

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**

Hochwasser 1999

Analyse der Ereignisse

Studienbericht Nr. 10 / 2000



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**

Hochwasser 1999

Analyse der Ereignisse

Studienbericht Nr. 10 / 2000

Hochwasser 1999

Analyse der Ereignisse

Herausgeber: Bundesamt für Wasser und Geologie BWG

Redaktion und Projektleitung:

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

In Zusammenarbeit mit:

SMA, ETHZ, UniBern, SLF, GEO7, Meteodat, Tergeso

Studienbericht Nr. 10 / 2000

Veröffentlichung des Bundesamtes für Wasser und Geologie

Zu beziehen unter Art. 804.315d bei

BBL/EDMZ, 3003 Bern, www.admin.ch/edmoz

6.2000 1000

Projektleitung und Redaktion:

Dr. Armin Petrascheck, BWG

Dr. Christoph Hegg, WSL

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Eidg. Versuchsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf

Alexandre Badoux

Felix Forster

Christoph Graf

Dr. Christoph Hegg

Roland Kimmerle

Franziska Schmid

Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Flüelastrasse 11, 7260 Davos Dorf

Dr. Michael Bründl

Martin Laternser

Urs Stöckli

Meteodat GmbH, Technoparkstr. 1, 8005 Zürich

Dr. Pierluigi Calanca

Dr. Mario Rohrer

Urs Steinegger

Tergeso AG, Stadterwingert 4, 7320 Sargans

Hans Müller-Lemans

Institut für Klimaforschung der ETHZ, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich

Dr. Dietmar Grebner

Thomas Roesch

Manfred Schwarb

Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Hoenggerberg, CH-8093 Zurich

Prof. Dr. Paolo Burlando

Wolfgang Ruf

Andrea Salvetti

Geo7, Neufeldstrasse 3, 3012 Bern

Peter Mani,

Geographisches Institut Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern

Prof. Dr. Hans Kienholz

Dr. Serena Liener

Professur für Umweltgeschichte, Universität Bern, Unitobler, CH-3000 Bern

Prof. Dr. Christian Pfister

MeteoSchweiz, Krähbühlstrasse 58, 8044 Zürich

Patrick Hächler

Eugen Müller

Francis Schubiger

Bundesamt für Wasser- und Geologie, 2501 Biel bzw. 3003 Bern

Dr. Hugo Aschwanden

Therese Bürgi

Dr. Armin Petrascheck

Jean Python

VORWORT

Die Hochwasser des Jahres 1999 weisen verschiedene Besonderheiten auf.

Nicht nur die Pegelstände der Flüsse und Seen, sondern auch die Flut der Pressemeldungen erreichte mit ungefähr 8000 Meldungen einen neuen Höchststand. Die lange Dauer und vor allem die direkte Betroffenheit von Siedlungsschwerpunkten, wie Thun, Bern, Zürich, Luzern, Rorschach, Rheinfelden und viele mehr, erklären das grosse Interesse. Man muss bis in das Jahr 1910 zurückgehen, um ein ähnliches Ereignis im gleichen Raum zu finden. Der Lawinenwinter hatte auf die Bedrohung aufmerksam gemacht. Nicht nur das Bewusstsein gegenüber Naturgefahren war geweckt, sondern auch das Wissen, dass der Schnee von gestern der Abfluss von morgen ist, liess auf mögliche Gefahren aufmerksam werden. Zum ersten Mal waren während eines Ereignisses aktuelle Tageswerte vieler hydrologischer Stationen via Internet verfügbar. Die Krisenstäbe konnten bei ihren Entscheidungen diese Information berücksichtigen.

Trotz all diesen Zeichen und vorhandenen Daten war es aber nicht möglich, die Katastrophe vorherzusagen, denn die Entwicklung ist stark abhängig von den nur sehr kurzfristig voraussehbaren Wetterlagen. So liessen zwei Starkniederschläge im Mai, mitten in der Periode der stärksten Schneeschmelze, die schwersten Befürchtungen Wirklichkeit werden. Was nicht vorher schon vorausblickend eingeleitet wurde, liess sich zur Vermeidung des Unglücks nicht mehr kurzfristig realisieren. Jetzt ging es nur noch um Schadensbegrenzung während des Ereignisses.

Um künftig bei ungünstigen Bedingungen im Einzugsgebiet die Lage besser einschätzen zu können, wurde das Schwergewicht dieser Ereignisanalyse darauf gelegt, herauszufinden, welche Phasen im Aufbau eines solchen Ereignisses mittelfristig und welche nur sehr kurzfristig vorhersehbar sind. Konkret: Wie ist das Zusammenwirken der nur ganz kurzfristig vorhersehbaren Niederschlagsanteile und der etwas längerfristig bekannte Einfluss der Schneeschmelze zu quantifizieren? Das Ziel dieser Analyse ist, abschätzen zu können, wie gross die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der Schadengrenze unter verschiedenen Bedingungen ist.

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit zwischen dem Bundesamt für Wasser und Geologie, verschiedenen privaten Ingenieurbüros (GEO7 - Bern, Meteodat - Zürich, Tergeso - Sargans), den Hochschulen (Geographisches Institut der ETH Zürich, Historisches Institut der Universität Bern, Geographisches Institut der Universität Bern) der MeteoSchweiz - Zürich und der Eidg. Forschungsanstalt WSL - Birmensdorf, die auch die Projektleitung und die Gesamtedaktion wahrnahm. Allen, die zum Gelingen des Berichtes beitrugen, sei an dieser Stelle für die erfreuliche interdisziplinäre und interinstitutionale Zusammenarbeit gedankt.

In Ergänzung zu diesem Bericht, der vor allem die ablaufenden Prozesse analysiert, wird durch das Bundesamt für Wasser und Geologie ein zweiter Bericht zu den Hochwassern 1999 herausgegeben. Dieser stellt in Anlehnung an die Berichte der Landeshydrologie und -geologie zu den Hochwassern der Jahre 1987 und 1993 die wichtigsten Beobachtungen zusammen und ordnet sie statistisch ein.

Bundesamt für Wasser und Geologie



Der Direktor

Dr. Ch. Furrer

PRÉFACE

Les crues de 1999 présentent plusieurs particularités. Ont atteint des sommets non seulement les niveaux d'eau des rivières et des lacs, mais aussi le nombre des communiqués de presse (environ 8000). La longue durée du phénomène et le fait que des quartiers d'agglomérations importantes à Thoun, Berne, Zurich, Lucerne, Rorschach, Rheinfelden et bien d'autres aient été directement touchés expliquent le grand intérêt suscité par l'événement. Il faut remonter jusqu'en 1910 pour trouver un phénomène semblable dans ces régions. L'hiver précédent, riche en avalanches, avait attiré l'attention sur la menace qui planait. On avait non seulement pris conscience de l'existence de dangers naturels mais, sachant que la neige d'hiver se transformerait en eau au printemps, on était conscient du risque qu'elle constituait. Pour la première fois lors d'un événement d'une telle ampleur, les valeurs les plus récentes fournies par les stations hydrologiques étaient disponibles sur Internet. Les cellules de crise pouvaient les utiliser pour prendre leurs décisions.

Malgré les signes avant-coureurs et les données à disposition, il ne fut pas possible de prévoir l'ampleur de la catastrophe, le déroulement des événements dépendant de la situation météorologique, qui n'est prévisible que très peu de temps à l'avance. Ainsi, à la mi-mai, au plus fort de la fonte de la neige, deux vagues de fortes précipitations firent que les pires craintes devinrent réalité. Tout ce qui n'avait pas été entrepris auparavant à titre préventif ne put être réalisé au dernier moment: il ne restait plus qu'à limiter les dégâts.

Dans l'optique de mieux pouvoir apprécier à l'avenir les situations découlant de conditions défavorables, l'accent a été mis sur l'étude des phases de formation d'un tel événement qui peuvent être prévues à moyen terme et sur celles qui ne sont prévisibles que très peu de temps à l'avance. Concrètement, il s'agissait de savoir comment quantifier les interactions entre la fonte des neiges (prévisible à l'avance) et les précipitations (prévisibles à très court terme). Le but de cette analyse est d'estimer la probabilité de dépassement du seuil des dégâts dans diverses conditions.

Le présent rapport résulte de la collaboration entre l'Office fédéral des eaux et de la géologie, de plusieurs bureaux d'ingénieurs (GEO7, Berne - GEOSAT, Zurich - Tergeso, Sargans), de Hautes Ecoles (Geographisches Institut de l'EPFZ, Geographisches Institut de l'Université de Berne), de Météo-Suisse, Zurich et de l'Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf, qui s'est chargé de la direction des travaux et de la rédaction d'ensemble. Que tous ceux qui ont participé à la concrétisation de ce projet soient remerciés ici pour leur travail interdisciplinaire et leur esprit de collaboration.

En complément à la présente étude qui porte surtout sur l'analyse des phénomènes, l'Office fédéral des eaux et de la géologie publiera un rapport sur les crues de 1999. Celui-ci, à l'instar des anciennes publications du Service hydrologique et géologique national consacrées aux crues de 1987 et 1993, présentera les faits principaux et les analyses d'un point de vue statistique.

Office fédéral des eaux et de la géologie



Dr. Chr. Furrer

Directeur

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	3
PRÉFACE	5
INHALTSVERZEICHNIS	7
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
TABELLENVERZEICHNIS	13
ZUSAMMENFASSUNG	15
RÉSUMÉ	21
1 DIE UNWETTERSCHÄDEN IM 1. HALBJAHR 1999	27
1.1 DIE UNWETTERSCHÄDEN VOR AUFFAHRT	27
1.2 DIE MAI-HOCHWASSER 1999	29
1.3 UNWETTERSCHÄDEN IM JUNI 1999	34
1.4 EINORDNUNG UND BEWERTUNG	34
2 ÜBERBLICK ÜBER DAS HOCHWASSERGESESCHEN AN FLIESSGEWÄSSERN UND SEEN	37
2.1 ALLGEMEINES	37
2.2 HOCHWASSERABFLUSSSPITZEN	38
2.3 AUSGEWÄHLTE GANGLINIEN	40
2.3.1 Situation am Rhein	40
2.3.2 Situation an der Linth und Limmat	42
2.4 PEGELSTÄNDE AN SEEN	43
2.5 GESAMTBETRACHTUNG	45
3 WITTERUNGSVERLAUF IM 1. HALBJAHR 1999	49
3.1 DIE STARKSCHNEEFÄLLE JANUAR BIS MÄRZ	49
3.2 WITTERUNGSVERLAUF MÄRZ BIS MAI	54
3.3 HOCHWASSER 10. BIS 15. MAI 1999	54
3.4 HOCHWASSER 19. BIS 22. MAI 1999	55
4 ABFLUSSBILDENDE FAKTOREN DER HOCHWASSER IM MAI 1999	59
4.1 SCHNEEDECKE	59
4.1.1 Datengrundlagen und Auswertung	59
4.1.2 Schneehöhen	62
4.1.3 Wasseräquivalent der Schneedecke	63
4.2 SCHNEESCHMELZE	69
4.2.1 Interpolation des Schneewasseräquivalents aus der Schneehöhe	69
4.2.2 Schmelzperioden an Messstationen	70
4.3 NIEDERSCHLAG	72
4.3.1 Vorregen	72
4.3.2 Ereignisniederschlag	73
4.3.3 Schneefallgrenze	78
4.3.4 Ähnliche Niederschlagsereignisse	78
4.3.5 Jährlichkeiten	79

5	ANALYSE DES WASSERHAUSHALTS AUSGEWÄHLTER EINZUGSGEBIETE	89
5.1	ANALYSE DES WASSERHAUSHALTS AUSGEWÄHLTER KLEINEINZUGSGEBIETE	89
5.1.1	Einordnung der Ereignisse im Alptal	89
5.1.2	Ereignisablauf in den Einzugsgebieten Erlenbach, Vogelbach und Lümpenenbach	90
5.1.3	Bewertung der Ergebnisse aus dem Spissibach	95
5.2	FLUSSEINZUGSGEBIETE	98
5.2.1	Vorgehen	98
5.2.2	Zeitlicher Verlauf	100
5.2.3	Massgebende Prozesse	106
5.3	FALLBEISPIELE	111
5.3.1	Der Einfluss der Schneedecke auf das Mittellandhochwasser im Februar 1999	111
5.3.2	Fallstudie Thur und Thunersee	114
6	VERGLEICH MIT ANDEREN EREIGNISSEN	121
6.1	HISTORISCHE ANALOGFÄLLE	121
6.1.1	Das Hochwasser vom Frühsommer 1566	122
6.1.2	Das Hochwasser vom Frühsommer 1817	123
6.1.3	Das Hochwasser vom Juni 1910	123
6.1.4	Die Hochwasser des Jahres 1970	125
6.2	ANALYSE DER AUSWIRKUNGEN VON SCHNEEREICHEN WINTERN	127
7	ERFAHRUNGEN UND MASSNAHMEN	135
7.1	RÜCKHALT IN DEN SEEN UND DEN KRAFTWERKS-SPEICHERN	135
7.1.1	Grundsätzliches zur Seeregulierung	135
7.1.2	Vorbereitende Massnahmen	136
7.1.3	Rückhalt in den Seen	136
7.1.4	Rückhalt in den Kraftwerksspeichern	136
7.2	VORHERSAGEN DER BEIDEN NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE IM MAI 1999	139
7.2.1	Die synoptische Entwicklung der beiden Ereignisse, die zum Hochwasser führten	139
7.2.2	Vorhersagen des Schweizer Modells (SM)	140
7.2.3	Temperaturverhältnisse während den Hochwasserepisoden im Mai 1999	142
7.3	ABFLUSSVORHERSAGEN	143
7.3.1	Vorhersagetätigkeit bei den Mai-Hochwassern 1999	143
7.3.2	Beratung und Information	143
7.3.3	Ausblick	144
7.4	ERFAHRUNGEN DER KRISENSTÄBE	144
8	LITERATURVERZEICHNIS	147
9	ANHANG	A 1

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

FIG. 1.1:	ORT UND STÄRKE DER UNWETTERSCHÄDEN IM 1. HALBJAHR 1999.	27
FIG. 1.2:	ORT UND STÄRKE DER DURCH DIE BEIDEN MAI-UNWETTER ANGERICHTETEN SCHÄDEN.	29
FIG. 1.3:	VERGLEICH DER ANTEILE DER PRIVATEN UND DER ÖFFENTLICHEN SCHÄDEN FÜR AUSGEWÄHLTE UNWETTEREREIGNISSE.	35
FIG. 2.1:	ÜBERSICHT ÜBER DIE HOCHWASSERSITUATION VOM FRÜHJAHR 1999.	38
FIG. 2.2:	STUNDENMITTELWERTE DES ABFLUSSES AUSGESUCHTER MESSSTATIONEN IM RHEINGEBIET UND PEGELSTAND DES BODENSEES.	41
FIG. 2.3:	STUNDENMITTELWERTE DES ABFLUSSES AUSGESUCHTER MESSSTATIONEN IM LIMMATGEBIET UND PEGELSTAND DES ZÜRICHSEES.	42
FIG. 2.4:	JAHRESHÖCHSTSTÄNDE 1999 AUSGEWÄHLTER SCHWEIZER.	44
FIG. 2.5:	BEDEUTENDE HOCHWASSERSITUATIONEN 1910 - 99: BETROFFENE MESSSTATIONEN (MESSNETZ LHG).	46
FIG. 3.1:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND IM ZEITRAUM 26. - 29. JAN. 1999.	50
FIG. 3.2:	TAGESMITTELTEMPERATUREN (LINIE), VIELJÄHRIGE MONATSMITTELTEMPERATUREN UND TAGESNIEDERSCHLÄGE (SÄULEN) VOM 1. JAN. BIS 31. MAI 1999 AN DEN STATIONEN ST. GALLEN (779 M Ü.M.), GLARUS (515 M Ü.M.); ZÜRICH SMA (556 M Ü.M.) UND ADELBODEN (1320 M Ü.M.).	51
FIG. 3.3:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND IM ZEITRAUM 4. - 11. FEB. 1999.	52
FIG. 3.4:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND (A) IM ZEITRAUM 16. - 18. FEB. 1999; (B) WEITERE ENTWICKLUNG (CA. 21. FEB. 1999).	52
FIG. 3.5:	MITTLERE NORMIERTE VERTEILUNG VON STARKEN TAGESNIEDERSCHLÄGEN (IN %) IM RAUM WALLIS BEI GROSSRÄUMIG GESTEUERTEN WEST- BIS NORDWESTANSTRÖMUNGEN.	53
FIG. 3.6:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND IM ZEITRAUM 4. - 8. MÄRZ 1999.	53
FIG. 3.7:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND IM ZEITRAUM 11. - 15. MAI 1999.	55
FIG. 3.8:	SCHEMATISIERTER DRUCK- UND STRÖMUNGSZUSTAND IM ZEITRAUM 19. - 22. MAI 1999.	56
FIG. 4.1:	NETZ DER VERWENDETEN IMIS-STATIONEN, VERGLEICHSTATIONEN UND MESSSTELLEN DES SLF SOWIE DAS ENET-STATIONSNETZ DER METEOSCHWEIZ.	60
FIG. 4.2:	WIEDERKEHRPERIODE (JÄHRLICHKEIT NACH GUMBEL-METHODE) DER MAXIMALEN SCHNEEHÖHE HS_{max} JEDES WINTERS DER LETZTEN 50 JAHRE FÜR DIE BEIDEN BENACHBARTEN STATIONEN MÜRREN UND WENGEN (BERNER OBERLAND).	61
FIG. 4.3:	DURCHSCHNITTLICHE WIEDERKEHRPERIODE DER MAXIMALEN SCHNEEHÖHEN HS_{max} DES WINTERS 1999 (ISOLINIEN).	62
FIG. 4.4:	DURCHSCHNITTLICHE WIEDERKEHRPERIODE DER MAXIMALEN WASSERWERTE DER GESAMTSCHNEEDECKE WE_{max} DES WINTERS 1999 (ISOLINIEN) SOWIE DIE EINZELNEN STATIONSWERTE.	63
FIG. 4.5:	ZEITLICHE ENTWICKLUNG DES WASSERWERTES DER GESAMTSCHNEEDECKE IM WINTER 1998/99 IN VIER REGIONEN.	64
FIG. 4.6:	DER MAXIMALE JÄHRLICHE WASSERWERT DER GESAMTSCHNEEDECKE WE_{max} WIRD IN DER REGION DAVOS SEIT 1937 (WEISSFLUHJOCH) RESP. 1947 (DAVOS) GEMESSEN.	65
FIG. 4.7:	DARSTELLUNG DER PERCENTILE (SUMMENHÄUFIGKEIT) [%] FÜR DIE STATION GARICHTE (1600 M Ü.M.), DAS WÄGITAL (STANDORTE GÄNGEN 1600 M Ü.M., HEIZLIHÖHE 1400 M Ü.M., MITTEL TANNELSTOFFEL 1250 M Ü.M.) UND DAS LIMMERNGEBIET (STANDORTE ROT NOSSEN 2760 M Ü.M., GEMSFAREN 1960 M Ü.M., DURNACHTAL 1420 M Ü.M.).	66
FIG. 4.8:	HÖHENABHÄNGIGKEIT DES WASSERÄQUIVALENTES AM 1. APRIL IM WÄGITAL UND KLÖNTAL.	67
FIG. 4.9:	HÖHENABHÄNGIGKEIT DES WASSERÄQUIVALENTS AM 1. MAI IN DEN GLARNER ALPEN.	68
FIG. 4.10:	HALBMONATSSUMMEN DER SCHNEESCHMELZE IN MM ZWISCHEN 1. MÄRZ UND 1. JULI 1999 AN AUSGEWÄHLTEN STATIONEN ZWISCHEN 1200 UND 2100 M Ü.M.	70
FIG. 4.11:	HALBMONATSSUMMEN DER SCHNEESCHMELZE IN MM ZWISCHEN 1. MÄRZ UND 1. JULI 1999 AN AUSGEWÄHLTEN IMIS- UND ENET-STATIONEN ZWISCHEN 2100 UND 2800 M Ü.M.	71
FIG. 4.12:	TEMPERATUR- UND NIEDERSCHLAGSVERLAUF AN HOCHGELEGENEN ANETZ-STATIONEN DER ÖSTLICHEN ALPENNORDSEITE IM MAI 1999.	72
FIG. 4.13:	ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 12STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 11. - 15. MAI 1999 (AB 11. MAI 1999, 23 UTC).	74
FIG. 4.14:	ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 24STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 11. - 15. MAI 1999 (AB 11. MAI 1999, 18 UTC).	74

FIG. 4.15: ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 72STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 11. - 15. MAI 1999 (AB 11. MAI 1999, 17 UTC).	75
FIG. 4.16: ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 12STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 19. - 22. MAI 1999 (AB 21. MAI 1999, 15 UTC).	76
FIG. 4.17: ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 24STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 19. - 22. MAI 1999 (AB 21. MAI 1999, 5 UTC).	76
FIG. 4.18: ISOHYETENANALYSE DES NIEDERSCHLAGSREICHSTEN 72STÜNDIGEN NICHT-KALENDARISCHEN INTERVALLS WÄHREND DES NIEDERSCHLAGSEREIGNISSES VOM 19. - 22. MAI 1999 (AB 19. MAI 1999, 6 UTC).	77
FIG. 4.19: JÄHRLICHKEITEN DER PUNKTNIEDERSCHLÄGE FÜR DIE 1-TAGESWERTE BEIM ERSTEN MAI-EREIGNIS (11. ODER 12. MAI 1999).	80
FIG. 4.20: JÄHRLICHKEITEN DER PUNKTNIEDERSCHLÄGE FÜR DIE 2-TAGESWERTE BEIM ERSTEN MAI-EREIGNIS (11. UND 12. MAI 1999).	81
FIG. 4.21: JÄHRLICHKEITEN DER PUNKTNIEDERSCHLÄGE FÜR DIE 5-TAGESWERTE BEIM ERSTEN MAI-EREIGNIS (10. - 14. ODER 11. - 15 MAI 1999).	81
FIG. 4.22: JÄHRLICHKEITEN DER PUNKTNIEDERSCHLÄGE FÜR DIE 1-TAGESWERTE BEIM ZWEITEN MAI-EREIGNIS (21. MAI 1999).	82
FIG. 4.23: FREQUENZDIAGRAMME FÜR FLÄCHEN-MENGEN-VERHÄLTNISSE VON GEBIETSNIEDERSCHLÄGEN IM MITTELLAND MIT DEN WIEDERKEHRPERIODEN 2, 5, 10, 25 UND 50 JAHRE FÜR 12, FÜR 24, FÜR 72 STUNDEN NIEDERSCHLAGSDAUER.	83
FIG. 4.24: FREQUENZDIAGRAMME FÜR FLÄCHEN-MENGEN-VERHÄLTNISSE VON GEBIETSNIEDERSCHLÄGEN IM MITTELLAND MIT DEN WIEDERKEHRPERIODEN 2, 5, 10, 25 UND 50 JAHRE FÜR 12, FÜR 24, FÜR 72 STUNDEN NIEDERSCHLAGSDAUER.	84
FIG. 4.25: FREQUENZDIAGRAMM DER GEBIETSNIEDERSCHLÄGE IM THUR-GEBIET (ANDELFINGEN).	86
FIG. 4.26: SAISONALE VERTEILUNG DER JÄHRLICHEN MAXIMALEN 5-TAGES-GEBIETS-NIEDERSCHLÄGE; EINZUGSGEBIET DER AARE BIS BERN.	87
FIG. 5.1 : DIE GEMESSENEN NIEDERSCHLÄGE UND ABFLÜSSE IM WINTER 1998/99, SOWIE DAS MIT DEM MODELL BROOK SIMULIERTE WASSERÄQUIVALENT DER GEBIETSSCHNEEDECKE FÜR DAS EINZUGSGEBIET DES ERLNBACHS (ALPTAL, KT. SCHWYZ).	90
FIG. 5.2: TÄGLICHE SCHMELZRATEN AN EINEM BEWALDETEN UND EINEM UNBEWALDETEN STANDORT IM EINZUGSGEBIET DES ERLNBACHES (ALPTAL, SZ).	91
FIG. 5.3 : DARSTELLUNG DER HAUPTSCHMELZPERIODE SOWIE DER NACHFOLGENDEN MAI-NIEDERSCHLAGS-PERIODEN ZWISCHEN DEM 19.4. - 1.6. 1999 IM EINZUGSGEBIET DES ERLNBACHS.	92
FIG. 5.4 : DARSTELLUNG DER HAUPTSCHMELZPERIODE SOWIE DER NACHFOLGENDEN MAI-NIEDERSCHLAGS-PERIODEN ZWISCHEN DEM 19. 4. - 1. 6. 1999 IM EINZUGSGEBIET DES VOGELBACHES.	94
FIG. 5.5: DARSTELLUNG VON NIEDERSCHLAG UND ABFLUSS FÜR DIE PERIODE VOM 19. APRIL BIS ZUM 1. JUNI 1999 FÜR DAS GESAMTE EINZUGSGEBIET DES SPISSIBACHES SOWIE DIE TEILEINZUGSGEBIETE (TEG) BAACHLI (1320 M Ü.M.) UND FULWASSER (1190 M Ü.M.).	95
FIG. 5.6: DARSTELLUNG DER NIEDERSCHLAGS- UND ABFLUSSSUMMEN FÜR DIE PERIODE VOM 19. APRIL BIS ZUM 1. JUNI 1999 FÜR DAS EINZUGSGEBIET DES SPISSIBACHES.	96
FIG. 5.7: BEISPIEL FÜR DIE TÄGLICHE FORTSCHREIBUNG DES WASSERÄQUIVALENTS.	99
FIG. 5.8: SCHEMA FÜR DIE ABLEITUNG DES ABFLUSSRELEVANTEN NIEDERSCHLAGES.	100
FIG. 5.9: GEBIETSNIEDERSCHLÄGE FEBRUAR.	101
FIG. 5.10: NIEDERSCHLAG MÄRZ.	101
FIG. 5.11: NIEDERSCHLAG APRIL.	102
FIG. 5.12: TAGESABFLÜSSE BROYE (MITTL. HÖHE CA. 700 M Ü.M.) UND SCHÄCHEN (MITTL. HÖHE CA. 1714 M Ü.M.) FÜR DEN MONAT APRIL.	103
FIG. 5.13: GESAMTWASSERANGEBOT FÜR DAS HOCHWASSEREREIGNIS VOM 10. - 14. MAI.	104
FIG. 5.14: GESAMTWASSERANGEBOT FÜR DAS HOCHWASSEREREIGNIS VOM 19. - 22. MAI.	105
FIG. 5.15: SUMME DER MONATSNIEDERSCHLÄGE, AUFGETEILT IN WASSERANGEBOT AUS REGEN UND SPEICHERUNG IN DER SCHNEEDECKE.	106
FIG. 5.16: DIREKTES WASSERANGEBOT AUS DEM NIEDERSCHLAG IN ABHÄNGIGKEIT DER MITTLEREN EINZUGSGEBIETSHÖHE (BETRACHTUNGSPERIODE: 1.FEB. - 16. JUNI 1999).	107
FIG. 5.17: WASSERANGEBOT AUS DER SCHNEESCHMELZE IN ABHÄNGIGKEIT DER MITTLEREN EINZUGSGEBIETSHÖHE.	108
FIG. 5.18: BEITRAGENDE FLÄCHE UND WASSERANGEBOT AUS DER SCHNEESCHMELZE.	109
FIG. 5.19: VERGLEICH DER HYPOMETRISCHEN KURVEN FÜR 5 VOM HOCHWASSER IM MAI 1999 BETROFFENE GEBIETE.	109
FIG. 5.20: GEGENÜBERSTELLUNG NIEDERSCHLAG BZW. GESAMTWASSERANGEBOT UND ABFLUSS FÜR AUFFAHRT- UND PFINGSTEREIGNIS.	110
FIG. 5.21: EINFLUSS DER HYDROLOGISCHEN VORGESCHICHTE AUF DAS EREIGNIS VOM 12. - 15. MAI 1999.	110

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

FIG. 5.22: GESAMTWASSERANGEBOT FÜR DAS HOCHWASSEREREIGNIS 20. - 22. FEB.	112
FIG. 5.23: TAGESABFLÜSSE VON AUSGEWÄHLTEN EINZUGSGEBIETEN IM FEBRUAR.	112
FIG. 5.24: ENTWICKLUNG VON ABFLUSS, NIEDERSCHLAG, SCHNEESCHMELZE, WASSERÄQUIVALENT UND GESAMTWASSERANGEBOT IN DEN EINZUGSGEBIETEN DER THUR UND DES THUNERSEES.	115
FIG. 5.25: WASSERANGEBOT AUS REGEN UND SCHNEESCHMELZE SOWIE ABFLUSS IN DEN THUR-EINZUGSGEBIETEN IM MAI.	116
FIG. 5.26: WASSERANGEBOT AUS REGEN UND SCHNEESCHMELZE SOWIE ABFLUSS IN DEN THUNERSEE-EINZUGSGEBIETEN IM MAI.	117
FIG. 5.27: SZENARIEN THUNERSEE.	119
FIG. 6.1: HÖHE UND DAUER DER MAXIMALEN HOCHSTÄNDE DES BODENSEES 1816-1999.	123
FIG. 6.2: AUFTEILUNG DER PRIVATSCHÄDEN UND DER SCHÄDEN AN BRÜCKEN, STRASSEN UND GEWÄSSERN IM JUNI 1910 NACH KANTONEN.	124
FIG. 6.3: AUFTEILUNG DER GESAMTSCHADENSUMME 1999 NACH KANTONEN.	125
FIG. 6.4: WASSERÄQUIVALENTE DER SCHNEEDECKE AN AUSGEWÄHLTEN MESSSTATIONEN IN DEN SCHWEIZER ALPEN AM 1. APRIL DER SCHNEEREICHEN JAHRE 1951, 1968, 1970, 1975, 1982, 1984 UND 1999.	127
FIG. 6.5: SIMULIERTE ENTWICKLUNG DES WASSERÄQUIVALENTS DER SCHNEEDECKE IN DEN VERGLEICHSJAHREN NACH DEM 1. APRIL AN DER MESSSTATION DAVOS.	128
FIG. 6.6: VERLAUF DES SEESPIEGELS DES BODENSEES IN DEN VERGLEICHSJAHREN.	128
FIG. 6.7: GLEITENDES 5-TAGE MITTEL DER TEMPERATUR AN DER KLIMASTATION CHUR FÜR DIE SCHNEEREICHEN VERGLEICHSJAHRE.	129
FIG. 6.8: AUFSUMMIERTE NIEDERSCHLÄGE IN DEN VERGLEICHSJAHREN NACH DEM 1. APRIL AN DER STATION CHUR.	129
FIG. 6.9: ZUFLÜSSE ZUM BODENSEE AUS DEM ALPENRHEIN GEMESSEN AN DER ABFLUSSSTATION RHEIN-DIEPOLDSAU BZW. AN DER VORGÄNGERSTATION IN DEN VERGLEICHSJAHREN.	130
FIG. 6.10: VERLAUF DES SEESPIEGELS DES THUNERSEES IN DEN VERGLEICHSJAHREN.	131
FIG. 6.11: SIMULIERTE ENTWICKLUNG DES WASSERÄQUIVALENTS DER SCHNEEDECKE IN DEN VERGLEICHSJAHREN NACH DEM 1. APRIL AN DEN STATIONEN MÜRREN (LINKS, 1660 M Ü.M.) UND HASLIBERG (RECHTS, 1830 M Ü.M.).	131
FIG. 6.12: AUFSUMMIERTE NIEDERSCHLÄGE IN DEN VERGLEICHSJAHREN NACH DEM 1. APRIL AN DER STATION INTERLAKEN.	132
FIG. 6.13: ABFLUSSGANGLINIEN DER ABFLUSSSTATIONEN AARE - RINGGENBERG BZW. UNTERSEEN UND SIMME-OBERWIL IN DEN VERGLEICHSJAHREN.	132
FIG. 7.1: VORHERSAGE DER 24 STUNDENSUMME DES NIEDERSCHLAGS VOM 21. MAI 1999 06 UTC BIS 22. MAI 1999 06 UTC AUSGEHEND VON DER SM-VORHERSAGE DES 20. MAI 1999 12 UTC.	141
FIG. 9.1: KALENDARISCHE 1-TAGESNIEDERSCHLÄGE VOM 11. MAI 1999 (D.H. NIEDERSCHLAG VOM 11. MAI, 7 UHR BIS 12. MAI, 7 UHR).	A 3
FIG. 9.2: KALENDARISCHE 1-TAGESNIEDERSCHLÄGE VOM 12. MAI 1999 (D.H. NIEDERSCHLAG VOM 12. MAI, 7 UHR BIS 13. MAI, 7 UHR).	A 4
FIG. 9.3: KALENDARISCHE 1-TAGESNIEDERSCHLÄGE VOM 21. MAI 1999 (D.H. NIEDERSCHLAG VOM 21. MAI, 7 UHR BIS 22. MAI, 7 UHR).	A 5
FIG. 9.4: 2-TAGESNIEDERSCHLAG VOM 11. - 12. MAI (D.H. NIEDERSCHLAG VOM 11. MAI, 7 UHR BIS 13. MAI 7 UHR).	A 6
FIG. 9.5: 5-TAGESNIEDERSCHLAG VOM 10. - 14. MAI (D.H. NIEDERSCHLAG VOM 10. MAI, 7 UHR BIS 15. MAI, 7 UHR).	A 7
FIG. 9.6: ÜBERBLICK ÜBER DIE UNTERSUCHTEN TEILEINZUGSGEBIETE.	A 8
FIG. 9.7: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT FEBRUAR (1. FEB. - 19. FEB. 1999).	A 8
FIG. 9.8: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT FEBRUAR (19. FEB. - 1. MÄRZ 1999).	A 9
FIG. 9.9: GESAMTWASSERANGEBOT FEBRUAR.	A 9
FIG. 9.10: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT MÄRZ.	A 10
FIG. 9.11: GESAMTWASSERANGEBOT MÄRZ.	A 10
FIG. 9.12: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT APRIL.	A 11
FIG. 9.13: GESAMTWASSERANGEBOT APRIL.	A 11
FIG. 9.14: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT MAI (1. MAI - 15. MAI 1999).	A 12
FIG. 9.15: GESAMTWASSERANGEBOT MAI (1. MAI - 15. MAI 1999).	A 12
FIG. 9.16: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT MAI (15. MAI - 1. JUNI 1999).	A 13
FIG. 9.17: GESAMTWASSERANGEBOT MAI (15. MAI - 31. MAI 1999).	A 13
FIG. 9.18: VERÄNDERUNG WASSERÄQUIVALENT 1. HÄLFTE JUNI.	A 14
FIG. 9.19: GESAMTWASSERANGEBOT 1. HÄLFTE JUNI.	A 14

