mit Grundwasserexfiltration in den Fluss bzw. mit Flusswasserinfiltration ins Grundwasser ermittelt werden.

7.12.2 Hydrogeologische Karten in der Schweiz

Eine Übersicht über die in der Schweiz veröffentlichten hydrogeologischen Karten ist in BUTTET et al. (1992) dargestellt. Diese Karten werden je nach Zielsetzung in unterschiedlichen Massstäben erstellt.

Kleinmassstäbliche Karten (1:500'000 oder kleiner) vermitteln eine landesweite Übersicht und richten sich an Fachleute aus Planung, Verwaltung und Hochschulen sowie auch an fachfremde interessierte Kreise. Sie werden von Fachdiensten des Bundes (siehe Abschnitt 7.12.3) oder von Forschungsorganisationen (JÄCKLI & KEMPF 1967) erstellt. Die Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz 1:2'200'000, veröffentlicht z.B. in DUPASQUIER & PARRIAUX (2002), ist verkleinert und vereinfacht in Fig. 7-6 ersichtlich.

Mittelmassstäbliche Karten (1:100'000) vermitteln eine Übersicht über ein Teilgebiet der Schweiz. Sie stellen auch den allgemeinen Rahmen für kantonale Planungsaufgaben dar. Das Zielpublikum ist ähnlich wie dasjenige der kleinmassstäblichen Karten. Zur Zeit sind sechs Blätter der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100'000 erschienen (SGTK ab 1972; vgl. Fig. 7-45, HAERING et al. 1993); eine weitere ist in Vorbereitung. Für den Kanton Bern ist eine hydrogeologische Karte in zwei Blättern im Massstab 1:100'000 vorhanden (WEA 1998, 1999).

Grossmassstäbliche Karten (1:25'000, in einzelnen Fällen 1:50'000) stellen Planungs- und Vollzugsinstrumente dar. Sie werden von den Kantonen unter Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse erstellt. Sie stellen ein Instrument für die Erschliessung, die Bewirtschaftung und den Schutz des Grundwassers dar. In verschiedenen Kantonen beschränkt sich die Darstellung auf die hydrogeologischen Verhältnisse der Lockergesteins-Grundwasserleiter; diese Karten werden oft als «Grundwasserkarten» bezeichnet. Sie zeigen unter anderem die Verbreitung und Mächtigkeit der

Grundwasservorkommen, die Grundwasseroberfläche und -fliessrichtung (Fig. 7-44). Die ebenfalls von den Kantonen erstellten Gewässerschutzkarten werden unter 7.10 «Grundwasserschutz» erwähnt.

Hydrogeologische Detailkarten (Massstab grösser als 1:25'000) werden vor allem gezielt für konkrete Wasserversorgungs- oder Infrastrukturprojekte erstellt und in der Regel nicht veröffentlicht.

7.12.3 Digitale Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000

Im Zusammenhang mit der Neubearbeitung der Geologischen und Tektonischen Karte der Schweiz 1:500'000 in einem Geographischen Informationssystem (GIS) (BWG in Vorb. a und b, HEITZMANN & PHILIPP 1999) drängte sich auch eine Weiterentwicklung der bestehenden Hydrogeologischen Karte (JÄCKLI & KEMPF 1967) auf. Die neue Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000 teilt sich auf in ein erstes Blatt, welches die verschiedenen Grundwasservorkommen der Schweiz und deren Ergiebigkeit darstellt (Blatt «Grundwasservorkommen») und in ein zweites Blatt («Vulnerabilität der Grundwasservorkommen»), in welchem die Grundwasservorkommen aufgrund ihrer Vulnerabilität (Verschmutzungsempfindlichkeit) charakterisiert werden. Im Blatt Grundwasservorkommen (Fig. 7-46), das sowohl im Hydrologischen Atlas der Schweiz (Tafel 8.6, BITTERLI et al. 2004) wie auch in der Kartenreihe des BWG im Massstab 1:500'000 (BWG in Vorb. c) veröffentlicht wird, werden zudem die Art der Grundwasserzirkulation in Karst-, Kluft- oder Lockergesteinen, die wichtigsten Quell- und Grundwasserfassungen sowie hydrodynamische Angaben zu den Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten dargestellt. Im Blatt Vulnerabilität sollen die natürlichen Kriterien wie Bodenart, Deckschicht und ungesättigte Zone quantitativ beurteilt und kombiniert sowie das Resultat dieser Kombination als Karte dargestellt werden. Die beiden hydrogeologischen Karten, zusammen mit der Geologischen und Tektonischen Karte der Schweiz, beruhen auf der gleichen Datenbasis und stellen ein gemeinsames Geographisches Informationssystem dar. Es ist vorgesehen, dass diese Karten den interessierten Benutzern sowohl als gedrucktes Produkt wie auch in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden.

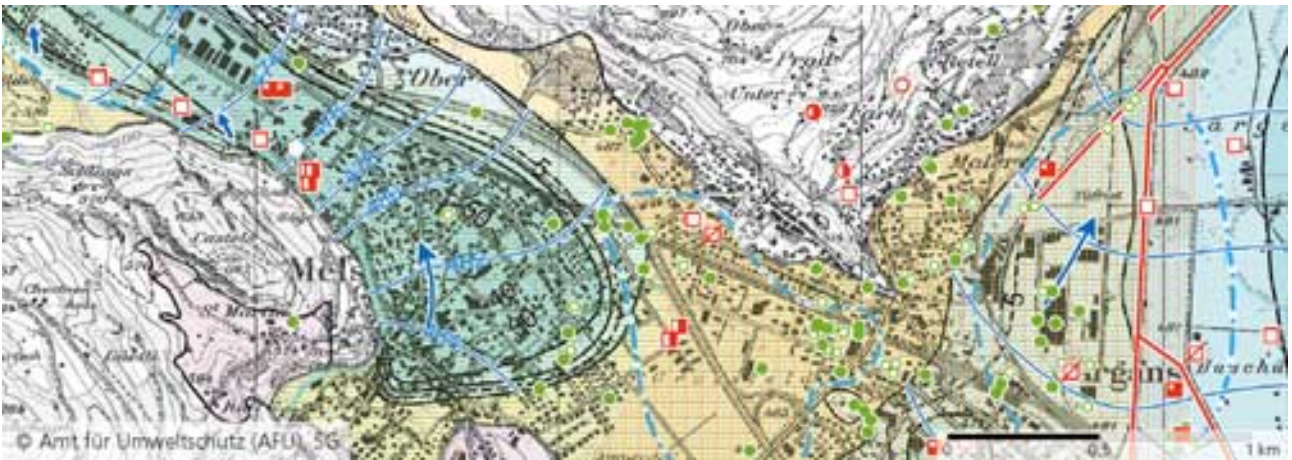


Fig. 7-44: Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons St. Gallen 1:25'000.



Fig. 7-45: Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100'000, Blatt Toggenburg (HAERING et al. 1993).

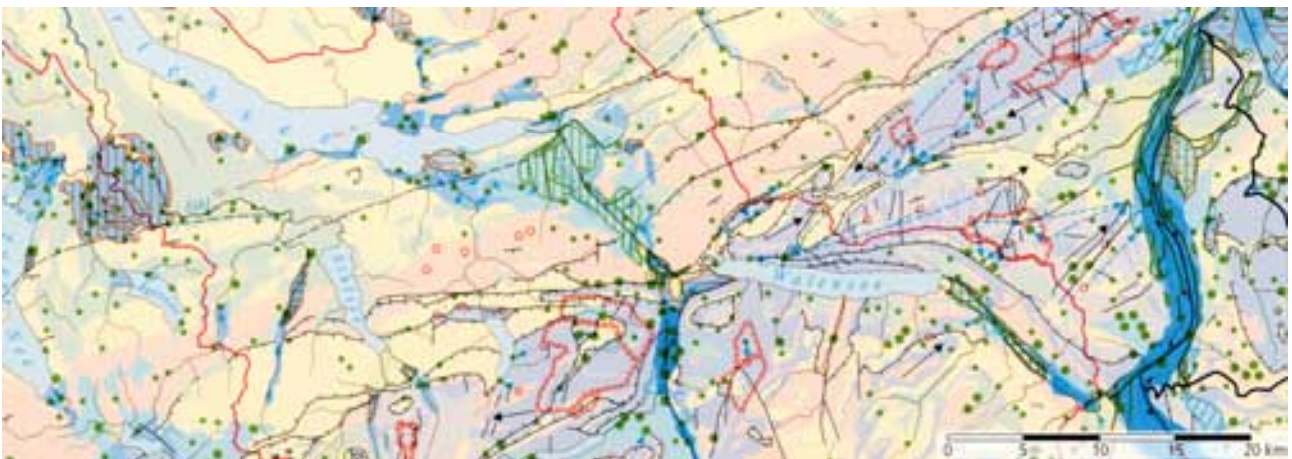


Fig. 7-46: Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:500'000 (BITTERLI et al. 2004).

8 Feststoffbeobachtung

Kennziffern

Quelle: BWG

Mittlere jährliche Schwebstofffrachten	Rhein – Diepoldsau (1979–1999)	2'800'000 t/Jahr	89 kg/s
	Rhône – Porte du Scex (1979–1999)	1'900'000 t/Jahr	60 kg/s
	Ticino – Bellinzona (1983–1999)	240'000 t/Jahr	8 kg/s
Mittlere Sedimentationsraten	Bodensee	0,04 mm/Jahr	
	Walensee	0,10 mm/Jahr	
	Thuner See	0,30 mm/Jahr	
	Lago Maggiore	0,36 mm/Jahr	
	Brienzer See	0,50 mm/Jahr	
Spezifische Feststofffrachten (beobachtete Gebiete)		10–40'000 m ³ /km ² pro Jahr	

8.1 Feststoffe messen

Unter dem Begriff Feststoffe wird die Gesamtheit der festen Stoffe verstanden, welche im Wasser transportiert oder abgelagert werden. Feststoffe sind also Geschiebe, Schwebstoffe, Geschwemmsel und Eis. Mit geeigneten Geräten und Einrichtungen werden Schwebstoffe und Geschiebe in eigenen Messnetzen erfasst.

8.1.1 Feststoffprozesse

Der Problembereich Feststoffe umfasst die Prozesse Generierung, Mobilisierung, Verlagerung und Ablagerung aller im Wasser befindlichen festen Stoffe. Unter dem Einfluss der Verwitterung werden die Festgesteine aufgelockert und zersetzt. Das derart entstandene Lockermaterial wird durch Oberflächenabfluss, Sturz- oder Rutschprozesse den Wasserläufen zugeführt. Wildbäche und Flüsse verfrachten diese Feststoffe weiter talabwärts, wobei Material teilweise in den Gerinnen abgelagert und wieder erodiert wird. In Seen und Stauseen werden grosse Feststoffvolumen abgelagert (GHO 1987).

8.1.2 Schwebstoffe

Bei der Messung der Schwebstoffe stehen die Schwebstoffkonzentration, die Schwebstofffracht sowie die Korngrößenverteilung im Vordergrund.

Die Schwebstoffkonzentration lässt sich durch Messungen relativ einfach bestimmen. Die Messung mit den manuellen Schwebstoff-Entnahmegärten (vgl. Fig. 8-1) liefert in einem bestimmten Punkt des Messquerschnittes einen quasi momentanen Konzentrationswert. Mit Hilfe eines Schwebstoff-Messwagens können integrierende Proben über die Abflusstiefe genommen werden (vgl. Fig. 8-2).

Die automatische Entnahme von Wasser-Schwebstoffproben (vgl. Fig. 8-3) weist gegenüber der manuellen



Fig. 8-1: Einsatz manueller Schwebstoffmessgeräte am Seil und an der Stange.

Methode den Vorteil auf, auch kurze Hochwasserereignisse mit genügender Probedichte erfassen zu können.

Die Schwebstofffracht (Tagesfracht, Jahresfracht) kann im Fließgewässer aus der Schwebstoffführung und



Fig. 8-2: Schwebstoffmesswagen der Landeshydrologie – Schwebstoffmessgerät am Flügelgewicht.

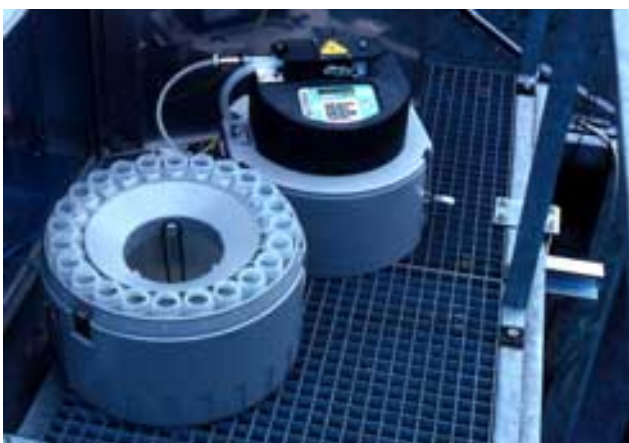


Fig. 8-3: Beispiel einer automatischen Station: Aare – Ringgenberg (BE). Die Station gehört nicht zum Standardmessnetz (vgl. Fig. 8-7).

den entsprechenden Abflussmengen bestimmt werden. In natürlichen Seen, Absetzbecken und Speicherseen kann die Fracht auch aus der Vermessung des Grundes (bathymetrische Aufnahme) abgeschätzt werden. Diese Vermessungen müssen aber mit der Analyse von Bodenproben kombiniert werden.

Die Bestimmung der Schwebstofffracht mit Hilfe von Stichprobenmessungen der Schwebstoffkonzentration und der kontinuierlichen Abflussmessung ist mancherorts problematisch. Einerseits ist es schwierig, innerhalb eines Flussquerschnittes einen repräsentativen Messpunkt für den Querschnitt zu bestimmen, da sich dieser entsprechend der Abflussbedingungen und weiterer Einflussgrößen ändert (vgl. Fig. 8-4). Andererseits kann mittels Stichprobenmessung die kontinuierliche Schwebstoffführung nur annähernd erfasst werden, wie Figur 8-5 zeigt. In vielen Gewässern ist zudem kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration feststellbar (vgl. Fig. 8-6). Deshalb wird heute an den Messstationen der Landeshydrologie eine Kombination von kontinuierlicher Trübungsmessung und Stichprobenmessung der Schwebstoffkonzentration angestrebt.

Das Standardmessnetz der Landeshydrologie deckt verschiedene wichtige Fließgewässer verteilt über die Hauptstromgebiete der Schweiz ab (vgl. Fig. 8-7). Das

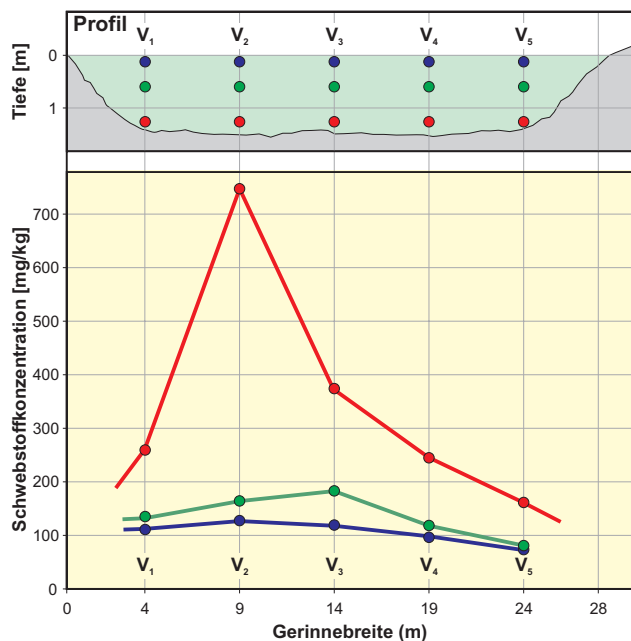


Fig. 8-4: Variation der Schwebstoffkonzentration im Flussprofil: Problem des repräsentativen Entnahmeortes (Daten: BWG).

Messnetz ist so angelegt, dass die Schwebstoffeinträge in die grössten Seen der Schweiz erfasst und der Schwebstoffaustrag aus der Schweiz ins nahe Ausland grob ermittelt werden kann (BWG 2004).

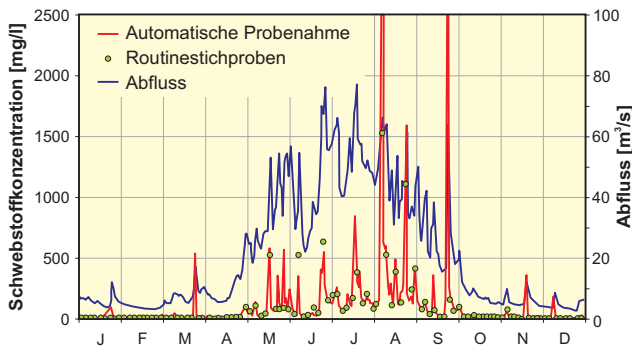


Fig. 8-5: Zeitliche Variation der Schwebstoffkonzentration, Lütchine – Gsteig (1994): Problem der Stichprobenmessung (Daten: BWG).

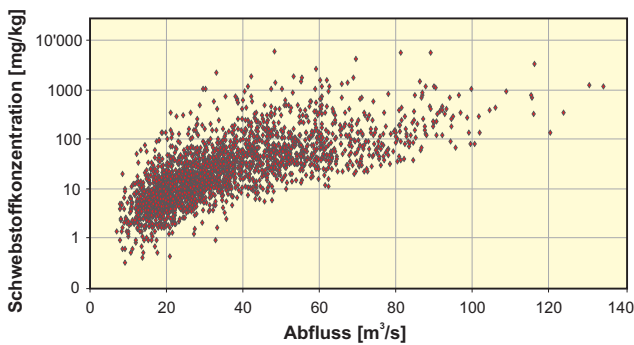


Fig. 8-6: Zusammenhang Schwebstoffkonzentration – Abfluss, Linth – Mollis (Periode 1976–1997) (Daten: BWG).

8.1.3 Geschiebe

Seit 1987 erfassen die Landeshydrologie, die Eidg. Forschungsanstalt WSL, interessierte Kantone und Forschungsinstitute Feststofffrachten (Geschiebe und/oder Schwebstoffe) in Geschiebesammlern (vgl. Fig. 8-8) im Rahmen eines Messprogrammes der Gruppe für operationelle Hydrologie. Die Datenerhebung ist so angelegt, dass sowohl Mittelwerte der Geschiebefracht als auch Extremwerte erfasst werden können. Die Messungen liefern die Grundlage für eine Verbesserung der bestehenden Ansätze zur Abschätzung der Feststoffmengen. Es ist vorgesehen, das Messnetz (vgl. Fig. 8-9) über einen Zeitraum von mindestens 30 bis 50 Jahren zu betreiben, um eine aussagekräftige statistische Auswertung zu ermöglichen.



Fig. 8-8: Geschiebeablagerungsplatz im Schipfenbach bei Silenen (UR).



Fig. 8-7: Standardmessnetz der Landeshydrologie zur Erfassung der Schwebstoffe in Fließgewässern. (Für die Beschriftung der geologischen Übersichtskarte s. Fig. 8-9) (Daten: BWG).



Fig. 8-9: Messstationen des Geschiebemessnetzes mit Zuordnung der Stationen zu den geologischen Einheiten der Schweiz (Daten: BWG).



Fig. 8-10: Geschiebemesstation Spissibach – Leissigen (BE) des Geographischen Instituts der Universität Bern.

Verschiedene Institute betreiben Forschungsstationen und Einrichtungen für die Feststoffmessung. Im Testgebiet Leissigen (BE) z.B. wird der aktuelle Geschiebetrieb des Spissibachs mit 18 Hydrophonen und einer Geschiebewaage (Entwicklung J. Schenk, GIUB; vgl. Fig. 8-10) erfasst (KIPFER 2000).

8.1.4 Murgänge

In den Alpen und anderen Gebirgen der Welt stellen Murgänge (auch als Gerölllawinen oder «Rüfen» bezeichnet) ein bedeutendes Gefahrenpotential dar. Sie treten vor allem in alpinen Schutthalden und in Wildbachgerinnen auf. Murgänge sind ein sich rasch bewegendes Wasser-Gesteins-Gemisch. Häufig ereignen sie sich bei ausserordentlichen Niederschlägen, wie z.B. bei den schweren Unwetterereignissen von 1987, 1993 und 2000 oder bei intensiven Sommergewittern. Murgangereignisse können vor allem auf überbauten



Fig. 8-11: Murgangbeobachtungsstationen der WSL.



Fig. 8-12: Murgangwaage im Illgraben (VS).

Wildbachkegeln oder bei einer Überlastung des Vorfluters durch den grossen Geschiebeeinstoss zu grösseren Schäden führen.