TABELLENVERZEICHNIS

TAB. 1.1: GESCHÄTZTE SCHADENKOSTEN (IN MIO. SCHWEIZER FRANKEN) WÄHREND AUFFAHRT UND PFINGSTEN 1999 IN DER SCHWEIZ PRO KANTON, AUFGETEILT IN SCHÄDEN AN PRIVATEN GÜTERN UND SCHÄDEN AN GÜTERN DER ÖFFENTLICHEN HAND.	33
TAB. 2.1: HOCHWASSERABFLUSSSPITZEN 1999 IM VERGLEICH MIT DEN BISHERIGEN HÖCHSTWERTEN SOWIE JÄHRLICHKEIT DES EREIGNISSES: STATIONEN AUS DEM BEOBACHTUNGSNETZ DER LHG BEI DENEN DIE MAI-HOCHWASSERABFLUSSSPITZE VON 1999 DEN RANG 1-3 EINNIMMT.	39
TAB. 2.2: MAXIMALE PEGELSTÄNDE AN SEEN 1999 IM VERGLEICH MIT DER SCHADENSGRENZE UND DEN BISHERIGEN HÖCHSTWERTEN.	43
TAB. 2.3: JAHRE MIT BESONDEREN HOCHWASSERSITUATIONEN.	45
TAB. 3.1: GEBIETSNIEDERSCHLÄGE FÜR 1000, 2000 UND 5000 KM ² IN DEN 3 INTENSIVSTEN NICHT-KALENDARISCHEN ZEITINTERVALLEN 12, 24 UND 72 STUNDEN WÄHREND DER BEIDEN EREIGNISSE (1) 10.-15. MAI 1999 UND (2) 19. - 22. MAI 1999 .	56
TAB. 4.1: MAXIMALE 1-TAGES PUNKTNIEDERSCHLÄGE VON GROSSEN EREIGNISSEN DIE IM SOMMERHALBJAHR IN DER NORDOSTSCHWEIZ UND IN VORARLBERG AUFGETRETEN SIND.	78
TAB. 4.2: VERGLEICH DER NIEDERSCHLAGSSUMMEN IM EINZUGSGEBIET DER THUR FÜR DAS AUFFAHRTS-EREIGNIS (10. - 15. MAI 1999), DAS PFINGSTEREIGNIS (19. - 23. MAI 1999) UND DAS HOCHWASSER VOM 7. - 8. AUGUST 1978, DEM GRÖSSTEN NIEDERSCHLAGSEREIGNIS IN DER UNTERSUCHUNGSPERIODE 1961 - 1998.	86
TAB. 4.3: VERGLEICH IM EINZUGSGEBIET DER AARE ZWISCHEN DEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN DES AUFFAHRTSEREIGNISSES 1999 UND DEN JÄHRLICH UND SAISONAL GRÖSSTEN NIEDERSCHLAGS-EREIGNISSEN IN DER UNTERSUCHUNGSPERIODE 1961 - 1998: MAI 1985 SAISONAL, WEIHNACHTEN 1991 JÄHRLICH.	87
TAB. 5.1: TÄGLICHE SCHMELZRATEN IN DEN DREI ALPTALER GEBIETEN FÜR DIE IN DER HAUPTSCHMELZE GELEGENE SCHÖNWETTERPERIODE VOM 1.-3. MAI 1999.	90
TAB. 5.2: DIE MASSGEBENDEN HYDROLOGISCHEN GRÖSSEN IM ERLNBACH WÄHREND DEN VERSCHIEDENEN EREIGNISPERIODEN.	93
TAB. 5.3: DIE MASSGEBENDEN HYDROLOGISCHEN GRÖSSEN IM VOGELBACH WÄHREND DER VERSCHIEDENEN EREIGNISPERIODEN.	94
TAB. 5.4: NIEDERSCHLAG- UND ABFLUSSSUMMEN WÄHREND DEN VERSCHIEDENEN EREIGNISPERIODEN.	96
TAB. 7.1: HOCHWASSERRÜCKHALT DER GROSSEN SEEN IM RHEINEINZUGSGEBIET.	137
TAB. 7.2: WÖCHENTLICHER RÜCKHALT IN DEN KRAFTWERKSSPEICHERN IN MIO. M ³ BZW. ALS DURCHSCHNITTLICHER ABFLUSS IN M ³ /S.	138
TAB. 9.1: MAXIMALER WASSERWERT DER GESAMTSCHNEEDECKE VON 28 SLF-VERGLEICHSTATIONEN IM WINTER 1998/99 IM VERGLEICH ZU FRÜHEREN WINTERN (MITTEL- RESP. MAXIMALWERT).	A 1
TAB. 9.2: CHARAKTERISTIK DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE.	A 15
TAB. 9.3: NIEDERSCHLAG, WASSERANGEBOT UND ABFLUSS IN DER PERIODE 1.2. - 30.4. 1999 UND WASSERÄQUIVALENT PER 1.5. 1999.	A 16
TAB. 9.4: NIEDERSCHLAG, WASSERANGEBOT AUS SCHNEESCHMELZE, GESAMTWASSERANGEBOT UND ABFLUSS FÜR DAS EREIGNIS VOM 10. - 14. MAI.	A 17
TAB. 9.5: NIEDERSCHLAG, SCHNEESCHMELZE, GESAMTWASSERANGEBOT UND ABFLUSS FÜR DAS EREIGNIS VOM 19. - 21. MAI.	A 18

ZUSAMMENFASSUNG

Einführung

Da der Schnee von „gestern“ der Abfluss von „morgen“ ist wurden schon Ende Februar Befürchtungen geäussert, dass das Jahr 1999 grosse Hochwasser bringen könnte. Zwei Starkniederschläge im Mai, mitten in der Periode der stärksten Schneeschmelze, liessen die schwersten Befürchtungen Wirklichkeit werden.

Situationen mit einer erhöhten Hochwassergefahr – sei es durch ausserordentliche Schneefälle oder durch langdauernde Vorregen – können sich wiederholen. Somit war ist es angezeigt, die Ereignisse von 1999 vertieft zu untersuchen. Zweck dieses Berichtes ist es, das Zusammenwirken der nur kurzfristig vorhersehbaren Niederschlagsanteile und des etwas längerfristig bekannten Einflusses der Schneeschmelze zu quantifizieren, um künftig in vergleichbaren Situationen auf diese Erfahrungen zurück greifen zu können. Dieser Bericht wird durch die Hydrologische Mitteilung Nr. 28 "Hochwasser 1999: Daten und statistische Analyse" ergänzt.

Was ist geschehen ?

Die Schäden

Die beiden Hochwasser vom 10. - 15. Mai 1999 (Auffahrt) und vom 22. Mai 1999 (Pfingsten) verursachten zusammen direkte Kosten im Umfange von ca. 580 Mio. CHF. Grössere Schadenssummen wurden 1987 und 1993 erreicht, aber auch 1978 wurden Schäden in ähnlicher Grössenordnung registriert. Somit muss 1999 als das viertgrösstes Schadenjahr seit 1972 eingestuft werden und kann vom Ausmass der finanziellen Schäden als selten aber nicht als aussergewöhnlich bezeichnet werden. Die Besonderheit liegt in der langen Dauer und der grossen räumlichen Ausdehnung der Hochwasser, waren doch praktisch alle Gebiete der Deutschschweiz mit Ausnahme des inneralpinen Raumes mehr oder weniger stark betroffen. Man muss bis ins Jahr 1910 zurück gehen, um ein in diesem Ausmass vergleichbares Hochwasserereignis zu finden.

Die Schäden entstanden vor allem durch Ausuferern der Seen und der grösseren Flüsse des Mittellandes (Aare, Thur, Rhein). Da sich dort Siedlungsschwerpunkte befinden, war schwergewichtig der private Sektor betroffen. Schadenursache war das eindringende Wasser und nicht dessen dynamische Kräfte wie z.B. 1987, 1993 oder 1997 bei Hochwasserereignissen in inneralpinen Gebieten. Dementsprechend waren Schäden an Gütern der öffentlichen Hand vor allem im Bereich der elektrischen Verteilanlagen, der Wasserversorgung und der Abwasserentsorgung zu verzeichnen. Schäden an Strassen und Brücken waren jedoch selten. Nicht vergessen werden dürfen lokale sehr hohe Schadenssummen infolge von Rutschungen des durch die Schneeschmelze und die häufigen Niederschläge im April stark durchfeuchteten Bodens.

Die Hochwasser

Das Auffallendste ist, dass praktisch an allen grösseren Seen ausser dem Genfer-, Langen- und Luganersee hohe bzw. Höchststände eintraten. Dafür sind hohe Zuflüsse während langer Zeit erforderlich und die Schneeschmelze war hierbei eine wesentliche Quelle des Wasserdargebotes. Am Thuner-, Briener-, Sarner-, Boden-, Zuger- und Walensee wurden die höchsten Wasserstände dieses Jahrhunderts registriert. Am Vierwaldstättersee und am Zürichsee wurden die Werte von 1910 knapp nicht erreicht. Die Wasserstände an Bieler- und Neuenburgersee sind wegen der 1972 abgeschlossenen zweiten Juragewässerkorrektion mit den früheren Werten nicht mehr direkt vergleichbar. Als Folge der Seehochstände wurden unterhalb der Seen an Aare, Linth, Limmat, Lorze, Rhein und Reuss Rekordabflüsse gemessen. Von 115 ausgewerteten Abflussmesstationen der Landeshydrologie und -geologie (LHG) registrierten 45 Stationen aussergewöhnliche Hochwasser (Jährlichkeiten > 20 Jahre). 32 Stationen wiesen neue Höchstwerte auf. Von letzteren liegen 15 Stationen unterhalb der eingangs erwähnten Seen. Der Zusammenhang ist offensichtlich: Die hohen Seestände ergeben einen hohen langdauernden Abfluss. Bereits kleine Zuflüsse unterhalb des Sees können dann einen neuen Spitzenwert bewirken. So betrug der Abfluss der Aare in Bern 620 m³/s wovon 570 m³/s oder 92% aus dem Thunersee stammten. Beide Werte liegen deutlich höher als

der bisherige Spitzenwert von 450 m³/s vom 1. Juni 1995 als aus dem Thunersee nur 330 m³/s (75%) abflossen. Auch beim Rhein in Rheinfelden, stammte noch die Hälfte des Spitzenabflusses von 4550 m³/s aus den Seen. Zu beachten ist dass die Abflussspitze in Rheinfelden 3 bis 13 Tage vor den Seehöchstständen auftrat. Es wären also noch ungünstigere Überlagerungen zwischen dem Abfluss aus den Seen und dem direkten Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet denkbar.

Von den verbleibenden 17 Stationen mit Höchstwerten ist bei 4 Stationen die mittlere Höhe des Einzugsgebiets über 1200 m ü.M. – also mit einem bedeutenden Schneeschmelzanteil – und bei 9 Stationen mit mittleren Einzugsgebietshöhen unter 750 m ü.M., also praktisch ohne Einfluss der Schneeschmelze. In diesen Gebieten führte fast ausschliesslich der Niederschlag zur Bildung von Höchstabflüssen. Somit kann allein aus der Analyse der Höhenverteilung der Einzugsgebiete bereits gesagt werden, dass sicher der Niederschlag, aber auch die Schneeschmelze an der Hochwasserbildung beteiligt waren.

An 10 der 32 Stationen wurde der bisherige Höchstwert deutlich (> 10 %) übertroffen. Man kann in diesen Fällen daher von echten Rekorden sprechen: Allerdings weisen 3 dieser Stationen eine kurze Messreihe (< 25 Jahre) auf, so dass bei der Interpretation Vorsicht geboten ist. Mindestens bei zwei (Murg in Wängi und Glatt in Rheinfelden) der verbleibenden 7 Stationen war auf Grund der Höhenlage der Einzugsgebiete alleine der Niederschlag für die Bildung der Rekordabflüsse massgebend. Dass die Schneeschmelze alleine – ohne Akkumulation in den grossen voralpinen Seen – keine bedeutenden Hochwasserspitzen erzeugt, zeigen das Wallis und Graubünden, die zwar im Winter 1999 von Lawinen und grossen Schneemengen heimgesucht wurden, die aber im Mai von den Starkniederschlägen verschont blieben und somit keine der dortigen Messstationen in der Liste der ausserordentlichen Abflüsse aufscheint.

Die Ursachen der Hochwasser

Die Vorgeschichte

In vier Niederschlagsperioden mit aussergewöhnlich starken Schneefällen zwischen dem 26. Januar und dem 8. März 1999 wurde jene mächtige Schneedecke aufgebaut, welche die zahlreichen Lawinen des Winters verursachte und deren Abschmelzen massgeblich an den Überschwemmungen im Mai 1999 beteiligt war. Unmittelbar relevant für ein erstes Hochwasser war die dritte Niederschlagsperiode vom 16. bis 24. Februar. Mit der Westanströmung wurde die Schneefallgrenze auf 1200 m angehoben. Gleichzeitig taute im Mittelland die vom Vorereignis noch vorhandene Schneedecke ab. Diese Situation ist typisch für Winterhochwasser im Mittelland, denn das Abschmelzen einer zwar dünnen, aber grossflächig vorhandenen Schneedecke sorgte im Zusammentreffen mit dem Regen für einen reichlichen Wasseranfall. Der Rhein erreichte in Rheinfelden einen Abfluss von 3470 m³/s. Eine nur um wenige Grade höhere Temperatur oder etwas mehr Niederschlag hätten ähnliche Spitzenabflüsse bewirkt, wie sie im Mai eintraten.

Im Rahmen der Vorgeschichte der Maihochwasser ist der Witterungsverlauf im April wichtig. An 20 Regentagen fiel zwischen 50 und 100 % mehr Niederschlag als im Durchschnitt. Dies führte zu einer ständigen Durchfeuchtung der Böden. Um den 25. April setzte eine ausgeprägte Wärmeperiode ein. In der Zeit vom 25. April bis zum 10. Mai waren die Abflüsse durch die intensive Schneeschmelze – auch in den grossen Höhenstufen – dominiert, da nur unbedeutende Niederschläge fielen.

Die Niederschläge

Gesamthaft ist in der Periode vom 11. bis 22. Mai in der Deutschschweiz und am Alpennordrand grossräumig die 2 bis 2.5-fache Regenmenge des langjährigen Monatsmittels im Mai gefallen. Die Niederschläge verteilten sich vor allem auf zwei Ereignisse:

Zu Auffahrt, vom 11. bis 15. Mai 1999, bildete sich ein langgestrecktes, annähernd ortsfestes Niederschlagsfeld entlang des Alpennordrandes mit einem Zentrum im Thurgau. Die höchsten gemessenen täglichen (lokalen) Niederschlagsspitzen lagen maximal bei 100 mm (12. Mai). Die Zweitagessummen erreichten Werte von 150 mm. Wichtiger als die Punktniederschläge war die Ausdehnung des Niederschlagsfeldes. Für das Thurgau bei Andelfingen (Einzugsgebiet von 1705 km²) wurde ein Zweitagesniederschlag von 116 mm ermittelt, was dem zweitgrössten Gebietsniederschlag seit 1961 entspricht. Er war nur geringfügig kleiner als der Niederschlag beim grossen Schadenhochwasser vom 7/8. August 1978. Mit den Niederschlägen vom 12. Mai vergleichbare 24-h Niederschläge treten in der Nordschweiz alle 5 bis 10

Jahre auf. Bezogen auf ein bestimmtes Einzugsgebiet sind diese Niederschlagsmengen aber seltener. Wie wichtig die örtliche Verteilung ist, zeigt sich beim Einzugsgebiet der Aare bei Bern ($E = 2969 \text{ km}^2$), in dem der Gebietsniederschlag in zwei Tagen nur 48 mm und in 5 Tagen 99 mm betrug. Vergleichbare Niederschlagsmengen sind häufig (Wiederkehrperiode < 3 Jahre) treten jedoch meist im Winter auf.

Nur wenig später folgte zu Pfingsten (21./22. Mai 1999) ein zweites Ereignis, diesmal mit wesentlich höheren Tagesniederschlägen (max. bei 200 mm) aber von kürzerer Dauer. Das Zentrum der Niederschläge lag im Raum Urnersee bis Walensee. Das Berner Oberland wurde diesmal kaum betroffen. Jedoch dehnte sich das Niederschlagsgebiet weiter bis nach Vorarlberg und Bayern aus und verursachte die schweren Hochwasser an der Donau. Für eine Dauer von 12 bis 24 Stunden müssen derartige grossflächige Niederschläge in der Nordschweiz als selten klassifiziert werden, können ihnen doch Jährlichkeiten von 25 bis 50 Jahren zugeordnet werden.

Die beiden Niederschlagsereignisse im Mai 1999 unterscheiden sich daher deutlich. Das Auftaktereignis war durch eher mässige aber über mehrere Tage dauernde Niederschläge, das Pfingstereignis durch kurze aber hohe Niederschläge geprägt. Zur Wetterlage vom 11./12. Mai findet sich z.B. ein typischer Parallel-Fall am 26.9.1987, wobei das Niederschlagszentrum über dem südlichen Jura lag und die maximale 24-stündige Summe mit 150 mm diejenige von 1999 noch übertraf. Bedingung für extreme Niederschläge ist dabei ein starker Temperaturgradient auch in der Höhe. Eine ähnliche Wetterlage wie zu Pfingsten 1999 trat z.B. am 31.7.1977 mit Niederschlagszentrum im Raum Schächental und Sihlsee auf, wobei Tagessummen von lokal über 150 mm, also etwas weniger wie 1999, gemessen wurden.

Die Schneeschmelze

Der Schmelzwasseranfall wird von zwei Faktoren bestimmt: Von der zugeführten Wärme und von der Grösse der schneebedeckten Fläche mit Schmelzbedingungen. Die Schneehöhe auf einer Flächeneinheit beeinflusst vor allem die Dauer des Schmelzprozesses, nicht aber dessen Intensität. Diese Schmelzbedingungen wurden 1999 optimal erfüllt. Die Wärmeperiode vom 25. April bis Mitte Mai ermöglichte eine kontinuierliche Schmelze bis in grosse Höhen mit Spitzenwerten an exponierten Punkten von 40mm/Tag. Wegen der mächtigen Schneedecke des Winters lag auch in tieferen Lagen länger Schnee als üblich, und der schneebedeckte Flächenanteil war höher als zum gleichen Zeitpunkt in anderen Jahren. Am 9. Mai 1999, kurz vor dem ersten Ereignis, waren z.B. noch ca. 68% des Berner Oberlandes schneebedeckt, wobei der Höhenbereich zwischen 1000 und 1500 m ü.M. bereits zu drei Viertel aper war, während sich die Schneedecke zwischen 1500 und 2000 m ü.M. immer noch über 85% der Fläche erstreckte. Oberhalb von 2000m war an diesem Tag eine nahezu noch vollständige Schneebedeckung anzutreffen. In den Vergleichsjahren 1992 und 1998 betrug die Gesamt-Schneebedeckung rund 50%, also rund 20 Prozentpunkte weniger. Die erhöhte Schneefläche 1999 betrifft in der Hauptsache die Höhenstufe zwischen 1500 und 2000 m ü.M., und somit den Bereich, der aufgrund der vertikalen Temperaturverteilung zu dieser Jahreszeit am stärksten vom Schmelzprozess betroffen ist.

Vergleichbare Schneedecken wurden zum Beispiel 1970, 1975 oder 1982 beobachtet und treten im Alpenraum im Durchschnitt etwa alle 10 Jahre auf. Dabei ist zu beachten, dass für die Abflussbildung nicht die Schneehöhe, sondern das Wasseräquivalent der Schneedecke am Beginn der Schmelzperiode massgebend ist. In den tiefen Lagen unter 1500 m ü.M. wurde das Maximum des Schneewasseräquivalents Ende März, in den höheren Lagen erst Ende April erreicht. Die Werte schwanken entsprechend den Höhenstufen und den Regionen sehr stark. Mit 520 mm wurde in Davos (1560 m ü.M.) der höchste Wert der seit 1947 bestehenden Messreihe gemessen. Am Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) nehmen die beobachteten 1200 mm den dritten Rang in der seit 1937 bestehenden Messreihe ein.

Wegen der starken Höhenabhängigkeit der Schneedecke und der Schmelzprozesse ist der Schmelzwasseranfall bezogen auf ein ganzes Einzugsgebiet nicht generalisierbar. Die mittleren Schmelzraten erreichten im März für die Höhenstufe von 500 bis 1000 m ü.M. 2 bis 4 mm/Tag. Höher gelegene Gebiete trugen zu dieser Zeit noch nicht zum Schmelzprozess bei. Im April setzte die Schmelze vor allem im Höhenbereich zwischen 1000 und 2000 m ü.M. mit durchschnittlichen Raten von 3 bis 7 mm/Tag ein. In der ersten Hälfte Mai war der Bereich unter 1500 m ü.M. bereits weitgehend ausgeapert, aber in höheren Lagen setzte eine intensive Schmelze mit Werten von 7 bis 15 mm/Tag ein, welche in der zweiten Hälfte Mai wegen des Temperaturrückganges nahezu halbiert wurde. Der erneute Anstieg im Juni war aufgrund der dann bereits

weitgehend erfolgten Ausaperung nicht mehr kritisch. Angaben zur Schneeschmelze müssen wegen der starken Variabilität immer den Zeitraum und den Ort enthalten.

Die Überlagerung von Schneeschmelze und Niederschlag

Die Hochwasser vom Mai 1999 entstanden durch die Überlagerung der Schneeschmelze und der Niederschläge. Die Beiträge dieser Prozesse waren je nach Region und Ereignis stark unterschiedlich. Für ausgewählte Einzugsgebiete wurden detaillierte Berechnungen über den Anteil von Schneeschmelze und Niederschlag gemacht.

Beispielhaft für die zahlreichen Einzugsgebiete der Voralpen wurde das Einzugsgebiet des Erlenbachs (Alptal) untersucht. Es liegt zwischen 1100 - 1600 m ü.M.. Während der Hauptschmelzperiode vom 19. April bis 10. Mai betrug der Anteil des Schmelzwassers am Abfluss 77%. Dieser Anteil reduzierte sich während des ersten Ereignisses vom 12. Mai auf 22% und beim zweiten auf nur noch knapp 5%, wobei zu diesem Zeitpunkt das Gebiet praktisch ausgeapert war. Für die gesamte Schmelzperiode vom 19. April - 22. Mai errechnet sich ein mittlerer Schmelzanteil von 47%. Die Abflusskoeffizienten waren mit durchschnittlich 92 % während dieser Zeit immer sehr hoch. Die gemessenen Abflussspitzen lagen in diesem kleinen Einzugsgebiet in einem Bereich, der praktisch jedes Jahr einmal erreicht wird.

Das Einzugsgebiet der Thur weist ähnliche Verhältnisse auf. Da das Gebiet beim Einsetzen der Niederschläge praktisch aper war, beschränkte sich hier der Einfluss der Schneeschmelze auf die Bodensättigung vor dem Regen. Zusammen mit den Niederschlägen im feuchten April beschränkte dies das Wasserrückhaltevermögen des Bodens so stark, dass die Abflusskoeffizienten mit gegen 70% markant höher waren als normal. Zu beachten ist, dass zwei in ihren Charakteristiken recht unterschiedliche Niederschlagsereignisse zwei Hochwasser in ähnlicher Grössenordnung (Thur Andelfingen 13. Mai: 1170 m³/s und 22. Mai: 970 m³/s) verursachten.

Im Berner Oberland stellen die registrierten Seestände einmalige Ereignisse dar, obwohl die Niederschläge die niedrigsten Jährlichkeiten aller im Mai 1999 betroffenen Hochwassergebiete aufweisen. Der starke Wasserzufluss in den Thunersee begann ca. am 22. April. Trotz vollständig geöffneter Schleusen stieg der Spiegel des Thunersees vom 1. bis 9. Mai bei einem Schmelzwasseranteil von 75 % bereits um 40 cm. Während des Niederschlagsereignisses vom 10. bis 14. Mai betrug der Schmelzwasseranteil dann nur noch 25%. Der Seespiegel stieg in dieser Zeit nochmals um rund 90 cm. Der Höchststand wurde einen Tag später gemessen, nochmals 15 cm höher. Man kann annehmen, dass die Zuflüsse zum Thunersee Anfang Mai – also kurz vor dem Einsetzen der Niederschläge – mit 350 m³/s im wesentlichen aus der Schneeschmelze stammten und für diesen Prozess einen oberen Grenzwert darstellen. Da die Abflusskapazität der Wehranlage bei der Schadengrenze von 558.30 M.ü.M. nur 360 m³/s beträgt, ist es somit möglich, dass die Schneeschmelze allein den Wasserspiegel des Sees bis an die Schadengrenze anheben kann, denn die Retentionseffekte werden wegen der langen Dauer der Zuflüsse klein. Somit wird klar, dass auch ein relativ unbedeutender Niederschlag in der Periode der maximalen Schneeschmelze einen ausserordentlich hohen Seestand erzeugen kann.

Im Unterschied zu den Seen des Berner Oberlandes waren die Höchststände am Bodensee, Zürichsee und Walensee nicht von der Schneeschmelze, sondern vom Niederschlag dominiert. Die Analyse zeigte, dass ungewöhnlich hohe Anteile des Zuflusses aus den ungemessenen, seenahen und tiefliegenden Einzugsgebieten stammten, in denen die Schneeschmelze weitgehend abgeschlossen war. Diese Einzugsgebiete lagen auch im Zentrum der Niederschläge insbesondere des zweiten Ereignisses vom 22./23. Mai.

Eine Zwischenstellung nimmt der Vierwaldstättersee ein, an dem sowohl aus den ungemessenen, seenahen Gebieten grosse Zuflüsse als auch an den gemessenen Fließgewässern Spitzenwerte beobachtet werden konnten.

Der für die Unterlieger so wertvolle Rückhalt der Seen wirkte sich bei diesen extremen Verhältnissen negativ für die Seeanstösler aus. In den grossen Alpenrandseen des Rheineinzugsgebietes wurden in der Zeit zwischen dem 10. und 15. Mai gesamthaft 950 Mio. m³ zurückgehalten, was einem Abfluss von ca. 2200 m³/s in Rheinfeldern entsprechen würde. Besonders eindrucksvoll ist der Rückhalt am Bodensee in dem zwischen dem 10. und 15. Mai 560 Mio. m³ und bis zum 24. Mai nochmals ca. 400 Mio. m³ zurück gehalten wurden. Dieser Rückhalt ist natürlich, da einerseits der Bodensee unreguliert ist und andererseits bei den übrigen Seen der Einfluss der Regulierung vernachlässigbar ist, weil in diesem Zeitraum die Wehre

ganz geöffnet waren. Es muss hier festgehalten werden, dass hohe Schneeschmelzabflüsse nur für die Seeanstösser und die Unterlieger derselben wesentlich zur Hochwassergefährdung beitragen. Für die Oberlieger bildeten diese hohen, aber gleichförmigen Abflüsse keine Gefahr. Ausschliesslich positiv war der Einfluss der Kraftwerksspeicher. Einerseits konnten die zwischen dem 26. April und dem 21. Juni gespeicherten 765 Mio. m³ Wasser zur Energieerzeugung verwendet werden und andererseits reduzierte dieser Rückhalt die Höchststände der Seen.

Erkenntnisse

Zur Entstehung der Hochwasser

Die hochalpine Schneeschmelze allein verursacht in den Fliessgewässern hohe Abflüsse, aber keine Höchsthochwasser. Erst durch die Rückhaltewirkung der Seen können an diesen Ausuferungen und unterhalb davon sehr hohe Abflüsse entstehen. Aber auch dies führt erst dann zu einem bedeutenden Schadenhochwasser, wenn sich die Schneeschmelze mit Niederschlag als Regen überlagert.

Am Thunersee führte die Schneeschmelze allein zu einem Seestand an der Schadengrenze. So genügte bei den gesättigten Böden ein relativ unbedeutender Regen (T<3 Jahre), um einen Hochstand zu erzeugen, der den bisherigen Höchststand aus dem Jahre 1910 um fast 50 cm übertraf und in der Aare einen Rekordabfluss von 570 m³/s verursachte, der um 40 % über den höchsten bisherigen Messwert aus dem Jahre 1970 lag. Rein statistisch ist dieser Rekordabfluss als extrem selten einzustufen. Beide auslösenden Prozesse (Schneeschmelze und Niederschlag) sind jedoch keineswegs aussergewöhnlich. So bestand z.B. 1970 eine vergleichbare Ausgangssituation. Die damaligen Regenfälle blieben glücklicherweise lokal, so dass es nur zu vergleichsweise geringfügigen Ausuferungen kam. Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses wie 1999 muss daher bedeutend höher angesetzt werden, als es eine rein statistische Analyse der Abflüsse der Aare in Thun vermuten lassen würde.

Anders ist die Situation im Thurgau, am Bodensee, Walensee oder Zürichsee. Bedeutende Gebietsniederschläge mit Jährlichkeiten von über 25 Jahren fielen auf einen von der Schneeschmelze und dem regenreichen April ständig feucht gehalten Boden. Dass unter diesen Vorbedingungen Hochwasser entstehen, die seltener sind als die Jährlichkeit des Niederschlages, entspricht bekannten Mechanismen der Abflussbildung. Die entstanden Hochwasser sind daher im wesentlichen ein Produkt des Niederschlages. Die Schneeschmelze wirkte hier vor allem abflussfördernd, aber nur begrenzt abflussbildend. Sie hatte zusammen mit den Niederschlägen aber auch einen wichtigen Einfluss auf die zahlreichen Rutschungen dieses Frühjahrs.

Die extremen Abflüsse unterhalb der grossen Voralpenseen sind im wesentlichen eine Konsequenz der hohen Seestände. Diese wären noch höher gewesen, wenn nicht die Kraftwerksspeicher, welche am Ende des Winters leer sind, bedeutende Wassermengen zurückgehalten hätten.

Schlussfolgerungen

Auch wenn man bis zum Jahre 1910 zurück gehen muss, um ein vergleichbares Ereignis zu finden, und die Hochwasser des Jahres 1999 in die Kategorie der „Jahrhunderthochwasser“ eingereiht werden können, muss damit gerechnet werden dass ein derartiges Hochwasser wieder kommen wird. Möglicherweise bald, denn Häufungen von Schadenhochwassern in bestimmten Perioden sind aus unbekanntem Gründen öfters zu beobachten. Es sind also die Lehren zu ziehen um beim nächsten Mal besser vorbereitet zu sein.

Angesichts der sehr grossen Wassermengen, der verschiedenen Ursachen, den begrenzten Platzverhältnissen und den allfälligen Auswirkungen auf die Unter- oder Oberlieger wird es schwierig sein, einen ausreichenden technischen Schutz vor derartigen Ereignissen zu verwirklichen. Zudem sind, weil die Ereignisse selten sind, die Kosten in Grenzen zu halten. An bestimmten Stellen – so an der Linth oder an der Aare unterhalb von Thun – wurde mit der Planung von wasserbaulichen Schutzmassnahmen bereits begonnen. Ob Massnahmen gerechtfertigt sind, bedarf einer sorgfältigen Prüfung und ist nicht Gegenstand dieses Berichtes. Aus der Analyse der Arbeit der Krisenstäbe können jedoch einige Lehren gezogen werden:

Verbesserung der Gefahrenanalyse

- Die Erstellung von Gefahrenkarten ist notwendig! Nur wer die möglicherweise gefährdeten Gebiete kennt, kann sich vorbereiten und im Ereignisfall angemessen reagieren.

Verbesserung der Schutzkonzepte

- Es braucht wasserbauliche Schutzkonzepte, die auch extreme Ereignisse berücksichtigen. Schaden kann bei extremen Ereignissen nicht nur durch rein wasserbauliche Massnahmen verhindert werden, sondern erfordert eine Ergänzung durch angepasste Nutzung in den betroffenen Gebieten. Bei einem Hochwasser der Seen ermöglicht das langsame Ansteigen der Seespiegel und die geringe Dynamik der Kräfte den Betroffenen sich im Ereignisfall richtig zu verhalten und vorgängig durch Objektschutz und angepasste Bauweisen Vorsorgemassnahmen zu ergreifen. Wenn diese Sicherungsmassnahmen im Zuge der Schadenbehebung ergriffen werden, entstehen im Vergleich zur reinen Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes keine nennenswerten Mehrkosten.

Verbesserung der Warnung und der Vorhersage

- Ein Lageüberblick über die aktuelle hydrologische Situation ist heute mit Fernmeldesystemen und Dank der Internettechnik möglich und muss ausgebaut werden. Es war ein merkbarer Fortschritt, dass die wichtigsten Messwerte im Bulletin der Landeshydrologie und -geologie frühmorgens jeden Tag verfügbar waren. Rasche Aufdatierungen sind jedoch besonders für schneller ablaufende Ereignisse unbedingt erforderlich.
- Wetter- und Abflussvorhersagen wurden in den letzten Jahren deutlich verbessert. Die Krisenstäbe sollen die Möglichkeit haben, die jeweils aktuellsten Prognosen abrufen zu können, was heute mit der Internettechnik möglich ist. Weitere Verbesserungen bei der Prognosegüte und der Verlängerung des Vorhersagezeitraumes sind ständige Anliegen.

Einfluss der Seeregulierung

- Bei der Bewirtschaftung der Seen ist nach schneereichen Wintern darauf zu achten, dass innerhalb des Reglements die Füllung der Seen hinausgezögert wird, auch wenn die Wirkung dieser Massnahme mit grösser werdenden Ereignissen immer kleiner wird. Der Handlungsspielraum ist aber angesichts der vielfältigen Interessenlagen und der fehlenden Langfristprognosen über mehrere Wochen begrenzt.

Verbesserung der Notfallplanung und des Einsatzes der Krisenstäbe

- Für die Krisenstäbe ist die Vorbereitung entscheidend. Die Gefahrenkarten der Raumplanung sind nach Erfordernis durch Intensitätskarten für spezifische Ereignisse zu ergänzen. Bauten und Anlagen im Hochwasserbereich sollen spätestens in der Phase, in der eine gefährliche Disposition erkannt ist, auf ihre Belastbarkeit überprüft werden. Die Einsatzbereitschaft von Mensch und Material ist sicherzustellen.
- Kommunikation im Krisenstab selbst, mit den Medien und der betroffenen Bevölkerung ist für den Erfolg aller Notmassnahmen von entscheidender Bedeutung.

RÉSUMÉ

Introduction

On sait que les neiges de l'hiver forment les écoulements du printemps. En février déjà, certains craignaient que 1999 soit une année de fortes crues. Deux épisodes pluvieux en mai, au plus fort de la fonte des neiges, vinrent confirmer les pronostics les plus pessimistes.