Zahlreiche Ereignisbeschreibungen in der Fachliteratur eignen sich wegen der meist nur groben Schätzungen der Fliesshöhen und -geschwindigkeiten lediglich bedingt zum Testen von Modellen oder zur Überprüfung von Erkenntnissen aus dem Labor. Es besteht deshalb weltweit ein erheblicher Bedarf an genauen Daten über die Eigenschaften und das Fliessverhalten von Murgängen aus Naturmessungen.

Erste automatische Beobachtungen von Murgängen wurden in der Schweiz 1993 im Dorfbach Randa (Mattertal VS) realisiert. Die Eidg. Forschungsanstalt WSL betreibt diese Station seit 1995. Seither sind die drei weiteren Stationen Schipfenbach (1997), Illgraben (2000) und Riale Valeyón (2002) dazugekommen (vgl. Fig. 8-11).

In diesen Einzugsgebieten erfassen Pluviometer den auslösenden Niederschlag, Geophone messen abschnittsweise Fliessgeschwindigkeiten, Pegelmessungen mittels Radar oder Echolot ermitteln Abflusstiefen und sämtliche Stationen sind mit Videokameras zur optischen Kontrolle ausgerüstet.

Im Illgraben, wo jedes Jahr mehrere Murgangereignisse auftreten, wurde 2003 zusätzlich eine Murgangwaage installiert. Diese besteht aus einer horizontalen Platte von 4 x 2 m, welche auf einem Stahlrahmen aufgeschraubt ist (vgl. Fig. 8-12). Vier vertikale und zwei horizontal angebrachte Messzellen registrieren die einwirkenden Kräfte und erlauben die Bestimmung



Fig. 8-13: Erstes erfasstes Ereignis auf der Murgangwaage im Illgraben (VS).

der Masse, welche auf der Waage liegt. Zusammen mit den Messungen der Abflusstiefe und der Geschwindigkeit lassen sich Dichte und Wassergehalt eines Murgangs kontinuierlich bestimmen. Figur 8-13 zeigt den ersten Murgang, der im Sommer 2004 mit der Waage aufgezeichnet werden konnte.

Alle Messungen dienen dem besseren Verständnis des Prozesses und fließen in die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen für die Praxis ein, welche unter anderem an der WSL entwickelt werden.

8.1.5 Seesedimentation

Der weitaus grösste Teil aller Feststoffe wird durch einmündende fliessgewässer den Seen zugeführt (vgl. Fig. 8-15). Die Bestimmung der Ablagerungsvolumina erfolgt durch periodische Seegrundaufnahmen (Delta-

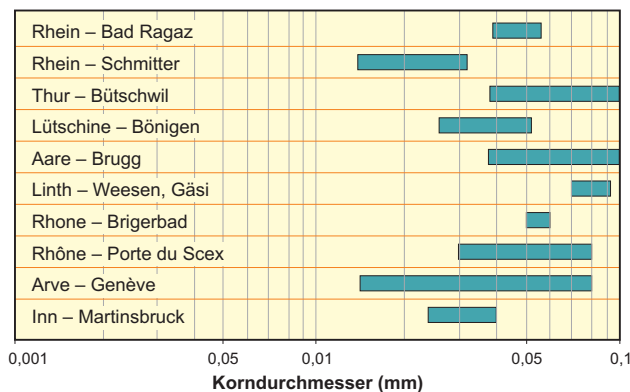


Fig. 8-14: Variationsbreite der Mittelwerte (Median) bei verschiedenen Stationen (Daten: BWG).



Fig. 8-15: Delta der Maggia im Lago Maggiore.

vermessungen). Deltabeobachtungen geben Aufschluss über den Einfluss von wasserbaulichen Veränderungen (Flusskorrekturen, -verlegung), Gefällsveränderungen, Auflandungen, ökologischen und ökomorphologischen Veränderungen auf das Erosionsverhalten der Flüsse. Die ersten Vermessungen Ende des 19. Jahrhunderts wurden mit einem Kabelot durchgeführt. Ab ca. 1940 erfolgte die Vermessung mit Ultraschall von Booten aus.

Zur Bestimmung der Sedimentationsraten (Schichtmächtigkeit der pro Zeiteinheit abgelagerten Sedimente) werden Sedimentfallen eingesetzt und Sedimentprofile erstellt.

8.1.6 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials und der Schwebstoffe (vgl. Fig. 8-14, Fig. 8-16) ist für viele Fragestellungen, insbesondere für Berechnungen des Transportvermögens einer Flussstrecke, wichtig. Zur

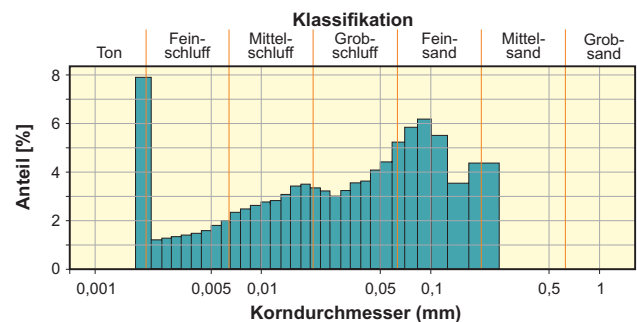


Fig. 8-16: Häufigkeitsverteilung der Schwebstoffe in der Rhone an der Station Porte du Scex (Daten: BWG).

Erfassung der gröberen Komponenten (Deckschicht) werden Linien- und Flächenproben durchgeführt. Volumenproben dienen vor allem zur Erhebung des Unterschichtmaterials. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung der Schwebstoffe erfolgt mit manuellen (Attenberg, Pipette) und elektronischen Messgeräten (Sedigraph, Coulter Counter, Laser).

8.2 Resultate

8.2.1 Schwebstoffkonzentration und -frachten

Die Erfassung von Schwebstoffführung und Schwebstofffrachten ist wichtig für die Prognose der Entwicklung von Stauräumen. Da die Schwebstoffe mengenmässig stärker ins Gewicht fallen als das Geschiebe, sind sie auch als Mass für den Gebietsabtrag im Einzugsgebiet von Bedeutung.

Figur 8-17 zeigt Schwebstoffkonzentrationen und absolute Frachten am Messstandort Aare – Brienzwiler (vgl. Fig. 8-18). Der Grossteil der Jahresfracht fällt in den abflussreichen Monaten Mai bis September an. Dass die Schwebstoffkonzentration in Zeiten mit hohen Abflüssen zunimmt, zeigt auch Figur 8-19. Die Korrelation zwischen der Schwebstoffkonzentration und dem mittleren Tagesabfluss ist mit 0,45 (Periode 1993–1997) allerdings nur schwach. In schweizerischen Fließgewässern variiert sie zwischen 0,2 (Reuss – Mühlau) und 0,9 (Areuse – Boudry).

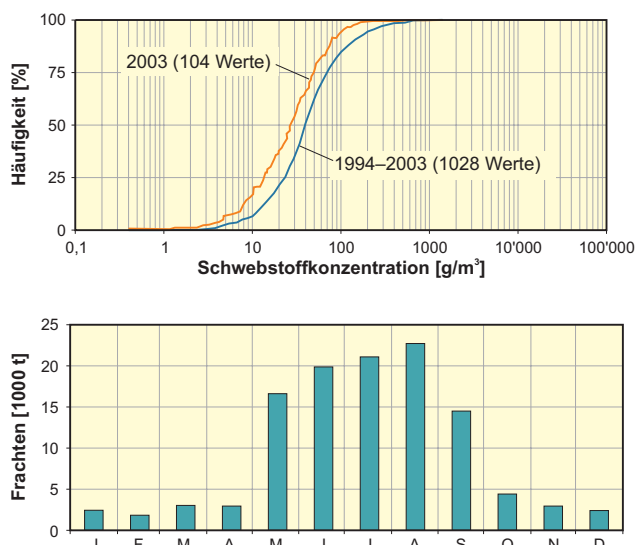


Fig. 8-17: Prozentuale Unterschreitungshäufigkeit der jährlichen Schwebstoffkonzentration (oben) und mittlere monatliche Schwebstofffrachten der Periode 1994–2003 (unten) gemessen an der Messstation Aare – Brienzwiler (BWG 2004).



Fig. 8-18: Messstation Aare – Brienzwiler (BE).

Die oberhalb des Briener Sees gelegene Station Brienzwiler misst mit rund 125'000 t/Jahr (Periode 1994–2003) im schweizerischen Vergleich eher kleine Schwebstoffmengen (vgl. Fig. 8-20). Am meisten Schwebstoffe transportieren die grossen Alpenflüsse oberhalb der Alpenrandseen (Rhein – Diepoldsau: 3 Mio t/Jahr; Rhône – Porte du Scex: 2,7 Mio t/Jahr; Periode 1994–2003).

8.2.2 Feststofffrachten (Geschiebe und Schwebstoffe)

Aus Figur 8-21 kann ersehen werden, dass im Mittelland (Geologie: Molasse) generell die kleinsten Feststofffrachten anfallen. Dies hängt, abgesehen von den geologischen Faktoren, natürlich auch mit der Topographie zusammen. Einzelne grössere Einzelereignisse verlagern teilweise das Mehrfache einer Jahresfracht an

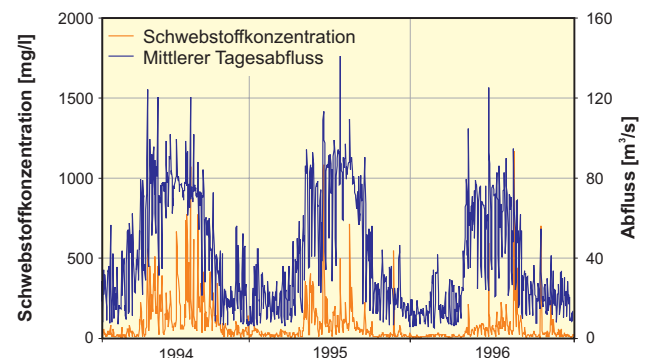


Fig. 8-19: Vergleich von Abfluss und Schwebstoffkonzentration bei der Messstation Aare – Brienzwiler (Daten: BWG).



Fig. 8-20: Mittlere jährliche Schwebstofffrachten ausgewählter schweizerischer Fließgewässer [Angaben in 1000 t] (nach BWG 2004, JAKOB & SPREAFICO 1997, SPREAFICO 1988).

Material. Mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse nimmt die spezifische Jahresfracht ab (vgl. Fig. 8-22).

8.2.3 Deltaufnahmen: Linth-Delta

Die erste bathymetrische Aufnahme des Linth-Deltas im Walensee (vgl. Fig. 8-23) wurde im Jahre 1860 aus-

geführt. Der jährliche Feststoffeintrag der Linth wurde bei einer Einzugsgebietsfläche von 621,7 km² auf zwischen 60'000 und 80'000 m³ geschätzt. Dies entspricht einem Transportvolumen von 96,5–128,5 m³/km² pro Jahr.

Eine neue Karte des Deltas wurde 1911 erstellt. Auf einer Deltafläche von 2,83 km² wurden 9640 Messun-

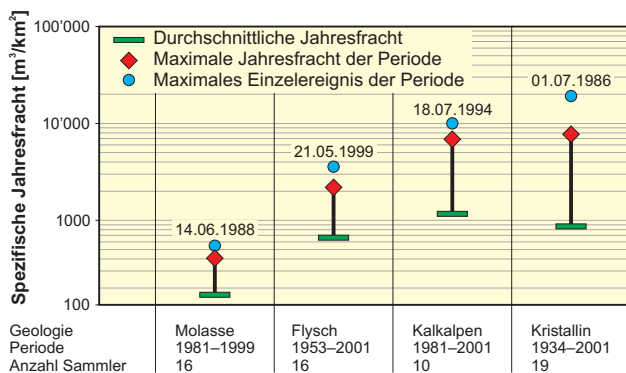


Fig. 8-21: Feststofffrachten ausgewählter Geschiebesammler unterschiedlicher Geologischer Zugehörigkeit (Daten: BWG).

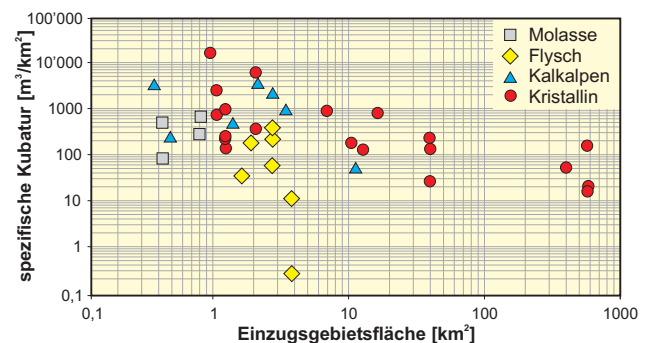


Fig. 8-22: Spezifische Jahresfrachten in den Untersuchungsgebieten (Daten: BWG).

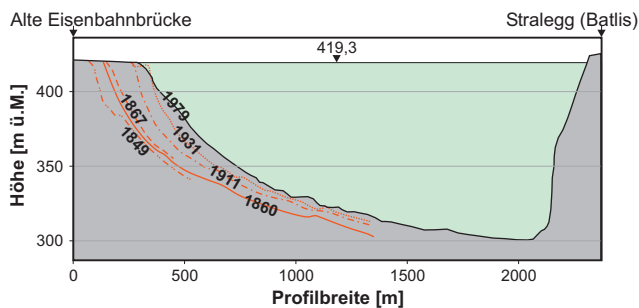


Fig. 8-23: Die Entwicklung des Linth-Deltas von 1849–1979 (LAMBERT 1980).

gen ausgeführt. Zwischen 1860 und 1911 lagerte die Linth 3'738'000 m³ Feststoffe im Walensee ab, was einer jährlichen Rate von 74'000 m³ entspricht. Das spezifische Volumen pro Jahr und km² betrug 119 m³ (COLLET et al. 1916).

Die Deltaaufnahme wurde 1931 wiederholt. Für die Periode 1911–1931 wurde ein Feststoffeintrag von 2'400'000 m³ geschätzt, was einem jährlichen Eintrag von 114'300 m³ entspricht. Zu diesem Volumen muss noch eine Entnahme von schätzungsweise 11'400 m³ durch Baggerungen hinzugezählt werden, um den gesamten Feststoffeintrag zu erhalten. Dies ergibt ca. 202 m³/km² pro Jahr (EAWW 1939).

Im Juni 1979 wurde das westliche Seebett wiederum vermessen. Das abgelagerte Feststoffvolumen von 1931–1979 wurde auf 6'500'000 m³ geschätzt. Dies entspricht einem mittleren jährlichen Erosionsabtrag von 0,23 mm für das Einzugsgebiet.

Verglichen mit früheren Untersuchungen (0,17 mm/Jahr für die Periode 1911–1931; JÄCKLI 1958) bedeutet dies einen erhöhten Eintrag (LAMBERT 1978, 1980).

8.2.4 Stauraumverlandung

Man geht davon aus, dass innerhalb weniger Dekaden 50 % der weltweiten Speicherkapazität in Stauseen verloren geht. In der Schweiz ist die Verlandung nicht so dramatisch (vgl. Tab. 8-1, Fig. 8-24), unter anderem auch wegen regelmässiger Stauraumspülungen durch einen Grundablass.

Trotzdem sind das bessere Verständnis der Erosions- und Ablagerungsprozesse, die Erfassung von Dichteströmungen, die Kenntnis der Auswirkungen der

Massnahmen zur Verringerung des Feststoffeintrages sowie die Entwicklung von Strategien für das optimale Spülen auch in der Schweiz sehr wichtig.

Stausee	Einzugsgebietsfläche [km ²]	Spezifische Jahressedimentation [m ³ /km ² ·a]	Retentionvolumen [Mio m ³]	Jährlicher Kapazitätsverlust [%]	Quelle
Gebidem (VS)	200	430'000	8,7	5,0	BOILLAT et al. 1996, RECH-STEINER 1996
Palagnedra (TI)	139	93'000	2,1	2,0	MÜLLER 1996, VISCHER 1981
Grimsel (BE)	74	68'000	94	2,8	VISCHER 1981
Dixence (VS)	47	28'000	400	0,0	BEZINGE & AESCHLIMANN 1981
Luzzzone (TI)	36,5	35'000	87	0,0	EPFL 1997
Sihlsee (SZ)	31,9	68'000	91,8	0,1	AMMANN 1987

Tab. 8-1: Ausgewählte Beispiele für die Kapazitätsverluste durch Stauraumverlandung in der Schweiz.



Fig. 8-24: Speicherbecken Luzzzone (TI).

8.3 Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen

Geschiebeführende Hochwasser und Murgänge verursachen regelmässig grosse Schäden im besiedelten Alpenraum. Die Eidg. Forschungsanstalt WSL stellt jähr-

lich solche Umwelterschäden in der Schweiz zusammen (z.B. HEGG 2003). Der Planung und Realisierung von Schutzmassnahmen kommt hohe Priorität zu. Leider bestehen bei der Grundlagenbeschaffung noch immer grosse Unsicherheiten und Kenntnislücken. Die Landeshydrologie hat deshalb in Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Bern eine Methode entwickelt, welche die Abschätzung der Transportkapazität, der transportierten Feststofffracht, des Feststoffpotentials und der Ablagerungen erlaubt (vgl. Fig. 8-25). Die Anwendung der Methode durch den Praktiker wird durch ein Handbuch, einen Theorieband und ein Rechenprogramm unterstützt.

Nach Vorarbeiten im Büro, bei denen eine erste Wildbachbeurteilung vorgenommen wird, sind Feldabklärungen notwendig. Dabei wird das Gerinne von unten nach oben abgeschritten, das Feststoffpotential abgeschätzt, Ablagerungsstrecken lokalisiert und beurteilt. Aufgrund der Begehung wird der Wildbach einer Ka-

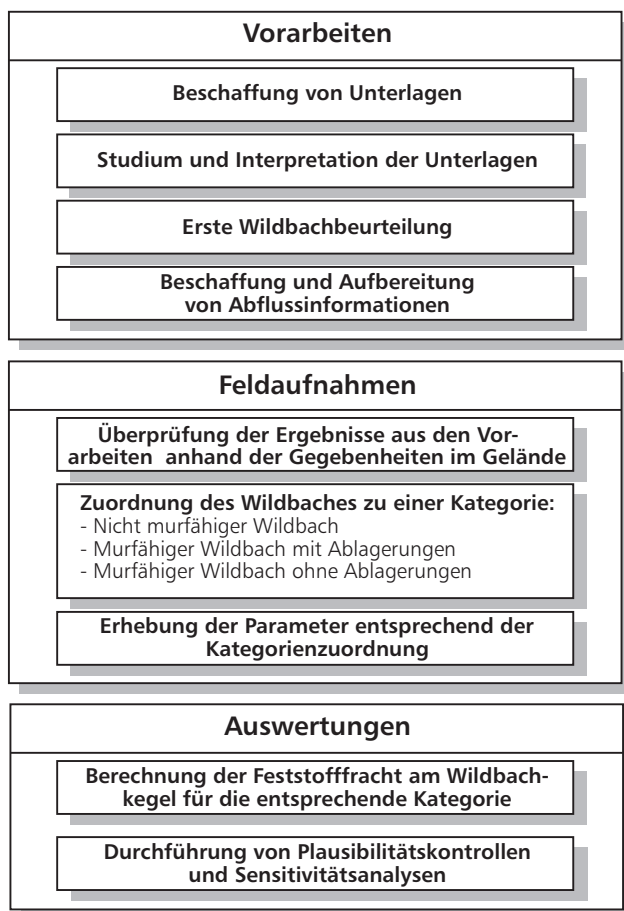


Fig. 8-25: Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte zur Abschätzung der Feststofffracht (nach GHO 1996).

tegorie, die Hinweise zum Transportverhalten gibt, zugeordnet. Obschon das vorgestellte Verfahren zu einer besseren Beurteilung des Feststofftransportes in steilen Gerinnen geführt hat, sind noch nicht alle Probleme zufriedenstellend gelöst.

Als Beispiel zeigt Figur 8-26 ein Ergebnis aus Berechnungen, welche für die Guppenruns (GL) erstellt worden sind. Der Bachlauf ist durch die Querprofile Nr. 21 (Tobelbereich) bis hinunter zur Mündung in die Linth (Nr. 1) schematisch dargestellt. Die grösseren natürlichen Ablagerungsstellen (zu ersehen bei den Querprofilen 19, 18, 13 sowie 8 und 7) genügen nicht, den Feststoffeintrag in die Linth dermassen zu reduzieren, dass dort kein Rückstau zu befürchten wäre.

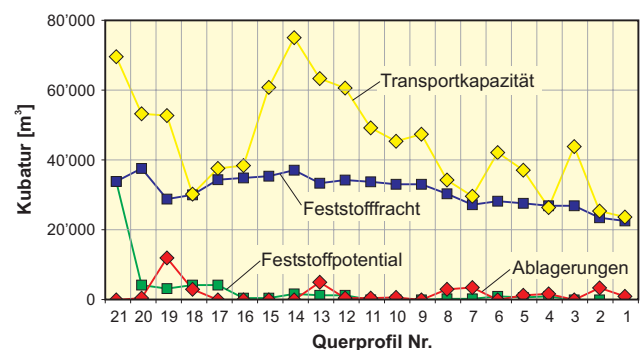


Fig. 8-26: Feststoffverlagerung während eines Grossereignisses in der Guppenruns (GL) (Daten: BWG).

Es konnte aber gezeigt werden, dass durch den geplanten Geschiebeablageungsplatz im Bereich der Querprofile Nr. 8 und 7 zusammen mit weiteren Rückhaltmassnahmen weiter oben (zu erstellen im Bereich der Querprofile 14–12) die Feststofffracht eines Grossereignisses so stark reduziert wird, dass ein Aufstau der Linth praktisch verhindert werden kann.

8.4 Feststoffhebung nach Unwettern

Die Erhebung der im Anschluss an ein Hochwasserereignis abgelaufenen Prozesse im Gerinne, der Geschiebeherde, der erodierten Feststoffmenge, der Ablagerungen und der Schlüsselstellen hilft bei einer möglichst sachgerechten Planung. Zudem tragen diese Informationen auch massgeblich zum Prozessverständnis bei, welches im Hinblick auf die Erarbeitung von längerfristigen Schutzmassnahmen unabdingbar ist. Die

Dokumentation der feststoffrelevanten Prozesse und der umgesetzten Feststoffvolumina nach Unwettern bildet daher einen wesentlichen Teil einer umfassenden Ereignisdokumentation. Figur 8-27 gibt einen Überblick über das Vorgehen.

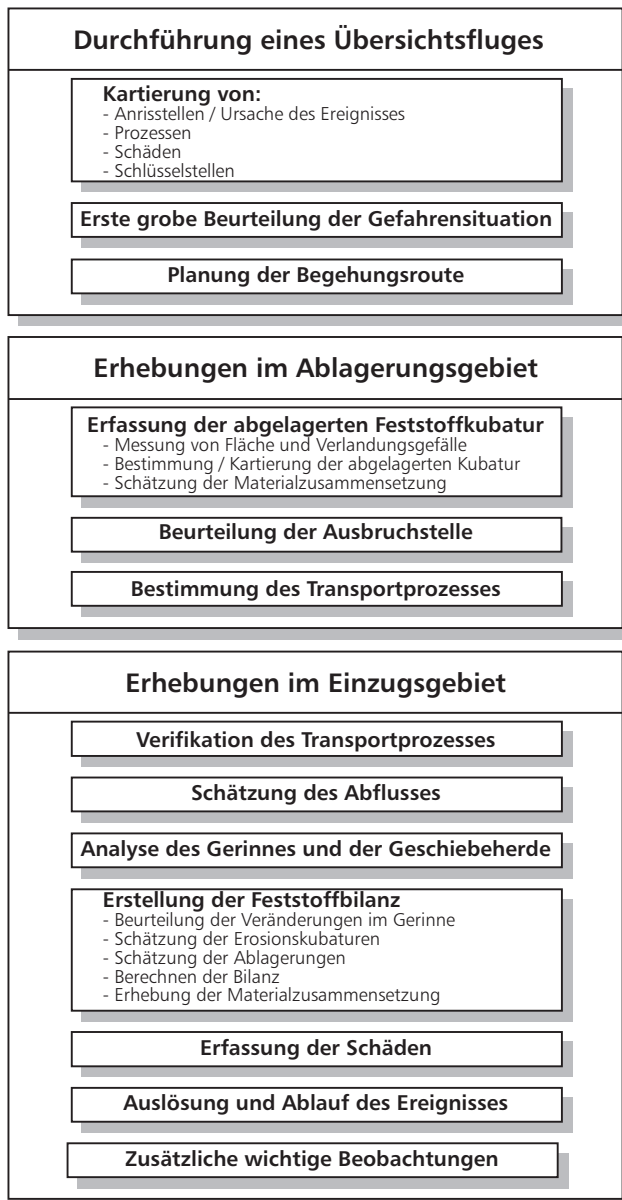


Fig. 8-27: Übersicht über das Vorgehen bei der Erfassung von Feststoffen nach Unwettern (nach GHO 1996).

9 Wasserqualität

Kennziffern

Quelle: BWG 2004

Konzentrationsmittelwerte an ausgewählten NADUF-Stationen im Jahr 2003 (frachtgewogen)

Station	Nitrat	Gesamtstickstoff	Orthophosphat (Filtrat)	Gesamtphosphor	organischer Kohlenstoff	
	N [mg/l]	N [mg/l]	P [mg/l]	P [mg/l]	DOC (gelöst) C [mg/l]	TOC (gesamt) C [mg/l]
Mehrheitlich alpines oder voralpines Einzugsgebiet						
Rhein – Diepoldsau	0,52	0,64	0,003	0,099	1,0	2,8
Kleine Emme – Littau	1,06	1,90	0,013	0,211	3,3	8,3
Rhône – Porte du Scex	0,46	0,50	0,005	0,184	0,9	2,6
Inn – S-chanf	0,27	0,30	0,003	0,091	1,0	1,8
Grosse Mittellandflüsse mit Seen im Einzugsgebiet						
Rhein – Rekingen	1,18	1,23	0,010	0,031	2,2	2,7
Rhein – Weil	1,36	1,44	0,014	0,038	2,3	2,9
Aare – Hagneck	0,92	1,02	0,003	0,029	1,6	2,1
Aare – Brugg	1,64	1,68	0,012	0,038	2,7	3,4
Reuss – Mellingen	0,75	0,92	0,006	0,044	2,7	3,3
Rhône – Chancy	0,62	0,76	0,020	0,085	1,7	2,5

Dieses Kapitel behandelt hauptsächlich Fragen der Wasserqualität in den Fließgewässern. Speziell die Seen resp. das Grundwasser betreffende Qualitätsfragen werden in den Kapiteln 6 und 7 vorgestellt.

9.1 Wasserqualität messen

Der Zustand eines Gewässers lässt sich mit zahlreichen Messgrößen beschreiben. Ausgewählte, wichtige chemische und physikalische Parameter von Fließgewässern werden vom BWG im Rahmen des 1972 gestarteten Projekts «Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer» (NADUF) erhoben.

Im Mittelpunkt des Interesses stehen diejenigen chemischen Inhaltsstoffe, die als Indikatoren für die zivilisatorische Belastung der Gewässer gelten. Die Tabelle der Kennziffern (s. oben) zeigt die frachtgewogenen Konzentrationsmittelwerte von Stickstoff (vgl. Abschnitt 9.2.3), Phosphor (vgl. Abschnitt 9.2.2) und organischem Kohlenstoff (DOC = gelöst; TOC = gesamt) für das Jahr 2003. Die Stationen wurden aufgrund der geographischen Gegebenheiten in zwei Gruppen aufgeteilt. Die Station Kleine Emme – Littau weist im Gegensatz zu den anderen Stationen derselben Gruppe eine höhere Stickstoff- und Phosphorbelastung auf, was auf die intensivere landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet zurückzuführen ist. Die Phosphorkonzentration der verbleibenden Flüsse mit alpinen bzw. voralpinen Einzugsgebieten folgt einem saisonalen Muster: Durch die Gesteinsverwitterung (apatitischer Phosphor) ist die Gesamtphosphorkonzentration im Sommer bei grösseren Abflüssen höher als im Winter, dies im Gegensatz zur Orthophosphatkonzentration,

die im Sommer geringer ausfällt als im Winter (Verdünnungseffekt der höheren Abflussmengen, unterschiedliche Herkunft des Wassers, sommerliche Zehrung aufgrund der Bioproduktion).

Andere wichtige Parameter wie z.B. der Gehalt an gelöstem Sauerstoff (vgl. Abschnitt 9.2.4) und die Wassertemperatur (vgl. Abschnitt 9.2.1) sind keine direkten Verschmutzungsindikatoren, bestimmen aber den Lebensraum der Wasserorganismen.

9.1.1 Messnetze und Beprobungsarten

NADUF, ein Gemeinschaftsprojekt des BWG mit dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) und der Eidgenössischen Forschungsanstalt



Fig. 9-1: Ausgewählte NADUF-Messstellen in der Schweiz.

für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), liefert Grundlagen zur Beurteilung des gegenwärtigen Zustandes der Fließgewässer sowie dessen mittel- und langfristigen Veränderung (JAKOB et al. 1994). In üblicherweise 14tägigen, abflussproportionalen Sammelproben werden mehrere chemische Inhaltsstoffe untersucht. Zusätzlich werden an den meisten Messstellen die Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Konzentration des gelösten Sauerstoffs kontinuierlich aufgezeichnet. Figur 9-1 zeigt die Lage ausgewählter NADUF-Stationen in der Schweiz.

Den grössten Teil der chemischen Gewässeruntersuchungen führen die kantonalen Gewässerschutzfachstellen durch. Art und Ausmass der Erhebungen der einzelnen kantonalen Fachstellen sind sehr heterogen. Es gibt sowohl örtliche wie zeitliche Unterschiede in der Datenerhebung. Den Fließgewässern werden pro Jahr entweder 4, 12 oder mehr Stichproben entnommen oder 12 bis 365 24-Stunden-Sammelproben erhoben. Bei Seen werden jährlich zwischen 2 und 12 Probenahmen mit Stichproben in verschiedenen Wassertiefen durchgeführt. Teilweise werden mit Messsonden Tiefenprofile in hoher Auflösung für einzelne

Parameter (gelöster Sauerstoff, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Lichtdurchlässigkeit) erhoben.

In der «Datenbank Gewässerzustand» (DBGZ) werden die Ergebnisse der Untersuchungen des Bundes und der Kantone zur Beurteilung des chemisch-physikalischen Gewässerzustandes in der Schweiz gespeichert. In der mehrplatzfähigen Applikation der DBGZ, die vom BWG betrieben wird, stehen den Benutzerinnen und Benutzern bedienungsfreundliche Verwaltungs- und Auswertungsfunktionen zur Verfügung (JAKOB & GUNTERSWEILER 1996).

In Figur 9-2 ist die zeitliche Entwicklung der Messnetze zur Bestimmung chemischer und physikalischer Parameter in Fließgewässern und Seen dargestellt. Basis dazu sind die in der DBGZ gespeicherten Messresultate. Neben den chemischen Parametern sind auch Erhebungen von Schwebstoffgehalten und Einzelmessungen von Temperaturen und elektrischen Leitfähigkeiten mit einbezogen. Unabhängig von Anzahl und Art der Probenahmen sind die Messstellen mit vorhandenen Daten an Fließgewässern und Seen für die verschiedenen Jahre verzeichnet. Die Übersicht zeigt deutlich, dass umfangreiche Gewässeruntersuchungen vielerorts erst nach 1970 mit der Inkraftsetzung des zweiten Gewässerschutzgesetzes begannen. Damit fällt an vielen Messstellen der Beginn der Messreihe mit dem «Höhepunkt» der Gewässerbelastungen zusammen. Lange Messreihen mit regelmässig erhobenen Daten fehlen grösstenteils.

Aufgrund der Temperaturentwicklung in den Gewässern seit Ende der 1980er Jahre wurde das BWG-Temperaturmessnetz ab dem Jahr 2001 mit Messstellen an mehrheitlich kleineren und möglichst wenig beeinflussten Gewässern wesentlich ergänzt.

9.1.2 Beprobung und Messgeräte NADUF

Für die automatische Probenahme und die kontinuierliche Messung wird bei den BWG-Stationen Flusswasser mittels einer Tauchpumpe in die Messstation gefördert (vgl. Fig. 9-3). Hier fließt das Wasser in ein mit Messelektroden bestücktes Gefäss. Elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoff und pH werden kontinuierlich bestimmt. Seit Anfang 1990 wurden stationsweise digitale Registriergeräte eingeführt. Ab 1999 wurde auf telefonische Übermittlung umgestellt, so dass 10-Minuten-Mittelwerte (Temperatur, pH, Sauerstoffkonzentration, elektrische Leitfähigkeit) übertragen werden. Dies ermöglicht eine häufige Kontrolle der Daten. Die Messelektroden werden monatlich gereinigt und

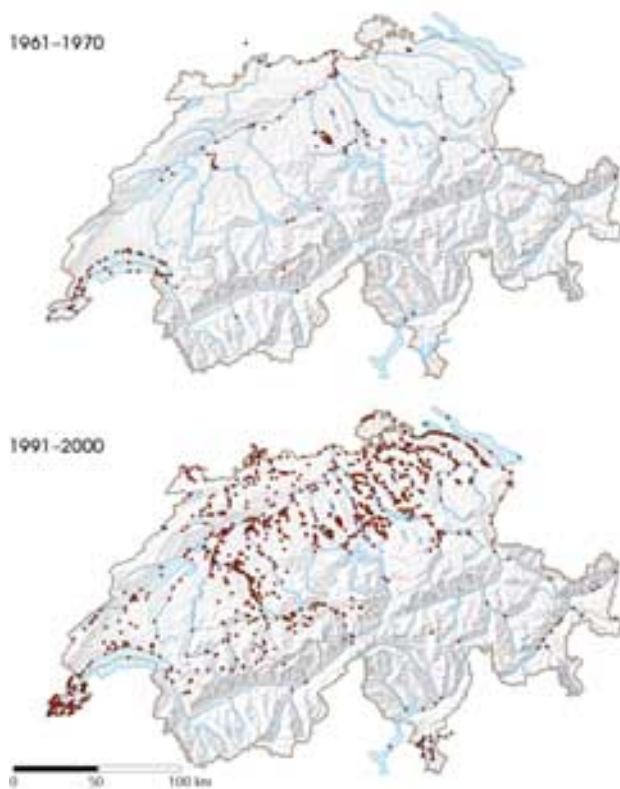


Fig. 9-2: Entwicklung des Messnetzes (nach JAKOB & GEISSEL 2004).

geeicht. Allfällige Differenzen zwischen aufgezeichneten und effektiven Werten werden bei der Datenauswertung korrigierend berücksichtigt. Gleichzeitig mit dem Unterhalt der Sonden werden auch die Zu- und Abläufe sowie die Probenehmer gründlich gereinigt.

Das Probenahmegerät entnimmt in gewissen Zeitabständen nacheinander zwei kleine Einzelprobe von einem resp. zwei Milliliter aus dem Wasserstrom. Die Steuerung des Probenahmegerätes erfolgt wo immer möglich abflussproportional. Wo eine abflussproportionale Probenahme nicht möglich ist, kommt eine zeitproportionale Probenahme zur Anwendung. Die automatisch entnommenen Proben gelangen durch ein Verteilsystem in die Aufbewahrungsgefäße (angesäuert für Schwermetallanalysen, nicht angesäuert für Analysen der übrigen Parameter), welche in einem Kühlschrank untergebracht sind (vgl. Fig. 9-3). Diese sogenannten Sammelproben wurden bis 1980 wöchentlich erhoben und untersucht. Seit 1981 werden die wöchentlichen Sammelproben vor der Untersuchung zu 14tägigen Mischproben vereinigt. Bei den unterhalb der Seen liegenden Stationen werden die Sammelproben seit 1993 zweiwöchentlich erhoben

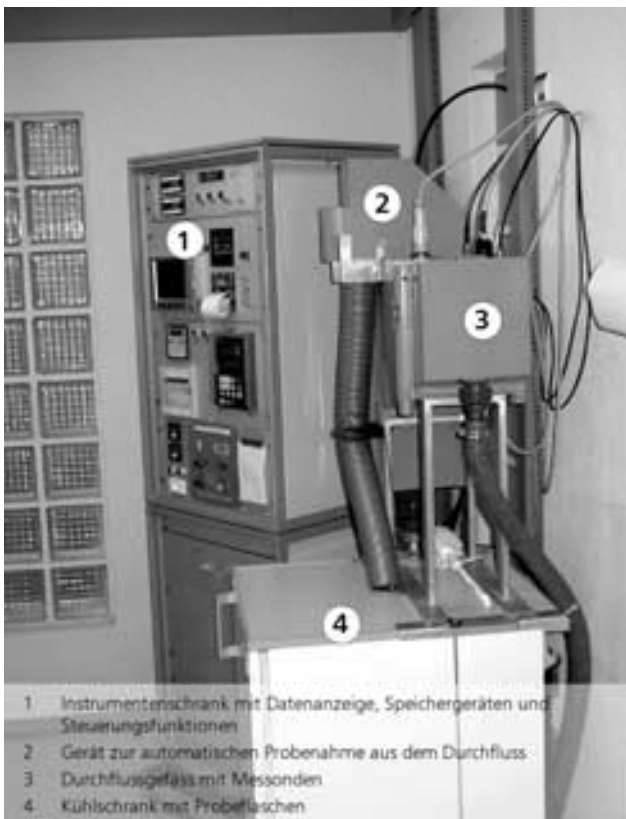


Fig. 9-3: NADUF-Messtation.

und untersucht, weil Hochwasserspitzen im Gegensatz zu den oberhalb von Seen liegenden Stationen gedämpft werden, weshalb die Gefahr des Überlaufens der Probeflaschen kleiner ist und somit zweiwöchentliche Sammelproben ausreichend sind. Die Probenahmeflaschen werden gekühlt per Express an die EAWAG gesandt, welche die Proben analysiert.

9.2 Ausgewählte Parameter

Anhand der Wassertemperatur sowie der Gehalte an Phosphor, Stickstoff und Sauerstoff im Wasser lassen sich Fragen der Wasserqualität beantworten.

9.2.1 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur gehört zu den wichtigsten Regulatoren von Lebensvorgängen in Gewässern. Alle Stoffwechselforgänge, die Dauer, der Verlauf und die Geschwindigkeit des Wachstums sowie die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften werden von ihr beeinflusst.

Lebensfähigkeit und Lebensaktivität der Wasserorganismen sind an bestimmte Temperaturgrenzen und Temperaturoptima gebunden. Die Temperaturregimes sind deshalb einer der Gründe für die unterschiedliche Fischbesiedlung der Flussregionen in Mitteleuropa. So ist allein aufgrund von Vorlieben und Toleranzen für spezifische Temperaturbereiche das Vorkommen mancher Arten auf bestimmte Flussabschnitte beschränkt. Im Oberlauf der Fließgewässer kommen beispielsweise kälteliebende Arten vor, während die im Unterlauf in höherer Individuendichte auftretenden Arten an die dort herrschenden höheren Temperaturen angepasst und gegen grössere Temperaturschwankungen weitgehend unempfindlich sind.

Mit steigender Wassertemperatur nimmt die Löslichkeit der Gase ab und die Aufnahmefähigkeit des Wassers für Sauerstoff sinkt. Gleichzeitig nimmt die Aktivität der tierischen Organismen zu und ihr Sauerstoffbedarf steigt. Bei erhöhtem Sauerstoffbedarf und gleichzeitig verringertem Sauerstoffangebot treten Stresssymptome auf. Eine Folge davon ist eine stark verminderte Nahrungsaufnahme. Werden die Temperaturgrenzen für eine Art überschritten, kann sie, falls keine Fluchtmöglichkeit besteht, nicht überleben. Temperaturen ab 15 °C begünstigen zudem den Ausbruch der proliferativen Nierenerkrankung (PKD), die hohe Mortalitäten zur Folge haben kann.

Das Temperaturoptimum liegt je nach Art unterschiedlich hoch. Bei Salmoniden wie Forellen, Felchen oder Äschen können ab 18–20 °C Stresssymptome auftreten. Temperaturen über 25 °C können bereits tödlich sein. Andere Arten, etwa Karpfen, Barsche oder Hechte, ertragen hohe Temperaturen besser.

Für die Flora und Fauna in den Gewässern sind nicht Mittelwerte über eine gewisse Zeit massgebend. Entscheidend ist die Dauer der temperaturbedingten Stresssituation. Je länger ein Organismus ihr ausgesetzt ist, desto anfälliger wird er auf entsprechende Symptome.

Neben biologischen Wirkungen verändern hohe Wassertemperaturen auch die Chemie eines Gewässers. So wird beispielsweise Ammonium (NH_4^+) zunehmend in das für Fische giftige Ammoniak (NH_3) überführt, oder es kommt nach der Vermehrung von Algen zur sogenannten «biogenen Entkalkung».