Des situations susceptibles de provoquer des inondations - on pense aux chutes de neige exceptionnellement abondantes ou aux longues périodes de pluies - peuvent se reproduire à l'avenir; c'est la raison pour laquelle il est utile d'étudier ces événements en détail. On a tenté, dans le présent rapport, de quantifier la conjonction entre de fortes pluies, qu'on ne peut prévoir qu'à courte échéance, et la fonte des neiges qui, elle, est prévisible à plus long terme, dans le but de pouvoir en tirer des enseignements utiles si une situation analogue se présentait dans le futur. Le présent rapport sera complété par la Communication hydrologique N° 28 «Les crues de 1999 : données et analyses statistiques».

Que s'est-il passé ?

Les dégâts

Les deux périodes de crue du 10 au 15 mai (Crue de l'Ascension) et du 22 mai 1999 (Crue de Pentecôte) ont causé des dommages directs de l'ordre de 580 millions de CHF. En 1987 et en 1983, les dommages ont été plus importants, alors qu'en 1972 ils étaient du même ordre de grandeur. L'année 1999 peut donc être classée au quatrième rang depuis 1972 en ce qui concerne l'importance des dégâts. Le montant atteint par les coûts peut donc être qualifié de rare mais non exceptionnel. La particularité des crues de 1999 réside dans leur durée et par l'extension du territoire affecté. En effet, pratiquement toute la Suisse alémanique fut plus ou moins touchée, à l'exception des régions intraalpines. Il faut remonter à 1910 pour retrouver des inondations comparables.

Les dégâts furent surtout dus au débordement des lacs et des cours d'eau les plus importants du Plateau (l'Aar, la Thur, le Rhin). Comme de grandes agglomérations se trouvent précisément dans ces zones, c'est surtout le secteur privé qui eut à souffrir. Les dégâts furent causés par le niveau atteint par l'eau et non pas par son énergie dynamique, comme ce fut le cas en 1987, 1993 et 1997 par exemple, dans les Alpes. Des biens appartenant à des entités publiques eurent aussi à subir des dégâts (installations de distribution du courant électrique, réseaux d'eau potable et d'eaux usées). En revanche, on déplora peu de dégâts aux routes et aux ponts. Par ailleurs, des glissements de terrain locaux se produisirent, le sous-sol étant saturé d'eau à la suite de la fonte des neiges et des fréquentes pluies du mois d'avril.

Les hautes eaux

Des niveaux élevés, voire des niveaux record, ont été enregistrés sur tous les grands lacs à l'exception du lac Léman, du lac Majeur et du lac de Lugano. Les lacs atteignent des niveaux élevés lorsque les débits des affluents sont abondants pendant une longue période. Les apports d'eau provenant de la fonte des neiges y ont dans ce cas largement contribué. Les lacs de Brienz, de Thoune, de Sarnen, de Zoug, de Walenstadt ainsi que le lac de Constance ont atteint leur plus haut niveau du siècle. Les lacs des Quatre-Cantons et de Zurich sont restés très légèrement au-dessous de leur niveau record de 1910. Pour les lacs de Neuchâtel et de Bienne, la comparaison avec les niveaux anciens n'a pas de sens, la deuxième correction des eaux du Jura ayant profondément modifié la situation. En raison du niveau élevé des lacs, des débits record ont été enregistrés dans leurs émissaires l'Aar, la Reuss, la Lorze, la Linth, la Limmat et le Rhin. Des 115 stations de jaugeage du Service hydrologique et géologique national, 45 ont enregistré une crue d'une période de retour supérieure à 20 ans; 32 un record absolu. Parmi celles-ci, 15 sont situées à l'aval des lacs cités plus haut. La relation saute aux yeux: les hauts niveaux dans les lacs provoquent des débits élevés pendant une longue période. Même des petits cours d'eau se jetant dans les émissaires des lacs peuvent alors provoquer des crues record. Le débit de l'Aar à Berne a atteint 620 m³/s, dont 570 (soit 92%) provenaient du lac de Thoune. Ces deux valeurs dépassent le record précédent du 1^{er} juin 1995. On avait alors relevé 450 m³/s

dans l'Aar dont 330 (75%) venaient du lac de Thoune. Dans le Rhin à Rheinfelden, la moitié des 4550 m³/s mesurés lors de la pointe de la crue provenaient des lacs. Remarquons que cette pointe s'est produite entre 3 et 13 jours avant le niveau maximum dans les lacs. La situation aurait donc été pire si le débit maximum à la sortie des lacs avait coïncidé avec les plus forts débits provenant du bassin intermédiaire aval.

Des 17 autres stations où un record a été enregistré, 4 ont un bassin versant situé à une altitude moyenne supérieure à 1200 m (la fonte des neiges y joue donc un rôle important) et 9 à une altitude inférieure à 750 m (la quantité d'eau provenant de la fonte des neiges y est négligeable). A ces 9 stations, ce sont essentiellement les précipitations qui ont provoqué la crue. Ainsi l'étude de la répartition des altitudes dans les bassins versants permet à elle seule d'affirmer que, à coup sûr, les précipitations, mais aussi la fonte des neiges ont provoqué la crue.

A 10 des 32 stations où le niveau n'avait jamais été si haut, la pointe enregistrée a dépassé de plus de 10 % le maximum précédent. On peut donc vraiment parler de record. Il convient cependant d'être prudent dans l'interprétation de ces chiffres. En effet, à 3 de ces stations la série de mesures est courte (< 25 ans). A deux autres au moins des 7 stations restantes (Murg à Wängi et Glatt à Rheinfelden), seules les pluies ont été à l'origine des débits record vu l'altitude relativement basse de leur bassin. L'exemple du Valais et des Grisons montre que la fonte des neiges seule, sans la retenue d'eau dans les lacs, ne provoque pas de crue exceptionnelle. Ces deux cantons avaient pourtant reçu des quantités de neige importantes au cours de l'hiver 1999 et de nombreuses avalanches s'y étaient déclenchées. Ils furent épargnés par les fortes pluies de mai, si bien que l'on ne signale des débits exceptionnels à aucune des stations situées sur leur territoire.

Les causes des crues

La situation au cours des mois précédents

Entre le 26 janvier et le 8 mars, une épaisse couche de neige s'est formée au cours de 4 épisodes de fortes précipitations. Cette neige provoqua les nombreuses avalanches de l'hiver et sa fonte contribua de façon décisive aux inondations du mois de mai. Le troisième de ces épisodes de précipitations se produisit du 16 au 24 février. Ce fut celui qui eut le plus d'importance en ce qui concerne la formation des crues. Un courant d'ouest fit remonter la limite des chutes de neige à 1200 m d'altitude. La couche de neige recouvrant le Plateau depuis l'épisode précédent fondit. La fonte de cette neige, pourtant peu épaisse, ainsi que les précipitations provoquèrent de forts débits sur les cours d'eau du Plateau (3470 m³/s dans le Rhin à Rheinfelden) en raison de la grande surface concernée. Cette situation se présente fréquemment au cœur de l'hiver. Une température légèrement supérieure ou des précipitations un peu plus abondantes auraient pu produire des écoulements du même ordre de grandeur.

Les conditions météorologiques du mois d'avril furent déterminantes pour les crues de mai. On enregistra des précipitations de 50 à 100 % supérieures à la moyenne en 20 jours d'intempéries. Le sol se gorgea d'eau. A partir du 25 avril, un fort réchauffement se fit sentir et jusqu'au 10 mai les écoulements furent essentiellement dus à la fonte des neiges jusqu'à des altitudes élevées, les précipitations ayant été très faibles durant cette période.

Les précipitations

Entre le 11 et le 22 mai, les quantités de précipitations furent 2 à 2,5 fois supérieures à la moyenne pluriannuelle du mois de mai en Suisse alémanique et sur le versant nord des Alpes. Il y eut deux vagues principales de mauvais temps.

La première se produisit à l'Ascension, du 11 au 15 mai, lorsqu'une vaste zone de mauvais temps se fixa sur la Suisse alémanique, son centre étant le bassin de la Thur. Les précipitations journalières maximales mesurées atteignirent localement 100 mm (le 12 mai), le total de 2 jours 150 mm. L'étendue de cette zone pluvieuse eut plus d'importance que les hauteurs d'eau mesurées: pour le bassin de la Thur à Andelfingen (1705 km²), 116 mm de pluie furent mesurés en 2 jours. Cette hauteur de pluie n'a été légèrement dépassée qu'une fois depuis 1961: c'était lors des très importantes crues des 7 et 8 août 1978. Des hauteurs de précipitations comparables en 24 heures se produisent localement tous les 5 à 10 ans dans le nord de la Suisse, moins souvent sur l'ensemble d'un bassin. La variabilité de la répartition géographique des pluies est démontrée par l'étude des précipitations dans le bassin de l'Aar jusqu'à Berne (2969 km²), sur lequel il

n'est tombé que 48 mm de pluie en 2 jours et 99 mm en 5 jours. De telles quantités sont fréquentes (période de récurrence < 3 ans), particulièrement au cours de l'hiver.

Quelques jours plus tard (les 21 et 22 mai), juste avant Pentecôte, se produisit le second épisode pluvieux, plus court mais plus intense (maximum mesuré: environ 200 mm de pluie en 24 heures). Il se concentra sur la région entre le lac des Quatre-Cantons et le lac de Walenstadt, mais la zone pluvieuse s'étendit jusqu'au Vorarlberg et à la Bavière, où elle provoqua une forte crue du Danube. L'Oberland bernois ne fut que peu affecté. Dans le nord de la Suisse, de telles précipitations en 12 et 24 heures sur une si grande surface peuvent être qualifiées de rares. Leur période de récurrence est de l'ordre de 25 à 50 ans.

Les deux épisodes pluvieux de mai 1999 sont donc très différents l'un de l'autre. Celui de l'Ascension ne fut pas très intense mais dura plusieurs jours. En revanche, à Pentecôte, les pluies furent très fortes sur une courte durée. Une situation très semblable à celle des 11 et 12 mai s'était présentée le 26.9.1987 sur le Jura méridional. Le maximum de pluie mesuré en 24 heures fut alors de 150 mm, soit plus qu'en 1999. La condition pour que des pluies aussi exceptionnelles se produisent est la présence d'un fort gradient de température en altitude. Une situation météorologique comparable à celle du second épisode pluvieux peut être trouvée le 31.7.1997 dans le Schächental et les environs du lac de Sihl. Localement, la lame d'eau tombée en un jour fut alors de 150 mm, quantité légèrement inférieure à celle de 1999.

La fonte des neiges

La quantité d'eau libérée par la fonte de la neige dépend de deux facteurs: de l'apport de chaleur et de l'étendue du territoire recouvert de neige participant à la fonte. La hauteur de neige sur une surface donnée détermine le temps nécessaire pour qu'elle fonde, mais n'influe pas sur l'intensité du phénomène. Le temps exceptionnellement doux du 25 avril à la mi-mai est à l'origine de la fonte continue de la neige (atteignant 40 mm/jour aux endroits bien exposés) jusqu'à des altitudes élevées. L'hiver ayant été riche en neige, celle-ci subsistait encore à des altitudes relativement basses. La surface pouvant participer à la fonte était donc plus grande que d'autres années aux mêmes dates.

Le 9 mai 1999, peu avant les premiers événements, quelque 68% de la surface de l'Oberland bernois étaient encore enneigés. Entre 1000 et 1500 m d'altitude, les $\frac{3}{4}$ de la surface étaient libres de neige, le 15 % seulement entre 1500 et 2000 m. Plus haut, le manteau neigeux était pratiquement continu. En 1992 ou 1998, par exemple, la neige recouvrait à peu près 50% du territoire de l'Oberland à la même date, soit presque 20 % de moins qu'en 1999. Le manteau neigeux était exceptionnellement étendu en 1999 sur la tranche d'altitude comprise entre 1500 et 2000 m, soit celle où la fonte des neiges est la plus active étant donné le gradient de température à cette époque de l'année.

Une couche neigeuse d'importance analogue a été relevée en 1970, 1975 et 1982. Elle est observée en moyenne tous les 10 ans dans les Alpes. Remarquons que l'élément déterminant pour la formation des écoulements n'est pas la hauteur de neige mais son équivalent en eau au début de la période de fonte. Au-dessous de 1500 m, celui-ci atteint son maximum à la fin mars et plus haut vers la fin avril. On a mesuré 520 mm à Davos (1560 m), soit la valeur la plus élevée depuis le début des mesures en 1947. Au Weissfluhjoch (2540 m), les 1200 mm mesurés placent l'année 1999 au troisième rang dans la série de mesures remontant à 1937. Ces valeurs varient fortement selon l'altitude et la région.

L'épaisseur de la couche de neige et le processus de sa fonte variant fortement avec l'altitude, la quantité d'eau produite par tout un bassin n'est pas généralisable. La vitesse moyenne d'ablation de la neige atteint 2 à 4 mm/jour en mars entre 500 et 1000 m d'altitude. Plus haut, la fonte n'avait alors pas commencé. Elle débuta en avril entre 1000 et 2000 m, à une vitesse de 3 à 7 mm/jour. Dans la première quinzaine de mai, pratiquement tout avait fondu au-dessous de 1500 m. Aux altitudes plus élevées, le taux d'ablation atteignait alors 7 à 15 mm/jour, valeurs qui diminuèrent de moitié après le 15 mai, à la suite d'une nette baisse de la température. Celle-ci remonta en juin mais le manteau neigeux ayant alors en grande partie fondu, l'eau produite ne causa pas de problème. Vu la forte variabilité du phénomène, tous les relevés relatifs à la fonte des neiges doivent être accompagnés de la date et d'indications sur l'endroit de la mesure.

Simultanéité de la fonte de la neige et des précipitations

Les crues de mai 1999 sont dues au fait que la fonte de la neige et les fortes précipitations coïncidèrent dans le temps. L'importance relative de chacun des deux phénomènes fut très variable selon les régions et

les dates. Les quantités d'eau provenant de la fonte de la neige et celles dues aux précipitations ont été calculées pour quelques bassins versants.

Le bassin de l'Erlenbach (Alptal), représentatif des nombreux bassins des Préalpes, a ainsi été étudié. Il s'étend de 1100 à 1600 m d'altitude. Au gros de la fonte de la neige, du 19.4 au 10.5, l'eau provenant de cette fonte représentait le 77 % de l'écoulement, pour se réduire à 22 % lors du premier épisode de crue le 12 mai et à 5 % pendant le second. La neige avait alors pratiquement fondu. Pour l'ensemble de la période de fonte, du 19.4 au 22.5, la contribution de la fonte de la neige aux écoulements avoisine 47 %. Le coefficient d'écoulement est resté élevé, voisin de 92 % durant cette période. Les débits de pointe ne dépassèrent pratiquement pas les valeurs mesurées chaque année.

La situation fut assez semblable dans le bassin de la Thur. Lors des premières précipitations, la fonte de la neige était presque achevée. Elle n'eut donc qu'une influence indirecte sur les écoulements par le fait qu'elle avait saturé les sols. Ceux-ci étant gorgés d'eau, leur capacité de rétention était très faible et le coefficient d'écoulement, voisin de 70 %, demeura extrêmement élevé par rapport à la normale. On constate que les deux épisodes pluvieux très différents l'un de l'autre provoquèrent deux crues du même ordre de grandeur (1170 m³/s le 13 mai à la station de Thur-Andelfingen et 970 m³/s le 22 mai).

Dans l'Oberland bernois, les niveaux atteints par les lacs constituent un événement unique, bien que la période de récurrence des précipitations soient les plus courtes des régions affectées par les crues de mai. Les forts apports d'eau au lac de Thoune commencèrent le 22 avril. Bien que les vannes des deux barrages aient été complètement ouvertes, le niveau du lac monta de 40 cm entre le 1^{er} et le 9 mai, la proportion d'eau d'origine nivale atteignant

75 %. Pendant les précipitations du 10 au 14 mai, celle-ci ne représentait plus que le 25 %. Le niveau du lac monta encore de presque 90 cm. Jusqu'au maximum, mesuré le 15, le niveau était encore monté de 15 cm. On peut admettre que les apports au lac (350 m³/s) au début mai, peu avant le début des précipitations, provenaient essentiellement de la fonte des neiges, ce qui constitue un maximum. Comme le débit aux barrages de régularisation du niveau du lac n'est que de 360 m³/s lorsque le niveau atteint la limite des dégâts (558,30 m), il est possible qu'avec la fonte des neiges seule cette limite ait été atteinte, la capacité de rétention du sol étant alors faible en raison de la durée du phénomène. Il est donc clair que même de faibles précipitations en pleine période de fonte des neiges peuvent causer des niveaux anormalement hauts dans les lacs.

Contrairement aux lac de Thoune et de Brienz, les lacs de Constance, de Walenstadt et de Zurich atteignirent leur niveau le plus élevé essentiellement en raison des pluies et moins à cause de la fonte de la neige. L'analyse montre qu'une part inhabituelle des apports d'eau à ces lacs provenait des affluents directs au lac, non jaugeés, situés à basse altitude et donc pratiquement libres de neige. Ces bassins étaient d'ailleurs au centre de la zone de précipitations, tout particulièrement lors de la seconde vague d'intempéries les 22 et 23 mai.

La situation au lac des Quatre-Cantons a été intermédiaire. Ont été très importants ici tant les apports des petits affluents directs que les apports des rivières jaugeées.

La rétention de l'eau dans les lacs, qui préserve généralement les riverains de l'aval, s'est révélée cette fois dangereuse pour les habitants des rives des lacs. Les grands lacs périalpins du bassin du Rhin ont stocké au total 950 millions de m³ d'eau entre le 10 et le 15 mai, ce qui correspond à un débit de 2200 m³/s à Rheinfelden. Le lac de Constance à lui seul a retenu 560 millions de m³ entre le 10 et le 15 mai et 400 millions de plus jusqu'au 24 mai. Cette rétention dans les lacs est naturelle étant donné que le lac de Constance n'est pas régularisé et que les vannes des barrages de régularisation des autres lacs étaient complètement ouvertes pendant cette période. Il convient de souligner que les écoulements importants dus à la fonte des neiges contribuèrent largement aux dégâts sur les rives des lacs et le long des cours d'eau plus en aval. A l'amont, en revanche, les débits élevés et bien réguliers dans les cours d'eau ne créèrent aucun danger pour les riverains. Les bassins d'accumulation ont joué un rôle très positif. D'une part, ils retinrent, entre le 26 avril et le 21 juin, 760 m³ d'eau en vue de production de l'énergie électrique et d'autre part réduisirent d'autant les apports aux lacs.

Enseignements

La formation des crues

La fonte des neiges d'altitude, à elle seule, provoque des écoulements importants dans les cours d'eau, mais pas de crues extraordinaires. Cette eau peut causer des inondations dans les lacs où elle est momentanément retenue ainsi que des débits extrêmement élevés à l'aval. Mais c'est seulement si des précipitations sous forme de pluie s'ajoutent à la fonte des neiges que des dégâts importants sont à craindre. La quantité de neige tombée durant l'hiver 1999 a une période de récurrence de l'ordre de 10 ans.

La fonte des neiges seule fit monter le niveau du lac de Thoune jusqu'à la limite des dégâts; une pluie peu abondante ($T < 3$ ans), tombant sur un sol saturé d'humidité, a suffi pour qu'il monte presque 50 cm plus haut que le niveau record de 1910. A l'aval, on enregistra sur l'Aar un débit record de $570 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 40 % de plus que le maximum précédent datant de 1970. Du point de vue statistique, ce débit peut être qualifié d'extrême. Pris séparément, les deux processus à l'origine de ce phénomène (la fonte des neiges et les précipitations) n'avaient rien d'inhabituels. En 1970, juste avant la crue, la situation était très semblable mais les précipitations restèrent heureusement localisées et les inondations furent beaucoup moins importantes. La probabilité pour que se produise un événement tel que celui de 1999 doit donc être beaucoup plus faible que ce que l'analyse statistique des débits de l'Aar à Thoune seule pourrait faire croire.

Dans la région de la Thur, des lacs de Constance, de Walenstadt et de Zurich, la situation fut très différente. Des précipitations importantes d'une période de retour de plus de 25 ans tombèrent sur un sol saturé d'eau à la suite de la fonte de la neige et des abondantes précipitations du mois d'avril. Qu'il se soit formé dans ces conditions des crues plus rares que la période de récurrence des précipitations correspond aux mécanismes connus de la formation des écoulements. Les crues qui se forment sont en conséquence principalement un produit des précipitations. La fonte de la neige a favorisé les écoulements mais n'a pas suffi à créer une crue exceptionnelle. En revanche, elle joua un grand rôle, avec les précipitations, dans la formation des innombrables glissements de terrain du printemps.

Des écoulements extrêmes à l'aval des grands lacs préalpains sont en général la conséquence de niveaux élevés dans les lacs. Ceux-ci auraient été encore plus élevés si les bassins d'accumulation, qui sont vides à la fin de l'hiver, n'avaient pas retenu d'importantes quantités d'eau.

Conclusions

Même s'il faut remonter jusqu'en 1910 pour trouver une crue comparable, et même si l'on qualifie celle de 1999 de crue du siècle, on ne doit pas oublier qu'elle va se reproduire, et peut-être même assez rapidement. En effet, une augmentation de la fréquence des crues dévastatrices a souvent été observée à certaines périodes sans que la raison en soit connue. Il faut donc tirer des enseignements des événements de 1999 afin d'être mieux préparé pour l'avenir.

Il sera difficile de mettre sur pied un système de protection satisfaisant contre de tels événements, vu la quantité d'eau en jeu, les différentes causes du phénomène, l'espace restreint dont nous disposons et les conséquences qui en résulteraient pour les riverains aussi bien à l'amont qu'à l'aval. Les coûts doivent aussi être maintenus dans certaines limites étant donné la rareté de ces événements. La planification de travaux hydrauliques de protection est déjà en route sur la Thur et l'Aar à l'aval de Thoune. Il conviendra d'étudier soigneusement la pertinence de ces mesures, ce qui n'entre pas dans le cadre du présent rapport. Certains enseignements peuvent cependant être tirés des travaux des cellules de crise:

Amélioration de l'analyse des dangers

- Le levé de cartes des dangers est nécessaire. Seul celui qui connaît les endroits menacés peut se préparer et réagir correctement en cas d'événement sérieux.

Amélioration de l'ensemble des mesures de protection

- Il est nécessaire de procéder à l'élaboration de concepts de protection pour les cours d'eau, qui tiennent aussi compte des événements extrêmes. On ne peut pas éviter des dommages seulement avec des mesures constructives. Celles-ci doivent être complétées par une utilisation adéquate du territoire dans

les régions menacées. Sur les rives des lacs, la montée lente des eaux et la faible énergie mise en jeu laissent le temps pour réagir correctement et pour mettre en place des mesures de prévention, soit par une protection ciblée de certains objets, soit par des dispositions constructives adéquates. Si ces mesures appropriées sont prises au moment de la remise en état, il n'en résultera pratiquement pas de frais supplémentaires par rapport à une simple réparation des dégâts.

Amélioration des systèmes d'alarme et des prévisions

- Une vue d'ensemble de la situation hydrologique est possible de nos jours grâce aux systèmes de télétransmissions et aux techniques Internet. Elle doit être davantage développée. La publication tous les matins de bonne heure par le Service hydrologique et géologique national d'un Bulletin contenant les principaux résultats des mesures récentes a déjà constitué un progrès considérable. La mise à jour rapide des données concernant des événements évoluant rapidement est absolument indispensable. Les prévisions du temps et des débits se sont bien améliorées ces derniers temps. Les cellules de crise doivent pouvoir disposer sur appel des prévisions les plus récentes, ce qui est possible avec la technique Internet actuelle. D'autres améliorations sont souhaitables comme la qualité de la prévision et surtout l'allongement de l'antériorité de la prévision.

Effet de la régularisation des lacs

- Il conviendrait qu'après des hivers riches en neige le remplissage des lacs soit retardé dans le cadre des règlements, même si cette mesure ne permet pas d'abaisser de beaucoup les plus hauts niveaux. Étant donné les différents intérêts en jeu et l'absence de prévisions sur quelques semaines, la marge de manoeuvre reste très limitée.

Amélioration de la planification des mesures à prendre et de l'intervention des cellules de crise

- La préparation des personnes formant les cellules de crise est décisive. Les cartes de dangers de l'Office de l'aménagement du territoire doivent être complétées par des cartes d'intensité pour certains événements. Il convient de procéder à un contrôle du risque encouru par les constructions et les installations se trouvant dans les zones menacées au plus tard lorsqu'un danger est signalé. Il faut s'assurer que le personnel et le matériel sont en état d'intervenir.
- L'efficacité des secours dépend en grande partie de la circulation de l'information au sein de la cellule de crise elle-même, mais aussi de celle-ci vers les médias et la population.

1 DIE UNWETTERSCHÄDEN IM 1. HALBJAHR 1999

A. Badoux, Ch. Graf, Ch. Hegg, R. Kimmelerle

Der Winter 1998/99 wurde durch andauernde Schneefälle geprägt, die zu einer ausserordentlich prekären Lawinensituation führten. Eine ausführliche Dokumentation dazu ist der Bericht "Der Lawinenwinter 1999" (SLF, 2000). Schon früh war das erste Hochwasser zu verzeichnen (Unwetter vom 20. bis 22. Feb.). Die grössten Schäden verursachten aber die Mai-Hochwasser an Auffahrt (11. bis 15. Mai) und an Pfingsten (22. bis 24. Mai). Einen Überblick über die aufgetretenen Schäden vermittelt die Karte in Fig. 1.1.

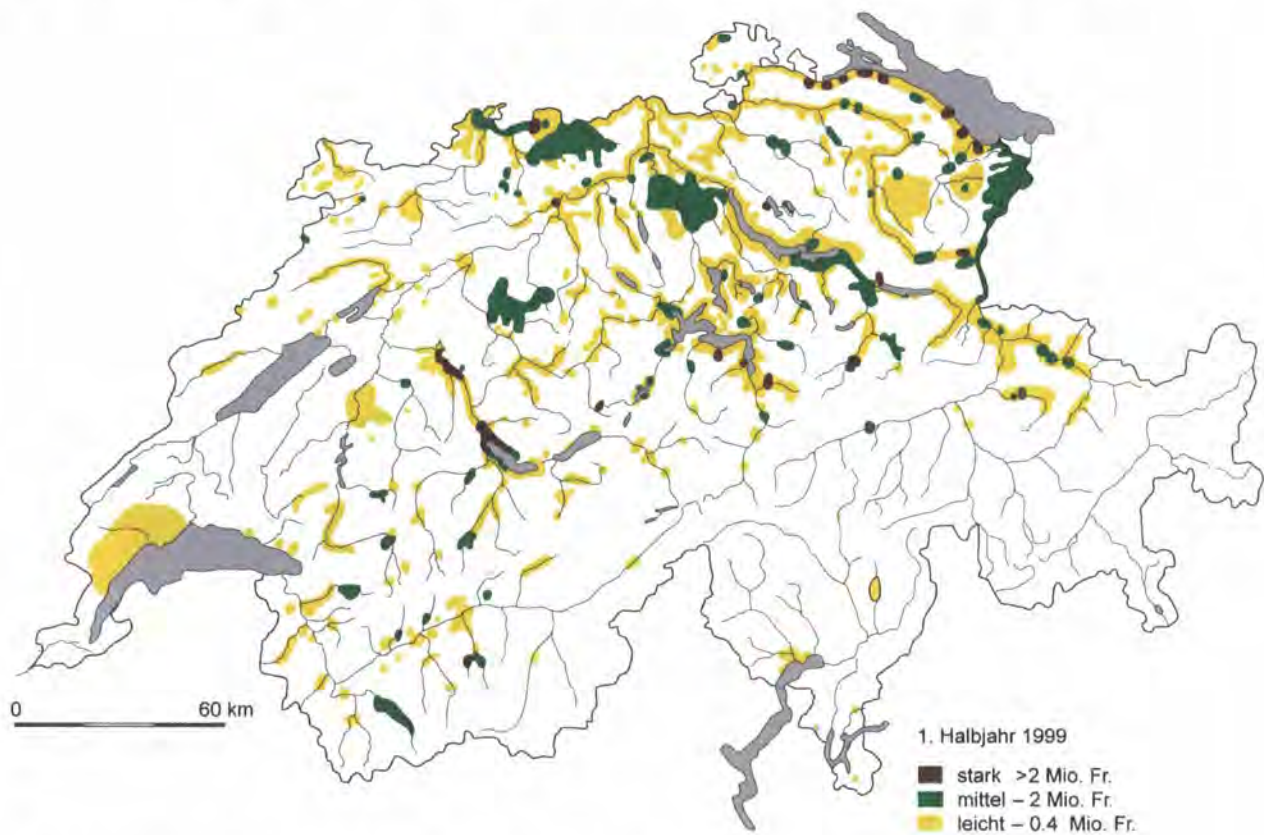


Fig. 1.1: Ort und Stärke der Unwetterschäden im 1. Halbjahr 1999.

1.1 DIE UNWETTERSCHÄDEN VOR AUFFAHRT

Die Niederschlagsperiode vom 20. - 22. Februar 1999

Während der Niederschlagsperiode vom 20. bis 22. Feb. stieg die Schneefallgrenze landesweit leicht an, wobei es im Mittelland intensiv regnete und die vorhandene Schneedecke zu schmelzen begann. Dies führte in den tiefergelegenen Landesteilen zu ansteigenden Flüssen, lokalen Überschwemmungen und zahlreichen Erdrutschen. Der Rhein führte oberhalb der Stadt Basel sehr grosse Wassermengen und in Rheinfelden (AG) beschädigte der Magdenerbach die Rosenau-Bahnbrücke derart stark, dass der Zugverkehr auf der Hauptlinie Basel-Zürich während rund 24 Stunden unterbrochen war. Der Dauerregen und die Schmelze der grösstenteils auch in den Niederungen vorhandenen Schneedecke führte zur Überflutung zahlreicher Gebäude, insbesondere der Kellergeschosse.

Gesamthaft verursachte das Unwetter im Februar Hochwasserschäden von gegen 40 Millionen Franken. Besonders kritisch war die Hochwasserlage in der Nordwestschweiz. Hohe Schäden entstanden in den

Kantone Aargau und Basel-Land (rund 15 bzw. 10 Millionen Franken). In beiden Kantonen ereigneten sich aufgrund der hohen Sättigung der Böden zahlreiche Rutschungen, welche, z.B. in Obermumpf (AG), Buus (BL) oder Wintersingen (BL), Schäden von je mindestens einer halben Million Franken verursachten.

Auch im Kanton Zürich wurden zahlreiche Gemeinden vom Hochwasser betroffen. Die Gesamtschäden dürften dort rund 7 Millionen Franken betragen. In der Nordostschweiz (Schaffhausen, St. Gallen, Thurgau, Appenzell Inner- und Ausserrhoden) sowie in der Zentralschweiz (Obwalden, Zug und Schwyz) entstanden hingegen nur relativ geringe Schäden.

Aus dem Kanton Bern und den Westschweizer Kantonen Jura, Neuenburg und Waadt wurden ebenfalls verschiedene Erdbeben und Überschwemmungen gemeldet. Bedrohlich war die Lage an den Ufern des Doubs, wo Teile des Städtchens St. Ursanne (JU) unter Wasser standen. Zwischen Thörishaus (BE) und Flamatt (FR) verschüttete ein Erdbeben die Gleise der SBB-Linie Bern-Freiburg.

März - April

Überdurchschnittliche Niederschläge und die einsetzende Schneeschmelze sättigten die Böden und führten zu zahlreichen Rutschungen. In über 60 Einzelereignissen registrierte man doppelt so viele Schäden infolge von Rutschungen als von Überschwemmungen.

Im März stürzten im Kanton Glarus unterhalb von Braunwald Pakete einer Rutschung (ca. 300'000 m³) über eine Felswand und gelangten in Form von Murgängen gegen das Dorf Rüti. Dabei sind in Rüti zwei zuvor evakuierte Wohnhäuser beträchtlich beschädigt und ein leerstehender Stall vollständig zerstört worden.

Am 29. April gingen über dem Emmental (BE) und dem Entlebuch (LU) starke Regenfälle und Hagelschauer nieder. Im Emmental sind unter anderem über 50 Häuser beschädigt worden. Die Hauptstrasse und die Bahnlinie zwischen Sumiswald (BE) und Huttwil (BE) mussten gesperrt werden.

Anfangs Mai wurde im Prättigau (GR) die Kantonsstrasse nach Davos zwischen Saas und Mezzaselva innert zwei Tagen durch Erdbeben dreimal massiv verschüttet. Die alte Brücke der Kantonsstrasse musste abgebrochen werden. Davos war erst nach dem Erstellen einer Notbrücke wieder über die Prättigauerstrasse erreichbar.

Das grösste Unwetter ereignete sich im Kanton Nidwalden. Im Bereich des Ischenwaldes zwischen den Ortschaften Beckenried (NW) und Emmetten (NW) lösten sich in der Zeit vom 22. Feb. bis zum 8. Juni - bei sechs grösseren Ereignissen - tranchenweise Erdbeben und Murgänge von einer 1,5 Millionen m³ grossen Rutschungsscholle. Die Kantonsstrasse von Beckenried nach Emmetten musste mehrmals gesperrt werden. Zeitweise mussten über zehn Personen aus sieben Häusern evakuiert werden. Bei diesen Ereignissen wurden unter anderem ein Stall zerstört und ein Hochspannungsmast umgeknickt. Hingegen war die unterhalb des Rutschungsgebiets liegende Autobahn A2 nie ernsthaft gefährdet.

1.2 DIE MAI-HOCHWASSER 1999

Zwei Starkniederschläge vom 10. bis 15. Mai (Auffahrt 1999) und vom 22. bis 24. Mai (Pfingsten 1999) führten zu den grössten Hochwasserschäden des Jahres 1999. Besonders die massiven Überschwemmungen beinahe aller Voralpenseen und deren Zu- und vor allem Ausflüsse, sowie die zahlreichen von Starkniederschlägen und Folgeprozessen (Rutschungen, Murgänge) betroffenen Gebiete der Alpennordseite verzeichneten Schäden in zwei- bis dreistelliger Millionenhöhe. Einen Überblick vermittelt Fig. 1.2. Die entstandenen Schäden sind, wo dies möglich war, entsprechend ihrem Auftreten den beiden Unwetterperioden von Auffahrt und Pfingsten zugeteilt.

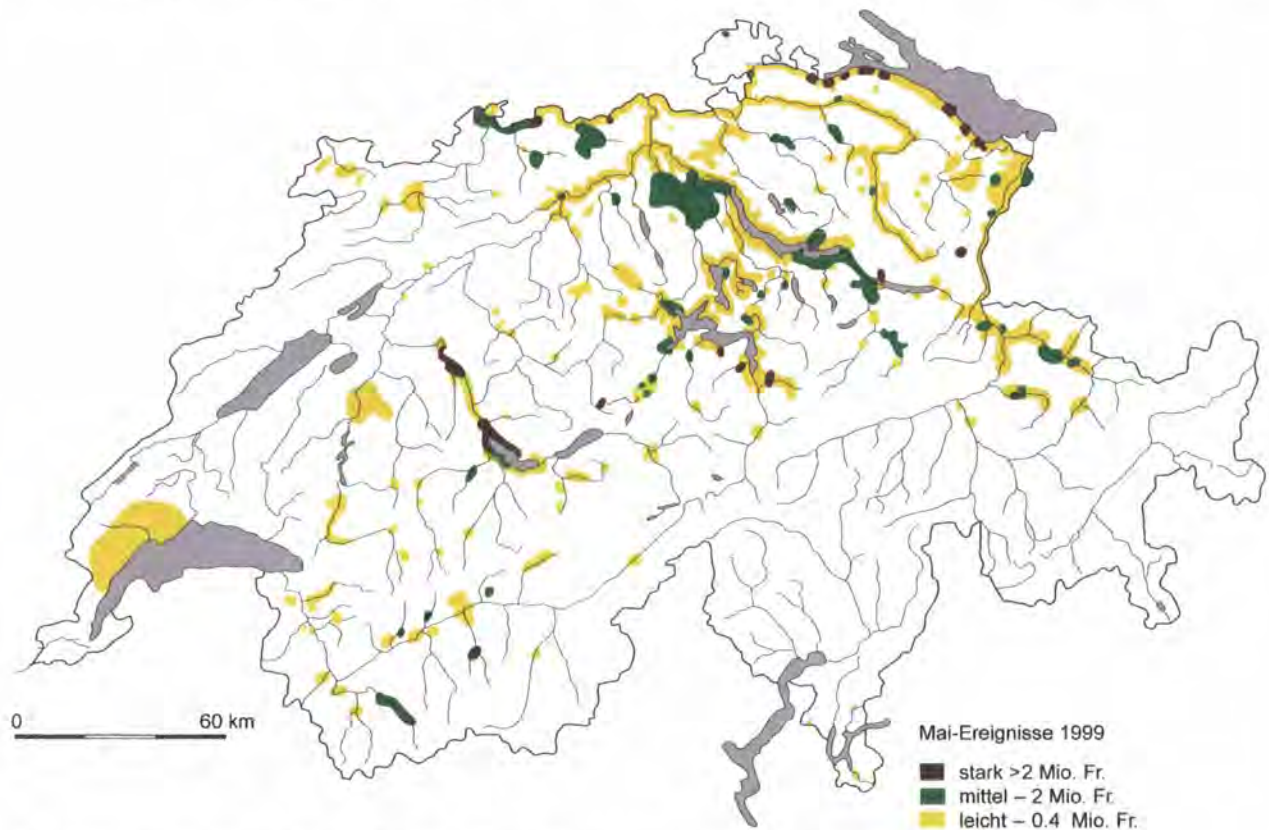


Fig. 1.2: Ort und Stärke der durch die beiden Mai-Unwetter angerichteten Schäden.

Der im Mai von den Hochwassern am stärksten betroffene Kanton war mit einem Gesamtschaden von rund 155 Millionen Franken eindeutig der **Kanton Bern**. Dabei lagen die Schadenszentren hauptsächlich im unteren Thuner Seebecken, in der Stadt Bern und dem dazwischen liegenden Aaretal.

In Thun übertraf der steigende Pegel des Thunersees nach starkem Dauerregen und bei intensiver Schneeschmelze in höheren Lagen bereits am Auffahrtsdonnerstag, dem 13. Mai, die bisherige Rekordmarke von 1910 (558,68 m ü.M.). Während den darauffolgenden Tagen stieg der Seespiegel kontinuierlich weiter, und erreichte am Samstag mit 559,17 m ü.M. seinen neuen Höchstwert. Die Fläche des Thunersees, die normalerweise 48,3 Quadratkilometer umfasst, wuchs zur Zeit des höchsten Seestandes um 2,5 Quadratkilometer. Der See trat dabei auf einer Länge von rund vier Kilometern über sein flaches linkes Ufer, welches in der Folge 400 Meter landeinwärts zu liegen kam. Von der Schadau bis zum Seewinkel im Gwatt standen zahlreiche Häuser im Wasser. Am Freitag, dem 14. Mai, wurden auch Teile der Thuner Innenstadt überschwemmt, was bei mehreren Geschäften zu Wassereinbrüchen führte. Die Schäden an den insgesamt ca. 570 betroffenen Häusern in Thun schätzt die Gebäudeversicherung des Kantons Bern auf rund 31 Millionen Franken. Von den Überflutungen ebenfalls stark betroffen waren in der Region Thunersee die Gemeinden Hilterfingen, Oberhofen und Sigiswil.

Zudem waren verschiedene Verkehrswege vom Hochwasser betroffen. So musste nach Auffahrt unter anderem die Hauptstrasse zwischen Thun und Spiez gesperrt werden, weil sie vom Seewasser überflutet wurde. Bei der Ausfahrt Rubigen stand die Autobahn A6 Richtung Thun teilweise unter Wasser und auch die A8 zwischen Spiez und Interlaken blieb zeitweise geschlossen. An Pfingsten (22. bis 24. Mai) stabilisierte sich die Hochwassersituation in Thun, indem kein weiterer Anstieg des Seepegels mehr erfolgte.

Im Aaretal riss das Hochwasser oberhalb der Hunzikenbrücke an zwei Stellen ca. 10 Meter lange und einen Meter tiefe Lücken in den Aaredamm. Von dort aus floss das Wasser via Auenwald in den Weiler Viehweid bis ins Belpmoos und richtete verschiedenorts massive Gebäudeschäden an. Unter anderem standen Teile des Flugplatzes Belpmoos ab Freitag 14. Mai während mehreren Tagen unter Wasser. Der Flugverkehr musste eingestellt werden und konnte erst am 26. Mai wieder aufgenommen werden. An Gebäuden und Anlagen des Flughafens entstand ein beträchtlicher Schaden.

Am 15. Mai führte die Aare in Thun bis zu $570 \text{ m}^3/\text{s}$ (vgl. Tab. 2.1). Durch das Wasser der Zuflüsse Zulg, Rotache, Kiese und Gürbe angereichert, erreichte die Aare in der Stadt Bern zeitweise einen Abflusswert von rund $620 \text{ m}^3/\text{s}$, trat vom Tierpark Dählhölzli bis zum Zehndermätteli über die Ufer und richtete dabei grosse Schäden an. Am Sonntag, dem 16. Mai, erreichte der Aarepegel in Bern einen neuen Höchstwert von $504,63 \text{ m ü.M.}$ – fast einen Meter über der eigentlichen Hochwassermarken. Von den Überflutungen betroffen war vor allem die Berner Matte, wo zahlreiche Liegenschaften oft bis zum Erdgeschoss unter Wasser standen und somit Bausubstanz und Mobiliar stark in Mitleidenschaft gezogen wurden. Zudem mussten in der Matte ca. 140 Personen vorübergehend evakuiert werden. Allein in der Stadt Bern entstanden an insgesamt rund 400 Gebäuden Schäden von rund 20 Millionen Franken.

Ebenfalls stark vom Mai-Hochwasser an Auffahrt (v.a. 11. und 12. Mai) betroffen war der **Kanton Aargau**, wo Gebäudeschäden in der Höhe von ca. 40 Millionen Franken und ein Gesamtschaden von rund 95 Millionen Franken entstanden. In Mitleidenschaft gezogen wurden vor allem die Gebiete entlang von Rhein, Aare, Reuss und Limmat. Besonders betroffen war dabei das Fricktal, auf welches ungefähr ein Drittel der Gebäudeschäden entfiel. In Rheinfeldern wurde in der Nacht auf den 13. Mai 1999 am Rheinpegel die Rekordmarke von 6,80 Meter erreicht. Die Wassermassen des Rheins drangen kurz vor Mitternacht durch ein Restaurant hindurch und überfluteten in der Folge die Marktgasse sowie den Zollvorplatz. Mehrere Ladenlokale und zahlreiche Kellerräume wurden dabei stark beschädigt, und Ware im Wert von mehreren Millionen Franken wurde zerstört. Massive Schäden entstanden auch in der Gegend rund um den Mutschellen, wo z.B. in Zufikon die Kosten der Instandstellung einer überfluteten Schulanlage auf eine halbe Million Franken geschätzt wurden. Hohe Einzelschäden von mehreren Millionen Franken verursachte das Hochwasser an Auffahrt zudem bei der Stoll Giroflex AG (Büromöbelfabrik) in Koblenz und bei der Grenacher Metall AG in Etzgen.

Die über das ganze Kantonsgebiet vergleichbar hohen Niederschlagssummen (vgl. Kap. 4.3) führten im Aargau verbreitet zu Schadensereignissen. Zahlreiche Strassen und einzelne Bahnstrecken, unter anderem ein Abschnitt der Bremgarten-Dietikon-Bahn, wo zwischen Wohlen und Bremgarten ein Bahndamm abrutschte, mussten wegen Überschwemmungen oder Unterspülungen gesperrt werden.

An Pfingsten blieb der Aargau weitgehend von grösseren Schäden verschont. Dort, wo das Wasser erneut in Kellergeschosse drang (wie z.B. in Rheinfeldern), gab es nach dem Auffahrtseignis nicht mehr viel zu beschädigen.

Über Auffahrt verursachte der hochgehende Rhein in **Basel-Stadt** Schäden an Gebäuden von rund anderthalb Millionen Franken. Betroffen waren vorwiegend Kellergeschosse in den Gebieten Kleinbasel, Marktplatz, Fischmarkt und Kleinhüningen. Während des Höchststandes des Rheinpegels von 8,76 Meter in der Nacht vom 12. auf den 13. Mai flossen in der Stadt Basel über $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasser ab. Aufgrund des andauernden, hohen Wasserstandes musste zudem die Rheinschiffahrt für 36 Tage eingestellt bleiben. Es wird mit Kosten von über vier Millionen Franken für Betriebsausfälle und Liegegelder gerechnet. Im Vergleich zum ersten Hochwasser des Jahres von Ende Februar waren im Mai im **Kanton Basel-Land** geringe Schäden zu verzeichnen. Probleme traten hauptsächlich entlang von hochgehenden Bächen oder Flüssen wie z.B. der Ergolz auf.

Der Kanton **Solothurn** wurde im Laufe des Monats Mai vorwiegend über Auffahrt in Mitleidenschaft gezogen. Ein Grossteil des Gesamtschadens von rund 7 Millionen Franken entfiel dabei auf die Region Olten. Neben unter Wasser stehenden Kellergeschossen, Einstellhallen und Strassenverbindungen sowie

einer weggerissenen Zufahrtsstrasse, war in Olten insbesondere die Firma Mungo Befestigungstechnik AG vom Hochwasser betroffen, wo in den überfluteten Produktionsanlagen und im Zwischenlager ein Schaden in Millionenhöhe entstand.

In der Zentralschweiz verursachten die Hochwasserereignisse an Auffahrt (10. bis 15. Mai) und Pfingsten (22. bis 24. Mai) einen Gesamtschaden von ca. 48 Millionen Franken. Am stärksten betroffen waren dabei die **Kantone Luzern, Nidwalden und Schwyz**. In der Stadt Luzern verursachte der hohe Wasserstand des Vierwaldstättersees nach Auffahrt (434,73 m ü.M.) sowie an Pfingsten (434,93 m ü.M.) zahlreiche Überflutungen von Kellern in den see- und reussnahen Liegenschaften. Grössere Schäden konnten jedoch verhindert werden. Im Bergsturzgebiet am Nünalpstock geriet am 14. Mai, ein Tag nach Auffahrt, eine gewaltige Erdmasse in Bewegung, welche Teile der Ortschaft Sörenberg bedrohte. Einige Liegenschaften mussten evakuiert werden. Die Kosten für Räumung, Gerinnesäuberung und Instandstellungen beliefen sich auf rund eine Millionen Franken. In Nidwalden entstanden die grössten Kosten im Rutschgebiet Emmetten-Beckenried. Auf die Entwicklung der Lage in diesem Gebiet wurde weiter oben eingegangen. Zusätzlich trat der Vierwaldstättersee unter anderem bei Stansstad über die Ufer und überflutete rund 60 Kellergeschosse sowie die örtliche Umfahrungsstrasse. Im Kanton Schwyz lagen die wichtigsten Schadenorte in den Ausser-schwyzzer Gemeinden am Zürich- und Obersee, rund um den Lauerzersee, wo zahlreiche Liegenschaften massiv überflutet wurden, sowie in den Gemeinden Ingenbohl-Brunnen und Küssnacht am Vierwaldstättersee.

In **Uri** führten die Niederschläge an Pfingsten zu zahlreichen Rutschungen. In Bristen (Gde. Silenen) und Planzeren (Gde. Bürglen) wurde ein Ferien- bzw. Bauernhaus von Erdmassen mitgerissen, was einen Toten und mehrere Verletzte forderte. In Bauen am Urnersee wurde ein Taucher von niederfallenden Gesteinsmassen erschlagen. Zusätzlich zerstörte der Rutsch ein Bootshaus mitsamt einigen Booten.

In den übrigen Zentralschweizer **Kantonen Obwalden, Zug und Glarus** entstanden während den Mai-Hochwassern vergleichsweise geringe Schadenssummen. In Obwalden konzentrierten sich die Hauptschäden um den Sarnersee, im Kanton Zug erschwerte eine rund zweiwöchige rutschungsbedingte Unterbrechung der SBB-Linie entlang des Zugersees bei Walchwil den Nord-Süd-Verkehr, und im Kanton Glarus sorgten Überschwemmungen u.a. im Raum Niederurnen-Näfels und im Sernftal für Schäden und Verkehrsbehinderungen.

Während dem Hochwasser an Auffahrt wurde der **Kanton Zürich** flächendeckend in Mitleidenschaft gezogen. In zahlreichen Gemeinden waren über die Ufer tretende Bäche sowie überflutete Kellergeschosse und Strassen zu verzeichnen. Die sehr ergiebigen Niederschläge führten auch zu verschiedenen Erdbeben, wie z.B. in Aathal (Seegräben) zwischen Uster und Wetzikon, wo am Mittwoch, dem 12. Mai, abends die S-Bahn der Linie 5 Richtung Zürich auf eine Rutschablagerung auffuhr. In der Folge entgleisten der Steuerwagen und einer der angehängten Wagen der 200 Meter langen Zugkomposition. Bei dem Zwischenfall wurden 2 Personen leicht verletzt. Ebenfalls problematisch war die Lage in den Ufergemeinden des Zürichsees. Am Samstag dem 15. Mai übertraf der Wasserstand mit 406,91 m ü.M. die bisherige Höchstmarke aus dem Jahr 1953. Am Pfingstsonntag, dem 23. Mai erreichte der Zürichseespiegel mit 407,01 m ü.M. sogar den zweithöchsten je registrierten Stand nach 1910.

Da bereits am 22. Mai zur Entlastung des Zürichsees die Limmatwehre geöffnet wurden, flossen bei der Station Limmat-Zürich (Unterhard) kurzfristig bis zu 630 m³ Wasser in der Sekunde ab. Dies führte im Bezirk Dietikon zu einer prekären Situation. Die Limmat überschwemmte ufernahe Gebäude sowie landwirtschaftliche Nutzflächen. Es entstanden Einzelobjektschäden in Millionenhöhe, wie z.B. im überfluteten Produktionsbetrieb der Confiserie Sprüngli. Insgesamt verursachten die Mai-Hochwasser im Kanton Zürich einen Gesamtschaden von rund 55 Millionen Franken.

Gebäude, Strassen, Flurwege und Bahnstrecken wurden im **Kanton St. Gallen** im Mai während beiden Unwettern an Auffahrt und Pfingsten stark in Mitleidenschaft gezogen. Gesamthaft verursachten die beiden Mai-Hochwasser in St. Gallen Schäden von knapp über 100 Millionen Franken; alleine die Gebäudeschäden belaufen sich bei ca. 3000 Meldungen auf rund 40 Millionen Franken. Der grösste Teil der Schäden entfällt auf das St. Galler Rheintal, das Walenseegebiet, das Bodenseeufer und den Raum um Rapperswil und Jona am Zürichsee.

Im Fliwald oberhalb von Weesen geriet am Pfingstsonntag, dem 23. Mai, die Erde ins Rutschen. Das abgerutschte Material gelangte über den Renzletenbach und den Flibach Richtung Dorf Weesen. Aufgrund der

aufgefüllten Gerinne bildete sich in der Folge ein Rückstau, der Bach trat am Nordrand des bewohnten Gebietes über die Wuhren und überschwemmte zahlreiche bereits evakuierte Gebäude. Insgesamt 60 überschwemmte Liegenschaften, weggerissene Betonsperren im Renzletenbach und die aufwendigen Räumungsarbeiten im Rutschgebiet verursachten einen Schaden von ca. 5 Millionen Franken. In Weesen mussten über Pfingsten 400 Personen vorübergehend ihre Häuser verlassen.

Während beiden Mai-Hochwassern herrschte in der Linthebene eine sehr kritische Situation. Befürchtet wurde aufgrund der grossen Abflussmengen ein Dambruch, dessen Folgen in den Kantonen St. Gallen, Schwyz und Glarus massive Verwüstungen hätten anrichten können. Glücklicherweise waren in der Linthebene schliesslich keine Schäden zu verzeichnen. Rund um den Damm wurden jedoch für Akut- und Sofortmassnahmen mehrere Millionen Franken aufgewendet.

Das Unwetter an Auffahrt verursachte im **Kanton Thurgau** mehrere kleinere Schäden von geringem Ausmass. Eine Ausnahme bildete unter anderem am 12. Mai der Bruch eines Thurdammes im Bereich Pfyn. Kurz vor Mitternacht riss das Wasser der Thur den rechtsseitigen Damm zwischen Grüneck-Müllheim und Pfyn auf einer Länge von ca. 25 Metern auf. Die Wassermassen flossen in der Folge Richtung Pfyn und überfluteten die Keller von drei Gebäuden.

Erst als während und nach den erneuten Niederschlägen an Pfingsten der Pegel des Bodensees weiter anstieg, begann die Lage an den Seeufnern kritisch zu werden. Am Pfingstmontag, dem 24. Mai, erreichte der Wasserstand in Romanshorn die Jahrhundert-Höchstmarke von 397,87 m ü.M. Vom hohen Seespiegel am stärksten betroffen waren die Unterseegemeinden Steckborn, Ermatingen, Berlingen und Gottlieben. Rund zwei Monate lang standen dort die ufernahen Häuser im Wasser. Weitere Folgen des hohen Seepiegels waren unter anderem zerstörte Uferbauten, beschädigte Strassen und Wege sowie verschlammte Anlagen (ARA, Strandbäder etc.).

Im Thurgau verursachten die Mai-Hochwasser Gebäudeschäden von rund 25 Millionen Franken, der grösste Teil entfällt auf die Gebiete entlang des Unter- und Bodensees. Bis in den Herbst gingen bei der Thurgauischen Gebäudeversicherung rund 2500 Schadensmeldungen ein. Der Gesamtschaden belief sich auf über 60 Millionen Franken.

Im **Kanton Graubünden** fielen die Schäden an der Infrastruktur der öffentlichen Hand mit über 10 Millionen Franken - bei einem Gesamtschaden von rund 15 Millionen Franken - stark ins Gewicht. Über Pfingsten (22. bis 24. Mai) wurden nach zahlreichen Rutschen unter anderem Wege beschädigt, und Bachläufe sowie Geschieberückhaltebecken mussten geräumt werden. Zum selben Zeitpunkt waren im nördlichen Churer Rheintal, im Schanfigg und in der Bündner Herrschaft Überflutungen zu verzeichnen.

In den übrigen Ostschweizer **Kantonen Appenzell Inner- und Ausserrhoden** sowie **Schaffhausen** belaufen sich die Schäden der Mai-Hochwasser je auf eine Million bis 2,5 Millionen Franken. In Appenzell Ausserrhoden ereigneten sich vorwiegend während dem Auffahrtseignis mehrere Rutschungen. Unter anderem wurden am Donnerstag, dem 13. Mai, die Gleise der Appenzeller Bahnen zwischen Bühler und Gais auf einer Länge von rund 50 Meter durch über 100 m³ Steine und Schlamm verschüttet. Im Kanton Schaffhausen waren in Stein am Rhein rund 50 Liegenschaften vom hochgehenden Rhein betroffen. Allein dort dürfte an Gebäuden und Mobiliar ein Schaden von gegen einer Million Franken entstanden sein.

Die Westschweiz wurde von den Mai-Hochwassern an Auffahrt und Pfingsten nur geringfügig in Mitleidenschaft gezogen. Die **Kantone Genf, Neuenburg, Jura** und **Freiburg** weisen dabei eine Schadenssumme von maximal einer Million Franken auf. Im **Kanton Waadt** verursachten Erdbeben relativ hohe Schäden an den Gütern der öffentlichen Hand.

Im **Wallis** verursachten zahlreiche über die Ufer tretende Bäche und Erdbeben massive Schäden an Gütern der öffentlichen Hand. Am stärksten betroffen war die Gemeinde Grimentz im Val d'Anniviers, wo sich nach zwei Erdbeben am 12. bzw. 14. Mai Schlammmassen bis ins Dorf ergossen. Dabei wurden mehrere Chalets und Gasthäuser sowie Fahrzeuge und Brücken beschädigt und Schäden von gegen 10 Millionen Franken verursacht.

Im **Kanton Tessin** entstanden im Mai keine Schäden durch Unwetter.

Tab. 1.1: Geschätzte Schadenkosten (in Mio. Schweizer Franken) während Auffahrt und Pfingsten 1999 in der Schweiz pro Kanton, aufgeteilt in Schäden an privaten Gütern und Schäden an Gütern der öffentlichen Hand.

Kanton	öffentliche Schäden	private Schäden	Total (gerundet)
BE	21.4	135	156
SG	16.5	85.5	102
AG	7	85	92
TG	12	50	62
ZH	15	40	55
GR	13.7	5	19
VS	12.5	2.5	15
SZ	5.5	7	13
LU	6.5	5.5	12
GL	4.4	3.6	8
BS	1.3	6	7.5
SO	1.7	5.3	7
UR	2.8	3.5	6.5
OW	3.3	1.2	4.5
BL	1.4	3	4.5
NW	1.3	2.5	4
ZG	2	1	3
VD	2.5	0.4	3
SH	1.1	1.5	2.5
AR	0.5	1	1.5
AI	1	0	1
FR	0.5	0.5	1
GE	0.7	0	1
JU	0.2	0.2	0.5
NE	0	0	0
TI	0	0	0
Total	135	445	580

1.3 UNWETTERSCHÄDEN IM JUNI 1999

Die Hochwassersituation entspannte sich nach Pfingsten (22. bis 24. Mai) nur langsam. Vielerorts blieb eindringendes Grundwasser immer noch ein grosses Problem, welches sich bei jedem Gewitter wieder verschärfte.

Die Hauptschadenorte lagen nach Pfingsten bis Ende Juni in den Kantonen Bern und Thurgau sowie im Baselbiet, wo schon Ende Mai mehrere Gewitter, z.T. mit Hagel, zu Überschwemmungen, Erdrutschen und zu Schäden in der Höhe von 2 Millionen Franken führten. Im Tessin tobten anfangs Juni starke Gewitter. In Porto Ronco und im Bleniotal blockierten Erdrutsche und entwurzelte Bäume Strassen. Die grössten Schäden entstanden beim heftigen Unwetter vom 2./3. Juni. Ein Hagelzug zog quer durch die Deutschschweiz und richtete alleine im Kanton Bern Überschwemmungsschäden von 10 - 15 Millionen Franken an. Mitte Juni gingen an zahlreichen Orten kurze, kräftige Gewitter nieder. Am 14. entlud sich ein kurzes, dafür um so verheerenderes Gewitter über dem Küssnachterberg und richtete in Maur (ZH) grosse Schäden an. In der gleichen Nacht ereigneten sich in der Gegend von Romanshorn und Kreuzlingen sowie in Güttingen Gewitter. Schliesslich verursachten starke Gewitter Ende Juni (27.) in Rüfenacht (BE), im Berner Oberland, im Emmental und im Mittelland sowie in Basel überflutete Keller und Einstellhallen. An verschiedenen Orten wurden im Juni infolge der heftigen Unwetter Hangrutschungen beobachtet. Im Lauterbrunnental musste der Betrieb der Standseilbahn auf die Grüschalp wegen einer tiefgründigen Hangbewegung für einige Zeit eingestellt werden, da Schäden an der Infrastruktur entstanden waren. Insgesamt richteten die Unwetter von Ende Mai bis Ende Juni Schäden in der Höhe von ca. 15 - 20 Millionen Franken an. Die Unwetterschäden, die im weiteren Verlauf des Jahres 1999 aufgetreten sind, bilden keinen Bestandteil des vorliegenden Berichts. Sie sind aber in Hegg et al. (2000) erläutert.

1.4 EINORDNUNG UND BEWERTUNG

Gesamthaft belaufen sich die Schäden im ersten Halbjahr 1999 somit auf etwa 640 Millionen Franken, wovon etwa 580 Mio. Franken auf die beiden Mai-Ereignisse entfallen. Je nachdem wie der Gesamtschaden auf diese zwei Ereignisse aufgeteilt wird, liegen vier bis fünf Ereignisse seit 1972 (Aug. 1987, Sept. 1993 (2 Ereignisse), Aug. 1978 und Juli 1987) mit ihrem Schadenausmass mindestens in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Hälfte der Schäden vom Mai 1999. Das finanzielle Schadenausmass dieser zwei Ereignisse ist somit zwar als selten, aber nicht als aussergewöhnlich zu klassieren. Mit Unwetterschäden mindestens in einem vergleichbaren Ausmass (einige 100 Millionen Franken) muss in der Schweiz alle paar Jahre gerechnet werden.

In diesen Zahlen nicht berücksichtigt sind die indirekten Schäden, welche die Hochwasser verursacht haben. Umwegkosten durch unterbrochene Verkehrswege, Einnahmeausfälle im Tourismus, Veränderungen im Einkaufsverhalten, wenn die gewohnte Verkaufsstelle über mehrere Wochen geschlossen bleibt, etc. sind schwer zu erfassen und oft kaum mit allfälligen Gewinnen aus den Verlagerungen aufrechenbar. Die indirekten Kosten werden hier deshalb nicht betrachtet, auch wenn sie gerade bei langen und grossflächigen Ereignissen, wie dies die Hochwasser vom Mai 1999 darstellen, einen sehr erheblichen Umfang annehmen können.

Aussergewöhnlich waren die Ereignisse vor allem in Hinblick auf ihre räumliche Ausdehnung und die zeitliche Dauer (vgl. auch Kap. 2). Während in der Regel die Alpenrandseen die Auswirkungen von seltenen Niederschlägen weitgehend zu puffern vermögen, führten die grossen Wassermengen dieses Jahres gerade bei den Seen und ihren Ausflüssen zu den grössten Schäden. Das einzige Ereignis in diesem Jahrhundert, bei dem der betroffene Raum ähnlich gross war und auch die Alpenrandseen in einem ähnlichen Ausmass betroffen waren, ist jenes von Ende Juni 1910. Auch bei jenem Ereignis spielte das Zusammentreffen der Schneeschmelze mit seltenen Starkniederschlägen eine wesentliche Rolle (vgl. Kap. 6).

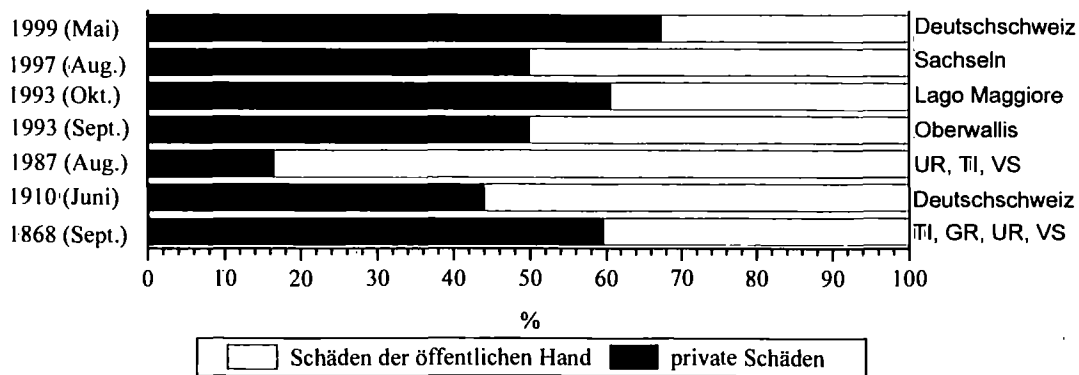


Fig. 1.3 Vergleich der Anteile der privaten und der öffentlichen Schäden für ausgewählte Unwetterereignisse.

Eine weitere Besonderheit der Ereignisse von 1999 liegt darin, dass vor allem private Güter und weniger Güter der öffentlichen Hand (Verkehrswege, Infrastrukturanlagen, etc.) betroffen waren (vgl. Fig. 1.3). Entsprechend hoch liegt mit etwa 2/3 der Anteil der versicherten Schäden. Im Vergleich dazu sind bei "normalen" Schadenereignissen (z.B. Brig, 1993 oder Sachseln 1997) private und öffentliche Güter je zu etwa 50 % betroffen. Einzig beim Unwetterereignis von 1993 im Tessin, bei dem ebenfalls Seeüberflutungen für einen wesentlichen Teil der Schäden verantwortlich waren, überstiegen die privaten Schäden deutlich die 50%-Marke. In dieser Betrachtung fällt das Ereignis von 1987, bei dem 4/5 der Schäden an Gütern der öffentlichen Hand anfielen, etwas aus dem Rahmen. Dies dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, dass 1987 wichtige Kommunikationsträger über weite Strecken parallel zu den vom Hochwasser am schwersten betroffenen Gerinnen verliefen. Nicht direkt vergleichen lässt sich die Verteilung der Schäden von 1868 und 1910, da sich vor allem die Kostenstruktur innerhalb der privaten Schäden grundlegend gewandelt hat. Während in dieser Kategorie bis in die Mitte dieses Jahrhunderts vor allem die Schäden am Kulturland ins Gewicht fielen, sind es in den letzten Jahren weitgehend die Schäden an Gebäuden und Mobiliar.

Der grosse Anteil an privaten Schäden beim Ereignis 1999 ist einerseits darauf zurückzuführen, dass vor allem die Seen und die grossen Flüsse des Mittellands und des Alpenrandes betraf, an denen sich zahlreiche Siedlungen befinden. Eine weitere wichtige Ursache ist aber auch die Tatsache, dass vor allem langsam fliessendes Wasser über die Ufer trat. Dieses dringt in Häuser und Keller ein und führt dort zu erheblichen Schäden. Die Gebäudestruktur aber auch Strassen und andere Anlagen überstehen diese Überflutungen oft weitgehend unbeschadet. Zudem fanden nur vergleichsweise kleine Feststoffumlagerungen statt, welche sich dort, wo sie auftraten, vor allem auf die Gerinne selbst und den unmittelbaren Uferbereich beschränkten. Bei anderen Grossereignissen dagegen, wie z.B. 1987 im Urnerland oder 1993 in Brig, traten wesentlich grössere Erosionen und entsprechend auch Ablagerungen in einem viel weiteren Umfeld um die eigentlichen Gerinne auf. Und es waren oft die grosse Erosion (z.B. durch die Reuss 1987) oder die Ablagerungen (z.B. in der Innenstadt von Brig 1993), welche die grössten Schäden zur Folge hatten.

FAZIT:

Das finanzielle Ausmass der Schäden ist selten, aber nicht aussergewöhnlich. Als aussergewöhnlich ist hingegen die grossflächige Verteilung der Schäden anzusehen. In diesem Jahrhundert weist einzig das Ereignis von Ende Juni 1910 ein ähnliches Schadenbild auf.

2 ÜBERBLICK ÜBER DAS HOCHWASSER- GESCHEHEN AN FLIESSGEWÄSSERN UND SEEN

Hugo Aschwanden

Wie im vorangehenden Kapitel erläutert, waren von den Mai-Hochwassern 1999 zahlreiche grosse Flüsse und Seen betroffen. An diesen Gewässern bestehen in der Regel Messstellen. Im folgenden Kapitel werden deshalb, nach einer kurzen Einführung in die Messwerterfassung und -übermittlung der Landeshydrologie, die gemessenen Abflüsse vom Mai 1999 erläutert und mit denen früherer Ereignisse verglichen. Für ausgewählte Gebiete werden zudem die Hochwasserganglinien aufgezeigt. Eine detaillierte Beschreibung der hydrologischen Beobachtungen an den LHG-Messstationen ist in Aschwanden (2000) enthalten.

2.1 ALLGEMEINES

Die LHG betreibt an den grösseren Seen und Flüssen ein Netz von über 250 Messstellen, bei denen der Wasserstand kontinuierlich aufgezeichnet wird. Dank intensiven Anstrengungen während der letzten Jahre werden bei mehr als der Hälfte davon die Daten digital aufgezeichnet und täglich – im Bedarfsfall häufiger – in die Abfragezentrale der LHG übermittelt, wo im Falle der Fließgewässer die Wasserstandsdaten automatisiert in Abflusswerte umgerechnet werden (Luder, 1996). Dies hat es im Frühjahr erstmals erlaubt, eine Hochwassersituation grösseren Ausmasses praktisch online mitzuverfolgen und dem Informationsbedürfnis der Behörden, der Krisenstäbe, der Einsatzleitungen vor Ort, der Prognosedienste, der Medien sowie der Öffentlichkeit gerecht zu werden. Bis auf wenige Ausnahmen haben die Messstationen auch bei den extremen Hochwasserständen funktioniert und Daten übermittelt. Dies nicht zuletzt dank des Einsatzes der LHG-Techniker im Feld, die im Rahmen ihres Pickettdienstes auch an den Feiertagen und Wochenenden die Messstationen betreuen.

Im Folgenden wird ein Überblick über die hydrologischen Beobachtungen während der Hochwassersituation im Monat Mai gegeben. Die LHG publiziert in der Reihe „Hydrologische Mitteilungen“ (Aschwanden, 2000) eine ausführlichere Darstellung und Analyse ihrer Messungen. Insbesondere der extremwertstatistischen Einordnung wird dort mehr Raum gegeben.