Der Wärmehaushalt der Gewässer hängt von vielen Umweltfaktoren ab. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die Temperaturen des Quellwassers und der Zuflüsse, die Energieeinstrahlung und -abstrahlung, der Niederschlag, die Verdunstung, die Kondensation und die Schneeschmelze sowie der Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft. In den Fliessgewässern findet beispielsweise wegen der turbulenten Wasserbewegung ein intensiver Temperatureaustausch mit der Umgebung statt. Schliesslich können Umgebungsfaktoren – wie die Beschattung durch eine ufernahe Gehölzvegetation oder die Infiltration von kühlem Grundwasser – die Temperatur des Gewässers entscheidend beeinflussen. Bei alpinen Fliessgewässern spielt zudem der Schmelzwasseranteil aus Schnee und Eis eine Rolle.

Alle diese Faktoren sind sowohl kurz- wie auch langfristigen Schwankungen unterworfen, was sich auf die Dynamik des Wärmehaushaltes auswirkt. Die Wassertemperatur an einer bestimmten Stelle hängt daher von der Summe der einzelnen Faktoren und der Dauer ihrer Einwirkung im obenliegenden Flusslauf bzw. im Einzugsgebiet ab.

Die Ausgangstemperatur eines Gewässers ergibt sich aus der Grundwassertemperatur im Quellgebiet und diese wiederum aus der Höhenlage. Ausser bei Thermalquellen entspricht die Quellwassertemperatur in der Regel der Jahresmitteltemperatur der Luft am betreffenden Ort und ist ziemlich konstant. Fliessgewäs-

ser in tieferen Lagen werden wärmer und weisen grössere jährliche Schwankungen auf.

Seen im Einzugsgebiet wirken sich insbesondere auf kurzfristige Temperaturschwankungen dämpfend aus. Auf der anderen Seite bietet ein See eine grosse Wasserfläche, die von der Sonneneinstrahlung erwärmt werden kann. Weil im Sommer aus dem temperaturschichteten See meist das obere, warme Wasser abfließt, liegen die Temperaturen im Seeausfluss höher als im Seeeinfluss.

Bei niedrigem Wasserstand erwärmt sich das Wasser in Bächen und Flüssen schneller als bei tiefem Wasser, da sich bei geringem Abfluss das spärlich abfließende Wasser auf der ganzen Breite des Profils verteilt und damit eine grössere Fläche für den Wärmeaustausch bildet.

Die Tagesschwankung der Gewässertemperatur zeigt bei sonnigem Wetter eine markante, meist sinusförmige Periodizität, wobei der Unterschied zwischen Tages- und Nachttemperatur mehrere Grade betragen kann (vgl. Fig. 9-4). Die Minima werden in den frühen Morgenstunden, die Maxima im Lauf des Nachmittags gemessen.

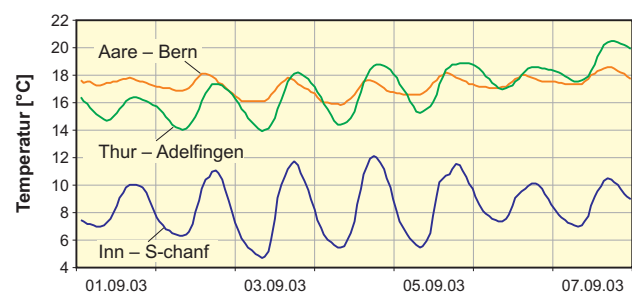


Fig. 9-4: Tagesschwankungen der Wassertemperatur (Aare – Bern durch Seeeinfluss gedämpft) (Daten: BWG 2004).

Die saisonalen Schwankungen weisen ebenfalls eine deutliche Sinusform auf, im Mittelland ausgeprägter als in den Alpen. Sie ergeben sich aus dem Jahresgang der Sonneneinstrahlung. Kurzzeitige meteorologische Einflüsse wie der Durchzug von Kalt- und Warmfronten oder das Auftreten von Nord- und Südströmungen erscheinen auf der Temperaturkurve deutlich als Abweichung vom sinusförmigen saisonalen Verlauf.

Die längerfristigen Zeitreihen der Wassertemperaturen ausgewählter BWG-Stationen zeigen seit 1954 eine

Temperaturzunahme (vgl. Fig. 9-5). Im Rhein bei Basel beispielsweise beträgt sie mehr als 2 °C. In den letzten 16 Jahren (1988–2003) lagen dort die Jahresmittelwerte – unabhängig von der Wasserführung – bei über 12 °C und damit deutlich höher als in den Jahren zuvor. Im Jahr 2003 lag der Jahresmittelwert erstmals und sogar deutlich über 13 °C. Diese Veränderung konnte auch bei Gewässern im Mittelland festgestellt werden. Mehrere Einflüsse wie Klimaänderung, Einleitungen von erwärmtem Wasser, Veränderungen im Abflussregime (beispielsweise durch Stauhaltungen und Drainagen) tragen zu dieser Entwicklung bei.

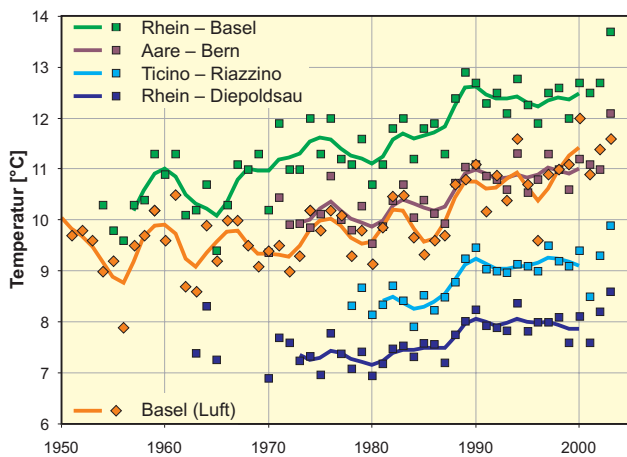


Fig. 9-5: Veränderung der Wassertemperatur an ausgewählten BWG-Messstationen seit 1950: Jahresmittelwerte (Punkte) und gleitendes Mittel über sieben Jahre (Linien). Zum Vergleich ist der Verlauf der Lufttemperatur in Basel dargestellt (nach BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

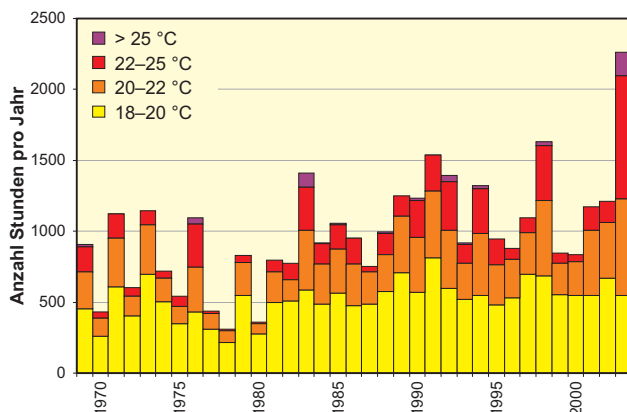


Fig. 9-6: Zeitdauer der Wassertemperaturen über 18 °C in der Thur bei Andelfingen (Anzahl Stunden pro Jahr). Die gewählten Temperaturgrenzen entsprechen den Empfindlichkeitsbereichen bestimmter Fischarten (nach BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

Auch die Thur bei Andelfingen – mit einem mittelländischen Einzugsgebiet ohne zusätzliche Einflüsse durch oberliegende Seen oder Gletscher – zeigt eine deutliche Zunahme der Perioden mit hohen Temperaturen (vgl. Fig. 9-6). Auffallend ist, dass sich die Zeitdauer mit Wassertemperaturen über 20 °C im Jahr 2003 gegenüber den trockenheissen Jahren 1976 und 1983 verdoppelt bis vervierfacht hat.

Durchschnittlich erfolgt der Temperaturanstieg in den Monaten April/Mai früher als in den 1970er Jahren, was zu einer Verlängerung der Sommerperiode mit hohen Wassertemperaturen geführt hat.

9.2.2 Phosphor

Phosphor ist das wichtigste wachstumslimitierende Element. Er kommt in der Natur in gelöster oder fester Form vor und stammt entweder aus organischen oder anorganischen Quellen. Orthophosphat stellt die für Pflanzen physiologisch direkt wirksame Phosphorkomponente dar. Eine möglichst niedrige Konzentration ist vor allem in den Seezuflüssen anzustreben, um eine zunehmende Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) der Seen zu vermeiden (vgl. Abschnitt 6.4.1). Phosphat gelangt diffus aus der Landwirtschaft und punktuell über Abwassereinleitungen und Regenüberlaufbecken in die Gewässer.

Die Phosphatkonzentration hat in den letzten Jahren abgenommen (vgl. Abschnitt 6.4.2), einerseits als Folge des Ausbaus der Abwasserreinigungsanlagen insbesondere durch die Phosphatfällung, und andererseits durch das Inkrafttreten des Phosphatverbotes für Textilwaschmittel im Jahre 1986. Heute stammt der größte Teil der Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft, obschon auch in diesem Bereich Ansätze zur Ökologisierung erkennbar sind. Ein besonderes Problem stellt die Phosphorakkumulation in vielen Böden des Mittellands dar. Da Phosphor im Boden nicht immer permanent gebunden wird (abhängig vom Bodentyp und von der Bodenhydrologie), muss auch nach weiteren in der Landwirtschaft ergriffenen Massnahmen mit einem mittel- bis längerfristigen Phosphoreintrag gerechnet werden, der zur Eutrophierung führen kann.

In der Figur 9-7 ist sichtbar, dass sowohl die Konzentrationen als auch die Schwankungen des Phosphors in Fließgewässern unterhalb von Seen abgenommen haben. Mit der Abnahme der Phosphorgehalte nahmen die Algenbiomasse und damit auch der Stoffumsatz in diesen Seen ab.

9.2.3 Nitrat

Nitrat ist ein guter Indikator für Belastungen aus der Landwirtschaft und aus gereinigten Siedlungsabwässern. Die Nitratgehalte haben nach einer Periode der Zunahme, die bis Ende 1980er Jahre reichte, in den letzten 10 Jahren an den meisten Stellen wieder abge-

nommen (vgl. Fig. 9-8). Dies ist eine Folge der Anstrengungen zur Ökologisierung der Landwirtschaft aber auch der Reduktion des NO_x -Ausstosses durch die Einführung des Katalysators bei den Benzinmotoren.

Figur 9-9 zeigt die Veränderung ausgewählter chemischer Parameter in den Jahren 1976–2000. Die Karte

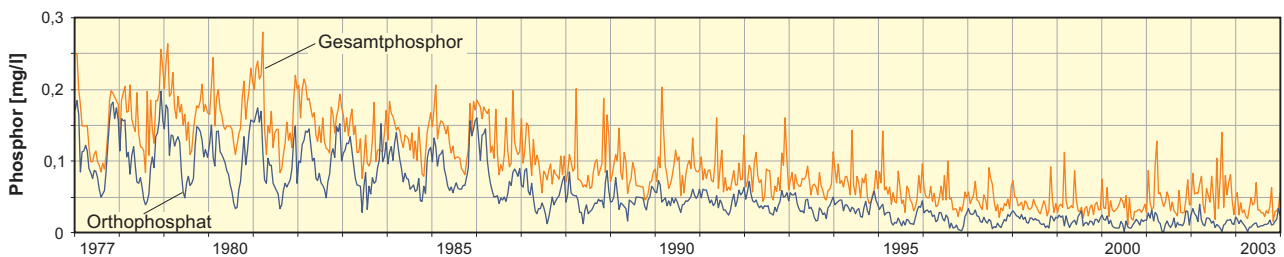


Fig. 9-7: Ganglinie Phosphorkonzentration Rhein – Village-Neuf/Weil (nach JAKOB et al. 2004).

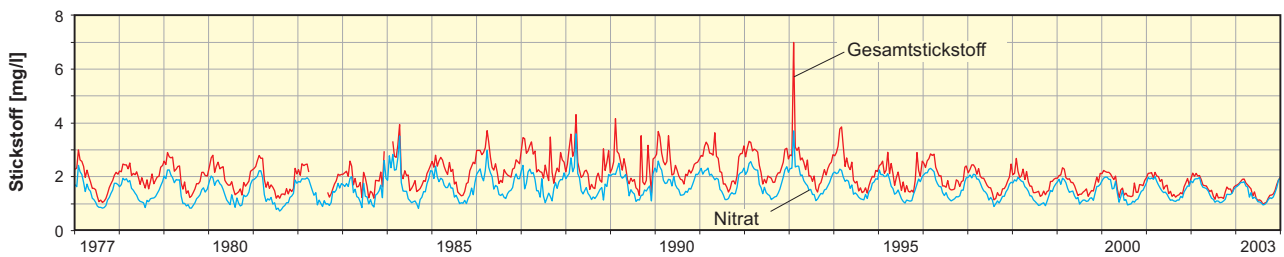


Fig. 9-8: Ganglinie Stickstoffkonzentration Rhein – Village-Neuf/Weil (nach JAKOB et al. 2004).



Fig. 9-9: Ausschnitt aus der HADES-Karte «Veränderung ausgewählter chemischer Parameter in Fließgewässern und Seen 1976–2000» (JAKOB et al. 2004).

stammt aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) und stellt die klassierten mittleren Stoffkonzentrationen verschiedener Zeitperioden dar.

9.2.4 Sauerstoff

Für die Lebewesen im Gewässer bedeutet eine hohe Temperatur speziell dann eine Stresssituation, wenn gleichzeitig der Sauerstoffgehalt reduziert ist. Bei der Station Thur – Andelfingen zeigen die Differenzen der Perioden 1986–1990 und 1996–2000 eine deutliche Zunahme der Sauerstoffkonzentration speziell in den Wintermonaten (vgl. Fig. 9-10).

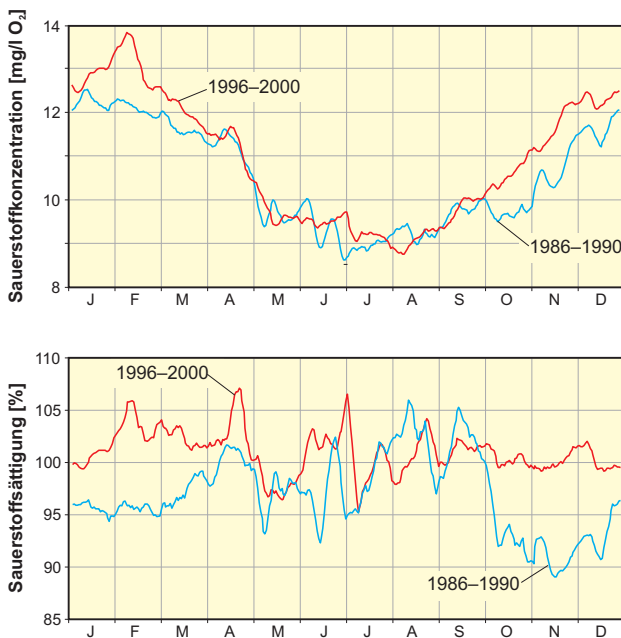


Fig. 9-10: Mittlere gemessene Sauerstoffkonzentrationen respektive berechnete Sauerstoffsättigungen in der Thur bei Andelfingen. Dargestellt sind Tagesmittelwerte, über jeweils sieben Tage gleitend gemittelt (nach JAKOB et al. 2002).

Mit der Berechnung der Sauerstoffsättigung wird der von der Temperatur abhängige Anteil der Sauerstoffgehalte im Jahresverlauf eliminiert. Im Durchschnitt erhöhte sich die Sauerstoffsättigung zwischen den Perioden 1986–1990 und 1996–2000 von 97 % auf 101 %. In der ersten Periode lag die Sättigung noch während längerer Zeitperioden deutlich unter 100 %. Ende der 1990er Jahre war die Situation speziell in den Wintermonaten deutlich besser. Dies ist hauptsächlich auf Massnahmen im Abwasserbereich zurückzuführen. So verringerte sich beispielsweise auch die Orthophos-

phatfracht zwischen den beiden Perioden im Mittel von 5,3 g P/s (1986–1990) auf 2,8 g P/s (1996–2000). In den von NADUF untersuchten Mittellandgewässern, bei denen in diesen Perioden Temperaturerhöhungen feststellbar sind, konnten keine ausgeprägten Sauerstoffmangelzustände beobachtet werden. Im Gegensatz dazu sind insbesondere in stehenden Gewässern kurzfristig auch Übersättigungen von bis zu 200 % möglich, wenn durch die Photosyntheseaktivität in einem Gewässer Sauerstoff produziert wird. In Fließgewässern gast – je nach Turbulenzen – der überschüssige Sauerstoff rascher aus.

Die ausserordentliche Strahlungsintensität und die Rekordtemperaturen im August 2003 spiegeln sich im Sauerstoffgehalt der Gewässer wider. Die Variation in der Sauerstoffsättigung bei NADUF-Stationen unterhalb der Seen hat während der Hitzeperiode ein Ausmass erreicht, das seit Beginn der Messreihen noch nie beobachtet wurde; auch nicht im Trockenjahr 1976 (vgl. Fig. 9-11). Verstärkt wird dieser Effekt durch langsam fließendes Flusswasser, das dem Ausbilden eines Gleichgewichtszustandes im Austausch mit atmosphärischem Sauerstoff nicht förderlich ist. Wesentlich sind hier Länge und Morphologie der Fließstrecke vom Seeausfluss bis zur Messstation. Auf der Strecke zwischen dem Bieler See und der Messstation an der Aare bei Brugg beispielsweise befinden sich neun grössere Staustufen, in denen die Aare langsam fließt. Die Reuss ist bis zur Messstation bei Mellingen ebenfalls durch Staustufen beeinflusst, aber die vier Staustrecken sind im Vergleich zur gesamten Fließstrecke von geringerer Bedeutung. Die Messstelle Brugg zeichnete sich im Hitzesommer 2003 durch besonders tiefe Sauerstoffwerte während der Nacht aus (< 80 %), die Messstelle Mellingen durch besonders hohe Werte tagsüber (> 170 %).