Beim Lesen oder der Interpretation der folgenden Ausführungen sind zwei grundsätzliche Probleme zu beachten, die bei der Berechnung von Abflüssen und speziell bei der automatischen Berechnung von Echtzeitwerten auftreten können: Erstens sind die sogenannten P/Q-Kurven, welche die Beziehung zwischen Pegelstand und Abfluss festhalten, über die Zeit gesehen nicht konstant. Erosions- und Akkumulationsprozesse im Gerinne können gerade bei Hochwasserereignissen bewirken, dass sich die Gerinnegeometrie und somit zwangsläufig auch die P/Q-Kurve massiv ändern. Ob ein Hochwasser Geometrie und Kurve verändert hat, kann unter Umständen rasch festgestellt werden. Hingegen kann es Wochen oder Monate dauern, bis die neue P/Q-Kurve in ihrer Form bestimmt werden kann, weil dazu durch Feldequippen mehrere Wassermessungen (z.B. Abfluss-Eichmessungen mit hydrometrischen Flügeln) bei verschiedenen Wasserständen (Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbereich) ausgeführt werden müssen. Bei der Berechnung von Echtzeit-Abflüssen wird also immer das Risiko eingegangen, dass die verwendete P/Q-Kurve nicht mehr gültig ist. Zweitens kann es wiederum speziell bei Hochwassern vorkommen, dass ein extrem hoher Pegelstand durch die verwendete P/Q-Kurve nicht mehr abgedeckt wird. Dies ist während der Hochwasser vom Mai 1999 auch bei unserer Abfragezentrale mehrere Male vorgekommen. Der Operateur musste in die Automation eingreifen und die P/Q-Kurven von Hand extrapolieren, was unter Umständen sehr anspruchsvoll sein kann und Kenntnisse der Gerinnegeometrie voraussetzt.

Aus diesen Gründen müssen rasch vermittelte Werte grundsätzlich als „provisorisch“ deklariert werden. Die Grundlagen der untenstehenden Ausführungen repräsentieren den Kenntnisstand vom April 2000. Es ist nicht ganz auszuschliessen, dass einzelne Werte im Verlaufe des Bearbeitungsprozesses bis Mitte Jahr noch geringfügig ändern.

2.2 HOCHWASSERABFLUSSSPITZEN

Die Fig. 2.1 zeigt die geographische Verbreitung der Hochwasser im Frühjahr. Auffallend ist die Konzentration auf ein Gebiet östlich der Simme / Aare und nördlich der Alpen. In der Südschweiz und im Inneren der Alpen traten keine Hochwasser auf. Die Hochwasser im Jura datieren mehrheitlich vom Februar, diejenigen der anderen Regionen gehen auf die beiden Mai-Ereignisse zurück. An 32 Stationen aus dem Messnetz der LHG, rund 2/3 davon seit über 50 Jahren in Betrieb, wurden die höchsten Abflüsse der jeweiligen Messperiode beobachtet, an 13 weiteren die zweit- und drittgrössten. Mit der Aare, der Reuss, der Limmat, der Glatt, der Thur, der Töss und dem Rhein waren im Hochwassergebiet alle grossen Flüsse betroffen. Eine besondere Situation ergab sich beim Walensee, wo weder die Linth aus dem Glarnerland noch die Seez im Oberlauf speziell viel Hochwasser führten und trotzdem am Linthkanal eine bedrohliche Situation entstand. Neben der Schneeschmelze, welche den See kontinuierlich ansteigen liess, muss der Niederschlag im bzw. der Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet eine bedeutende Rolle gespielt haben. Die Station Thur-Stein in der gleichen Region verzeichnete das höchste gemessene Hochwasser, was diese Annahme unterstützt. Das Zentrum des intensivsten 24-Stunden Niederschlags lag denn auch etwas nördlich des Walensees, wo an Pfingsten Niederschläge bis gegen 200 mm gemessen wurden (vgl. Kap. 4.3.2).

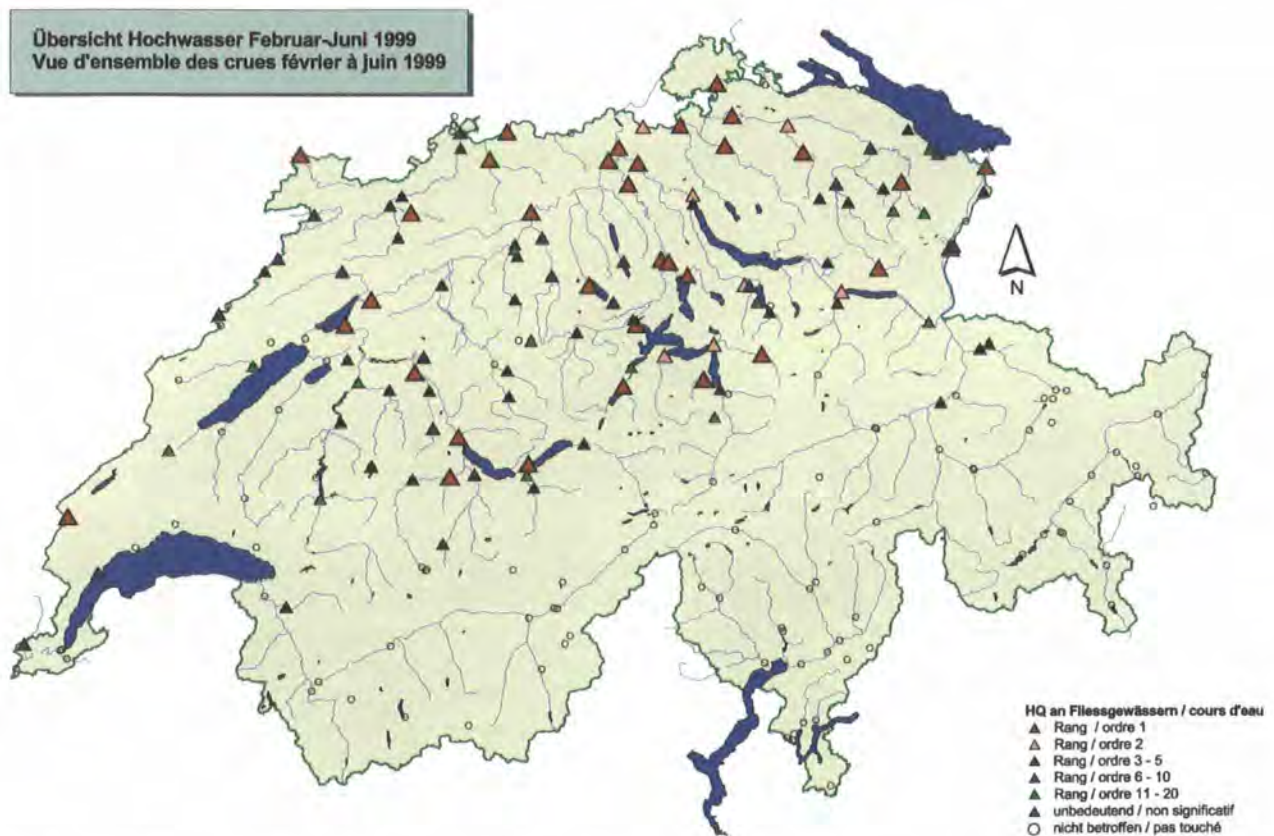


Fig. 2.1: Übersicht über die Hochwassersituation vom Frühjahr 1999.

Tab. 2.1: Hochwasserabflussspitzen 1999 im Vergleich mit den bisherigen Höchstwerten sowie Jährlichkeit des Ereignisses: Stationen aus dem Beobachtungsnetz der LHG bei denen die Mai-Hochwasserabflussspitze von 1999 den Rang 1-3 einnimmt (alphabetische Reihenfolge). Bei Stationen mit fett gedruckten Namen übertreffen die neuen Höchstwerte die alten um mehr als 10 %.

Fließgewässer- Station	Ereignis 1999							bisherige Höchstwerte				
	Q m ³ /s	Rang	Jährlichkeit T					Länge Reihe	Datum	Q m ³ /s	Jahr	beob. seit
			-10	-50	-100	-200	> 200					
Aare - Bern, Schönau	620	1					x	82	16.5.99	450	1995	1918
Aare - Brugg	1250	1		x				84	12.5.99	1170	1994	1916
Aare - Brügg (Ägerten)	770	1					x	95	20.5.99	700	1944	1905
Aare - Hagneck	940	1		(x)				16	14.5.99	933	1994	1984
Aare - Ringgenberg, Goldswil	270	1				x		74	15.5.99	244	1987	1926
Aare - Thun	570	1					x	94	15.5.99	400	1970	1906
Aare - Untersiggenthal, Stilli	2620	1					x	96	12.5.99	2320	1994	1904
Allaine - Boncourt, Frontière	64	1		(x)				16	13.5.99	56	1994	1984
Alp - Einsiedeln	94	3	(x)					8	12.5.99	98	1993	1992
Biber - Biberbrugg	31	2	(x)					10	13.5.99	32	1991	1990
Dünnern - Olten	135	1		(x)				22	12.5.99	115	1978	1978
Engelberger Aa - Buochs	120	2		x				84	22.5.99	125	1960	1916
Ergolz - Liestal	155	1			x			86	12.5.99	155	1994	1914
Glatt - Rheinsfelden	155	1			(x)			24	12.5.99	120	1994	1976
Grosstalbach - Isenthal	48	1		x				43	22.5.99	46	1977	1957
L. Binnenkanal - Ruggell	41	3		(x)				25	22.5.99	47	1987	1975
Limmat - Baden	660	1				x		49	22.5.99	590	1953	1951
Limmat - Zürich, Unterhard	590	2					x	94	22.5.99	657	1910	1906
Linth - Weesen, Biäsche	320	2				x		93	23.5.99	338	1910	1907
Lorze - Frauenthal	35	1					x	86	21.5.99	32	1993	1914
Lorze - Zug, Letzi	61	1		(x)				17	13.5.99	57	1984	1983
Luthern - Nebikon	34	3	(x)					12	13.5.99	45	1995	1988
Muota - Ingenbohl	290	2			x			83	22.5.99	315	1977	1917
Murg - Frauenfeld	140	2		x				40	12.5.99	152	1968	1960
Murg - Wängi	60	1					x	46	12.5.99	43	1968	1954
Reuss - Luzern	430	1				x		78	23.5.99	390	1953	1922
Reuss - Mellingen	760	1			x			90	14.5.99	740	1994	1910
Reuss - Mühlau, Hünenberg	710	1				x		94	14.5.99	640	1953	1906
Rhein - Basel	5090	3			x			131	12.5.99	5700	1876	1869
Rhein - Neuhausen	1190	1					x	91	11.6.99	1072	1926	1909
Rhein - Rekingen	2030	2					x	96	13.5.99	2250	1910	1904
Rhein - Rheinsfelden	4550	1					x	67	12.5.99	4270	1994	1933
R. Binnenkanal - St.Margrethen	140	1				x		81	22.5.99	130	1991	1919
Sarner Aa - Sarnen	59	1				x		77	14.5.99	52.5	1944	1923
Scheulte - Vicques	65	1		(x)				8	12.5.99	54	1996	1992
Schl. Brünnen - Muotathal	14.9	1		(x)				11	22.5.99	13.7	1991	1989
Simme - Latterbach	210	1		(x)				14	12.5.99	205	1990	1986
Sitter - St.Gallen, Bruggen/Au	480	1		(x)				19	22.5.99	430	1984	1981
Suhre - Oberkirch	4.3	1		(x)				24	18.5.99	4.1	1977	1976
Thur - Andelfingen	1130	1				x		96	13.5.99	1100	1910	1904
Thur - Halden	920	3		x				35	12.5.99	1170	1978	1965
Thur - Stein, Iltishag	150	1			x			36	22.5.99	115	1990	1964
Töss - Neftenbach	290	1				x		79	12.5.99	270	1953	1921
Werd. Binnenkanal - Salez	120	1				x		69	22.5.99	115	1990	1931
Wigger - Zofingen	105	3	(x)					20	13.5.99	125	1995	1980

Die Tab. 2.1 enthält eine Zusammenstellung jener Stationen, bei denen das Hochwasser von 1999 eine herausragende Stellung (Rang 1-3) einnimmt. Bei den Stationen, welche die höchsten Wassermengen seit Beobachtungsbeginn aufgezeichnet haben, übertrafen die neuen Höchstwerte in rund der Hälfte aller Fälle die alten um mehr als 10 %. Extreme Beispiele dafür sind die Höchstabflüsse der Aare, welche an den Stationen Thun von 400 auf 570 m³/s (40 %) und Bern von 450 auf 620 m³/s (35 %) anstiegen. Ähnlich hohe Veränderungen registrierten einzig noch die Stationen Thur-Stein (von 115 auf 155 m³/s), Murg-Wängi (von 43 auf 60 m³/s), Glatt-Rheinsfelden (von 120 auf 155 m³/s) und Scheulte-Vicques (von 48 auf 65 m³/s). Der Abfluss der Limmat-Baden (660 m³/s) wird als höchster geführt, allerdings weist eine alte Messreihe von 1904-21 mit 735 m³/s einen noch höheren Wert auf. Etwas Ähnliches gilt auch für die Station Sitter-St. Gallen. Die 1999 gemessenen 480 m³/s sind die höchsten der noch relativ kurzen Messreihe ab 1981. Die etwas weiter unten liegende Station Bernhardzell (1924-80) hat diesen Wert zwei Mal übertroffen: 525 m³/s (1978) und 495 m³/s (1977).

Auf der neuen Datengrundlage wurde für alle betroffenen Stationen die Hochwasserstatistik mit den in der LHG üblichen Verfahren (Landeshydrologie und -geologie, 1986, 1988, 1991) nachgeführt. Ausführlich besprochen wird diese in der LHG-Mitteilung (Aschwanden, 2000). In Tab. 2.1 ist die Jährlichkeit der Ereignisse von 1999 in klassierter Form dargestellt. Die Aussagekraft hängt stark von der Länge der zur Verfügung stehenden Messreihe ab. Aus diesem Grunde sind die Werte aus kurzen Datenreihen (weniger als 30 Jahre) in Klammer gesetzt. Lässt man diese ausser acht, fällt auf, dass die meisten Ereignisse eine Jährlichkeit von mehr als 50 Jahren aufweisen. Der Schwerpunkt liegt im Bereich von 100-1000 Jahren, wobei auch hier die Abflüsse der Aare bei Thun und Bern herausragen. Insgesamt kann aufgrund der extremwertstatistischen Auswertung besonders an den grossen Flüssen von einem sehr seltenen Ereignis gesprochen werden.

2.3 AUSGEWÄHLTE GANGLINIEN

2.3.1 SITUATION AM RHEIN

Nachdem es bereits Anfangs Mai verschiedentlich geregnet hatte, kam es am 11. und 12. Mai (Auffahrtstage) in mehreren Wellen zu sehr starken Regenfällen, wobei das Hauptniederschlagsfeld mehr oder weniger ortsfest im zentralen und östlichen Mittelland verharrte (vgl. Kap. 3.3). Ein zweiter kleinerer Schwerpunkt der Regenfälle trat im Berner Oberland auf. Gegen Abend des 12. Mai trafen beim Zusammenfluss von Aare, Reuss, Limmat und Rhein im Raume Brugg - Koblenz fast gleichzeitig die Hochwasserwellen der einzelnen Flussgebiete zusammen (siehe Fig. 2.2, oben). Mit Spitzenabflüssen von 1240 m³/s waren die Aare-Brugg und mit 1130 m³/s die Thur-Andelfingen die abflussreichsten Rheinzubringer. Während der Abfluss der Thur schnell wieder abklang, verharrte die Aare als Folge der hohen Wasserstände im Thunersee und Bielersee über längere Zeit auf hohem Niveau. Der Rhein selbst führte zu diesem Zeitpunkt in Neuhausen nur rund 700 m³/s Wasser, gleichviel wie auch die Reuss-Mellingen beitrug, wobei diese mit 760 m³/s ihr Maximum aber erst am 15. Mai erreichte. Die gleiche Grössenordnung verzeichnete auch die Limmat-Baden (Abflussspitze 660 m³/s). Die Abflüsse der Glatt-Rheinsfelden und der Töss-Neftenbach fielen mengenmässig weniger ins Gewicht, bedeuteten für diese Flüsse aber gleichwohl die höchsten gemessenen Spitzenwerte. Das Zusammentreffen dieser Spitzenwerte führte an der Aare in Untersiggenthal (2620 m³/s) sowie rheinabwärts in Rheinfeldern (4550 m³/s) und Basel (5090 m³/s) zu einem ausserordentlichen Hochwasser (siehe Fig. 2.2, unten). Die Station Rhein-Rekingen verzeichnete mit 2000 m³/s den zweitgrössten Wert, etwas kleiner als der Höchstwert von 1910 (2250 m³/s). Der Bodensee-Untersee (Berlingen) lag aber am 12. Mai 1999 noch mehr als einen Meter unter seiner Jahreshöchstmarke, welche er am 24. Mai 1999 erstmals und am 11. Juni 1999 noch einmal erreichte (397,87 m ü.M.).

Das Ereignis vom 19. - 22. Mai (Pfingsttage) brachte insbesondere am 21. Mai 1999 im Niederschlagszentrum zwischen Urnersee und Walensee noch einmal sehr hohe Niederschlagsmengen (siehe Kap. 3.4). Mit über 900 m³/s reagierte die Thur-Andelfingen beinahe so stark wie 10 Tage zuvor. Auch die Limmat-Baden erreichte wiederum einen ähnlichen Spitzenwert von über 600 m³/s, dagegen war die Aare vom zweiten Ereignis nicht mehr betroffen. Da unterdessen durch den hohen Wasserstand im Bodensee auch der Abfluss des Rheins bei Neuhausen auf rund 1150 m³/s angestiegen war, resultierte am Rhein mit gegen

4000 m³/s bereits das dritte grosse Hochwasser in diesem Frühjahr. Zuvor hatte schon das Ereignis am 22. Februar den Wert von 3500 m³/s nur knapp verpasst.

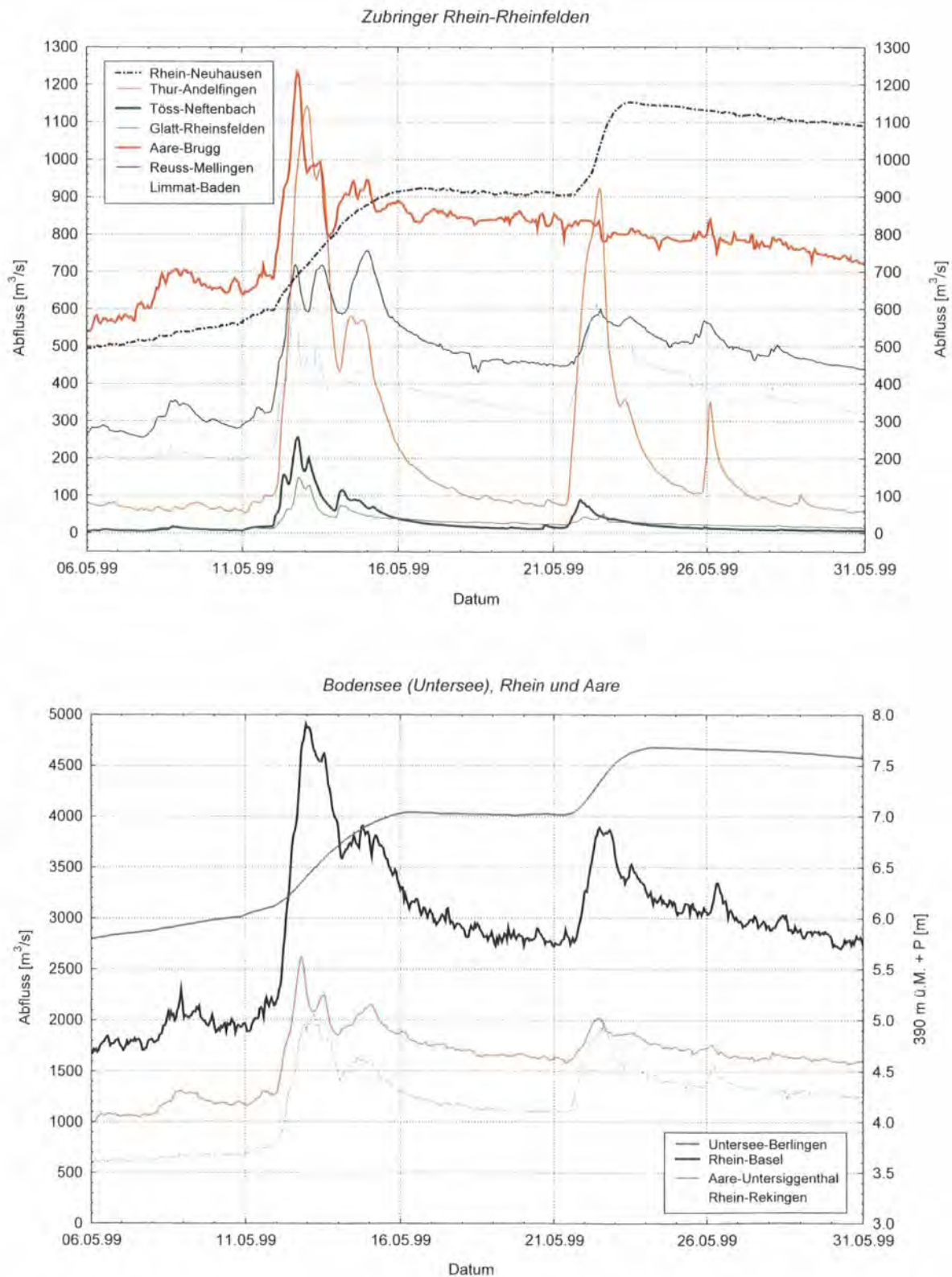


Fig. 2.2: Stundenmittelwerte des Abflusses ausgesuchter Messstationen im Rheingebiet und Pegelstand des Bodensees. (Die Korrektur des Spitzenwertes des Rheins-Basel auf 5090 m³/s konnte in dieser Darstellung noch nicht berücksichtigt werden.)

2.3.2 SITUATION AN DER LINTH UND LIMMAT

Die Fig. 2.3 zeigt das Hochwasserereignis vom Frühjahr 1999 an der Linth und Limmat während den Monaten Mai und Juni. Mit einer Einzugsgebietsfläche von 600 km² (Station Mollis) bildet die Linth den Hauptzubringer in den Walensee. Auch wenn deren Abfluss durch den Kraftwerkeinfluss geprägt ist, kann man erkennen, dass die beiden Ereignisse im Mai für die Linth nicht von Bedeutung waren. Augenfällig hingegen ist der Seeausfluss (Linth-Weesen), welcher in der Zeit vom 10. - 31. Mai 1999 beträchtlich über dem Zufluss (Linth-Mollis) liegt. Die maximale Differenz erreichte dabei rund 200 m³/s. Da der Seespiegel trotzdem noch weiter anstieg und die Seez in ihrem Oberlauf (Station Mels, 105 km²) kein grosses Hochwasser führte, stammt die Wassermenge zum grösseren Teil aus dem mit 332 km² nur halb so grossen Zwischeneinzugsgebiet der Seez von Mels bis zum Walensee und dem See-Einzugsgebiet im engeren Sinne. Eine Volumenbetrachtung (Vergleich Zufluss-Ausfluss, Pegelstandsänderungen des Sees) zeigt, dass der Walensee bereits ab dem 1. Mai 1999 die zufließenden Wassermassen nicht mehr genügend abführen konnte und in der Folge bis am 22. Mai 1999 um 2,47 m auf den neuen Höchststand von 422,16 m ü.M. anstieg. Zwar überschritt der Walensee die Schadengrenze nur an einem Tag, doch bedeuteten die langandauernden hohen Abflüsse eine ernste Gefahr für die Dämme des Linthkanals. Da der Walensee nicht reguliert ist, widerspiegelt die Ganglinie des Seeausflusses direkt den Verlauf des Pegelstandes im See. Dieser hatte selbst Ende Juni den Stand von Anfang Mai noch nicht wieder erreicht.

Der hohe Zufluss aus dem Walensee und ebenfalls ein beträchtlicher Zufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 1999:105) liessen auch den Zürichsee im gleichen Zeitraum um ca. 1 m auf den zweithöchsten je gemessenen Pegelstand von 407,01 m ü.M. ansteigen. Letztmals hatte der See 1953 einen ähnlichen hohen Seestand aufgewiesen. Die Schadensgrenze (406,60 m ü.M.) überschritt er am 13. Mai 1999 für insgesamt 19 Tage und erreichte gegen Ende Juni wieder das Niveau von anfangs Mai. Die Ganglinie der Station Limmat-Zürich ergibt sich aus dem regulierten Seeausfluss und der Überlagerung mit der Sihl. Deren Spitzenwert an der Station Zürich-Sihlhölzli von 250 m³/s (Pfungstereignis) wurde seit dem Bau der Kraftwerke am Sihlsee (1937) nie mehr erreicht, früher aber zwischen 1919 und 1939 sechs Mal überschritten und galt nicht als ausserordentlich. Für die Station Limmat-Zürich bedeuten die gemessenen 590 m³/s das zweitgrösste Ereignis.

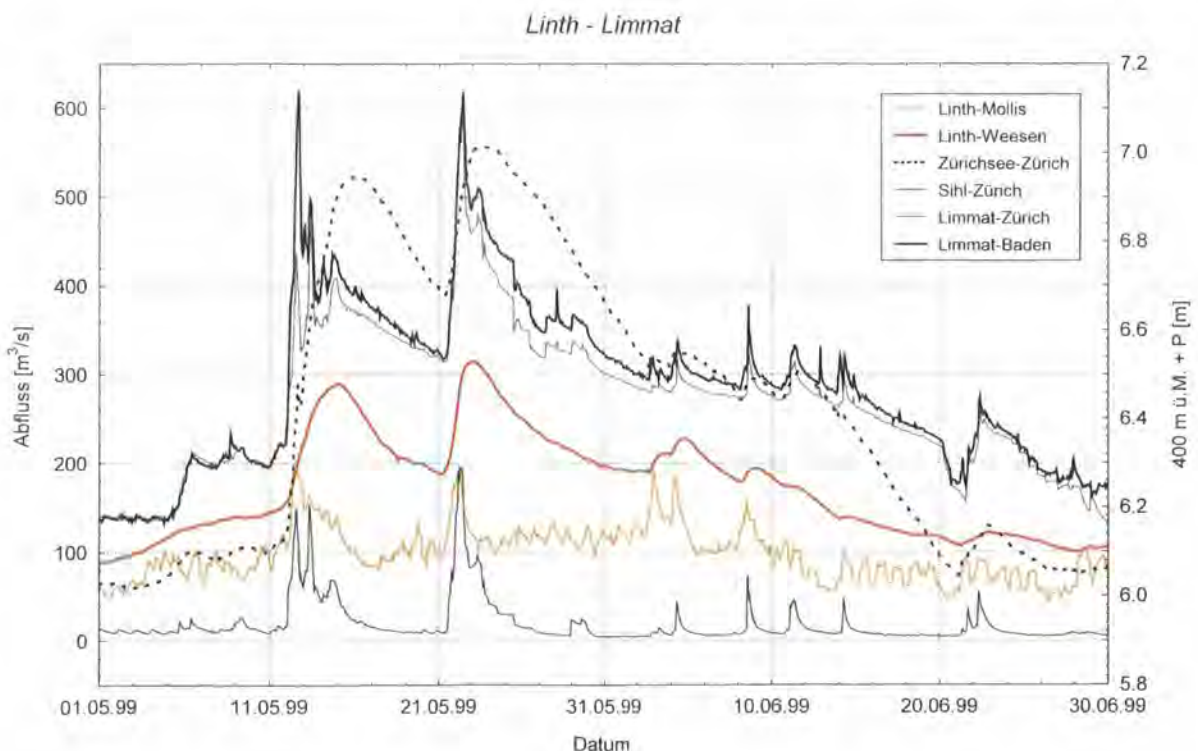


Fig. 2.3: Stundenmittelwerte des Abflusses ausgesuchter Messstationen im Limmatgebiet und Pegelstand des Zürichsees. (Die Korrektur des Spitzenwertes vom 22. Mai 1999 der Limmat-Baden auf 660 m³/s konnte in dieser Darstellung noch nicht berücksichtigt werden)

2.4 PEGELSTÄNDE AN SEEN

Die durch die vorangegangene Schneeschmelze bereits stark gefüllten Alpenrandseen vermochten die intensiven Niederschläge an Auffahrt und Pfingsten nicht mehr abzuführen, überschritten die Schadensgrenze und überschwemmten die Ufer. Die Fig. 2.4 zeigt die maximalen Seepegelstände von 1999 im Vergleich mit den Schadensgrenzen und den bisherigen Höchstwerten. Dabei fällt auf, dass die Schadensgrenze teilweise um mehr als einen halben Meter überschritten wurde: am extremsten beim Thunersee und beim Bodensee-Untersee mit je 87 cm. Für 6 Seen bedeutete das Hochwasser 1999 einen neuen gemessenen Höchststand. Dieser liegt beim Thunersee 49 cm über dem bisherigen Höchstwert, beim Lauerzersee sogar 66 cm, allerdings steht die Messstation in Lauerz erst seit 1986 in Betrieb. Neben dem massiven Überschreiten der Schadensgrenzen ist die Dauer des Ereignisses das herausragende Charakteristikum. Am Bodensee lag der Pegel volle 53 (Untersee) bzw. 48 Tage (Obersee) über der Schadensgrenze. Auch der Vierwaldstättersee (30 Tage), der Zürichsee (19), der Thunersee (16) und der Brienersee (9) waren lange Zeit betroffen.

Tab. 2.2: Maximale Pegelstände an Seen 1999 im Vergleich mit der Schadensgrenze und den bisherigen Höchstwerten.

See	Wasser- stand max. P m.ü.M.	Datum	Schadens- grenze S m.ü.M.	über- schritten Anzahl Tage	Ereignis 1999 Rang	beo- bachtet seit Jahr	bisheriger Höchstwert	
							P[max] m.ü.M.	Jahr
Bodensee, Obersee	397.87	24.05.99	397.14	48	2**	1866	397.98	1890
Bodensee, Untersee	397.67	24.05.99	396.80	53	2**	1886	397.75	1890
Brienersee	565.36	15.05.99	564.80	9	1	1868	565.35	1910
Thunersee	559.17	15.05.99	558.30	16	1	1904	558.68	1910
Bielersee	430.19	15.05.99	430.25	0	--	1890	431.26	1944
Lac Neuchâtel	430.06	23.05.99	430.35	0	--	1920	431.18	1944
Murtensee	430.06	22.05.99	430.85	0	--	1905	431.83	1944
Samersee	471.28	14.05.99	*		1	1902	471.06	1901
Vierwaldstättersee	434.93	23.05.99	434.45	30	2	1874	435.24	1910
Lauerzersee	449.15	15.05.99	*		1	1983	448.49	1986
Zugersee	414.49	23.05.99	*		1	1877	414.45	1975
Walensee	422.16	23.05.99	422.00	1	1	1911	422.11	1953
Zürichsee	407.01	23.05.99	406.60	19	2	1892	407.22	1910

* nicht bekannt

** siehe Bemerkungen im Fliesstext

Der Walensee überschreitet die Schadensgrenze trotz neuem Höchststand nur um 16 cm und zeigte damit die geringste Überschreitung aller Alpenrandseen. Trotz des Höchsthochwassers der Aare blieben die ein hydraulisches System bildenden Juraseen (Murten-, Neuenburger- und Bielersee) zum Teil noch deutlich unter der Schadensgrenze.

Die Fig. 2.4 ordnet die maximalen Pegelstände von 1999 in die langjährigen Messreihen ein. Gesamthaft fällt auf, dass die definierten Schadensgrenzen offensichtlich recht häufig überschritten werden. Bei einigen Seen dürfte dies alle 3-6 Jahre der Fall sein. Die Ausnahme bilden die Juraseen, wo die zweite Juragewässerkorrektur ab den 70er-Jahren ihre Wirkung zeigt und die Schadensgrenzen seither nicht mehr erreicht wurden. Auch wenn an allen Alpenrandseen das Ereignis von 1999 eine herausragende Stellung (Rang 1 oder 2) einnimmt, kann aufgrund der Fig. 2.4 eine differenziertere Betrachtung vorgenommen werden. Beim Thuner-, Briener- und Walensee hebt sich das Hochwasser von 1999 deutlich als ausserordentliches Ereignis ab. Entweder ist es das einzige dieser Grössenordnung oder es existiert höchstens noch ein Ereignis gleichen Ausmasses. Dies trifft mit Einschränkungen auch auf den Zürichsee zu. Zwar hat es dort zu Beginn des Jahrhunderts und noch einmal 1953 grosse Ereignisse gegeben, aber

seit der Mitte der 50er-Jahre wurde die Schadensgrenze nicht mehr erreicht. Beim Vierwaldstättersee und beim Zugersee handelt es sich um Hochwasser mit sehr hohen Pegelständen, welche aber in der rund 125 Jahre dauernden Beobachtungszeit weitere 3 - 4 Mal annähernd erreicht oder gar überschritten worden sind. Beim Bodensee schliesslich lässt sich aufgrund Fig. 2.4 feststellen, dass ein Ereignis der Grössenordnung von 1999 im Verlaufe der Beobachtungszeit seit 1866 rund alle 25 Jahre auftritt.