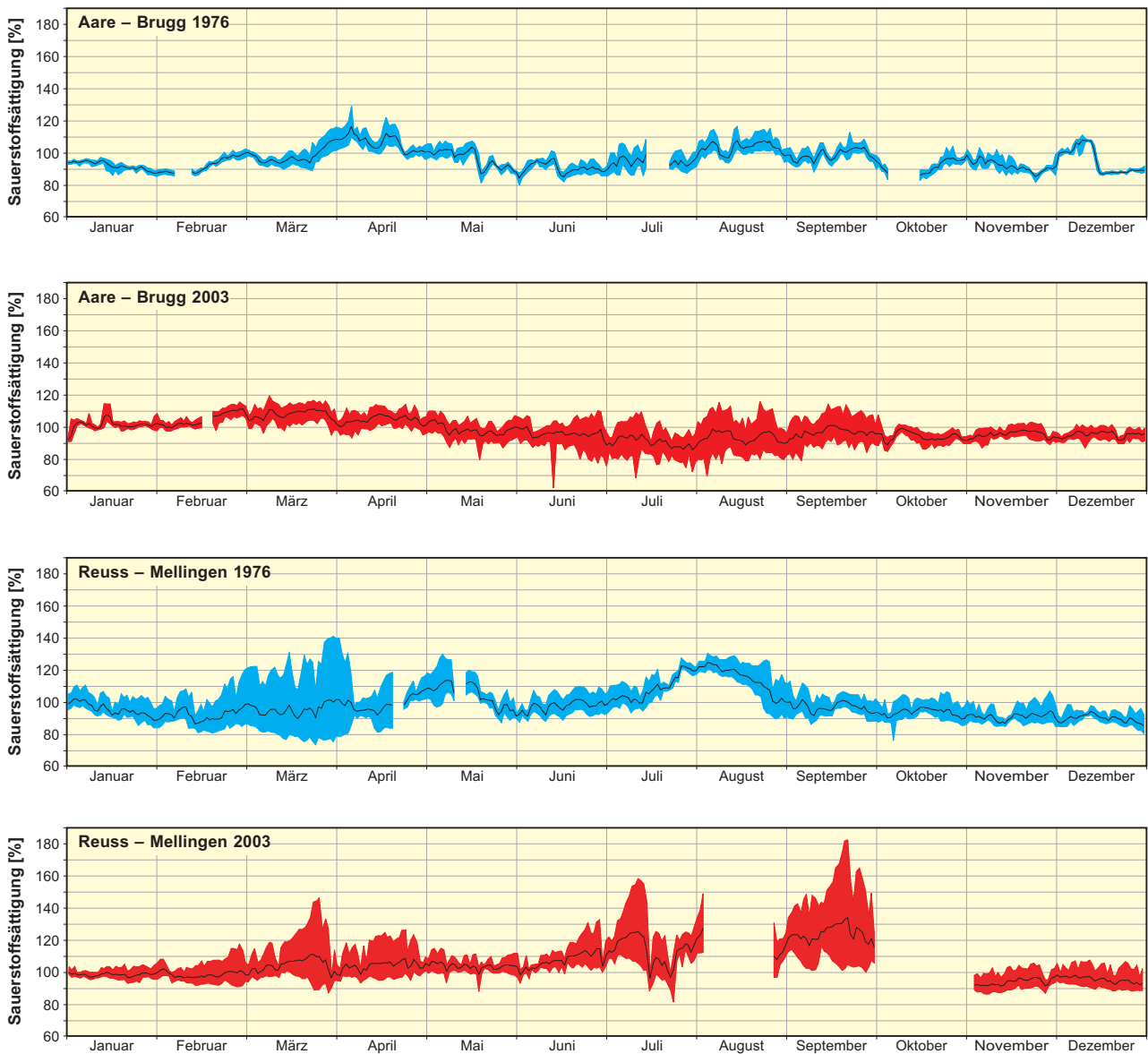


Fig. 9-11: Sauerstoffsättigung der Aare bei Brugg und der Reuss bei Mellingen in den Trockenjahren 1976 und 2003. Tagesmittel und Variation zwischen Minimal- und Maximalwerten (nach BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

10 Wasserhaushalt

Kennziffern

Wasserhaushalt der Schweiz (Periode 1961–1990)

Quelle: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a

Kanton	Niederschlag P [mm/a]	Abfluss R [mm/a]	Verdunstung E [mm/a]	Speicher δS [mm/a]	unterirdischer Zu- / Abfluss I [mm/a]	Anteil am Ge- samtanfluss CH [%]
Aargau	1086	521	565	–	–	1,8
Appenzell Innerrhoden	1891	1229	480	0	–182	0,5
Appenzell Ausserrhoden	1596	1059	537	–	–	0,6
Bern	1484	1028	465	–2	7	15,0
Basel-Landschaft	988	455	533	–	–	0,6
Basel-Stadt	942	393	549	–	–	< 0,1
Fribourg	1242	720	522	–	–	2,9
Genève	981	363	618	–	–	0,3
Glarus	1971	1617	417	–6	57	2,7
Graubünden	1443	1099	346	–2	–	19,1
Jura	1181	680	501	–	–	1,4
Luzern	1318	748	547	–	–23	2,7
Neuchâtel	1339	818	521	–	–	1,6
Nidwalden	1785	1290	495	0	–	0,9
Obwalden	1781	1316	453	–1	–13	1,6
St. Gallen	1658	1156	498	0	–4	5,7
Schaffhausen	916	364	552	–	–	0,3
Solothurn	1106	570	536	–	–	1,1
Schwyz	1997	1499	498	0	–	3,3
Thurgau	1027	421	606	–	–	1,0
Ticino	1971	1474	497	0	–	10,1
Uri	2088	1711	382	–5	–	4,5
Vaud	1250	678	572	0	–	5,3
Valais	1457	1062	401	–6	–	13,6
Zug	1447	872	575	–	–	0,5
Zürich	1221	662	559	–	–	2,8
Schweiz	1458	991	469	–2	0	100,0

10.1 Wasserkreislauf

Der globale Wasserkreislauf, der Weg des Wassers aus den Ozeanen über die Atmosphäre auf die Kontinente und wieder zurück, ist untrennbar mit den regionalen Wasserkreisläufen über den Landflächen verknüpft. Er setzt sich aus den Bilanzgliedern Niederschlag (P), Abfluss (R), Verdunstung (E), Speicheränderung (δS) und unterirdischen Zu- oder Abflüssen (I) zusammen.

Als Ausgangspunkt des Wasserkreislaufs wird oft die Verdunstung gewählt (vgl. Kap. 4). Wasser kann direkt von Wasser- und Landoberflächen verdunsten oder über die Transpiration von Pflanzen aus dem Boden und dem Grundwasser in die Atmosphäre gelangen. Kondensation und Resublimation des dampfförmigen Wassers (vgl. Fig. 10-1) ermöglicht die Wolken- oder Nebelbildung. Im Durchschnitt verweilt ein Wassermolekül rund 9 Tage in der Atmosphäre (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990), bevor es als Niederschlagswasser,

Hagel, Schnee, Rauheif oder Nebelniederschlag (vgl. Kap. 2 und 3) zur Erdoberfläche zurückgelangt. Hier tritt das Wasser in Fließgewässern (vgl. Kap. 5), Seen (vgl. Kap. 6), als Schnee und in Gletschern (vgl. Kap. 3) sowie im Grundwasser (vgl. Kap. 7) in Erscheinung.

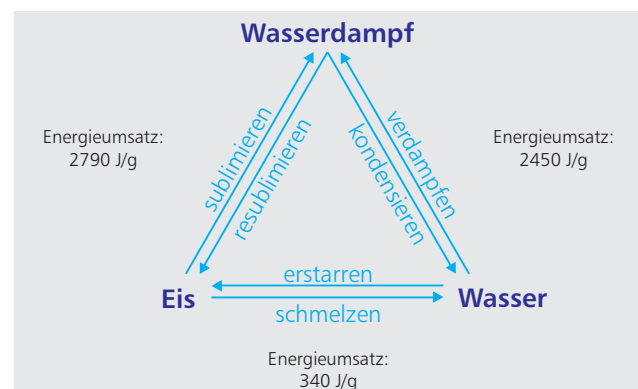


Fig. 10-1: Aggregatzustände des Wassers.

Auf seinem Weg nimmt Wasser feste und gelöste Stoffe auf. Die erosive Wirkung des Wassers prägt die Erdoberfläche z.B. durch den Transport und die Akkumulation von Feststoffen (vgl. Kap. 8) und zwingt zum dauernden Unterhalt der wasserbaulichen Einrichtungen (vgl. Kap. 5). Für viele Nutzungen hat die Qualität des Wassers oberste Priorität (vgl. Kap. 6, 7 und 9). Spätestens mit der erneuten Verdunstung werden alle Stoffe wieder zurückgelassen – der Wasserkreislauf beginnt von vorn.



Fig. 10-2: Wasserkreislauf und Wasserhaushalt.

Die Isotope des Wassermoleküls (Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium) eignen sich als natürliche Tracer für die Untersuchung hydrologischer Prozesse – z.B. für die Bestimmung der Herkunft bzw. des Alters von Grundwasser (vgl. Kap. 10.5).

10.2 Wasserhaushalt und Wasserbilanz

In der Wasserbilanz werden alle Wasserflüsse eines bestimmten Gebietes erfasst. Dabei gilt die Verdunstung als die am schwersten messbare Grösse und wird oft als Restglied berechnet. Durch eine hydrologische «Neuinterpretation» der Wasserbilanz können heute die Gebietsniederschläge in den Gebirgsräumen der Schweiz genauer bestimmt werden (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

Der Wasserhaushalt beschreibt den Wasserkreislauf in einem bestimmten Gebiet und für einen bestimmten Zeitraum. Er gibt einen Überblick über die langfristig verfügbaren Wasserressourcen. Die Einteilung der Schweiz in 287 Bilanzierungsgebiete (Einzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 100 und 150 km²) ermöglicht die detaillierte räumliche Erfassung des Wasserhaushaltes. Zur Bestimmung des Wasserhaushaltes von Flussgebieten, Kantonen (vgl. Kennziffern Kap. 10) und letztlich der gesamten Schweiz werden die Bilanzierungsgebiete zu grösseren Raumeinheiten aggregiert (vgl. SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

10.2.1 Klassische Wasserbilanz

Die Wasserbilanzgleichung ($P = R + E + \delta S - I$) kann nach der Verdunstung aufgelöst werden:

$$E = P - R - \delta S + I$$

mit: E	Gebietsverdunstung [mm/a]
P	Gebietsniederschlag [mm/a]
R	Gebietsabfluss [mm/a]
δS	Speicheränderung der Gletscher [mm/a]
I	Natürliche unterirdische Zu- und Abflüsse [mm/a]

Berechnet man die Verdunstung mit dieser Formel, so ergeben sich oftmals unrealistische Werte, was zum grossen Teil auf die lückenhafte Niederschlagsmessung, auf die Fehler bei der Erfassung der Niederschläge im Gebirge und schliesslich auf die daran anschliessende Interpolation der Punktniederschläge zurückzuführen ist (vgl. Kap. 2). Figur 10-3 zeigt die mit der Wasserbilanzgleichung berechnete Gebietsverdunstung im Einzugsgebiet des Rheins bis Felsberg. Es ergeben

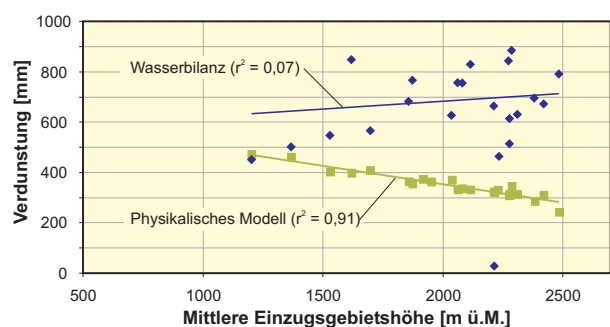


Fig. 10-3: Vergleich der aus der Wasserbilanz berechneten Verdunstung der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet des Rheins bis Felsberg, basierend auf gemessenen und regionalisierten Niederschlägen (Daten: KIRCHHOFFER & SEVRUK 1992) mit den mit einem physikalischen Modell bestimmten Werten (Daten: MENZEL 1997) (nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

sich unplausibel, da stark streuende und mit zunehmender Höhe steigende Verdunstungswerte. Zum Vergleich ist die realistischerweise zu erwartende, mit der Höhe abnehmende Verdunstung derselben Gebiete, berechnet mit einem physikalischen Modell (MENZEL 1997), dargestellt.

10.2.2 Hydrologische Wasserbilanz

Ausgehend von der in Abschnitt 10.2.1 geschilderten Problematik greifen SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002b) den Vorschlag von LANG (1985) zur Bestimmung der Niederschläge im Alpenraum auf. Ihre hydrologische «Neuinterpretation» der Wasserbilanz geht davon aus, dass nicht die Verdunstung, sondern die im Gebirge gemessenen Niederschläge und die daraus abgeleiteten Gebietsniederschläge die grösste Fehlerquelle darstellen, zumal heute verlässliche Verdunstungswerte für alle Gebiete vorliegen (vgl. Kap. 4.4) und die Speicheränderungen einzelner repräsentativer Gletscher erforscht sind (vgl. Kap. 3.7).

«Hydrologisch» bedeutet, dass sowohl die Wasserhaushaltskomponenten in einem Bilanzierungsgebiet als auch die Wasserbilanzen mehrerer Bilanzierungsgebiete aufeinander abgestimmt sind (vgl. Fig. 10-4). Grösste Bedeutung kommt der Genauigkeit der Abflussdaten zu. In Gebieten mit verlässlichen Abflussdaten kann die Wasserbilanz direkt bestimmt werden. Abflüsse aus Gebieten mit weniger plausiblen Daten müssen in einem Prozess des regionalen Abgleichs abgeschätzt werden. Erstmals stehen damit alle Wasserhaushaltskomponenten flächendeckend für die ganze Schweiz zur Verfügung (vgl. SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

10.2.3 Wasserbilanz der Schweiz

Der in Abschnitt 10.2.2 vorgestellte hydrologische Ansatz ermöglicht die Darstellung der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz sowohl für die gesamte Schweiz (vgl. Fig. 10-5) als auch für jedes der 287 Bilanzierungsgebiete. Als Beispiel zeigt Figur 5-32 den von SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002a) berechneten Gebietsabfluss der Bilanzierungsgebiete.

Die Verdunstungsanteile am Niederschlag erreichen im Mittelland und Jura Werte um 50 % (vgl. Fig. 10-6); sie können aber im Einzelfall bis zu 70 % des Gebietsniederschlags ausmachen. Die absoluten Werte der Gebietsverdunstung liegen in diesen Regionen zwischen 500 und 650 mm/a mit Maximalwerten um 720 mm pro Jahr. Im Alpenraum sind die Verdunstungsanteile

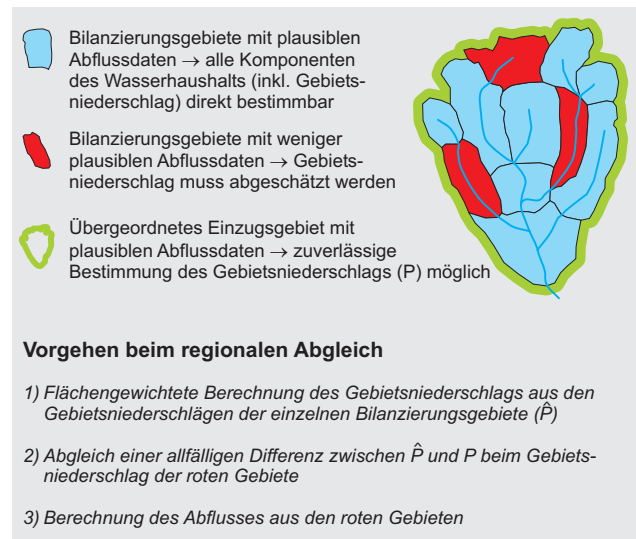


Fig. 10-4: Berechnung der Wasserbilanz der Bilanzierungsgebiete mit regionalem Abgleich (nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

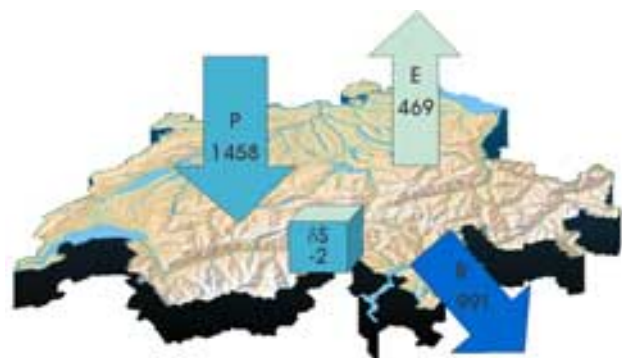


Fig. 10-5: Wasserbilanz der Schweiz: jährliche Wasserhöhen in mm (Periode 1961–1990) (Daten: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

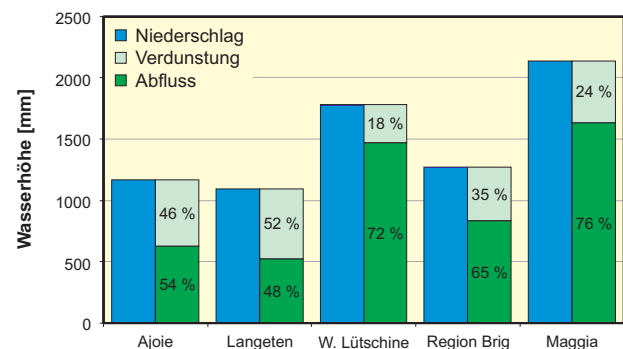


Fig. 10-6: Charakteristische mittlere Wasserbilanzen von Bilanzierungsgebieten entlang eines Profils Jura – Wallis – Tessin (Periode 1961–1990) (nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

am Gebietsniederschlag sehr klein. In hochalpinen Bilanzierungsgebieten gelangen bis zu 90 % der Niederschläge zum Abfluss (SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

In Figur 10-7 sind die Schwankungen der Wasserhaushaltselemente Niederschlag und Verdunstung entlang zweier Nord-Süd-Profile darstellt. Aus der Differenz resultiert, unter Vernachlässigung der unterirdischen Zu- oder Abflüsse und der Speicheränderung, der Abfluss.

Für andere Fragestellungen kann der Wasserhaushalt grösserer Einzugsgebiete oder der Kantone berechnet werden. Die Beiträge der Kantone zum Gesamtabfluss der Schweiz reichen von weniger als 0,1 % (Kt. Basel-Stadt) bis 19,1 % (Kt. Graubünden) (vgl. Kennziffern Kap. 10). In diesen Zahlen widerspiegeln sich natürlich auch die unterschiedlichen Kantonsflächen. Um deren Einfluss auszuschalten, wurde für jeden Kanton ein «Effizienzfaktor» berechnet, der sich aus dem Verhältnis zwischen dem Abflussbeitrag eines Kantons und

dessen Flächenanteil ergibt. In dieser Betrachtungsweise erreicht der Kanton Uri (Anteil am Gesamtabfluss 4,5 %) einen Faktor von 1,7, gefolgt von Glarus mit einem Faktor von 1,6 sowie Schwyz und Tessin mit 1,5. Im Kanton Uri wird also dank der hohen Niederschläge 1,7 mal mehr Abfluss erzeugt als aufgrund des Flächenanteils an der Schweiz von 2,6 % zu erwarten wäre. In den Kantonen Thurgau, Schaffhausen und Genf ist die «Abflusseffizienz» – wegen der kleinen Niederschlags- und der hohen Verdunstungswerte – mit einem Wert um 0,4 vergleichsweise gering. Die Angabe der Wasserhöhe in mm/a (vgl. Kennziffern Kap. 10) ermöglicht ebenfalls einen direkten, von der Kantonsfläche unabhängigen Vergleich der Wasserbilanzen.

Figur 10-8 zeigt das Spektrum der Wasserbilanzen in den Kantonen auf. Wie das Beispiel des Kantons Appenzell Innerrhoden verdeutlicht, kann der Anteil unterirdisch ab- oder zufließenden Wassers in Karstge-

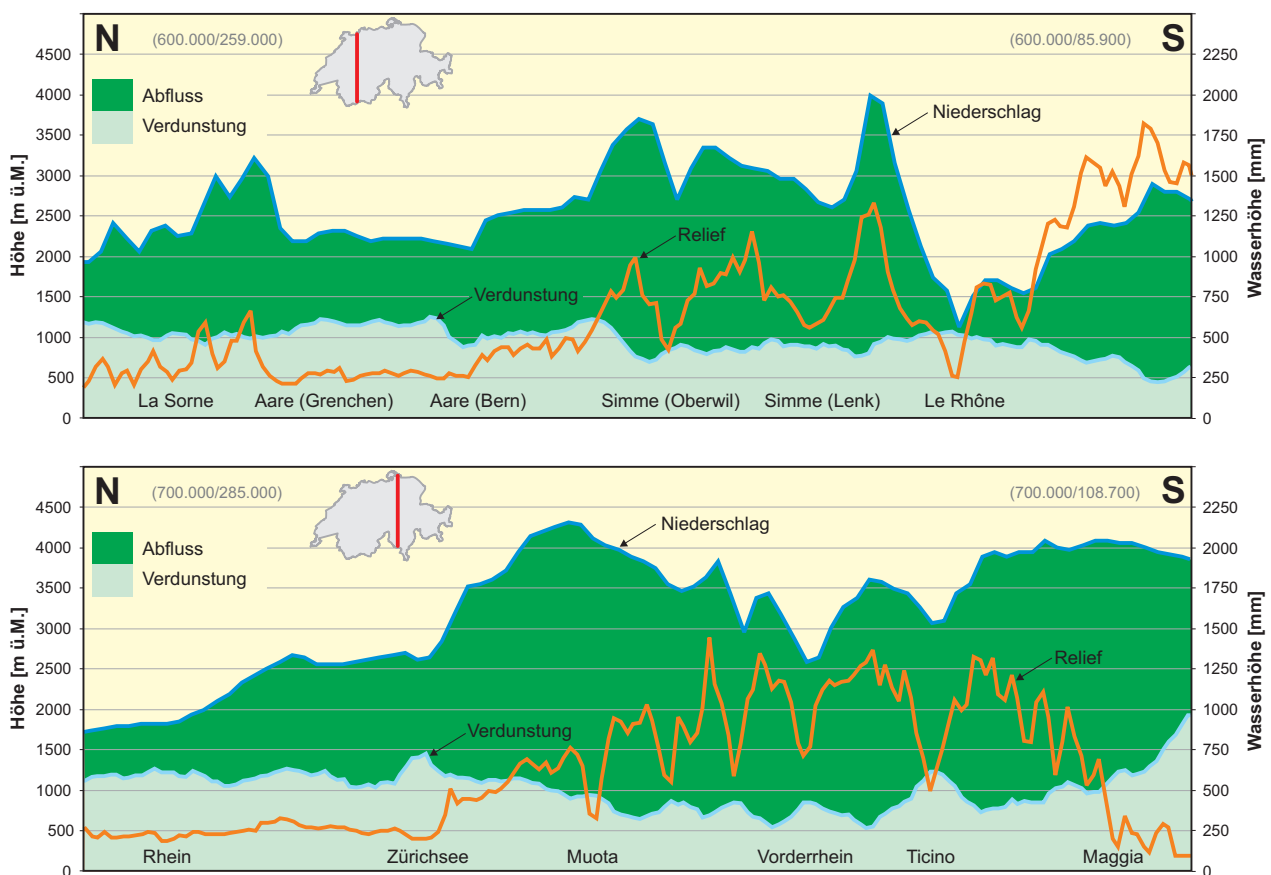


Fig. 10-7: Veränderung von Niederschlag und Verdunstung entlang zweier Nord-Süd-Profile (Jahresniederschlagssummen der Periode 1971–1990 aus Figur 2-14 und jährliche aktuelle Verdunstungshöhen der Periode 1973–1992 aus Figur 4-9; Daten: SCHWARB et al. 2001a; MENZEL et al. 1999).

bieten beträchtlich sein und darf nicht ausser Acht gelassen werden. Der Anteil der Speicheränderung an der mittleren jährlichen Bilanz ist demgegenüber im regionalen – aber nicht unbedingt im lokalen – Massstab unbedeutend (maximal –6 mm, Kt. Glarus und Wallis). Trotzdem sind die in Seen, im Grundwasser und in Gletschern gespeicherten Wassermengen beträchtlich (vgl. Tab. 10-1). Allein die im Gletschereis gespeicherten rund 67 km³ Wasser entsprechen einer 1600 mm hohen Wasserschicht über der gesamten Fläche der Schweiz, was ungefähr einem Jahresniederschlag gleichkommt. Zudem beeinflusst die temporäre Speicherung von Wasser im Schnee massgeblich das Abflussregime der Flüsse (vgl. Abschnitt 5.3.2) und trägt zur «Wasserschlossfunktion» der Alpen bei.