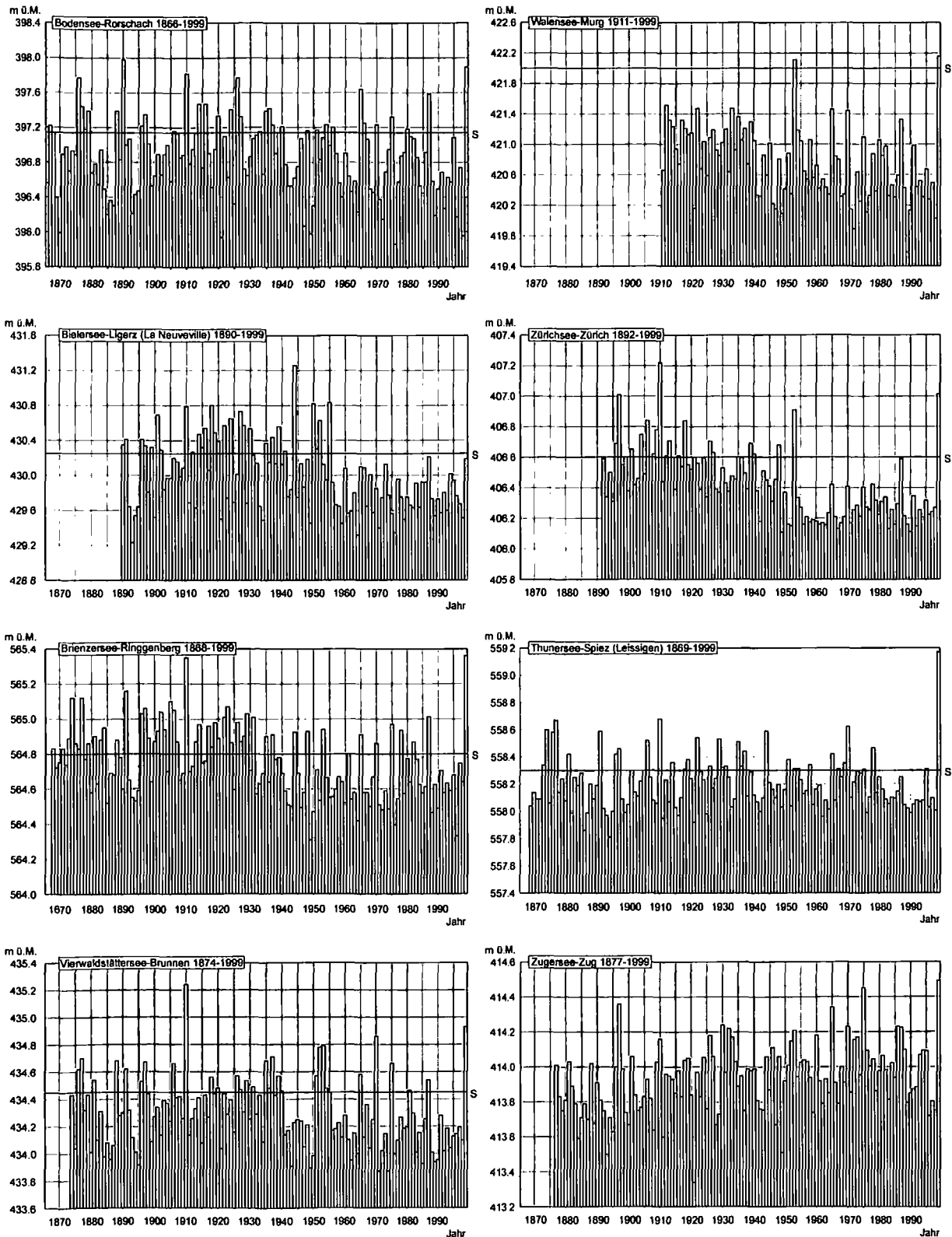


Fig. 2.4 Jahreshöchststände 1999 ausgewählter Schweizer Seen (Messnetz LHG, S = 1999 gültige Schadensgrenze).

Allerdings haben Luft et al. (1990: 28) nachgewiesen, dass während der Beobachtungszeit von 1887-1987 die jährlich höchsten täglichen Wasserstände des Untersees und des Obersees einem signifikanten Trend unterliegen. Dieser beträgt -25 cm/100 Jahre bzw. -27 cm/100 Jahre. Diese Trends werden auf zwei Effekte zurückgeführt: auf die Veränderungen der hydraulischen Auslaufbedingungen im Bereich des Konstanzer Trichters sowie auf Veränderungen des Zuflussregimes beim Alpenrhein bedingt durch den Betrieb der Kraftwerkspeicher. Berücksichtigt man diesen Aspekt sowie die Angaben der Kraftwerksbetreiber (vgl. Kap. 7.1.4), wonach zwischen dem 10. Mai und 24. Mai 1999 rund 82 Mio. m³ Wasser (entsprechend rund 15 cm Pegeldifferenz im Bodensee) in den Stauanlagen zurückgehalten wurde, muss das Ereignis von 1999, trotz leicht tieferem Pegelstand gegenüber 1890 (bisheriger Höchstwert), mit grosser Wahrscheinlichkeit als grösstes von der LHG gemessenes Ereignis betrachtet werden. Die am deutschen Pegel Konstanz registrierten Wasserstände von 1817 (398,44 m ü.M.) und 1821 (398,12 m ü.M.) sind allerdings noch höher gewesen (vgl. Fig. 6.1).

Bei der Interpretation der Messreihen von Seepegelständen ist eine gewisse Vorsicht angebracht. Zum einen sind mit Ausnahme des Boden- und Walensees die Seen reguliert und zum anderen wird je nach Situation in den Speicherseen der Alpen mehr oder weniger Wasser zurückgehalten. So ist bekannt (Aschwanden u. Schädler, 1988: 38), dass auch während des Hochwasserereignisses von 1987 die Kraftwerke massgebend zu einer Dämpfung der Hochwasserspitzen und der Seestände beigetragen haben.

2.5 GESAMTBETRACHTUNG

Wie in Fig. 2.1 dargestellt, waren vom Hochwasser 1999 nicht nur alle Alpenrandseen sondern weite Teile der Nordschweiz östlich der Aare betroffen. Die Analysen zeigen, dass das Ereignis nicht nur bezüglich Ausbreitung und Ausmass, sondern an den Seen, an der Aare und am Rhein auch in Bezug auf die Dauer aussergewöhnlich war. Um festzustellen, wie das Ereignis von 1999 gesamthaft in die hydrologische Geschichte des Jahrhunderts einzuordnen ist, werden für jede Messstelle aufgrund der geordneten Reihe der Jahresmaxima diejenigen Jahre bestimmt, deren Abfluss über einem bestimmten Schwellenwert liegt. Als Kriterium wird das 20-jährliche Hochwasser oder 85 % des höchsten gemessenen Hochwassers (HHQ) der Messreihe angenommen. Summiert man für die einzelnen Jahre die Zahl der Messstationen, welche die obengenannten Kriterien erfüllen und zeichnet sie auf, lässt sich räumlich und quantitativ ein Bild gewinnen, welche Jahre als „Hochwasserjahre“ zu bezeichnen sind. Die Tab. 2.3 fasst die Zahlen zusammen.

Tab. 2.3: Jahre mit besonderen Hochwassersituationen (Grundlage: Messstationen LHG 1910-99).

Jahr	Anzahl Stationen gemäss untenstehenden Kriterien			Auswertung: Anzahl Stationen	
	A Maximum	B Y20	C P15	mindestens ein Kriterium A-C ist erfüllt	Messnetz
1910	8	16	16	18	39
1914	3	10	9	13	59
1918	2	7	11	14	69
1920	7	13	14	17	81
1954	9	22	19	26	121
1968	7	18	20	25	169
1977	16	24	33	35	185
1978	8	20	24	29	186
1987	21	46	49	55	194
1990	12	21	24	28	196
1999	32	45	50	52	115**

Legende:

Maximum

Y20

P15

Bemerkung:

HQ des Jahres ist gleichzeitig grösstes Ereignis (HHQ) der gesamten Datenreihe

HQ des Jahres hat mindestens die Jährlichkeit 20 Jahre

HQ des Jahres ist höchstens 15% kleiner als das grösste Ereignis der gesamten Datenreihe

** Anzahl ausgewertete Messreihen

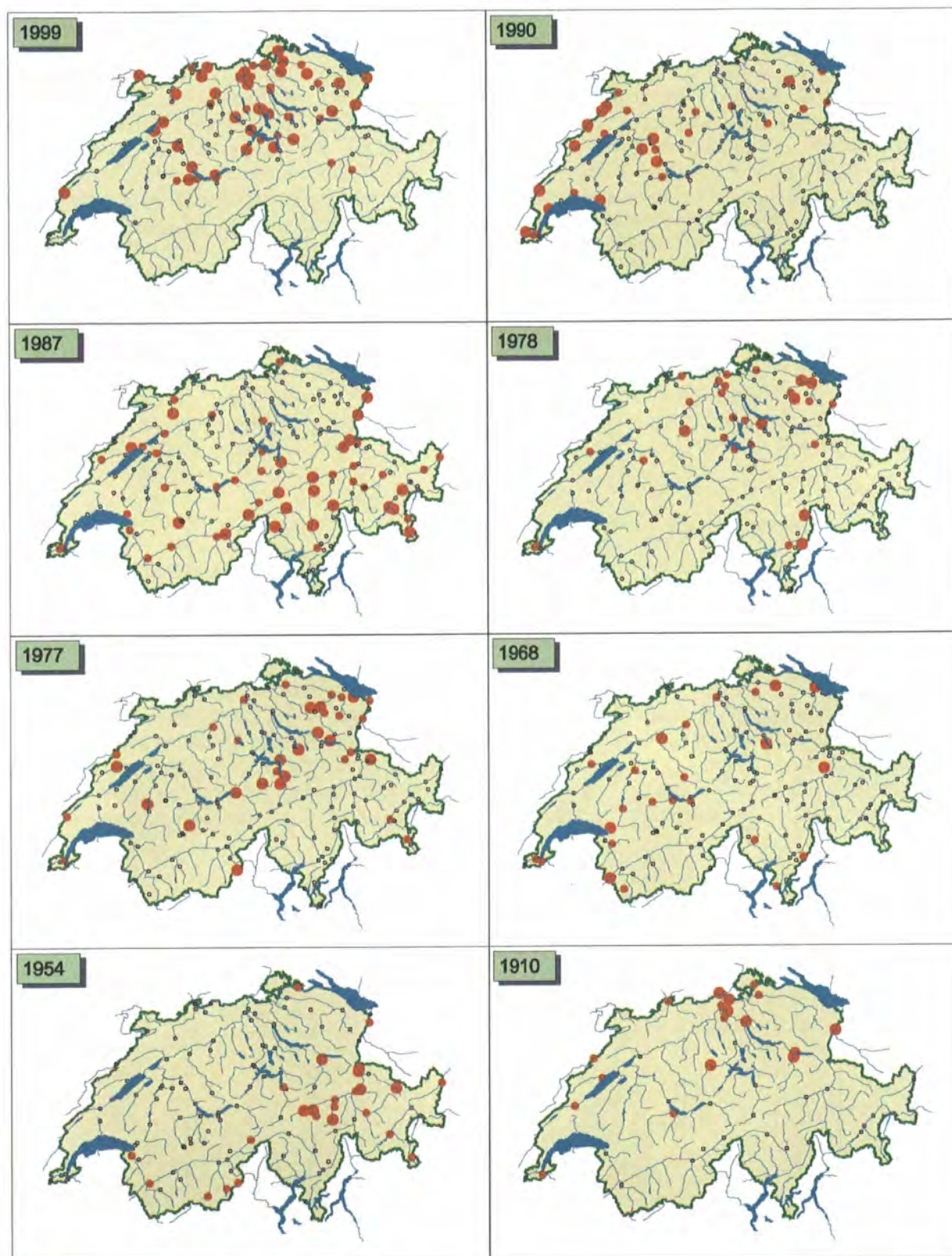


Fig. 2.5: Bedeutende Hochwassersituationen 1910 - 99: betroffene Messstationen (Messnetz LHG).

Der Vergleich der einzelnen Jahre untereinander wird durch die unterschiedliche Messnetzgrösse zu den jeweiligen Zeitpunkten etwas verfälscht. Auch fallen bei einer solchen gesamtschweizerischen Betrachtungsweise regionale Hochwassersituationen wegen der zumeist geringen Anzahl betroffener Messstationen nicht speziell auf. Als Beispiel dazu dient das Jahr 1993, wo die Alpensüdseite und das Wallis von schweren Hochwassern betroffen waren (LHG, 1994). Weiter ist zu beachten, dass diese Analyse nicht ereignisbezogen ist, sondern immer die Hochwasser eines ganzen Jahres betrachtet. Nimmt man die Anzahl Ereignisse, d.h. das Total A - D aus Tab. 2.3, als Mass, steht das Jahr 1987 (55 Ereignisse) an der Spitze, gefolgt von 1999 (52) und 1977 (35). Als Nächste folgen praktisch gleichbedeutend die Jahre 1978, 1990, 1954 und 1968. Aufgrund dieser Betrachtungsweise ist das Jahr 1999 unzweifelhaft als ausserordentlich einzustufen. Bezieht man die Messnetzgrösse in die Betrachtung mit ein, sticht besonders das Jahr 1910 hervor, als fast die Hälfte aller damaligen Messstationen von einem Hochwasser betroffen waren. Ein detaillierterer Vergleich der beiden Jahre aufgrund der Stationen, welche heute noch in Betrieb stehen, zeigt, dass in der Mehrzahl der Fälle die Wassermengen 1910 noch etwas höher waren, als 1999. Zudem waren auch Stationen in der Westschweiz betroffen. Aus diesem Blickwinkel muss man annehmen, dass auch 1910 eine ganz aussergewöhnliche Situation zu verzeichnen war.

Die Fig. 2.5 zeigt die geografische Umsetzung der Werte von Tab. 2.3. Das Ausmass des Hochwassers von 1999 wird hier noch einmal ersichtlich. Einzig die Ereignisse von 1987 im Alpenraum und 1977 in den Voralpen und am Alpenrand erreichen annähernd die gleiche überregionale Verbreitung. Im Jahre 1978 war zwar die gleiche Region wie 1999 betroffen, doch das Ereignis war insgesamt weniger ausgeprägt. Dies lässt sich daran erkennen, dass bei weniger Stationen das grösste Ereignis der Messperiode registriert wurde. Das Ereignis von 1990 konzentrierte sich auf den Jura und die Berner Voralpen westlich der Aare, dasjenige von 1954 vorwiegend auf das Bündnerland. Mangels Messstationen lassen sich die Hochwasser von 1910 bezüglich ihrer Ausbreitung nur schlecht beurteilen. Wie obenstehend ausgeführt, deutet jedoch Einiges darauf hin, dass die Situation mit 1999 vergleichbar gewesen ist.

FAZIT:

Die meisten Messstationen an den Seen des Mittellandes, an ihren Ausflüssen sowie in den nördlichen Voralpen östlich der Aare registrierten im Mai 1999 eines der grössten, wenn nicht das grösste Ereignis seit Messbeginn. Die statistisch bestimmten Wiederkehrperioden liegen dabei oft deutlich über 100 Jahren. Einiges deutet darauf hin, dass in diesem Jahrhundert einzig die Situation im Juni 1910 mit jener vom Mai 1999 vergleichbar ist.

3 WITTERUNGSVERLAUF IM 1. HALBJAHR 1999

D. Grebner

Das erste Halbjahr 1999 war durch zwei herausragende Schadensphasen geprägt: die Lawinenperiode im Februar und März und die Hochwasserperiode im Mai. Als Beginn des Aufbaus des Lawinenpotentials lässt sich aufgrund der Zirkulationseigenschaften in der Atmosphäre die Entwicklung ab Ende Januar bezeichnen. Er erklärt sich unmittelbar aus der Schneeakkumulation in 4 zum Teil ergiebigen Niederschlagsphasen: 26. - 29. Jan., 4. - 11. und 16. - 24. Feb. und 4. - 8. März 1999.

Eine viel diskutierte Frage war die nach dem ursächlichen Zusammenhang zwischen diesen Lawinenperioden und den Hochwasserereignissen im Frühjahr. Zum Verständnis der besonderen Eigenschaften der beiden zu untersuchenden Hochwasser, 10. - 15. und 19. - 22. Mai 1999, – d.h. rasches Erreichen und Dauer der Hochwasserstände sowie Hochwasser auch ausserhalb der Niederschlagszentren – sind deshalb in der meteorologischen Darstellung nicht nur die beiden auslösenden Niederschlagsereignisse im Mai zu betrachten, sondern auch die Witterungsentwicklung seit den Schneefällen Ende Januar. Letzteres lässt dann u.a. auch eine Beurteilung zu, in wieweit in der Kombination der aufeinanderfolgenden Einflüsse weitere hochwasserverschärfende Zustände noch realistisch gewesen wären (vgl. Kap. 5.3.2).

Entsprechend den durch Schäden betroffenen Gebiete konzentriert sich die meteorologische Beschreibung im wesentlichen auf die Alpennordseite und gegebenenfalls den inneralpinen Raum.

3.1 DIE STARKSCHNEEFÄLLE JANUAR BIS MÄRZ

Im Zeitintervall während den oben erwähnten vier Niederschlagswellen von Ende Januar bis Anfang März war die Westströmung im Raum Nordatlantik-Europa durch starkes Mäandrieren charakterisiert. Verantwortlich dafür waren jeweils eine starke Verlagerung oder Ausdehnung des atlantischen Subtropenhochs (Azorenhoch) nach Norden, vielfach bis Grönland. Über Europa stellte sich jeweils ein grossräumiger Tiefdrucktrog mit Achse von Skandinavien zum Mittelmeer ein.

Zwischen diesen beiden grossräumigen Druckzentren wurde durch das Hoch maritim warme Luft vom mittleren bis nördlichen Nordatlantik gegen die vom Tief aus polaren Breiten nach Süden gebrachte Kaltluft geführt (Fig. 3.1 bis Fig. 3.4 und Fig. 3.6). Die Alpennordseite lag insbesondere während den ersten 3 Ereignissen (26. - 29. Jan., 4. - 11. und 16. - 24. Feb. 1999) in diesem dynamisch sehr aktiven Grenzgebiet der Luftmassen (Fig. 3.1, Fig. 3.3, Fig. 3.4). Darin entstehende Fronten mit einzelnen sekundären Wirbelbildungen wurden in rascher Folge gegen die Alpen geführt. Bei den gegebenen Strömungszuständen wirkte sich auch die Orographie durch Stau auf die Niederschlagsbildung aus. Über die tägliche Höhenlage der Schneefallgrenze, d.h. über den für spätere Abflussbildungen massgebenden Aufbau einer Schneedecke bis in tiefere Lagen des Mittellandes entschied die jeweils dominierende Zufuhr der Luft aus den beiden genannten Herkunftsgebieten. Tendenziell sank die Schneefallgrenze bei den Ereignissen zirkulationsbedingt von West nach Ost, bzw. aus Wärmehaushaltsgründen von der Alpennordseite in den Alpenraum hinein ab.

Die Verlagerungs- und Veränderungsgeschwindigkeiten der grossräumigen Steuerungszentren war gering. Dementsprechend bestanden in der betroffenen Region länger Niederschlagsbedingungen als bei üblicherweise durchziehenden Systemen.

Neben den erwähnten, prinzipiellen Bedingungen unterscheiden sich die 4 Ereignisse in der Schweiz durch individuelle Eigenschaften und Entwicklungen.

Während der ersten etwa 4-tägigen Niederschlagsphase (26. - 29. Jan. 1999) lag die Schweiz weitgehend im Einflussbereich der maritimen Strömung (zwischen dem Keil des Subtropenhochs und dem Tief; Fig. 3.1). Entsprechend blieben die tieferen Lagen bis 700 m ü.M. schneefrei. Im Ereignisverlauf drehte die Strömung mit zunehmender Dominanz des Tiefs für den Alpenraum auf Nord. Am 29. Jan. 1999 drang dadurch Kaltluft über die Schweiz nach Westen vor. Dieser Übergang ist durch erhöhte bis hohe Tagesniederschläge markiert (Fig. 3.2); danach brachen diese durch einen an die Kaltluft gekoppelten, vorübergehenden Hochdruckeinfluss ab, so dass mit dem Temperaturrückgang voralpin keine Schneedecke entstand.

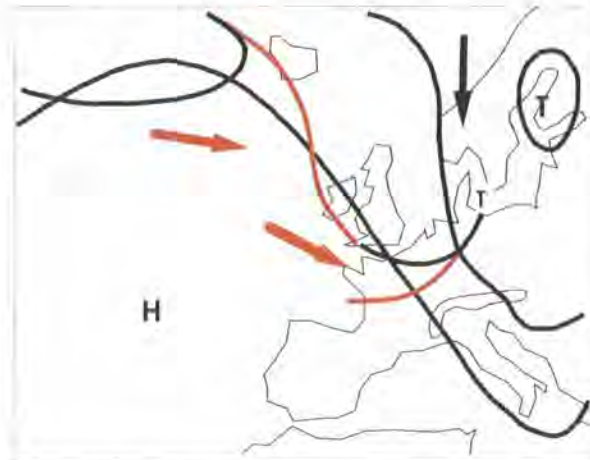


Fig. 3.1: Schematisierter Druck- und Strömungszustand im Zeitraum 26. - 29. Jan. 1999. Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront).

Auch in der zweiten Niederschlagsphase (4. - 11. Feb. 1999) wurde die Temperatur zunächst durch den maritimen Zustrom aus Nordwest bestimmt. Die entstehenden Fronten trafen in täglicher Folge am Alpen-nordhang ein. Die Achse des steuernden Tiefs war von Skandinavien zur Adria orientiert. Am 8. Feb. 1999 drang seine Kaltluft mit einem in der Hauptströmung transportierten, sekundären Tief ebenfalls wieder über die Schweiz nach Westen vor (Fig. 3.3). Die Niederschläge setzten sich in diesem Fall aber fort. Die Schneefallgrenze im Niederschlagsfeld des Tiefs sank in der Kaltluft ab und erzeugte bis in die tiefen Lagen des Mittellandes eine geschlossene Schneedecke.

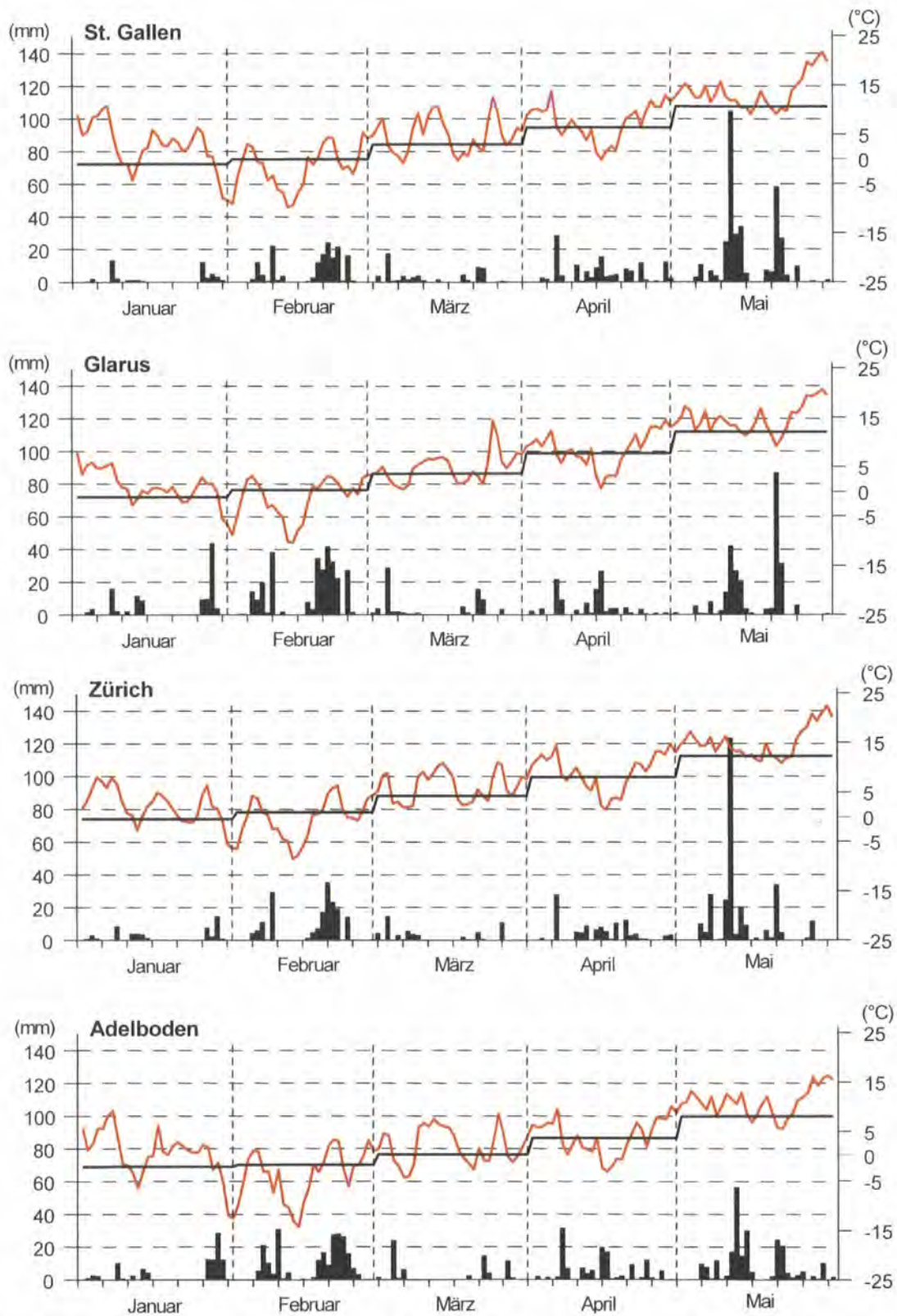


Fig. 3.2: Tagesmitteltemperaturen (Linie), vieljährige Monatsmitteltemperaturen und Tagesniederschläge (Säulen) vom 1. Jan. bis 31. Mai 1999 an den Stationen St. Gallen (779 m ü.M.), Glarus (515 m ü.M.); Zürich SMA (556 m ü.M.) und Adelboden (1320 m ü.M.). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

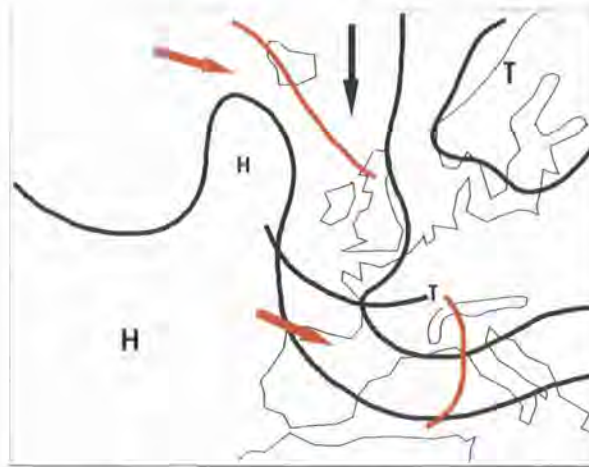


Fig. 3.3: Schematisierter Druck- und Strömungszustand im Zeitraum 4. - 11. Feb. 1999. Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront).

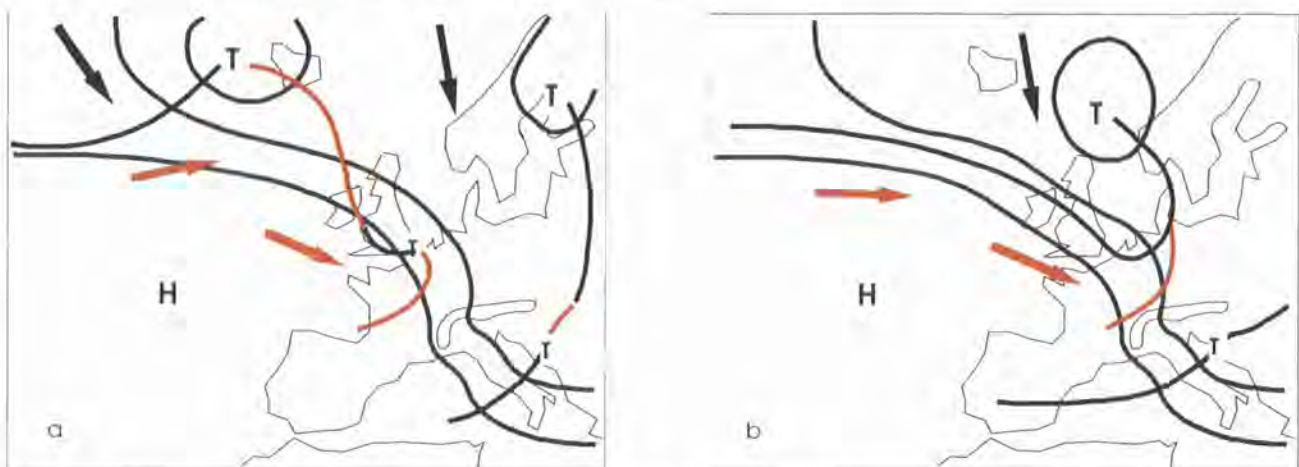


Fig. 3.4: Schematisierter Druck- und Strömungszustand (a) im Zeitraum 16. - 18. Feb. 1999; (b) weitere Entwicklung (ca. 21. Feb. 1999). Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront).

Die Strömungsbedingungen während der sowohl bezüglich den täglichen Niederschlagsmengen als auch bezüglich der Dauer intensivsten, dritten Niederschlagsphase (16. - 24. Feb. 1999) sind den beiden vorangehenden Ereignissen vergleichbar: die Schweiz lag erneut zwischen den Steuerungszentren "Hoch über dem Atlantik" und "Tief über Skandinavien". Das Azorenhoch war mit etwa 45° N für die Jahreszeit weit nördlich positioniert. Seine Ausdehnung nach Norden war jedoch durch ein Tief bei Südgrönland abgeflacht. Dadurch stellte sich in der ersten Hälfte des Ereignisses eine Westströmung vom Atlantik aus etwa 50° Nord ein (Fig. 3.4a). Mit ihr stieg die Temperatur nach der davorliegenden Kältephase während des Niederschlags (bis zum 21. Feb. 1999) um über 15 °C an (Fig. 3.2). Die Schneefallgrenze wurde auf über 1200 m ü.M. angehoben; gleichzeitig taute die im Mittelland liegende Schneedecke aus dem Vorereignis unterhalb 700 m ü.M. wieder ab. In den lawinenbetroffenen Höhen jedoch bekam sie weiteren Zuwachs.

Das Schmelzen des Schnees in den tieferen Lagen sättigte einerseits zusammen mit dem Regen die Ende Winter ohnehin geringen Kapazitäten an Bodenspeichern. Andererseits führte der Regenanteil der Niederschläge auch zu einem ersten grösseren Hochwasser (vgl. Kap. 1.1). Auf das Zusammenspiel von Niederschlag und Schneeschmelze bei diesem Februar-Unwetter wird in Kapitel 5.3.1 eingegangen.

Die ausgedehnte Dauer der dritten Niederschlagsphase entstand dadurch, dass, nach Abzug des zunächst für den Alpenraum massgebenden Tiefs von Skandinavien zum Schwarzen Meer, sich zwischen 17. und 24. Feb. 1999 der zweite Wirbel von Südgrönland nach Polen verschob (Fig. 3.4b). Mit dieser Entwicklung drehte die Strömung auf der Rückseite dieses Wirbels auf Nordwest. Die Temperatur sank aber während

des Niederschlages nur kurz ab (Fig. 3.2). Die Nullgradgrenze blieb im wesentlichen um 1000 m ü.M., so dass im Mittelland keine neue Schneedecke entstand.

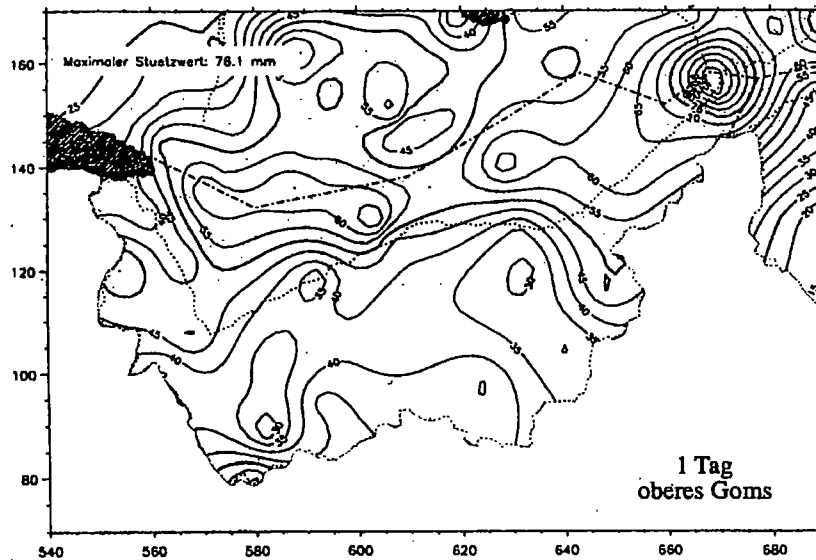


Fig. 3.5: Mittlere normierte Verteilung von starken Tagesniederschlägen (in %) im Raum Wallis bei grossräumig gesteuerten West- bis Nordwestanströmungen. Die Normierung ist mit dem Niederschlagsmaximum im oberen Goms durchgeführt. Rand: km-Skala.

Während zyklonal aktiven West- bis Nordwestströmungen betreffen Niederschläge vor allem die Alpennordseite. Im Fall der skizzierten dreidimensionalen Strömungseigenschaften ist jedoch auch ein Übergreifen der Niederschläge in die Alpen hinein typisch. Besonders betroffen sind dabei der Raum oberes Wallis, die kammnahen Zonen der nördlichen Gebirgskette im Wallis und Engadin sowie im Wallis der Raum Gr. St. Bernhard und das Rhonetal unterhalb von Martigny (Fig. 3.5).

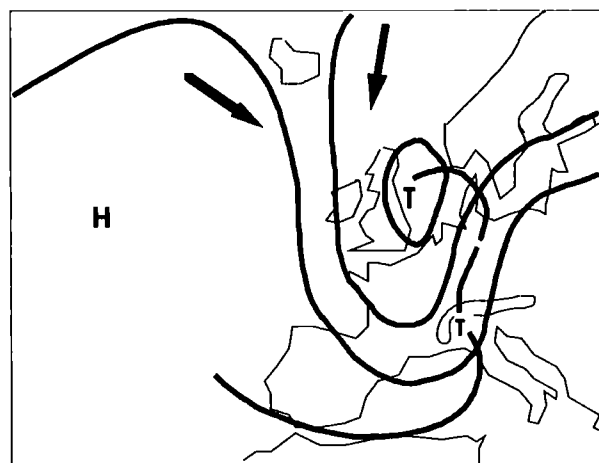


Fig. 3.6: Schematisierter Druck- und Strömungszustand im Zeitraum 4. - 8. März 1999. Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront).

Eine letzte Niederschlagswelle trat ab 4. bis etwa 8. März 1999 auf, mit Maximum am 4. März. Die Niederschlagsdauer nimmt von Ost nach West ab. Die Eigenschaft und Anordnung der Steuerungszentren war im Prinzip wie schon beschrieben: Hochkeil über dem Atlantik bis Grönland, allerdings mit Tiefdrucktrog in westlicherer Position als bisher, d.h. Zentrum über der Nordsee und Achse nach Mallorca (Fig. 3.6). Bei dieser Druckverteilung lagen die Alpen in der Südwestströmung der Trogvorderseite. Die Niederschläge betrafen vor allem noch einmal das untere Wallis und die Alpensüdseite. Entsprechend der Trogstruktur waren sie aber dort typischerweise nicht extrem.

Nordalpin war die frontal vordringende Luft kalt. Der Niederschlag fiel z.T. bis ins Mittelland als Schnee. Die dort entstehende Schneedecke blieb jedoch unterhalb von 700 m ü.M. nur dünn.

3.2 WITTERUNGSVERLAUF MÄRZ BIS MAI

Nach dem letzten Schneefall Anfang März richtete sich eine von den Azoren bis nach England gestreckte Tiefdruckzone ein. Auf ihrer Südseite wurde vom 8. bis 16. März 1999 Warmluft in den Alpenraum geführt. Es blieb annähernd niederschlagsfrei. Die Nullgradgrenze im Tagesmittel an der Erdoberfläche am Alpen-nordhang stieg deutlich über 1000 m ü.M. (Fig. 3.2), in der freien Atmosphäre über 2000 m ü.M. Die Schneedecke wurde bis 700 m ü.M. vollständig, bis ca. 1400 m ü.M. teilweise abgebaut.

Es folgten eine Bisenlage bis 19. März 1999 und anschliessend ein Wechsel zwischen Hochdruckeinfluss und Durchgängen von Fronten mit sekundären Tiefdruckgebieten. Nennenswerte Niederschläge traten aber nur, lokal unterschiedlich, zwischen 21. und 23. März 1999 auf. Sie fielen unterhalb von 1000 m als Regen.

Insgesamt war der Monat März in der ganzen Schweiz überdurchschnittlich warm, vor allem in den zunehmend schneefreien ausseralpinen Gebieten. Die Schneedecke schmolz am Alpennordhang bis Monatsende bis auf Höhen um 1000 m ü.M. ab. In den Alpentälern folgte die Temperatur der Warmluftzufuhr hingegen nur beschränkt. Die Niederschläge in der Monatssumme blieben auf der Alpennordseite mit geringen Ausnahmen unterdurchschnittlich.

Im April war der Alpenraum von zahlreichen Frontdurchgängen betroffen. Sie wurden grossräumig von unterschiedlichen Druckzuständen gesteuert. Hochdruckeinflüsse setzten sich kaum oder nur kurz durch. Dadurch charakterisiert sich der Monat als sehr niederschlagsreich, sowohl bezüglich den Tagesmengen als auch nordalpin weitgehend bezüglich der Anzahl Niederschlagstage. Im 30-jährigen Mittel liegt im April diese Anzahl je nach Zählkriterium (> 0.3 oder > 0.9 mm/d) und je nach Standort einer Station zwischen 15 und 10 Tagen. Im aktuellen Monat traten bis über 20 Tage auf. Die Monatssumme der Niederschläge überstieg, mit Ausnahme im mittleren Wallis, landesweit das vieljährige Mittel, nordalpin verbreitet mehr als 50 %, im Raum Schaffhausen und zwischen Bieler- und Vierwaldstättersee mehr als 100 %.

Die Temperatur war im April, ausser während einer Trogbildung mit Luftzufuhr vom Europäischen Nordmeer zwischen 12. und 18. Apr. 1999, in den meisten Landesteilen über dem Durchschnitt; Ausnahmen waren der Jura und die westlicheren schneebedeckten Gebiete. Die Nullgradgrenze lag auf der Alpennordseite im Tagesmittel sowohl an der Erdoberfläche als auch in der freien Atmosphäre zwischen 1800 und 2000 m ü.M. und sank nur innerhalb der Abkühlungsphase (12. - 18. Apr. 1999) kurz unter 1000 m ü.M. ab (16. Apr. 1999). Inneralpin ist die bodennahe Temperatur aufgrund der Kältewirkung der Schneedecke (Kältegehalt, Schmelze, Verdunstung) etwas tiefer.

Aufgrund der nahezu ständigen Niederschlagsbedingungen auf der Alpennordseite im April war die Evapotranspiration trotz beginnender Vegetation gering. In den bereits aperen Gebieten baute sich keine neue Schneedecke mehr auf, deren niederschlagsakkumulierende Eigenschaft als Verschärfung für die Hochwasserbildung im Mai zu werten wäre. Der flüssige Niederschlag hielt aber die Bodenfeuchte auf einem hohen Sättigungsgrad. Ebenso wurde die Schneedecke bis zur Schneefallgrenze, um 1500 m ü.M. und zeitweise auch höher, aufgefuechtet, sodass in Höhen mit einsetzender Schmelze das Wasser rasch in den Boden abgegeben und dort Sättigung erreicht wurde.

Die nach dem 24. Apr. 1999 stark steigenden Temperaturen führten in zunehmenden Höhen bis in die Kammlagen zur Temperierung der Schneedecke.

3.3 HOCHWASSER 10. BIS 15. MAI 1999

Wie schon bei den Entwicklungen von Januar bis März (Kap. 3.1) ist auch in diesem Fall die Ereignisdauer in den Eigenschaften der grossräumigen Druckverteilung und Zirkulation zu suchen. Anfang Monat richtete sich südlich von Grönland ein steuerndes Tiefdruckgebiet ein. Durch Regeneration bestand es bis 12. Mai 1999, bzw. in Auflösungsformen bis 15. Mai 1999. Zunächst (d.h. bis 9. Mai 1999) lagen die in seiner

Zirkulation entstehenden Luftmassengrenzen (Fronten) in der üblicherweise radialen Form im Druckfeld und wurden dadurch mit der Strömung nach Osten geführt.

Nach einer geringen Verlagerung des Tiefs gegen Irland bildete sich am 10. Mai 1999 ein Anschluss an ein von Polen bis Sibirien reichendes Tiefdruckgebiet. Unter diesen Zirkulationsbedingungen wurde eine gegen Mitteleuropa geführte Luftmassengrenze am 10. Mai 1999 parallel zur Strömung am Südrand der Tiefdruckzone gedreht und lag in den folgenden Tagen zonal annähernd ortsfest über der Nordschweiz (Fig. 3.7). Die Front wanderte erst mit der Verschiebung und Veränderung der gesamten Druckanordnung am 15. Mai 1999 abschwächend nach Süden ab.

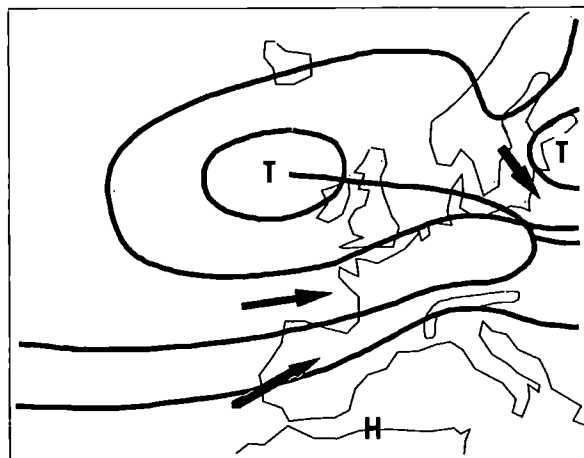


Fig. 3.7: Schematisierter Druck- und Strömungszustand im Zeitraum 11. - 15. Mai 1999. Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront).

Der Niederschlag entstand durch die thermodynamischen Eigenschaften entlang dieser Front. Die Niederschlagsleistung in der betroffenen nordalpinen Region ergab sich aus den gegebenen vertikalen Schichtungen der niederschlagsrelevanten Prozesskomponenten und aus der annähernd ortsfesten Lage des Systems. Die Achse des Hauptniederschlagsfeldes ist, entsprechend der verantwortlichen Luftmassengrenze, West-Ost ausgerichtet (Fig. 3.7 und Fig. 4.13 - 4.15). Die Position des Zentrums wurde durch die horizontale Verteilung der vertikalen Schichtungen festgelegt. Es ist gegenüber einem vergleichbaren Ereignis der jüngeren Vergangenheit (September 1987) (Grebner et al., 1999) nach Osten in den Raum Zürich-St. Gallen verschoben, in der Niederschlagsleistung schwächer, aber in der Dauer länger. Seine Bedeutung lag deshalb im Niederschlagsvolumen der gesamten Dauer (Fig. 4.15). Wie u.a. die Position des Vergleichsfall vom September 1987 zeigt, ist für Zirkulationssysteme dieser Art die Orographie in Form von Stau, im Gegensatz zu den beschriebenen Bedingungen von Januar bis März 1999 (Kap. 3.1), nicht relevant.

Entsprechend einer Zusammenstellung von spezifischen Zirkulationsanordnungen im Hydrologischen Atlas der Schweiz ist die beschriebene Struktur des Ereignisses eine der typischen Möglichkeiten für nordalpine Stark- bis Extremniederschläge (Grebner et al., 1999, Abbildung zum 26. Sep. 1987).

3.4 HOCHWASSER 19. BIS 22. MAI 1999

Für die zweite Starkniederschlagsphase im Mai war die Druckverteilung und die sich daraus ergebende Zirkulation von zwei Zentren in einem Tiefdrucktrog verantwortlich. Der Trog erstreckte sich am 18. Mai 1999 von Grönland nach Spanien. Das Hauptzentrum lag bei Grönland; ein weiteres Zentrum über Nordspanien, d.h. in der Trogspitze. Letzteres wanderte bis zum 22. Mai 1999 über Südfrankreich, die Westalpen, Venedig zur Adria (Fig. 3.8, Bahnkurve gestrichelt). In seinem Aktivitätsbereich fielen in der Westschweiz ab 18., gegen Osten ab 19. Mai 1999 zunächst mässige Niederschläge. Auf der Ostseite des Tiefs wurde mediterrane Warmluft bis Polen und von dort um das Tief wieder nach Südwesten geführt.

Während dieser Entwicklung verlagerte sich das Haupttief von Grönland nach Schottland. Auf seiner Südseite streckte sich deshalb die (bodennah kühle) Westströmung gegen Mitteleuropa, mit Delta nördlich der Alpen (Fig. 3.8). Die Stauwirkung an den Alpen, vor allem aber die Konvergenz mit der dort von Osten entgegenfließenden (bodennah warmen) Luft waren Anlass für eine grossflächig starke Intensivierung der Niederschläge (Fig. 3.2 und Fig. 4.16 bis 4.18). Sie reichten nord- bis inneralpin von der Osthälfte der Schweiz nach Osten ins Donaugebiet von Deutschland und Österreich, und sie waren in Zeiteinheiten bis knapp 2 Tage deutlich ergiebiger als beim ersten Ereignis. Das Zentrum des gesamten Niederschlagsfeldes lag östlich der Schweiz im deutschen Einzugsgebiet der Donau (vgl. Kap. 4.3.4). Die überwiegend thermodynamische Ursache lässt die Überlegung zu, dass die dort gefallenen Niederschlagsmengen auch über der Schweiz auftreten können.

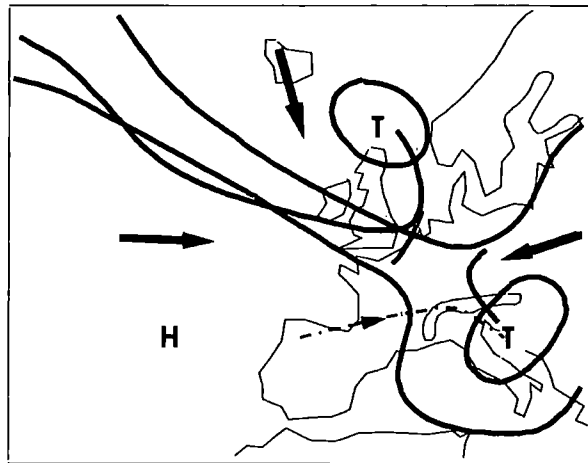


Fig. 3.8: Schematisierter Druck- und Strömungszustand im Zeitraum 19. - 22. Mai 1999. Dicke Pfeile: Zufuhr von Warmluft (rot) und Kaltluft (blau). Zwischen den Luftmassen liegen die generierten und transportierten Frontfolgen (rot: Warmfront, blau: Kaltfront). Dünner Pfeil: Zugbahn des südlichen Tiefdruckgebietes.

Die Niederschlagszentren im Gebiet der Schweiz traten zwischen Walensee und Unersee und im Prättigau auf (Fig. 4.16 - 4.18). Am 21. Mai 1999 überstiegen dort die Tagessummen an einzelnen Stationen 160 mm. Diese Mengen sind um mehr als 30 % höher als die Tagesmaxima des vorangehenden Ereignisses (Kap. 3.3). Bei den 24stündigen d.h. nichtkalendrischen Niederschlagsmengen der Zentren steigt dieser Unterschied sogar bis auf über 60 % (Fig. 4.15 und 4.17). Ähnliches gilt für 12 Stunden. Bis 72 Stunden nimmt jedoch diese punktuelle Dominanz auf 16 % ab. Auch die Gebietsniederschläge dieses zweiten Ereignisses lagen für die kurzen Dauern deutlich über dem ersten (Tab. 3.1). Ab längeren Intervallen über ca. 40 Stunden Dauer zeigte sich aber dann die höhere Effizienz des atmosphärischen Niederschlagsystems vom ersten Ereignis.

Tab. 3.1: Gebietsniederschläge für 1000, 2000 und 5000 km² in den 3 intensivsten nichtkalendrischen Zeitintervallen 12, 24 und 72 Stunden während der beiden Ereignisse (1) 10.-15. Mai 1999 und (2) 19. - 22. Mai 1999 .

Zeitintervall	12 h			24 h			72 h		
	1000	2000	5000	1000	2000	5000	1000	2000	5000
Fläche [km ²]	1000	2000	5000	1000	2000	5000	1000	2000	5000
Ereignis 1 [mm]	60	56	50	104	100	90	178	170	157
Ereignis 2 [mm]	83	80	67	124	119	102	150	145	128

Das Tief über der Adria zog nach dem 22. Mai 1999 nach Südosten weiter. Die massgebende Strömungskonvergenz im nördlichen Alpenraum löste sich auf, und in der von Westen vorgedrungenen Kaltluft entstand ein Hochkeil. Er beendete in der Schweiz im Laufe des 23. Mai 1999 diese Niederschlagsphase.

Beim Vergleich mit typischen Zirkulationsmustern extremer Niederschlagsereignisse (Grebner et al. 1999) lässt sich der aktuelle Fall dem Schema vom 17. Juli 1987 annähern, mit etwas anderer Position der Tiefzentren, und damit mit anderer Lage des Niederschlagsfeldes. Ausserdem besitzt er im Konvergenz- d.h. Hebungsbereich komplexere Eigenschaften der vertikalen Temperaturschichtung als der Vergleichsfall.

Die Temperaturen waren im Mai allgemein relativ hoch. Sie gingen zwar nach dem Durchzug des Tiefs von Spanien her zurück (Fig. 3.2). Während des Minimums am 20. und 21. Mai 1999 blieb die Nullgradgrenze aber immer noch über 2000 m, meist sogar über 2200 m ü.M., sowohl im Tagesmittel in Bodennähe, als auch in der freien Atmosphäre. Entsprechend hochreichend fiel der Niederschlag als Regen. Gleichzeitig setzte sich die Schneeschmelze fort. Letztere verstärkte sich in den verbliebenen Höhenzonen mit Schneedecke nach dem Ereignis bis zum Monatsende durch weiteren Temperaturanstieg. Die Nullgradgrenze hob sich dabei auf Höhen zwischen 3000 und 3800 m ü.M. und lag damit an einzelnen Tagen bis 1000 m über dem Mittel, aber im wesentlichen noch innerhalb der Standardabweichung.

Das in der Schweiz stark überregnete Gebiet umfasst die nordalpine Osthälfte des Alpenrandes bis in die Alpen hinein, mit Schwerpunkt über dem Einzugsgebiet des Alpenrheins (Fig. 4.16 bis 4.18). Als hydrologische Ausgangsbedingung bestand dort der in den wenigen Tagen seit dem ersten Mai-Ereignis unwesentlich abgebaute Zustand des Bodenwassergehalts und der Wasserstände in den Gewässern.

FAZIT:

Massgebende meteorologische Konditionierung vor dem ersten Starkniederschlagsereignis vom 10. bis 15. Mai 1999 waren die ausgedehnten überdurchschnittlichen Schneefälle von Ende Januar bis März, die überdurchschnittlichen Temperaturen im März mit ihrer Wirkung auf die Schneedecke, insbesondere Abschmelzen bis auf Höhen um 1000 m ü.M., sowie die überdurchschnittliche Niederschlagsaktivität nach Häufigkeit und Menge im April. In den höher gelegenen Gebieten und für die Alpenrandseen war zudem die Wärmeperiode ab Ende April von entscheidender Bedeutung, welche durch die intensive Schneeschmelze einerseits die Böden weitgehend durchfeuchtete und andererseits zu einem starken Ansteigen der Seepiegel führte. Für die Auswirkung des zweiten Niederschlagsereignisses vom 19. - 22. Mai 1999 war vor allem der vom vorausgehenden Ereignis geschaffene hydrologische Zustand (Bodenfeuchte, Schneedecke, Abfluss) als Ausgangsbedingung massgebend.

4 ABFLUSSBILDENDE FAKTOREN DER HOCHWASSER IM MAI 1999

Wie in den vorangehenden Kapiteln aufgezeigt, zeichnen sich die Hochwasser vom Mai 1999 unter anderem dadurch aus, dass sie auch ausserhalb der eigentlichen Niederschlagszentren zu erheblichen Schäden geführt haben. Der schneereiche Lawinenwinter 1998/99 legt deshalb die Vermutung nahe, dass nebst den Niederschlägen, auf die in Abschnitt 4.3 eingegangen wird, auch das Abschmelzen der Schneedecke eine wesentliche Rolle spielte. Im nachfolgenden Kapitel wird deshalb der Zustand der Schneedecke im Frühjahr 1999 dargestellt und mit demjenigen früherer Jahre verglichen. Da aber eine Schneedecke per se nicht unbedingt hochwasserrelevant ist, sondern es erst durch ihr Abschmelzen wird, werden in Abschnitt 4.2 einige wichtige Aspekte dieses Prozesses aufgezeigt. Zudem wird der Schmelzverlauf im Frühjahr 1999 an ausgewählten Stationen erläutert.

4.1 SCHNEEDECKE

Michael Bründl, Pierluigi Calanca, Martin Laternser, Mario B. Rohrer, Urs Steinegger, Urs Stöckli

4.1.1 DATENGRUNDLAGEN UND AUSWERTUNG

Die folgenden Untersuchungen stützen sich im Wesentlichen auf das Netz der Vergleichsstationen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) (Fig. 4.1). An diesen Stationen wird jeweils am Morgen zwischen 7.00 h und 8.00 h die Lufttemperatur, die Schneetemperatur (10 cm unter der Oberfläche), die Neuschneehöhe, der Wasserwert des Neuschnees (soweit über 10 cm), die Gesamtschneehöhe, Windrichtung und -stärke gemessen. Daneben werden noch Beobachtungen für die Lawinenwarnung erhoben, die aber in diesem Zusammenhang nicht relevant sind.

An 54 SLF-Vergleichsstationen wird alle 14 Tage bei der Schneeprofilaufnahme auch der Wasserwert der Gesamtschneedecke erhoben. Von 54 Stationen liegen 28 Stationen im untersuchten Raum (d.h. ohne Wallis, Tessin und Engadin). Verschiedene Stationen sind schon seit mehr als 50 Jahren in Betrieb, womit ein umfassender, langjähriger Datensatz von direkten Wasserwertmessungen in der Schneedecke vorliegt. Die Station Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) weist mit 63 Jahren die längste lückenlose Messreihe auf. Zu Beginn der Periode wurden die Messwerte allerdings teilweise interpoliert. 15 Stationen verfügen über 40 oder mehr Beobachtungsjahre, weitere 22 über eine Reihenlänge von 25 - 39 Jahren, 15 über eine solche von 15 - 24 Jahren und an 13 Stationen beträgt die Messdauer 8 - 14 Jahre. An 11 von den insgesamt 65 Stationen mit Wasserwertdaten wurden 1999 keine Messungen durchgeführt.

Zusätzlich standen 21 Stationen des interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS) und 6 ENET-Station der MeteoSchweiz im Untersuchungsgebiet (d.h. ohne Wallis, Tessin und Engadin) zur Verfügung.

Weitere Stationen, die für die Analyse des Wasseräquivalents herangezogen wurden, sind die Stationen Mettmen-Garichte, das Messnetz im Wägital und das Messnetz Linth-Limmern im hinteren Glarnerland. Im Wägital werden seit 1943 an insgesamt 47 Standorten Schneehöhenmessungen und davon an 11 Standorten Dichtemessungen durchgeführt. Diese Stationen gehören damit neben denen des Weissfluhjoches zu den längsten Wasseräquivalentreihen der Schweiz. Im Gebiet Linth-Limmern werden an 16 Standorten seit 1963 Messungen des Wasseräquivalents durchgeführt. Eine Übersicht über die geographische Lage der verwendeten Stationen gibt Fig. 4.1.

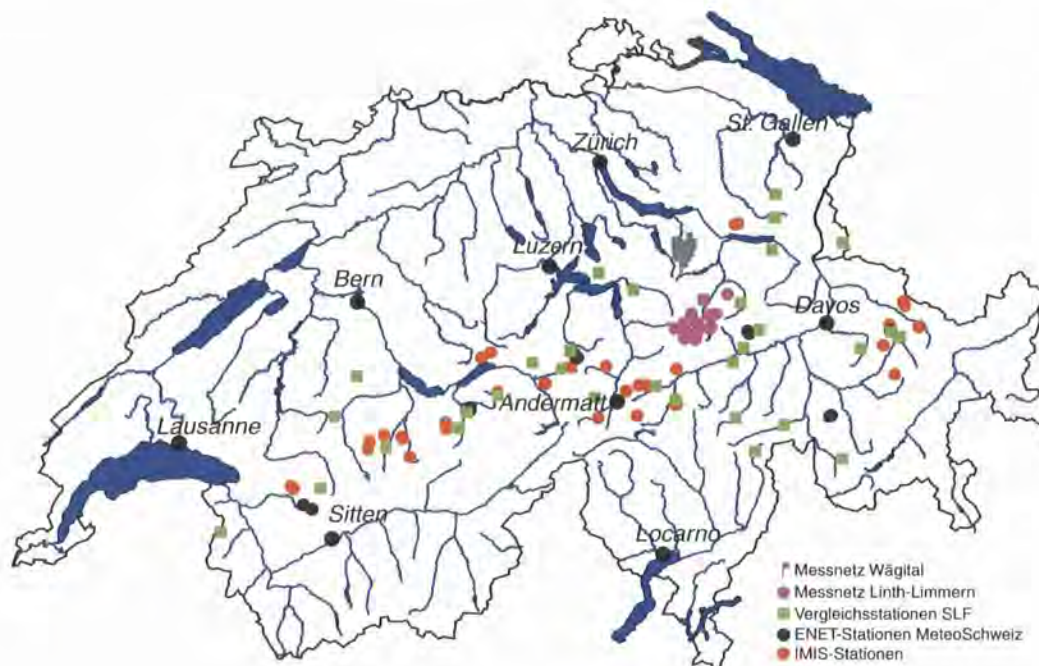


Fig. 4.1: Netz der verwendeten IMIS-Stationen, Vergleichsstationen und Messstellen des SLF sowie das ENET-Stationsnetz der MeteoSchweiz. Als weitere Stationen standen das Messnetz im Wägital und das Messnetz aus dem Gebiet Linth-Limmern zur Verfügung.

Methodik zur Analyse der Jährlichkeit

Bevor die Wiederkehrperioden von Schneehöhe und Wasseräquivalent in den verschiedenen Regionen erläutert werden, soll noch auf die grundsätzliche Problematik von Jährlichkeitsuntersuchungen eingegangen werden. Die hier vorgestellten Untersuchungen der Jährlichkeit stützen sich auf die klassische Gumbel-Methode (Gumbel, 1958). Diese Methode wurde angewendet, um eine Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen zu gewährleisten. Es muss jedoch erwähnt werden, dass sich die Verteilung der Daten nicht immer optimal an die theoretische Verteilung von Gumbel anpassen lässt. Modernere Methoden würden statistisch besser gesicherte Ergebnisse liefern. Unabhängig von der verwendeten Methode liegt ein Grundproblem in der unterschiedlichen Beobachtungsdauer der verschiedenen Messstationen. Kurze Messreihen geben fast immer kleinere Wiederkehrperioden als lange Messreihen. Aus diesem Grund wurden für die folgenden Auswertungen nur Daten von Stationen mit ungefähr gleich langer Beobachtungsdauer verwendet. Zudem sollten es möglichst lange Messreihen sein, welche einige schneereiche Winter enthalten (v.a. 1945, 1951, 1960, 1966, 1968, 1970, 1975, 1980, 1981, 1982). Mit Ausnahme der Station Weissfluhjoch (ab 1937) begannen die ersten SLF-Vergleichsstationen und Messstellen ihre Aufzeichnungen in den vierziger Jahren, so dass wir heute insgesamt 41 Stationen mit mehr oder weniger lückenlosen Schneemessungen seit mindestens 1951 haben. Da diese Stationen aber nicht flächendeckend repräsentativ über den gesamten schweizerischen Alpenraum verteilt sind, mussten noch weitere Stationen zugezogen werden. Schliesslich wurde mit den Daten von 72 SLF-Stationen mit mindestens 40jährigen Reihen (Messbeginn vor 1960) gearbeitet. Dies stellt einen Kompromiss zwischen möglichst vielen Stationen (räumlich hohe Auflösung), möglichst langjährigen Stationen (Qualität der Extremwertstatistik) und möglichst gleich langer Beobachtungsdauer (Vergleichbarkeit der Extremwerte) dar.

Die oben beschriebene Problematik wird am Beispiel der SLF-Vergleichsstationen Mürren und Wengen dargestellt. Fig. 4.2 zeigt, wie problematisch die Jährlichkeitsberechnung sein kann. Grundsätzlich wird die grösste Schneehöhe jedes Winters (HS_{max}) gegen die Wiederkehrdauer (Anzahl Beobachtungen/Rang) auf einer doppelt logarithmischen Achse aufgetragen. Unter der Annahme von Gumbel-verteilten Daten kommen somit die Punkte auf einer Geraden zu liegen und die Jährlichkeit eines bestimmten Ereignisses kann einfach abgelesen werden (Schnittpunkt HS_{max} mit der Regressionsgeraden). Im Fall von Mürren liegt HS_{max} des Winters 1999 auf dem 2. Rang und die Wiederkehrdauer eines solchen Ereignisses beträgt ca. 38 Jahre

(das der linearen Regression zugrunde liegende 95%-Konfidenzintervall beträgt 33 - 43 Jahre). Offenbar wies seit Messbeginn im Winter 1948 nur der Winter 1968 eine noch grössere Schneehöhe als 1999. Im nur wenige Kilometer entfernten Wengen, das eine ähnlich lange Messreihe aufweist, wurde aber ausgerechnet im schneereichen Winter 1968 nicht gemessen. 1999 liegt somit klar auf dem 1. Rang und erhält dadurch eine hohe Wiederkehrdauer von 46 Jahren (40 - 54 Jahre). Falls 1968 auch Wengen eine grössere maximale Schneehöhe HS_{max} aufwies als 1999, so würde die Jährlichkeit des 1999er Ereignisses deutlich tiefer ausfallen. Die unterschiedlichen Maximalschneehöhen der beiden Standorte sind auch ein Hinweis auf den Einfluss der Höhe über Meer auf die maximale Schneehöhe.

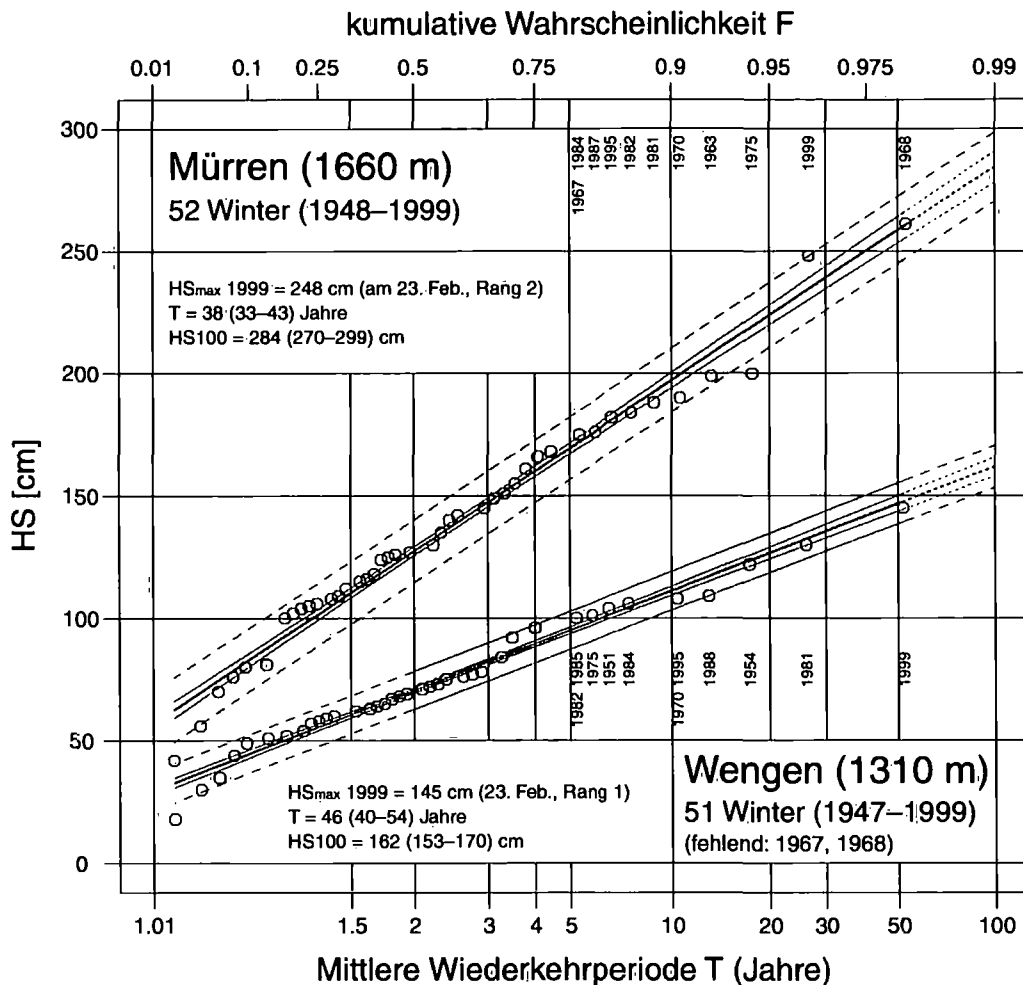


Fig. 4.2: Wiederkehrperiode (Jährlichkeit nach Gumbel-Methode) der maximalen Schneehöhe HS_{max} jedes Winters der letzten 50 Jahre für die beiden benachbarten Stationen Müren und Wengen (Berner Oberland). 1999 erreichten beide Stationen am 23. Feb. ihre grösste Schneehöhe. Im Fall von Müren entspricht das einer Jährlichkeit von knapp 40 Jahren (95%-Vertrauensintervall 33 - 43 Jahre, Rang 2); das 100jährige HS-Ereignis würde rund 284 cm betragen (95%- Prognoseintervall 270 - 299 cm). In Wengen hatte das 1999er Ereignis eine Jährlichkeit von rund 45 (40 - 54) Jahren (Rang 1, ohne 1968); das 100jährige Ereignis käme auf rund 162 (153 - 170) cm. Die extremsten 10 Winter sind in der Grafik gekennzeichnet.

Auf die Problematik der Aussagekraft aufgrund unterschiedlicher Messreihen wird in SLF (2000) ausführlicher eingegangen.

Fig. 4.2 zeigt an einem Beispiel, dass eine Aussage über einen grösseren Raum durch eine einzelne Station stark verzerrt werden kann. Aus diesem Grund wurde versucht, regional zu interpolieren, um die räumliche Variabilität angemessen zu berücksichtigen. Als Interpolationsverfahren wurde die in der Geostatistik gebräuchliche Kriging-Methode (z.B. Cressie, 1993) verwendet, um die Jährlichkeiten der maximalen Schneehöhen und der Wasserwerte des Winters 1999 in ihrer geographischen Verteilung darzustellen.

4.1.2 SCHNEEHÖHEN

Fig. 4.3 zeigt die durchschnittliche Wiederkehrperiode der maximalen Schneehöhen (HS_{max}) des Winters 1999. Man sieht, dass die grössten Jährlichkeiten entlang des Alpennordhanges auftreten (insbesondere im zentralen und östlichen Berner Oberland sowie vom Prättigau bis nach Samnaun). Das Ereignis 1999 hat bezüglich der maximalen Schneehöhe eine Wiederkehrdauer von 20 - 40 Jahren. Die Schneehöhe hat grundsätzlich keinen direkten Einfluss auf die Abflussbildung. Eine grosse Gesamtschneehöhe kann sich je nach Zeitpunkt ihres Auftretens noch sehr stark setzen und enthält damit nicht zwingend ein hohes Wasseräquivalent. Sie erlaubt in diesem Zusammenhang jedoch eine Einordnung in das langjährige Mittel und zeigt, dass im Winter 1998/1999 vor allem auf der Alpennordseite viel Schnee in den Bergen vorhanden war.

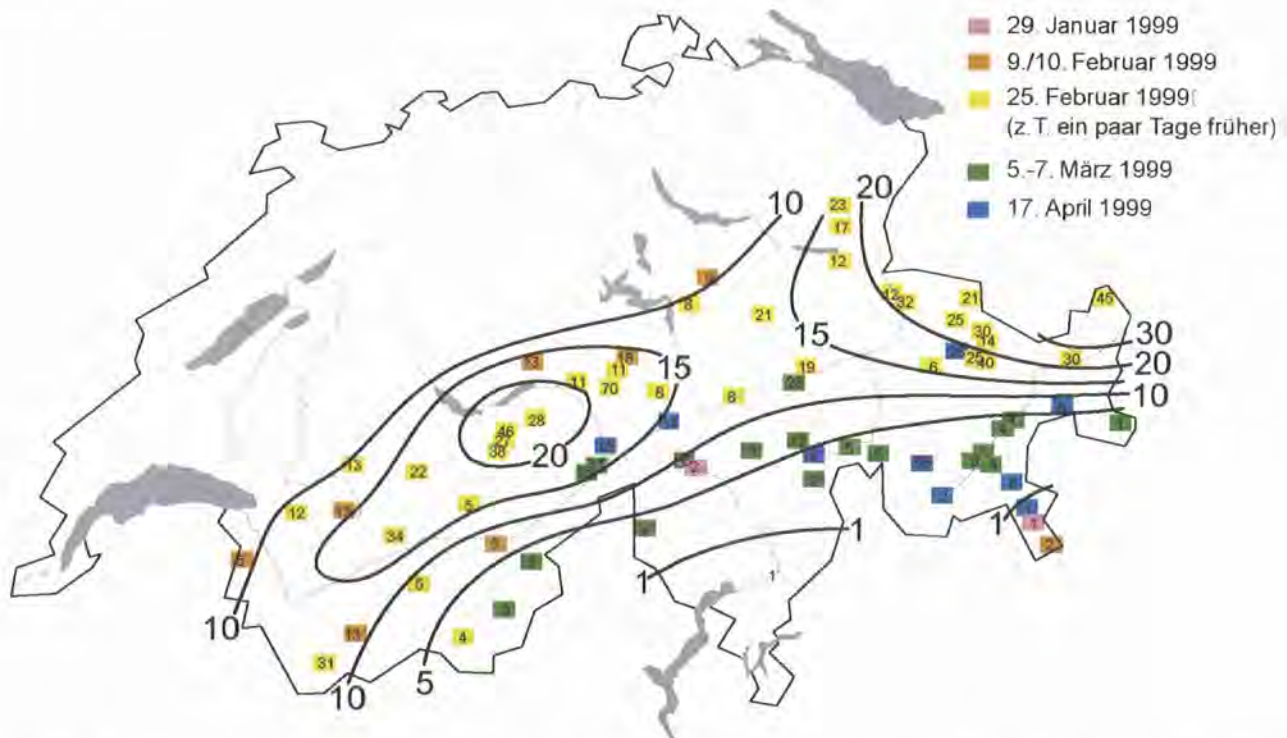


Fig. 4.3: Durchschnittliche Wiederkehrperiode der maximalen Schneehöhen HS_{max} des Winters 1999 (Isolinien). Die einzelnen Stationswerte (kleine Zahlen) sind mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet (siehe oben) und deshalb mit Vorsicht zu interpretieren. Auffallend ist die grosse räumliche Variabilität zwischen nah beieinander liegenden Stationen. Mit Farbe sind die unterschiedlichen Zeitpunkte der Schneehöhenmaxima markiert.