Speicher	Wassermenge [km ³]	Wasserhöhe [mm]	Anteil [%]
Künstliche (Stau-) Seen	4	97	1,1
Grundwasser	50	1210	14,1
Gletscher	67	1610	18,7
Natürliche Seen (inkl. Grenzseen)	235	5690	66,1
Total	356	8607	100,0

Tab. 10-1: Wasserreserven der Schweiz (Quelle: MAISCH et al. 1999).

10.3 Die Alpen als Wasserschloss Europas

Hohe Niederschläge, geringe Verdunstung und die temporäre Rücklage von Wasser in Form von Schnee und Eis lassen Gebirgsräume zu «Wasserschlossern» für die umliegenden Tiefländer werden. Die hydrologische Fernwirkung der Alpen ist von VIVROLI & WEINGARTNER (2004) quantifiziert worden.

Die Alpen verdanken ihren Titel als «Wasserschloss Europas» dem Umstand, dass hohe Niederschläge einer tiefen Verdunstung gegenüberstehen. Dadurch erzeugt der Alpenraum deutlich mehr Abfluss als die umliegenden Gebiete (vgl. Tab. 10-2).

	Erde	Landflächen	Europa	Alpen
Niederschlag	973	746	780	1460
Verdunstung	973	480	510	480
Abfluss	–	266	270	980

Tab. 10-2: Mittlere Wasserbilanzen in mm (Quellen: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990, MOUNTAIN AGENDA 1998).

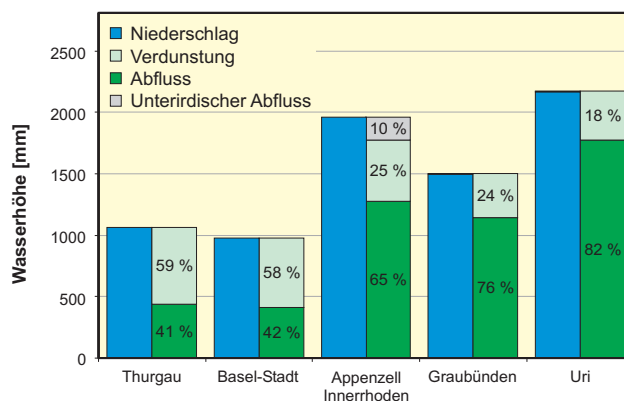


Fig. 10-8: Wasserbilanzen ausgewählter Kantone (Periode 1961–1990) (Daten: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002a).

Entscheidend für die Wasserschlossfunktion ist zudem die saisonale Abflussvariabilität in den Gebirgsräumen. Die winterlichen Niederschläge werden in Form von Schnee und Eis gespeichert. Dieses Wasser fliesst erst im Frühling und Sommer ab, genau dann, wenn das Wasserdargebot im Vorland klein und der Wasserbedarf der Landwirtschaft gross sind. Die Tiefländer der Alpenflüsse Rhein, Rhone, Po und Donau profitieren daher vor allem in den Sommermonaten vom Abfluss aus den Alpen.

Um die hydrologische Fernwirkung der Alpen zu quantifizieren, wurde der Anteil des Abflusses, der aus dem Alpenraum stammt, auf monatlicher Basis bestimmt. Einen Anteil von 100 % weisen die Hauptflüsse beim Verlassen des Alpenraumes auf. Durch die Tieflandzuflüsse wird der alpine Anteil verringert; durch Zubringer mit alpinem Regime kann er auch wieder erhöht

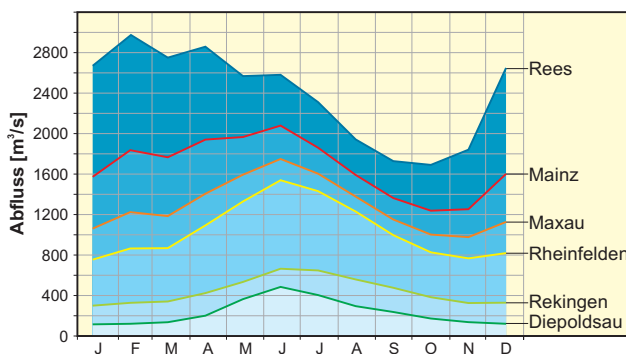


Fig. 10-9: Mittlere monatliche Abflussmengen des Rheins zwischen Diepoldsau (CH) und Rees (D) (nach VIVROLI 2001). Rees liegt an der deutsch-niederländischen Grenze und charakterisiert das Gesamt-einzugsgebiet des Rheins.

werden. Figur 10-9 zeigt die Zusammensetzung der mittleren Monatsabflüsse des Rheins. Der Alpenrhein (Messstation Diepoldsau) und die Aare (Zufluss vor der Messstation Rheinfelden) entwässern den alpinen Teil des Rheineinzugsgebiets. Dieser alpine Teil umfasst flächenmässig nur 15 % des gesamten Rheineinzugsgebietes; er trägt aber durchschnittlich 34 % zum Gesamtabfluss in Rees bei (vgl. Tab. 10-3 und Tab 10-4). In den Sommermonaten erhöht sich dieser Betrag auf bis zu 52 % (durchschnittlicher alpiner Beitrag im Juni) (VIVIROLI & WEINGARTNER 2004).

Abflussmessstation	Distanz ab Quelle [km]	Mittlere Jahresabflussmenge [m ³ /s]	Mittlerer Beitrag der Alpen zum Jahresabfluss [%]
Diepoldsau (CH)	150	223	100
Rekingen (CH)	298	443	49
Rheinfelden (CH)	356	1043	74
Maxau (D)	568	1288	60
Mainz (D)	704	1672	47
Rees (D)	1043	2385	34

Tab. 10-3: Jahresabflüsse des Rheins und Beitrag des alpinen Einzugsgebiets am Gesamtabfluss (Quelle: VIVIROLI & WEINGARTNER 2004).

Wie Tabelle 10-4 verdeutlicht, liefern die alpinen Regionen des Rheingebiets 2,3 mal soviel Wasser als aufgrund ihres Flächenanteils zu erwarten wäre (Überproportionalität). Tabelle 10-4 gibt auch einen Überblick über die alpinen Anteile am Abfluss der anderen grossen Alpenflüsse. In allen Flussgebieten sind diese Beiträge in den Sommermonaten Juli und August noch wesentlich höher. Das Spektrum reicht hier von 36 % (Donau) bis 80 % (Po).

Strom	Mittlerer Beitrag der Alpen zum Gesamtabfluss [%]	Flächenanteil des Alpenraums [%]	Überproportionalität des Alpenraums
Rhein	34	15	2,3
Rhone	41	23	1,8
Po	53	35	1,5
Donau	26	10	2,6

Tab. 10-4: Beitrag der Alpen zum Gesamtabfluss von Rhein, Rhone, Po und Donau (Quelle: VIVIROLI & WEINGARTNER 2004).

10.4 Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten

Die Periode 1961–1990 weist höhere Niederschlags- und Verdunstungswerte auf als der grössere Teil der übergreifenden Periodenmittel im 20. Jahrhundert. Einzig das hochgelegene Inngebiet (mittlere Höhe um 1800 m ü.M.) macht davon eine Ausnahme.

In Figur 10-10 werden am Beispiel des Rheineinzugsgebiets die Mittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten der 30jährigen Periode 1961–1990 (Standardperiode der WMO) mit den Mittelwerten der übergreifenden Periodenmittel 1901–1930, 1902–1931, ..., 1971–2000 verglichen. Dabei lassen sich interessante Tendenzen ablesen:

- Die Periodenmittel der Verdunstung nahmen, wohl hauptsächlich infolge des Temperaturanstiegs, im Laufe des 20. Jahrhunderts kontinuierlich zu; Perioden vor der Standardperiode 1961–1990 weisen deshalb durchwegs kleinere, Perioden nach 1961–1990 durchwegs grössere Werte als die Standardperiode auf.
- Der mittlere Gebietsniederschlag blieb zu Beginn des letzten Jahrhunderts relativ konstant mit Werten um 96 % des Periodenmittels 1961–1990. Bemerkenswert ist die markante Zunahme der Gebietsniederschläge ab der Periode 1946–1975. Seit der Periode 1961–1990 scheint sich der Niederschlag wieder auf einem nun höheren Niveau einzupendeln.
- Im Gebietsabfluss kommen primär die Effekte der zeitlichen Schwankungen des Niederschlags zum Tragen. Es resultiert in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Abnahme, gefolgt von einer Zunahme und einer anschliessenden Nivellierung analog dem Niederschlagsverlauf.

In den anderen Flussgebieten der Schweiz sind – mit Ausnahme des Inngebietes – ähnliche zeitliche Muster erkennbar. Erwähnenswert ist die markante Zunahme der mittleren Gebietsverdunstung beim Ticino mit Werten um 360 mm/a zu Beginn des Jahrhunderts und einem Wert von 485 mm/a für die Periode 1961–1990.

Im Inngebiet dagegen war die mittlere Gebietsverdunstung zu Beginn und wiederum am Ende des 20. Jahrhunderts systematisch höher als in der Standardperiode 1961–1990; sie zeigt also einen u-förmigen zeitlichen Verlauf. Die mittleren Gebietsniederschläge unterliegen geringeren zeitlichen Schwankungen als in den anderen Flussgebieten; der für das Rheingebiet

dokumentierte Anstieg des Niederschlags in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist hier nicht zu beobachten.

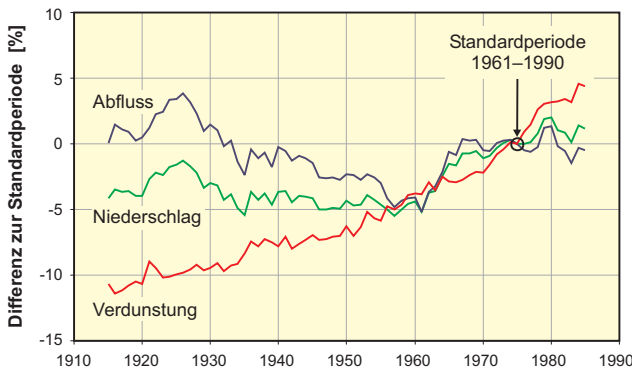


Fig. 10-10: Vergleich der übergreifenden 30jährigen Periodenmittel (1901–1930, 1902–1931, ..., 1971–2000) der Wasserhaushaltskomponenten des schweizerischen Rheingebiets mit den Werten der Standardperiode 1961–1990 (nach SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002b).

10.5 Die Isotope im Wasserkreislauf

Die Isotope des Wassermoleküls werden in den Naturwissenschaften – vor allem in der Hydrologie, Hydrogeologie und Klimatologie – als natürliche Markierstoffe (Tracer) eingesetzt. Das «Nationale Netz zur Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf» (NISOT) stellt die notwendigen Vergleichsdaten und langjährigen Messreihen zur Verfügung, ohne die solche Informationen nicht gedeutet werden können.

10.5.1 Messung der Isotope im Wasserkreislauf

Die stabilen Isotope Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H) sowie das radioaktive Wasserstoff-Isotop Tritium (^3H) sind Bausteine des Wassermoleküls. Sie werden an Wasserproben in der Schweiz von unterschiedlichen Organisationen gemessen. Rund 135 Stationen, an denen solche Messungen im Niederschlagswasser, in Fließgewässern, in Seen, in Gletschern, im Schnee und im Grundwasser vorgenommen wurden, konnten durch eine Bestandaufnahme identifiziert werden (s. PARRIAUX et al. 2001 sowie www.bwg.admin.ch). Diese Messungen stellen jedoch nicht die als Referenz erforderlichen, langjährigen, landesweit verteilten Datenreihen dar. Deswegen wurde 1992 das «Nationale Netz zur Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf» (NISOT) ins Leben gerufen.

NISOT umfasst zur Zeit 21 möglichst repräsentativ über die ganze Schweiz verteilte Messstellen (s. Fig. 10-11): 11 Niederschlags-, 7 Oberflächenwasser- sowie 3 Grundwasserstationen, für welche der Anteil von Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium im Wasser gemessen wird (SCHÜRCH et al. 2003b, PARRIAUX et al. 2001, SCHOTTERER et al. 1995).

Die Niederschlagsstationen liegen in der Nähe von meteorologischen Stationen der MeteoSchweiz, wo u.a. Temperatur und Dampfdruck bestimmt werden. Für die Isotopenmessung werden monatliche Sammelproben der täglich geleerten Niederschlagsmesser verwendet. Als Fließgewässerstationen wurden Stationen des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) mit Abfluss- und Wassertemperaturmessung gewählt. Dort werden je nach örtlicher Infrastruktur entweder 28tägige, abflussproportionale Sammelproben automatisch oder pro Monat zwei Stichproben manuell entnommen. An den Grundwasserstationen (eine Quelle und zwei Förderbrunnen) werden monatliche Stichproben erhoben sowie Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und Quellschüttung bzw. Grundwasserstand ermittelt. Nach ihrer Validierung werden die Daten archiviert und dem interessierten Publikum zur Verfügung gestellt (s. www.bwg.admin.ch; s. auch «Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz», z.B. BWG 2004).



Fig. 10-11: Beobachtungsstationen NISOT (Nationales Netz zur Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf), Stand 2003 (nach SCHÜRCH et al. 2003b).

10.5.2 Messgrößen

Die Isotopenverhältnisse von Deuterium ($^2\text{H}/^1\text{H}$) und Sauerstoff-18 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) werden als Deltawert ($\delta^2\text{H}$ oder $\delta^{18}\text{O}$ [‰]) ausgedrückt, welcher die relative Abweichung einer Wasserprobe vom internationalen, auf das Ozeanwasser bezogenen Standard (VSMOW = «Vienna Standard Mean Ocean Water») in Promille beschreibt (PARRIAUX et al. 2001, ETCHÉVERRY 2002).

$$\delta^2\text{H} = \frac{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{Probe}} - (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{VSMOW}}}{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{VSMOW}}} \cdot 1000 \quad [‰]$$

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Probe}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}} \cdot 1000 \quad [‰]$$

$$(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{VSMOW}} = (155,76 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$$

$$(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}} = (2005,2 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$$

Eine negative Abweichung weist auf eine Verarmung an schweren Isotopen (^2H oder ^{18}O) hin.

Die Tritium-Konzentration wird als Tritium-Einheit (TU) angegeben. Eine Tritium-Einheit ist definiert als das Verhältnis von einem Tritiumatom auf 10^{18} Atome normalen Wasserstoffes; dies entspricht einer Aktivität von 0,119 Bq/l (1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde).

10.5.3 Darstellung ausgewählter Messreihen

Die Ursache für den «Fingerabdruck», den die Isotope von Sauerstoff und Wasserstoff in den verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufs hinterlassen, liegt vor allem in der Isotopenfraktionierung während der Entstehung von Niederschlag. Durch die physikalischen Prozesse (Verdunstung bzw. Kondensation), die in der

Atmosphäre stattfinden, kommt es zu einer Trennung (Fraktionierung) zwischen leichteren und schwereren (enthalten entweder Sauerstoff-18, Deuterium oder Tritium) Wassermolekülen. Dabei werden die leichten

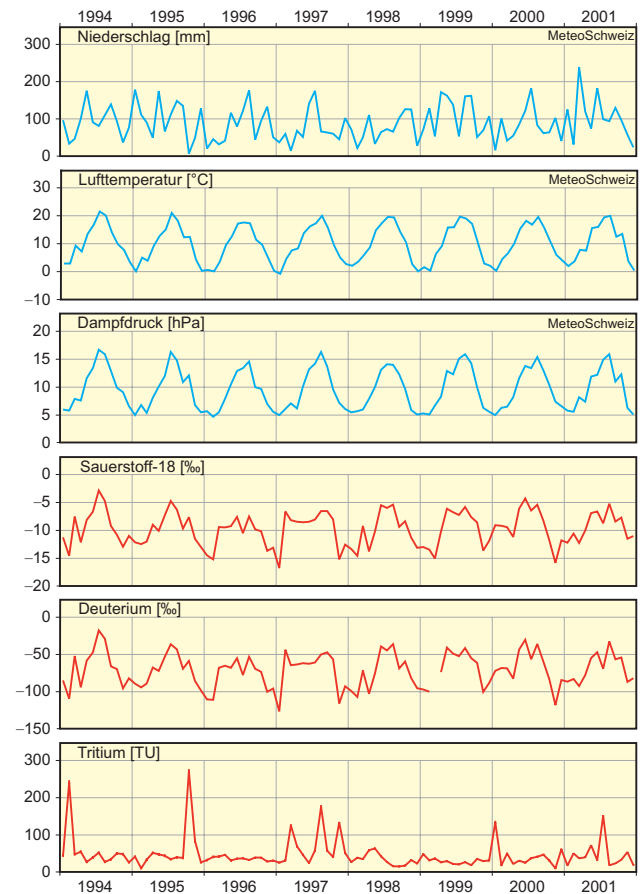


Fig. 10-13: Meteorologische Messgrößen und Isotopenverhältnisse im Niederschlag der Station Bern (nach BWG 2002).

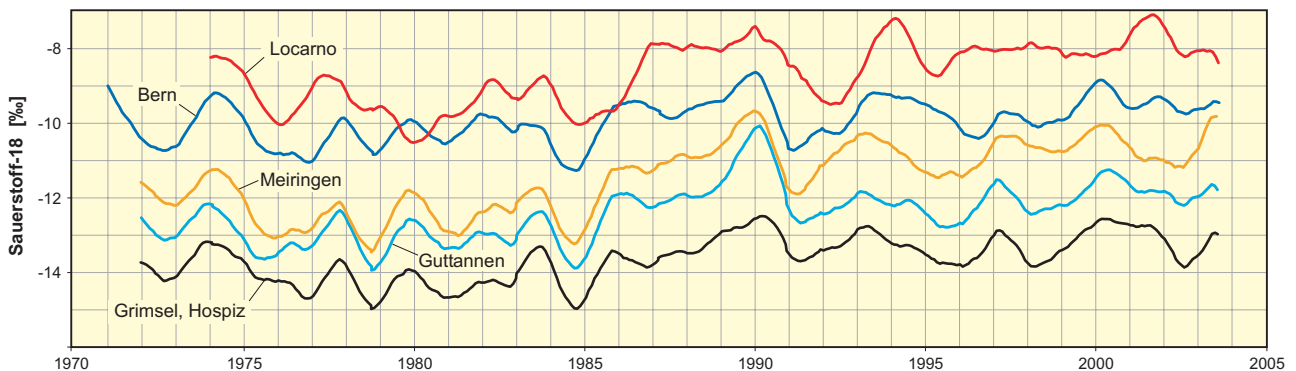


Fig. 10-12: Sauerstoff-18 im Niederschlag: Gleitende Monatsmittel ausgewählter Stationen (ergänzt nach SCHOTTERER et al. 2000, PARRIAUX et al. 2001).

Isotope generell besser mobilisiert. Diese Isotopenfraktionierung ist stark temperaturabhängig. Dies hat einen Jahresgang der Isotopenverhältnisse in den Niederschlägen zur Folge (vgl. Fig. 10-13). Ausserdem zeigt die jährliche Verteilung der Isotopenverhältnisse einen generellen Trend zu einer Anreicherung schwerer Isotope (vgl. Zunahme $\delta^{18}\text{O}$ in Figur 10-12). Dies könnte entweder mit einer globalen Erwärmung oder mit einer veränderten Herkunft des Niederschlagswassers in Zusammenhang stehen.

Trotz der Vielfältigkeit der beeinflussenden Faktoren weisen die stabilen Isotope eine mehr oder weniger lineare Höhenabhängigkeit auf (vgl. Fig. 10-14). Ein charakteristisches Isotopensignal ist für ein spezifisches Niederschlagsgebiet und für eine gegebene Jahreszeit erkennbar. Deshalb eignen sich diese Isotope gut zur Bestimmung der mittleren Infiltrationshöhe von Grundwasser, wobei saisonale und regionale Unterschiede sowie klimatisch bedingte Veränderungen berücksichtigt werden müssen.

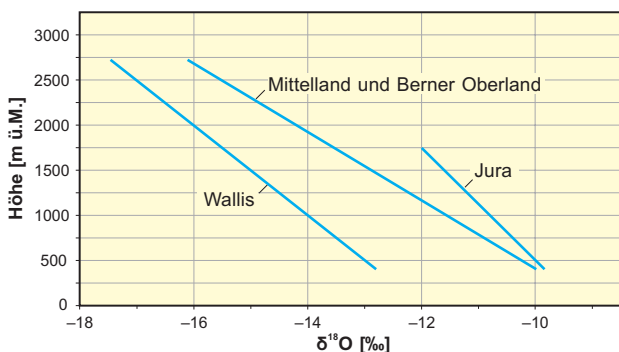


Fig. 10-14: Räumliche Variation der Höhenabhängigkeit (Periode 1974–1983) (nach SCHOTTERER et al. 1995, PARRIAUX et al. 2001).

Der «Fingerabdruck» des Tritiums entspricht im Wesentlichen noch immer der Markierung, die Kernwaffenversuche in den fünfziger und sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts hinterlassen haben. Seit 1963, dem Jahr der Unterzeichnung eines Verbots für atmosphärische Atomwaffentests, nimmt die Tritiumkonzentration stetig ab. Diese Tendenz widerspiegelt sich in der Tritium-Ganglinie der Lutry-Quelle (vgl. Fig. 10-15). Die Tritiumkonzentration eignet sich trotz dieser Abnahme gut zur Datierung von Grundwässern, die maximal einige Jahrzehnte alt sind.

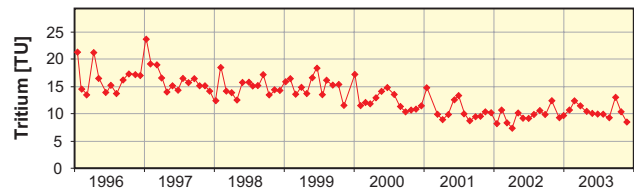


Fig. 10-15: Tritium-Isotopenkonzentration in der Lutry-Quelle (Messstelle Savigny) (nach BWG 2004).

Eine Anwendung der Isotope des Wassermoleküls in der Praxis wird in Kapitel 7.6 illustriert. Weitere Anwendungsbeispiele (u.a. Datierung mit Tritium) sind in PARRIAUX et al. (2001) und in ETCHEVERRY (2002) dargestellt.

Literaturverzeichnis

- AMMANN, M. A. (1987): Herkunft und Zusammensetzung von Silt in fliessenden Gewässern und Stauseen – geotechnische Abtragsanalysen im Alpenraum. Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der ETH und der Universität Zürich. Neue Folge Nr. 266, Zürich.
- AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H. R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W. H. (1993): Untere Süswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf – Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik und Fluid Logging. Geologische Berichte der LHG Nr. 16, Bern.
- ASCHWANDEN, H. (1985): Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde Nr. 66, Bern.
- ASCHWANDEN, H. & KAN, C. (1999): Die Abflussmenge Q_{347} : Eine Standortbestimmung. Hydrologische Mitteilungen der LHG Nr. 27, Bern.
- ASCHWANDEN, H. & WEINGARTNER, R. (1983): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 65, Bern.
- AUCKENTHALER, A. & HUGGENBERGER, P. (Ed.) (2003): Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser. – Birkhäuser, Basel.
- AUER, M. (2003): Regionalisierung von Schneeparametern – Eine Methode zur Darstellung von Schneeparametern im Relief. Publikation Gewässerkunde Nr. 304, Bern.
- BACHMANN, M. & BENDIX, J. (1993): Nebel im Alpenraum: Eine Untersuchung mit Hilfe digitaler Wetter-satelliten. Bonner Geographische Abhandlungen Heft 86, Bonn.
- BADER, S. & KUNZ, P. (1998): Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz (Schlussbericht NFP 31). – vdf, Hochschulverlag an der ETH, Zürich.
- BARBEN, M. (2003): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Geographica Bernensia G 71, Bern.
- BAUMGARTNER, A., & LIEBSCHER, H.-J. (1990): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie (Bd. 1). – Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- BÄUMLE, R., BEHRENS, H., EINSIEDL, F., GOLDSCHIEDER, N., GRUST, K., HÖTZL, H., KÄSS, W., KENNEDY, K., KINZELBACH, W., KOZEL, R., MÜLLER, I., MÜLLER, J., NIEHREN, S., ROSSI, P., SCHNEGG, P.-A., SEILER, K.-P., WITTHÜSER, K., WOHNLI, S. & ZOJER, H. (2001): Comparative Tracer Studies in Groundwater. In: ATH (Association of Tracer Hydrology): Tracer Studies in the Unsaturated Zone and Groundwater (Investigations 1996–2001). Proceedings of the 8th International Symposium on Water Tracing, Munich 2001 (p. 103–230). Beiträge zur Hydrogeologie 52, Graz.
- BEZINGE, A. & AESCHLIMANN, R. (1981): Rehaussement de la prise de vidange de fond du barrage de Grande Dixence. Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. In: VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazio-logie): Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. Internationale Fachtagung (p. 137–148). Mitteilungen der VAW Nr. 53, Zürich.
- BFE (Bundesamt für Energie) (1998): Geothermie: Praktische Nutzung von Erdwärme. Bern.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2002): Umwelt Schweiz 2002 – Statistiken und Analysen. Neuchâtel.
- BINDERHEIM-BANKAY, E. (1998): Sanierungsziel für natürlich eutrophe Kleinseen des Schweizer Mittellandes. Diss. ETH Nr. 12'784, Zürich.
- BITTERLI, T., GEORGE, M., MATOUSEK, F., CHRISTE, R., AVIOLAT, P., FRACHEBOUD, S., BRÄNDLI, R., FREY, D. & TRIPET, J.-P. (2004): Grundwasservorkommen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.6), Bern.
- BOILLAT, J., DUBOIS, J. & LAZARO, PH. (1996): Eintrag und Austrag von Feststoffen im Spülkanal von Gebidem. Modellversuche und numerische Simulation. In: VISCHER, D. (Ed.): Int. Symposium Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen (p. 151–170). Mitteilungen der VAW Nr. 142, Zürich.
- BONZANIGO, L. (1998): Lo slittamento di Campo Vallemaggia. – Boll. Geol. appl. 3/1, 111–120.
- BONZANIGO, L. (1999): Lo slittamento di Campo Vallemaggia. Diss. ETH Nr. 13'387, Zürich.
- BOSSART, P. & WERMEILLE, S. (2003): Paleohydrological Study of the Surroundings of the Mont Terri Rock Laboratory. In: HEITZMANN, P. & TRIPET, J.-P. (Ed.): Mont Terri Project – Geology, Paleohydrology and Stress Field of the Mont Terri Region (p. 45–64). Berichte des BWG, Serie Geologie Nr. 4, Bern.
- BOUZELBOUDJEN, M., KIRÁLY, L., KIMMEIER, F. & ZWAHLEN, F. (1997): Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 2: Hydrogeologie. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.3), Bern.
- BROCKMANN, J. (1923): Regenkarte der Schweiz 1:600'000. Bern.
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG, SR 814.20) vom 24. Januar 1991.
- BURGER, A., RECORDON, E., BOVET, D., COTTON, L. & SAUGY, B. (1985): Thermique des nappes souterraines. – Presses polytechniques romandes, Lausanne.
- BUTTET, P. & EBERHARD, A. (1995): Das Eidgenössische Grundwasser-Beobachtungsnetz. Hydrologische Mitteilungen der LHG Nr. 22, Bern.

- BUTTET, P., FISCHER, H., TRIPET, J.-P. & PEYER, K. (1992): Geologische, hydrogeologische und bodenkundliche Grundlagenkarten und Typprofile. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.1), Bern.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1993): Situation der Trinkwasserversorgung. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 212, Bern.
- BUWAL (2000): Angemessene Restwassermengen – Wie können sie bestimmt werden? BUWAL Wegleitung, Vollzug Umwelt, Bern.
- BUWAL (2004): Grundwasserschutz. BUWAL Wegleitung, Vollzug Umwelt, Bern.
- BUWAL / BWG (2002): NAQUA News. Faltblatt, Bern.
- BUWAL / BWG (2003): NAQUA News. Faltblatt, Bern.
- BUWAL / BWG (2004): NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003. Bern.
- BUWAL / BWG / MeteoSchweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 369, Bern.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2000): Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10, Biel.
- BWG (2002): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2001. Bern.
- BWG (2003): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2002. Bern.
- BWG (2004): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2003. Bern.
- BWG (in Vorbereitung a): Geologische Karte der Schweiz 1:500'000. Bern.
- BWG (in Vorbereitung b): Tektonische Karte der Schweiz 1:500'000. Bern.
- BWG (in Vorbereitung c): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000, Grundwasservorkommen. Bern.
- CASTANY, G. & MARGAT, J. (1977): Dictionnaire français d'hydrogéologie. – Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.
- CHRISTEN, M., BARTELT, P. & GRUBER, U. (2002): AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. In: INTERPRAEVENT: Proceedings of the International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, 14.–18. October 2002 (Vol. 2, p. 715–725). Matsumoto, Japan.
- CIPEL (Commission Internationale pour la Protection des Eaux du lac Léman) (2004): Rund um den Genfersee. Informations-Bulletin der Internationalen Kommission zum Schutz des Genfersees Nr. 27, Lausanne.
- COLLET, L.-W., MELLET, R. & STUMPF, W. (1916): Le charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse. *Annalen der Schweizerischen Landeshydrographie* Bd. 2, Bern.
- COMBE, J. & ROSSELLI, W. (Ed.) (2002): L'eau qui sort des bois – quand forêt durable rime avec eau potable. Actes de la Journée thématique de l'Antenne romande du WSL du 26 novembre 2002 à l'EPFL. WSL Antenne romande, Lausanne.
- DEMATTEIS, A., HESKE, S., PARRIAUX, A. & TACHER, L. (1997): Haupttypen der Grundwasserleiter. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.4), Bern.
- DE MONTMOLLIN, F. & JAKOB, A. (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.3), Bern.
- DOERFLIGER, N. & ZWAHLEN, F. (1998): Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK). BUWAL Praxishilfe, Vollzug Umwelt, Bern.
- DOKULIL, M., HAMM, A. & KOHL, J.-G. (2001): Ökologie und Schutz von Seen. – Facultas-Universitäts-Verlag, Wien.
- DOLLINGER, J. (1997): Geologie und Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel bei Bern. *Geologische Berichte der LHG* Nr. 21, Bern.
- DUPASQUIER, S. & PARRIAUX, A. (2002): Typische Grundwasserverschmutzungen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.5), Bern.
- EAWW (Eidg. Amt für Wasserwirtschaft) (1939): Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe- und Schwebstoffführung. Mitteilung des EAWW Nr. 33, Bern.
- EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) (1997): Alluvionnement des retenues. Rapport final du Projet PSEL Nr. 31. Institut d'hydraulique et d'énergie, Lausanne.
- ETCHEVERRY, D. (2002): Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines – Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. *Rapports de l'OFEG, Série Géologie* No 2, Berne.
- EUROPEAN COMMISSION (1995): Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas – COST Action 65, Final report. Rep. EUR 16547 EN, Luxembourg.
- FAGERLUND, G. (2001): Etude des chroniques piézométriques 2000 de la nappe alluviale du Rhône de Viège au Léman – Interprétations des réponses de l'aquifère face à la crue d'octobre 2000. Travail de diplôme à l'Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie / CREALP (Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin), Sion (unveröffentlicht).
- FAUVE, M., RHYNER, H. & SCHNEEBELI, M. (2002): Pistenpräparation und Pistenpflege – Das Handbuch für den Praktiker. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos.

- GEES, A. (1997): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz: Bedeutung für das Bemessungshochwasser. *Geographica Bernensia* G 53, Bern.
- GEIGER, H. (1985): Niederschlag im Wald. In: SGK (Schweizerische Geotechnische Kommission) & HK/SNG (Hydrologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft): Der Niederschlag in der Schweiz (p. 139–148). *Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie* Nr. 31, Bern.
- GEIGER, H., ZELLER, J. & RÖTHLISBERGER, G. (1991): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes: Grundlagen. *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes* (Bd. 7), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.
- GEMEINDE HASLE B. BURGDORF (1992): Unwetter 1987 – Das Ereignis, die Ursachen und die Folgen für die Gemeinde Hasle b. Burgdorf. – Mühlethaler, Hasle-Rüegsau.
- Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) vom 28. Oktober 1998.
- GHO (Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie) (1982): Unterirdisches Wasser. In: GHO: Verzeichnis hydrologischer Fachausdrücke mit Begriffserklärung. *Landeshydrologie*, Bern.
- GHO (1987): Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten – Erfahrungen und Empfehlungen. Mitteilung der GHO Nr. 2. *Landeshydrologie und -geologie*, Bern.
- GHO (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Mitteilung der GHO Nr. 4. *Landeshydrologie und -geologie*, Bern.
- GIBERT, J., DANIELOPOL, D. L. & STANFORD, J. A. (1994): *Groundwater Ecology*. – Academic Press, San Diego.
- GK/SANW (Glaziologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften) & VAW/ETHZ (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ) (2003): *Gletscherberichte (1881–2002) «Die Gletscher der Schweizer Alpen»*, Jahrbücher der GK/SANW, herausgegeben durch die VAW Nr. 1–122, Zürich.
- GÖTZ, A. (1988): Messungen als Grundlage für Gewässerkorrekturen. In: LHG (Landeshydrologie und -geologie): 125 Jahre Hydrometrie in der Schweiz (p. 99–108). *Hydrologische Mitteilungen der LHG* Nr. 9, Bern.
- GREBER, E., BAUMANN, A., CORNAZ, A., HEROLD, T., KOZEL, R., MURALT, R. & ZOBRIST, J. (2002): Grundwasserqualität in der Schweiz – NAQUA_{TREND} – das nationale Beobachtungsprogramm. – *Gas, Wasser, Abwasser* 82/3, 191–201.
- GREBNER, D., ROESCH, T. & SCHWARB, M. (1999): Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981–1993. In: BWG: *Hydrologischer Atlas der Schweiz* (Tafel 2.5), Bern.
- GRIEBLER, C. & MÖSSLACHER, F. (Ed.) (2003): *Grundwasser-Ökologie*. – UTB, Facultas, Wien.
- GSA (Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern) (2003): *Gewässerbericht 1997–2000*. Bern.
- GUILLEMIN, C. & ROUX, J.-C. (Ed.) (1992): *Pollution des eaux souterraines en France: bilan des connaissances, impacts et moyens de prévention*. – Ed. BRGM, *Manuels et méthodes* 23, Orléans.
- GURTZ, J., BALTENSWILER, A., LANG, H., MENZEL, L. & SCHULLA, J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins (Schlussbericht NFP 31). – vdf, Hochschulverlag an der ETH, Zürich.
- GUTHRUF, J., GUTHRUF-SEILER, K. & ZEH, M. (1999): *Kleinsseen im Kanton Bern. Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern* (GBL). Bern.
- HAEBERLI, W., PAUL, F., GRUBER, S., HOELZLE, M., KÄÄB, A., MACHGUTH, H., NOETZLI, J. & ROTHENBÜHLER, C. (2004): Effects of the extreme Summer 2003 on Glaciers and Permafrost in the Alps – First Impressions and Estimations. – *Geophysical Research Abstracts* 6/03063.
- HAERING, CH., JÄCKLI, H., KOBEL, M., KÜNDIG, R., LIENERT, O., PHILIPP, R., STARCK, P. & WYSSLING, L. (1993): *Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000 – Blatt Nr. 5: Toggenburg*. Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK), Zürich.
- HARDWASSER AG (ohne Datum): *Rheinwasser, Hardwasser, Trinkwasser*. Broschüre, Riehen.
- HAUDE, W. (1958): Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung potentieller Evaporation und Evapotranspiration. – *Meteor. Rsch.* 11/3, 96–99.
- HEGG, CH., FRAEFEL, M., FRICK, E., SCHMID, F. & BADOUX, A. (2003): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahr 2002. – *Wasser, Energie, Luft* 95(3/4), 63–70.
- HEIERLI, J. (2003): *NXD Prognosegüte unter der Lupe*. Interner Bericht SLF (unveröffentlicht).
- HEITZMANN, P. (Ed.) (2004): *Mont Terri Project: Hydrogeological Synthesis, Osmotic Flow*. Reports of the FOWG, *Geology Series* No. 6, Bern.
- HEITZMANN, P. & PHILIPP, R. (1999): *Digitale geologische Karten als Grundlagen für die Umweltplanung*. In: ASCH, K. (Ed.): *GIS in Geowissenschaften und Umwelt* (p. 3–24). – Springer, Berlin.

- HOFBAUER, R. (1916): Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. – Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Bau-dienst 38–40.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Auflage – Enke, Stuttgart.
- HOLZHAUSER, H. & ZUMBÜHL, H. J. (1999): Nacheiszeitliche Gletscherschwankungen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 3.8), Bern.
- HÜGLI, A. (2002): «Die Schlange im eigenen Busen nähren» – Die Korrektur der Aare zwischen Thun und Bern im 19. Jahrhundert. Lizentiatsarbeit am Historischen Institut der Universität Bern (unveröffentlicht).
- HUNKELER, D., GOLDSCHNEIDER, N., ROSSI, P. & BURN, CH. (in Vorbereitung): Merkmale mikrobieller Gemeinschaften in unverschmutztem Grundwasser und Methoden zu deren Charakterisierung. Berichte des BWG, Bern.
- IAH (International Association of Hydrogeologists) (1989): Memoires of the International Symposium on Hydrogeological Maps as Tools for Economic and Social Development. Hannover.
- IGKB (Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee) (2004): Der Bodensee. Zustand – Fakten – Perspektiven. Bregenz.
- IKEN, A. (1995): Einige Aspekte der Mechanik von Gletscherschwankungen. In: SANW (Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften): Gletscher in ständigem Wandel (p. 153–170). – vdf, Hochschulverlag an der ETH, Zürich.
- IWB (Industrielle Werke Basel) (ohne Datum): Die Wasserversorgung von Basel-Stadt. Broschüre, Basel.
- JÄCKLI, H. (1958): Der rezente Abtrag der Alpen im Spiegel der Vorlandsedimentation. – Ecl. Geol. Helv. 5/2, 354–365.
- JÄCKLI, H. & KEMPF, T. (1967): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000. In: LT (Landestopographie): Atlas der Schweiz (Tafel 16), Wabern-Bern.
- JAKOB, A. & GEISSEL, A. (2004): Messnetze zur Bestimmung chemischer und physikalischer Parameter in Fließgewässern und Seen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.1²), Bern.
- JAKOB, A. & GUNTERSWEILER, R. (1996): DBGZ – Die eidgenössische Datenbank über den Gewässerzustand. – Gas, Wasser, Abwasser 7/5, 372–377.
- JAKOB, A., LEUENBERGER, U. & LIECHTI, P. (2004): Veränderung ausgewählter chemischer Parameter in Fließgewässern und Seen 1976–2000. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.6), Bern.
- JAKOB, A., LIECHTI, P. & BINDERHEIM-BANKAY, E. (2002): 30 Jahre NADUF – Eine Zwischenbilanz. – Gas, Wasser, Abwasser 82/3, 203–208.
- JAKOB, A., LIECHTI, P. & SCHÄDLER, B. (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? – Gas, Wasser, Abwasser 7/4, 288–294.
- JAKOB, A. & SPREAFICO, M. (1997): Schwebstoffkonzentrationen und -frachten in Fließgewässern. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.4), Bern.
- JAKOB, A., ZOBRIST, J., DAVIS, J. S., LIECHTI, P. & SIGG, L. (1994): NADUF – Langzeitbeobachtung des chemisch-physikalischen Gewässerzustandes. – Gas, Wasser, Abwasser 74, 171–186.
- JENSEN, H., LANG, H. & RINDERKNECHT, J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.4²), Bern.
- KAN, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (unveröffentlicht).
- KAN, C. (2002): Hydrometrische Netze. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.1²), Bern.
- KILCHMANN, S. (2001): Typology of recent groundwaters from different aquifer environments based in geologic tracer elements. Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (unveröffentlicht).
- KIPFER, A. (2000): Geschiebefrachtmessung mittels Waage in einem Wildbach – das Verfahren Schenk. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (unveröffentlicht).
- KIRCHHOFER, W. & SEVRUK, B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.2), Bern.
- KÖLLA, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. – Schweizer Ingenieur und Architekt 33–34, 965–972.
- KÖNITZER, CH. (2004): Untersuchungen zur Abflussbildung im Sperbelgraben, Emmental. Publikation Gewässerkunde Nr. 311, Bern.
- KÜRSTEINER, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lünen. – Schweizerische Bauzeitung 1, 4–8.
- LAMBERT, A. (1978): Eintrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen im Walensee. – Eclogae geol. Helv. 71/1, 35–52.
- LAMBERT, A. (1980): Das Delta der Linth im Walensee – ein Vergleich der Seegrundaufnahmen von 1931 und 1979. – Wasser, Energie, Luft 72/(7/8), 243–246.

- LANG, H. (1978): Zum Problem der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Verdunstung in der Schweiz. In: SGK (Schweizerische Geotechnische Kommission) & HK/SNG (Hydrologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft): Die Verdunstung in der Schweiz (p. 53–61). Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 25, Bern.
- LANG, H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: SGK (Schweizerische Geotechnische Kommission) & HK/SNG (Hydrologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft): Der Niederschlag in der Schweiz (p. 149–157). Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 31, Bern.
- LAUTERBURG, R. (1887): Anleitung zur Berechnung der (mitteleuropäischen) Quellen- und Stromabflussmengen aus der Regenmenge, Grösse und Beschaffenheit der Quellen- und Flussgebiete. – Allg. Bauzeitung (Wien) 9–13, 17–20, 27–30.
- LEHNING, M., BARTELT, P., BROWN, B. & FIERZ, C. (2002): A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning – Part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. – Cold Region Science and Technology 35, 169–184.
- LH (Landeshydrologie) (1982): Handbuch für die Abflussmessung. Hydrologische Mitteilungen der LH Nr. 4, Bern.
- LIECHTI, P. (1994): Der Zustand der Seen in der Schweiz. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 237, Bern.
- LOMBARDI, G. (1996): Der Drainagestollen von Campo, Rovana. – Wasser, Energie, Luft 88/11/12, 281–287.
- MAISCH, M., PAUL, F. & KÄÄB, A. (2004): Kenngrößen der Gletscher und ihre Veränderungen 1850–2000. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 3.10), Bern.
- MAISCH, M., WIPF, A., DENNELER, B., BATTAGLIA, J. & BENZ, CH. (1999): Die Gletscher der Schweizer Alpen – Gletscherhochstand 1850 – Aktuelle Vergletscherung – Gletscherschwund-Szenarien. (Schlussbericht NFP 31). – vdf, Hochschulverlag an der ETH, Zürich.
- MARGOT, A., SCHÄDLER, B., SIGG, R. & WEINGARTNER, R. (1992): Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke und Seeregulierungen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.3), Bern.
- MARTINEC, J., MEISTER, R. & AELLEN, M. (1992): Schneedecken- und Gletschermessnetze. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 3.1), Bern.
- MATTHESS, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers. – Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- MATTHESS, G. & UBELL, C. (2003): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt – Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1. – Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- MAURER, H. (1975): Niederschlagsarme Perioden und Trockenperioden in der Bundesrepublik Deutschland. Dissertation an der Universität Freiburg i.Br.
- MEIER BÜRGISSER, G. & KELLER, B. (2004): Gewässerzustand Uster – Greifensee. Wege durch die Wassermwelt – Hydrologische Exkursionen in der Schweiz Nr. 1.1 (Region Zürich). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bern.
- MELLI, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. – Schweizerische Bauzeitung 12, 137–141.
- MENZEL, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften Nr. 67, Zürich.
- MENZEL, L., LANG, H. & ROHMANN, M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 4.1), Bern.
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1996): Hydrogeochemische Stoffsysteme – Teil I. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) Nr. 110, Bonn.
- MEYLAN, B. (2003): Der Wald sorgt für sauberes Trinkwasser. – Gas, Wasser, Abwasser 83/3, 191–199.
- MOESCHLER, P., CHRISTE, R. & MÜLLER, I. (1988): Microcrustaceans as Bioindicators in the Karstic Aquifers: A Case Study in the Jura (Neuchâtel, Switzerland). In: IAH (International Association of Hydrogeologists): Karst Hydrology and Karst Environment Protection (p. 948–953). Proceedings of the IAH 21st Congress, Vol. XXI, Part 2. – Geological Publishing House, Beijing.
- MOESCHLER, P., MÜLLER, I. & SCHOTTERER, U. (1982): Les organismes vivants, indicateurs naturels dans l'hydrodynamique du karst, confrontés aux données isotopiques, chimiques et bactériologiques, lors d'une crue de la source de l'Areuse (Jura Neuchâtelois, Suisse). In: LEIBUNDGUT, CH. & WEINGARTNER, R. (Ed.): Tracermethoden in der Hydrologie (p. 213–224). Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 28 I, Bern.
- MOESCHLER, P. & ROUCH, R. (1988): Découverte d'un nouveau représentant de la famille des Gelyellidae (Copepoda, Harpacticoida) dans les eaux souterraines de Suisse. – Crustaceana 55/1, 1–16.
- MONTEITH, J. L. (1981): Evaporation and surface temperature. – Quart. J. Roy. Met. Soc. 107, 1–27.
- MOUNTAIN AGENDA (1998): Mountains of the World. Water Towers for the 21st Century. Bern.

- MÜHLETHALER, CH. (2004): Analyse von Trockenperioden im 20. Jahrhundert in der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 309, Bern.
- MÜLLER, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mitteilungen der VAW Nr. 4, Zürich.
- MÜLLER, T. (1999): Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. – Springer, Berlin.
- MÜLLER, U. (1996): Erfahrungen mit Real-Time DGPS Anwendungen in der Hydrographie (cm-Genauigkeit mit Phasenlösung). In: VISCHER, D. (Ed.): Int. Symposium Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen (p. 267–278). Mitteilungen der VAW Nr. 143, Zürich.
- NAEF, F., SCHERRER, S. & ZURBRÜGG, CH. (1999): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.7), Bern.
- NAEF, F. & THOMA, C. (2002): Dämpfung von Hochwasserspitzen in Fließgewässern. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.9), Bern.
- NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) (1997): Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Nagra tech. Ber. NTB 96–01, Wettingen.
- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. Nagra tech. Ber. NTB 00–01, Wettingen.
- NCG+EPFL (2004): Glissement de la Frasse. Assainissement: Etude de faisabilité 2002-2003. Rapport final. Association technique «NCG+EPFL pour l'étude du glissement de la Frasse», Lausanne (unveröffentlicht).
- OCCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung) (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. Bern.
- PARRIAUX, A., ETCHEVERRY, D. & VAUDAN, J. (2001): Isotope im Wasserkreislauf. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 6.2), Bern.
- PASQUIER, F., BOUZELBOUDJEN, F. & ZWAHLEN, F. (1999): Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100'000 – Blatt Nr. 6: Sarine/Saane. Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK), Zürich.
- PEARSON, F. J., ARCOS, D., BATH, A., BOISSON, J.-Y., FERNÁNDEZ, A. M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, A., GRIFFAULT, L., HERNÁN, P. & WABER, H. N. (2003): Mont Terri Project: Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Berichte des BWG, Serie Geologie Nr. 5, Bern.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. – Proc. Roy. Met. Soc. (A), 193, 120–145, London.
- PIFFNER, A., KÜHNI, A. & JEMELIN, L. (1997): Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 1: Geologie. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.2), Bern.
- PHILLIPS, M. (2000): Influences of snow supporting structures on the thermal regime of the ground in alpine permafrost terrain. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos.
- PIELMEIER, CH. (2003): Textural and mechanical variability of mountain snowpacks. Diss. Phil.-nat. Universität Bern.
- POCHON, A. & ZWAHLEN, F. (2003): Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen bei Kluft-Grundwasserleitern. BUWAL Praxishilfe, Vollzug Umwelt, Bern.
- PRIMAULT, B. (1962): Du calcul de l'évapotranspiration. – Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie (B), 12/1, 124–150.
- PRINZ, H. (1997): Abriss der Ingenieurgeologie. – Enke, Stuttgart.
- RECHSTEINER, G. (1996): Ablagerungen im Stausee Gebiet und einige ihrer Folgen. In: VISCHER, D. (Ed.): Int. Symposium Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen (p. 137–148). Mitteilungen der VAW Nr. 142, Zürich.
- RUSSI, T., AMMANN, W., BRABEC, B., LEHNING, M. & MEISTER, R. (2003): Avalanche Warning Switzerland 2000. In: ZSCHAU, J. & KÜPPERS, A. (Ed.): Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction (p. 569–578). – Springer-Verlag, Berlin.
- SCHÄDLER, B. & WEINGARTNER, R. (2002a): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 6.3), Bern.
- SCHÄDLER, B. & WEINGARTNER, R. (2002b): Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz – Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung. – Wasser, Energie, Luft 94(7/8), 189–197.
- SCHNITTER, N. (1992): Die Geschichte des Wasserbaus in der Schweiz. – Olynthus, Oberbözingen.
- SCHOTTERER, U., STOCKER, T., BÜRKI, H., HUNZIKER, J., KOZEL, R., GRASSO, D. A. & TRIPET, J.-P. (2000): Das Schweizer Isotopen-Messnetz: Trends 1992–1999. – Gas, Wasser, Abwasser 80/10, 733–741.
- SCHOTTERER, U., STOCKER, T., HUNZIKER, J., BUTTET, P. & TRIPET, J.-P. (1995): Isotope im Wasserkreislauf – Ein neues eidgenössisches Messnetz. – Gas, Wasser, Abwasser 75/9, 714–720.

- SCHUDEL, B., BIAGGI, D., DERVEY, T., KOZEL, R., MÜLLER, I., ROSS, J. H. & SCHINDLER, U. (2002): Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie: Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Geologie Nr. 3, Bern.
- SCHÜRCH, M., EGGER, C. & KOZEL, R. (2004): Beobachtung von Grundwasserstand und Quellschüttung. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 8.5), Bern.
- SCHÜRCH, M., HEROLD, T. & KOZEL, R. (2003a): Grundwasser – die Funktion des Waldes. – Bündnerwald 56/4, 71–76.
- SCHÜRCH, M., KOZEL, R., SCHOTTERER, U. & TRIPET, J.-P. (2003b): Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT). – Environmental Geology 45, 1–11.
- SCHWARB, M., FREI, CH., SCHÄR, CH. & DALY, CH. (2001a): Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.6), Bern.
- SCHWARB, M., FREI, CH., SCHÄR, CH. & DALY, CH. (2001b): Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.7), Bern.
- SEVRUK, B. & KIRCHHOFER, W. (1992): Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.3), Bern.
- SGTK (Schweizerische Geotechnische Kommission) (ab 1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000 mit Erläuterungen, Zürich.
- SIEGENTHALER, U., SCHOTTERER, U. & OESCHGER, H. (1983): Sauerstoff-18 und Tritium als natürliche Tracer für Grundwasser. – Gas, Wasser, Abwasser 63/9, 477–483.
- SIGRIST, B. (1988): Entwicklung der Messgeräte – Pegel und Abflussmessung. In: LHG (Landeshydrologie und -geologie): 125 Jahre Hydrometrie in der Schweiz (p. 25–35). Hydrologische Mitteilungen der LHG Nr. 9, Bern.
- SLF (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung) (1936–1998): Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Winterbericht des SLF Nr. 1–62. Weissfluhjoch und Davos.
- SLF (2000): Der Lawinenwinter 1999 – Ereignisanalyse. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos.
- SPREAFICO, M. (1988): Hydrometrie heute und morgen. In: LHG (Landeshydrologie und -geologie): 125 Jahre Hydrometrie in der Schweiz (p. 123–151). Hydrologische Mitteilungen der LHG Nr. 9, Bern.
- SPREAFICO, M., HODEL, H.P. & KASPAR, H. (2001): Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr.1, Bern.
- SPREAFICO, M., WEINGARTNER, R., BARBEN, M. & RYSER, A. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern.
- STOFFEL, A. & MEISTER, R. (2004): Ten years experience with the five level avalanche danger scale and the GIS database in Switzerland. In: ISSW (International Snow Science Workshop): Proceedings ISSW, Jackson Hole, WY, USA.
- SVG (Schweizerische Vereinigung für Geothermie) (2002a): Info – Geothermie Nr. 2, Biel.
- SVG (2002b): Info – Geothermie Nr. 4, Biel.
- SVG (2003): Info – Geothermie Nr. 5, Biel.
- SVGW (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches) (2002): Wasserstatistik 2000 – Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz. Zürich.
- SVGW (2004): Jahrbuch 2003/04. Zürich.
- THORNTWHAITE, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. – The Geogr. Rev. 38/1, 55–94.
- TRIPET, J.-P., BRECHBÜHLER, Y.-A., HAARPAINTNER, R.-T. & SCHINDLER, B. (1990): Hydrogéologie des milieux à faible perméabilité – Etude des marnes aaléniennes dans la galerie de reconnaissance du Mont-Terri. – Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles 113, 179–189.
- TROXLER, F. & WANNER, H. (2000): Mittlere Nebelhäufigkeit im Winterhalbjahr. In: SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt): Klimaatlas der Schweiz (Tafel 9.1), Wabern-Bern.
- TURC, L. (1961): Evaluation des besoins en eau irrigation, l'évapotranspiration potentielle. – Ann. Agron. 12, 13–49.
- TURNER, H. (1985): Nebelniederschlag. In: SGTK (Schweizerische Geotechnische Kommission) & GK/SNG (Hydrologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft): Der Niederschlag in der Schweiz (p. 159–164). Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 31, Bern.
- UNESCO (Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft, Kultur und Kommunikation) (1981): Avalanche Atlas – Illustrated international avalanche classification. IAHS/ICSU. – UN publication, Paris.
- UTTINGER, H. (1949): Die Niederschlagsmengen in der Schweiz 1901–1940. – Verlag des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Zürich.
- VEIT, H. (2002): Die Alpen – Geoökologie und Landschaftsentwicklung. – Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

- VISCHER, D. (1981): Verlandung von Stauseen. – Schweizer Ingenieur und Architekt *99/47*, 1081–1086.
- VISCHER, D. (1986): Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert. Mitteilungen der VAW Nr. 84, Zürich.
- VISCHER, D. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz – Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 5, Biel.
- VIVIROLI, D. (2001): Zur hydrologischen Bedeutung der Gebirge. Publikation Gewässerkunde Nr. 265, Bern.
- VIVIROLI, D. & WEINGARTNER, R. (2004): Hydrologische Bedeutung des europäischen Alpenraums. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 6.4), Bern.
- VOELLMY, A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. – Schweizerische Bauzeitung *73*, 159–165, 212–217, 246–249, 280–285.
- VONDER MÜHLL, D. & KOORDINATIONSGRUPPE PERMAFROST (1999): Permafrost – Verbreitung und ausgewählte Aspekte. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 3.9), Bern.
- VUATAZ, F. & FEHR, A. (2000): 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. – Géothermie Suisse *10/26*, 2–10.
- WEA (Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern) (1989): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern – See-land: Infiltration aus Hagneckkanal und Alter Aare. Bern.
- WEA (1998): Grundwasservorkommen – Übersichtskarte des Kantons Bern 1:100'000, Bern.
- WEA (1999): Grundwasser-Bilanzierung, Lockergestein – Übersichtskarte des Kantons Bern 1:100'000 / 1:700'000, Bern.
- WEINGARTNER, R. (1992): Niederschlagsmessnetze. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 2.1), Bern.
- WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen. Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 37, Bern.
- WEINGARTNER, R. & ASCHWANDEN, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.2), Bern.
- WEINGARTNER, R. & PEARSON, CH. (2001): A Comparison of the Hydrology of the Swiss Alps and the Southern Alps of New Zealand. – Mountain Research and Development *21/4*, 370-381.
- WIDMANN, M. & SCHÄR, C. (1997): A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland. – Int. Journal of Climatology *17*, 1333–1356.
- WOLF, R. (1871): Schweizerische Flussgebietskarte mit Niederschlagscurven 1:1'000'000, beruhend auf Messungen von 1864–69. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.
- ZBINDEN, P. (2003): Extrem trockenes, erstes Halbjahr 2003. (www.meteoschweiz.ch).
- Z'GRAGGEN, L. & OHMURA, A. (2002): Räumlich-zeitliche Variationen der Nettostrahlung 1984–1993. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 4.2), Bern.
- ZWAHLEN, F. (Ed.) (2004): Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – COST Action 620, Final report. European Commission, Rep. EUR 20912, Luxembourg.

Internethnachweis

- <http://glacierhazards.ch>
Naturgefahren Gletscher der VAW und der ETHZ.
- <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>
Schweizerisches Gletschermessnetz der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SCNAT) und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETHZ.
- www.bwg.admin.ch
Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG).
- www.crealp.ch
Zentrum für alpine Umweltforschung (Crealp, VS).
- www.dwd.de
Deutscher Wetterdienst (DWD).
- www.ecogis.admin.ch
Darstellung und interaktive Abfrage von Umweltdaten des BUWAL.
- www.gewaesserschutz.zh.ch
Abteilung Gewässerschutz Kanton Zürich (AWEL).
- www.iac.ethz.ch
Institut für Atmosphäre und Klima der ETHZ (IACETH).
- www.meteoschweiz.ch
MeteoSchweiz, nationaler Wetterdienst der Schweiz.
- www.proclim.ch
«InfoSystem on Climate and Global Change» der SCNAT.
- www.statistik.admin.ch
Bundesamt für Statistik.
- www.trinkwasser.ch
Portal Wasser & Gas des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches (SVGW).
- www.umwelt-schweiz.ch
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

Bildnachweis

- Umschlag: oben: Sandra Cramer, GIUB
Mitte: Beat Sigrist, BWG
unten: NAQUA, BWG
- Fig. 2-4: Eva Gertsch, GIUB
Fig. 2-5: MeteoSchweiz
Fig. 2-6: Joachim Gurtz, IACETH
Fig. 2-7: Rolf Weingartner, GIUB
Fig. 2-25: Tom Reist, GIUB
Fig. 2-29: Martin Jucker, Jucker Farmart (ZH)
- Fig. 3-1: Martin Zimmerli, SLF
Fig. 3-4: Martin Schneebe, SLF
Fig. 3-6: Chris Pielmeier, SLF
Fig. 3-7: Thomas Wiesinger, SLF
Fig. 3-9: Gemeindelawinendienst Walenstadt (SG)
Fig. 3-16–3-17: Archiv SLF
Fig. 3-18: Thomas Stucki, SLF
Fig. 3-20: Simone Perret, GIUB
Fig. 3-21: links: Frédéric Martens, London Alpine Club Library
rechts: Heinz J. Zumbühl, GIUB
Fig. 3-27: Sandra Cramer, GIUB
- Fig. 4-4: Joachim Gurtz, IACETH
Fig. 4-6: Joachim Gurtz, IACETH
- Fig. 5-3: Beat Sigrist, BWG
Fig. 5-5–5-6: BWG
Fig. 5-7: Beat Sigrist, BWG
Fig. 5-8–5-9: BWG
Fig. 5-10–5-18: Beat Sigrist, BWG
Fig. 5-40: Daniel Viviroli, GIUB
Fig. 5-41: Beat Sigrist, BWG
Fig. 5-42: Katharina Iseli-Reist, Biembach-Bad (BE)
Fig. 5-47: Beat Sigrist, BWG
- Fig. 6-5: Monika Brunner, Gemeindeverwaltung Pfäffikon (ZH)
Fig. 6-8: Sandra Cramer, GIUB
Fig. 6-9: Markus Zeh, GSA/GBL Bern
Fig. 6-11: Pius Stadelmann, Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern
- Fig. 7-5: BWG
Fig. 7-20: Denis Blant, ISSKA
Fig. 7-30: NAQUA, BWG
Fig. 7-31: BWG
Fig. 7-32: Hans Rickenbacher
Fig. 7-34: Hans Rickenbacher
Fig. 7-40: NAQUA, BWG
- Fig. 7-41: Thomas Gabriel, Hardwasser AG (BL)
Fig. 7-42: Marc Schürch, BWG
Fig. 8-1: Rolf Bigler
Fig. 8-2–8-3: Adrian Jakob, BWG
Fig. 8-8: Eva Gertsch, BWG
Fig. 8-10: Leissigen-Team, GIUB
Fig. 8-12–8-13: WSL
Fig. 8-15: Beat Sigrist, BWG
Fig. 8-18: Adrian Jakob, BWG
Fig. 8-24: Adrian Jakob, BWG
- Fig. 9-3: NADUF-Team, BWG
- Fig. 10-2: Sandra Cramer, GIUB