Fig. 4.3 zeigt die unterschiedlichen Zeitpunkte, an denen die verschiedenen Stationen ihr Schneehöhenmaximum erreichten. Ein Grossteil der Stationen vom Unterwallis entlang dem Alpennordhang bis hin zum Unterengadin verzeichnete die grösste Schneehöhe am 25. Feb. 1999, d.h. am letzten Tag der dritten Starkschneefallperiode. Einige tiefergelegenen Stationen erreichten das Schneehöhenmaximum bereits um den 10. Feb. (während der zweiten Starkschneefallperiode), da es dort während der dritten Periode zeitweise regnete. Die hoch gelegenen Stationen (Grimsel Hospiz, Weissfluhjoch) verzeichneten ihr Schneehöhenmaximum erst im Frühjahr, nämlich während der von Süden her übergreifenden Starkschneefallperiode Mitte April. Auch Andermatt und die hoch gelegenen Oberengadiner Stationen erreichten am 17. April die grösste Schneehöhe des Winters 1999. Demgegenüber überschritten die übrigen, unter Südeinfluss stehenden

Stationen (vom Oberwallis über das Tessin, das südliche Mittelbünden bis hin zum Oberengadin und ins Münstertal) das Schneehöhenmaximum bereits in der Zeit vom 5. bis 7. März.

Im Vergleich zu früheren Jahren liegt der Winter 1999 bezüglich der maximalen Schneehöhe - mit Ausnahmen auf der Alpensüdseite, dem südlichen Wallis, Rheinwald, Avers und dem Oberengadin - unter den fünf Wintern mit den maximalen Werten innerhalb der letzten 50 Jahre. Mindestens vergleichbare Schneehöhen gab es in den Schweizer Alpen verbreitet in den Jahren 1951, 1968, 1970 (v.a. östlicher Alpennordhang), 1975 sowie 1982. Für eine detaillierte Erläuterung der aufgetretenen regionalen Unterschiede sei auf die ausführliche Studie Lawinenwinter 1999 (SLF, 2000) verwiesen.

4.1.3 WASSERÄQUIVALENT DER SCHNEEDECKE

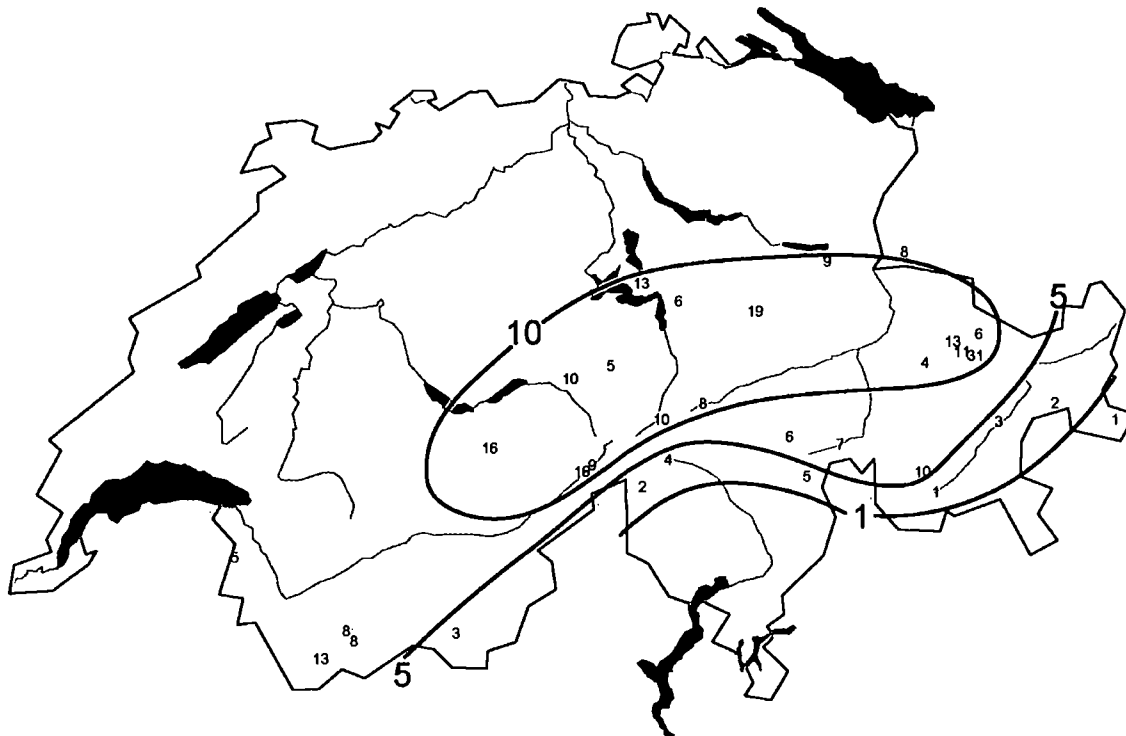


Fig. 4.4: Durchschnittliche Wiederkehrperiode der maximalen Wasserwerte der Gesamtschneedecke WE_{max} des Winters 1999 (Isolinien) sowie die einzelnen Stationswerte (kleine Zahlen).

Eine für die Abflussbildung weit wichtigere Einflussgrösse als die Gesamtschneehöhe ist das Wasseräquivalent der Schneedecke. Obwohl die Gesamtschneehöhe Ende Februar in einigen Gebieten des Berner Oberlandes eine Wiederkehrperiode von 20 - 50 Jahren aufwies, betrug die Wiederkehrperiode des Wasseräquivalents im gleichen Gebiet nur 10 - 15 Jahre. Dies verdeutlicht, dass eine grosse Schneehöhe nicht zwangsläufig auch ein grosses und damit seltenes Wasseräquivalent aufweisen muss. Wird eine grosse (seltene) Gesamtschneehöhe früh im Winter erreicht, kann sie sich stark setzen und das Wasseräquivalent ist dann im Vergleich zum langjährigen Mittel relativ gering.

Fig. 4.4 zeigt von den ausgewählten 32 Stationen mit einer Beobachtungsdauer länger als 15 Jahre die durchschnittliche Wiederkehrperiode des maximalen Wasseräquivalents der Gesamtschneedecke HW_{max} im Schweizer Alpenraum. Die Wiederkehrperiode des maximalen Wasserwertes der Schneedecke für den Winter 1998/99 beträgt am zentralen Alpennordhang sowie im Gotthardgebiet und in Nordbünden 10 - 20 Jahre, im Wallis 5 - 10 Jahre, im übrigen Graubünden rund 5 Jahre und am Alpensüdhang 1 - 5 Jahre.

Der Zeitpunkt, an dem der Maximalwert an den Stationen des SLF erreicht wurde, ist je nach Höhenlage und Region verschieden. Die Verteilung der maximalen Wasserwerte unterteilt in drei Höhenzonen (unter 1500 m ü.M., 1500 - 1800 m ü.M., über 1800 m ü.M.), wird in Tab. 9.1 im Anhang dargestellt. Der maximale

Wasserwert wurde in tieferen Lagen (unter 1500 m ü.M.) im Zeitraum Ende Februar bis Mitte März 1999 erreicht, in mittleren Lagen (1500 - 1800 m ü.M.) zwischen Mitte März und Mitte April und in höheren Lagen (über 1800 m ü.M.) und in den südlichen Gebieten meist erst Mitte April oder noch später. Auch die in Kap. 4.2.1 erläuterten Simulationen des Wasseräquivalentes der Schneedecke zeigen, dass in Höhenlagen zwischen 1800 und 2600 m ü.M. die maximalen Werte um den 25. April 1999 erreicht wurden. Höher gelegene Gebiete erhielten auch später noch Schneezuwachs. Zum Beispiel wurde am 24. Mai auf dem Claridenfirn in 2900 m ü.M. ein Wasseräquivalent von 3500 mm gemessen.

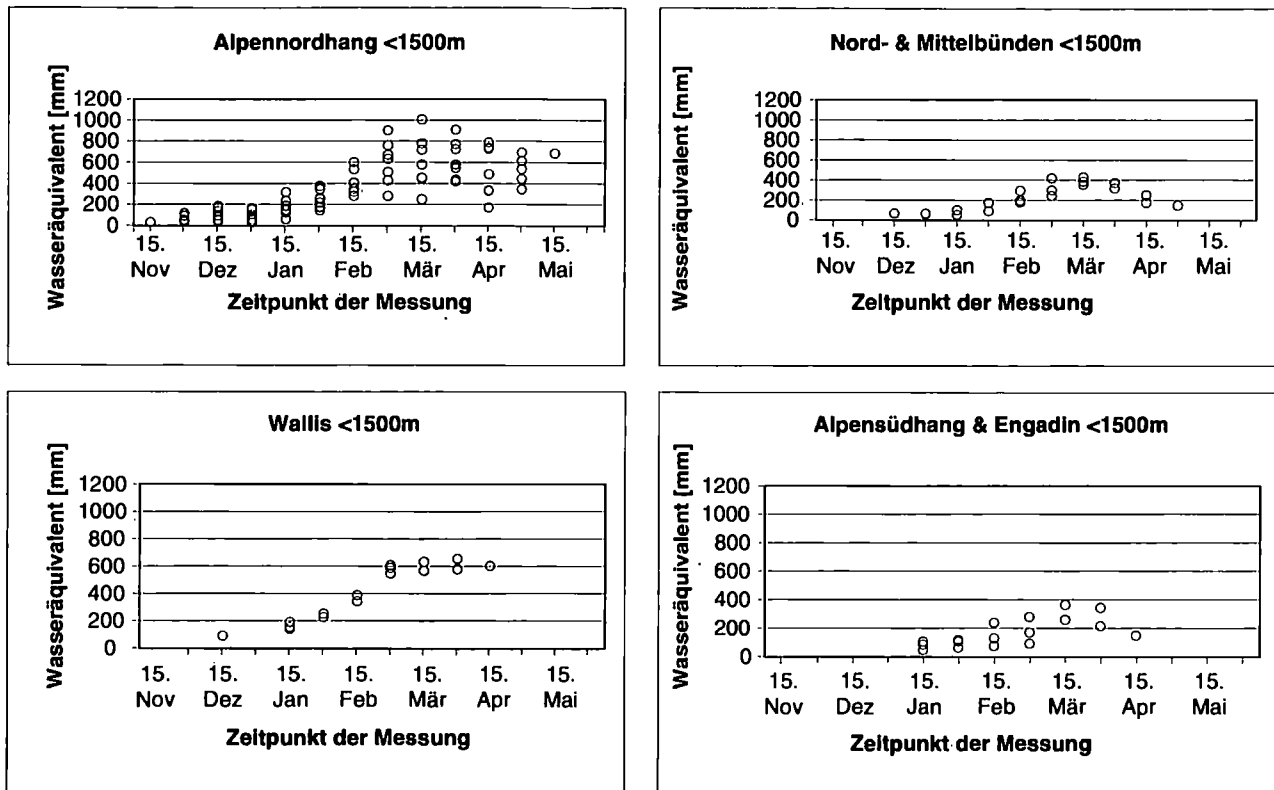


Fig. 4.5: Zeitliche Entwicklung des Wasserwertes der Gesamtschneedecke im Winter 1998/99 in vier Regionen (Alpennordhang, Nord- und Mittelbünden, Wallis, Alpensüdhang und Engadin) im Höhenbereich unter 1500 m ü.M. Ausser am Alpennordhang ist die Stationsdichte gering.

Fig. 4.5 zeigt die zeitliche Entwicklung des Wasserwertes der Schneedecke in den verschiedenen Regionen. Von Mitte Januar bis Anfang März nahm der Wasserwert überall markant zu und erreichte insbesondere am Alpennordhang mit verbreitet mehr als 600 mm überdurchschnittlich hohe Werte. Am Alpensüdhang lagen im untersuchten Höhenbereich (1000 - 1500 m ü.M.) die Werte unter 400 mm.

Jahre mit vergleichbar hohen Wasseräquivalenten waren im Berner Oberland 1975, am zentralen Alpennordhang 1975 und 1982. Am östlichen Alpennordhang lag je nach Station 1970 und 1975 ein vergleichbares maximales Wasseräquivalent vor, vereinzelt auch 1982.

Klimatologisch interessant ist der neue Rekord in Davos, weil auf dieser Station schon seit mehr als 50 Jahren beobachtet wird. An der Station Weissfluhjoch oberhalb Davos liegt der maximale Wasserwert von 1999 innerhalb der 63-jährigen Messperiode auf Rang 3 (vgl. Fig. 4.6). Andere Jahre mit vergleichbar hohen Werten waren in Nordbünden 1975, im Gebiet Hinterrhein 1984 (Station Splügen) und im Gebiet Vorderrhein 1992 (Station Sedrun). An der Station Splügen (1961-1995) liegt das maximale Wasseräquivalent des Jahres 1975 eindeutig auf dem ersten Rang.

Der Vergleich der Wasseräquivalente der Schneedecke des Winters 1998/99 mit den Werten früherer Winter zeigt, dass die Schneereserven hoch, jedoch nur an gewissen Stationen maximal waren. Auch an einigen Stationen mit kürzerer Messdauer wurden neue Rekorde gemessen, so an den SLF-Stationen Gantrisch 736 mm (20 Jahre Betriebsdauer, bisheriges Maximum 646 mm), Gsteig 446 mm (11 Jahre, 366 mm),

Göscheneralp 812 mm (11 Jahre, 742 mm), Arolla 669 mm (11 Jahre, 520 mm), Davos 523 mm (53 Jahre, 472 mm), Motta Naluns 521 mm (12 Jahre, 518 mm) und Samnaun 383 mm (11 Jahre, 303 mm).

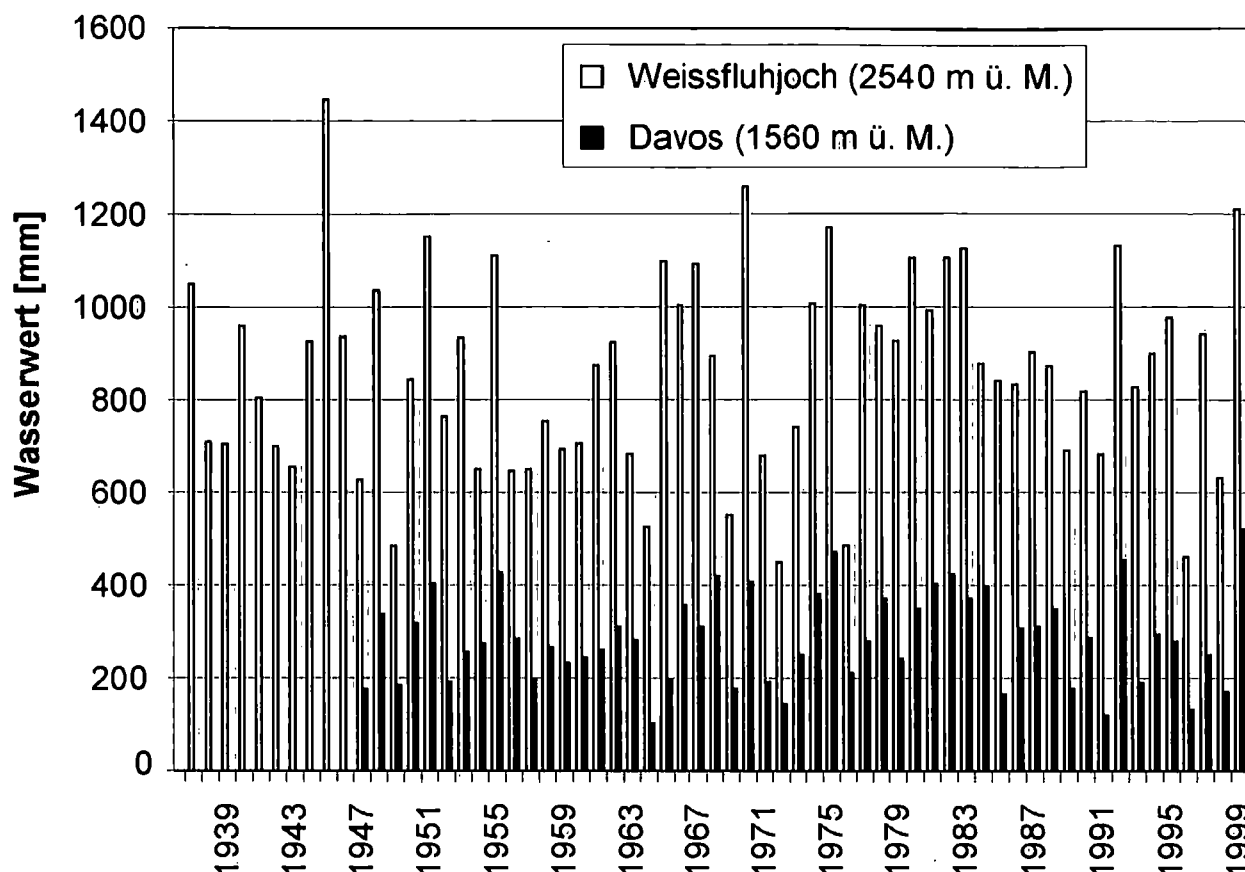


Fig. 4.6: Der maximale jährliche Wasserwert der Gesamtschneedecke WE_{max} wird in der Region Davos seit 1937 (Weissfluhjoch) resp. 1947 (Davos) gemessen.

Auch in den Schwyzer- und Glarneralpen zählte der Winter 1999 zu den Wintern mit den höchsten Wasseräquivalentwerten der letzten 50 Jahre. Eine Analyse der Wasseräquivalentwerte in diesen Gebieten ergibt folgende Einordnung der Situation im Frühjahr 1999:

An der Station Mettmen Garichte auf 1600 m ü.M. lag das Wasseräquivalent am 1. März bei 864 mm. Dies ist der dritthöchste Wert der Messreihe seit 1943. Die Fig. 4.7 zeigt für diese Messstation, dass sich fünf Winter deutlich von den übrigen abheben. Es sind dies für den 1. März neben 1998/1999 die Winter: 1967/68, 1974/75, 1980/81 und 1981/82. Der Winter 1998/99 belegt Rang drei. Diese Rangierung bleibt bis zum Beginn der Schneeschmelze Mitte April erhalten.

Für den 1. April liegen aus dem Wägital umfangreiche Schneemessungen in verschiedenen Höhenlagen und Expositionen zwischen ca. 800 und 1800 m ü.M. vor. In diesem Untersuchungsgebiet werden Schneehöhen- und Wasseräquivalentmessungen jährlich seit 1943 durchgeführt. In diesem Jahr zeigte sich in Lagen unter 1200 m ü.M. eine starke Differenzierung der Schneedecke je nach Exposition und Abschattung. Die höher gelegenen Gebiete wiesen hohe bis sehr hohe Wasseräquivalentwerte auf (Fig. 4.8). Die starke Zunahme mit der Höhe erklärt sich einerseits aus der geringeren Schneeschmelze und andererseits aus dem grösseren Anteil an festem Niederschlag. Im Vergleich zu anderen Jahren mit hohen Wasseräquivalentwerten fällt der Winter 1974/75 mit noch stärker ausgeprägter Höhenzunahme auf. Hingegen waren am 1. April 1970 und 1982 die Unterschiede in den Höhenzonen deutlich geringer. Die Darstellung der Percentile (Summenhäufigkeit, Fig. 4.7) für die Stationen zeigt, dass das Wasseräquivalent in diesem Gebiet zu diesem Zeitpunkt einen hohen aber nicht extremen Werte aufweist.

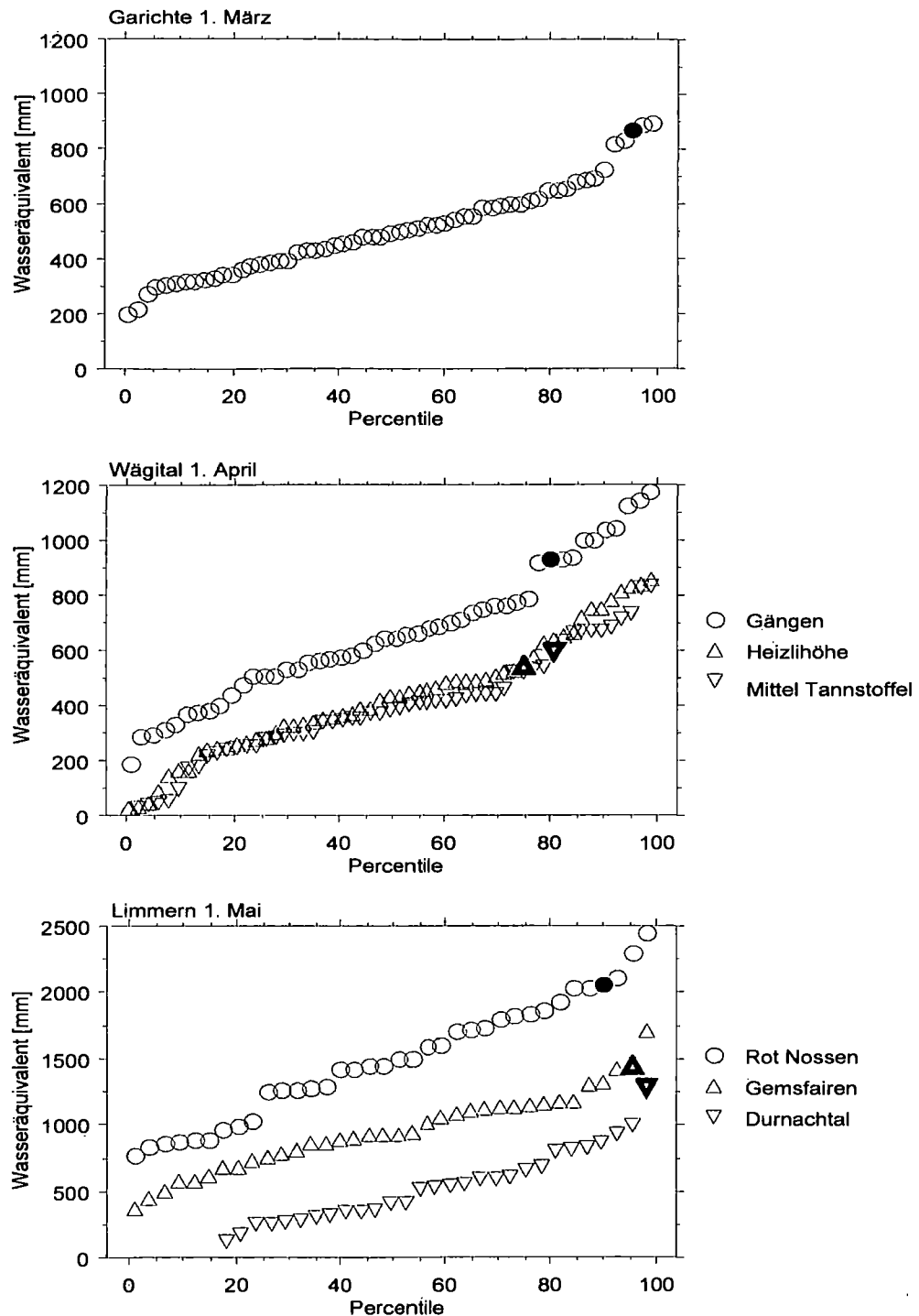


Fig. 4.7: Darstellung der Percentile (Summenhäufigkeit) [%] für die Station Garichte (1600 m ü.M.), das Wägital (Standorte Gängen 1600 m ü.M., Heizlihöhe 1400 m ü.M., Mittel Tannstoffel 1250 m ü.M.) und das Limmerngebiet (Standorte Rot Nossen 2760 m ü.M., Gemsfairn 1960 m ü.M., Durnachtal 1420 m ü.M.). Die Messungen von 1999 sind fett gedruckt. Die Darstellung sagt aus, dass zum Beispiel auf der Garichte der Wasseräquivalentwert von 1999 in ca. 95 % der Realisationen unterschritten wurde.

Wie am 1. April im Wägital liegen im Einzugsgebiet des Limmernsees Schneemessungen am 1. Mai in einem Höhenbereich zwischen 1200 und 2800 m ü.M. vor. Bei 16 Standorten wird seit 1963 gemessen, wobei 1999 an verschiedenen Standorten maximale Werte erhoben wurden. Im Mittel waren allerdings die Werte der Winter 1969/70 und 1974/75 leicht höher. Die Darstellung der Percentile (Fig. 4.7) zeigt, dass zu diesem Zeitpunkt und in dieser Höhenlage teilweise sehr hohe Wasseräquivalente vorlagen. Die Fig. 4.9 zeigt die Höhenabhängigkeit des Wasseräquivalentes in schneereichen Jahren. Die Unterschiede sind in

diesem Höhenbereich in den untersuchten Jahren wesentlich weniger ausgeprägt als im tiefergelegenen Untersuchungsgebiet Wägital. Dies hängt damit zusammen, dass in niederschlagsreichen Wintern im betrachteten Höhenbereich eine kompakte Schneedecke aufgebaut wird. Eine solche Schneedecke speichert kleinere Schmelzwassermengen effizient, wodurch in solchen Jahren im März oder April kaum Schmelzwasserabfluss stattfindet. Insbesondere an den niedrigeren Messstandorten Gemshäfen (1960 m ü.M.) und Durnachtal (1420 m ü.M.) liegen die Messwerte auf dem zweiten bzw. ersten Rang.

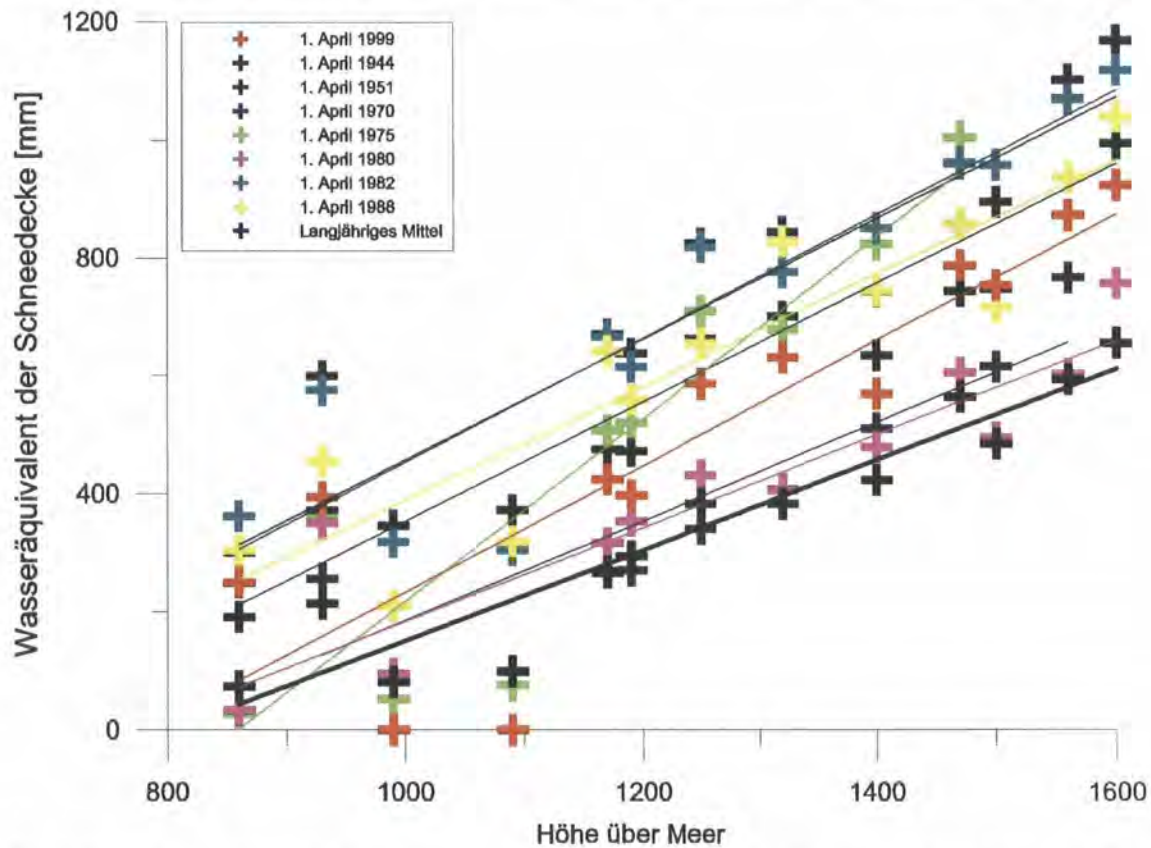


Fig. 4.8: Höhenabhängigkeit des Wasseräquivalentes am 1. April im Wägital und Klöntal. Datengrundlage: Meteodat und SLF.

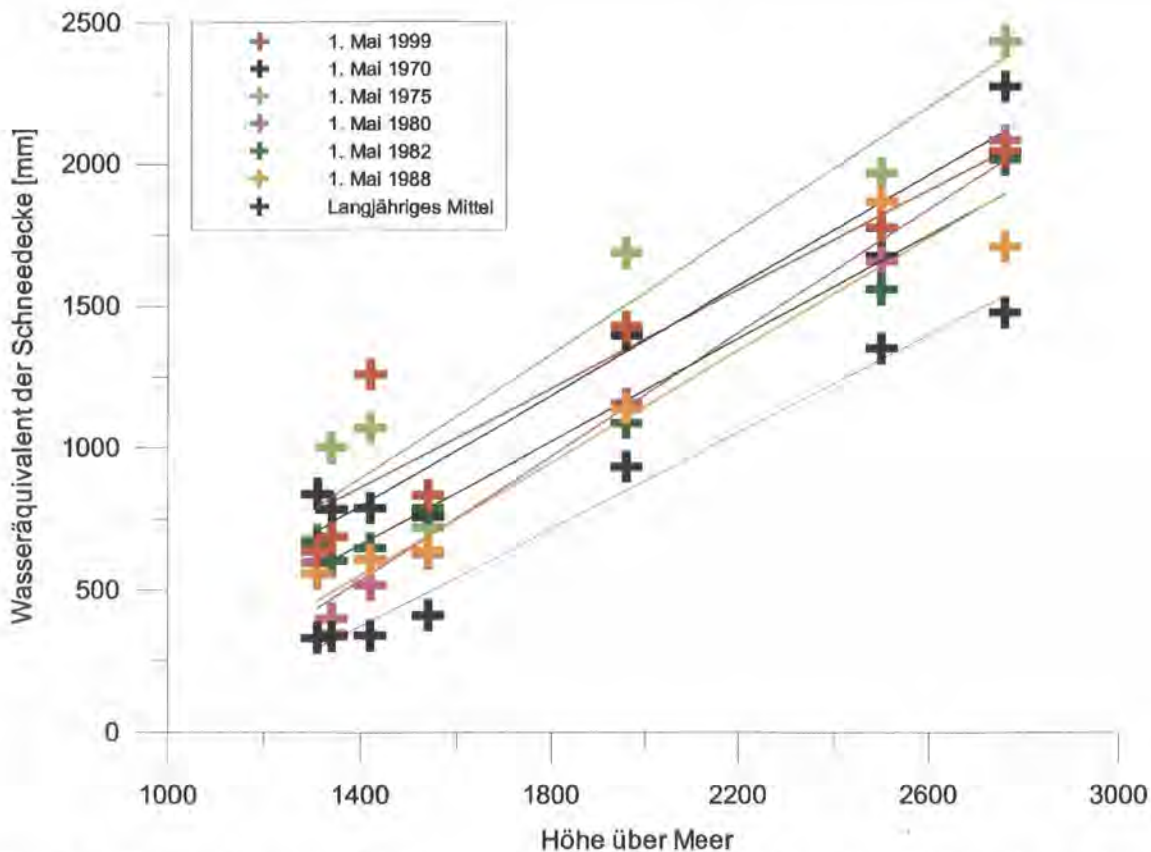


Fig. 4.9: Höhenabhängigkeit des Wasseräquivalents am 1. Mai in den Glarner Alpen. Datengrundlage: Meteodat und SLF.

Einen Hinweis auf die flächenhafte Ausdehnung der Schneedecke im Frühjahr 1999 geben Kleindienst et al. (2000). Sie haben im Rahmen eines Auftrages des Kantons die Entwicklung der Schneebedeckung im Berner Oberland (Fläche: 3240 km²) anhand von Satellitenbildern verfolgt. So waren z.B. am 9. Mai 1999, also kurz vor dem ersten Niederschlagsereignis, 68 % des Berner Oberlandes immer noch schneebedeckt. Der Höhenbereich zwischen 1000 und 1500 m ü.M. war dabei zu drei Vierteln schneefrei, der zwischen 1500 und 2000 m ü.M. aber noch zu 85 % schneebedeckt und die höher gelegenen Gebiete lagen noch unter einer weitgehend geschlossenen Schneedecke. Bis zum 29. Mai schmolz der Schnee unterhalb von 1500 m ü.M. praktisch vollständig ab und auch zwischen 1500 und 2000 m ü.M. sank die Schneebedeckung auf 30 %. Zwischen 2000 m ü.M. und 2500 m ü.M. aperten 15 % der Fläche aus, während sich die Schneeschmelze in den höher gelegenen Gebieten noch nicht in der Ausdehnung der Schneedecke bemerkbar machte. Insgesamt sank der Anteil der schneebedeckten Fläche im Berner Oberland vom 9. bis zum 29. Mai 1999 um über 20 % auf ca. 45 %. Die Ausdehnung der Schneedecke fiel damit 1999 erst Ende Monat Mai in jenen Bereich, der in zwei den von Kleindienst et al. (2000) aufgeführten Vergleichsjahren (1992 und 1998) bereits Anfang Mai erreicht wurde, betrug doch die Schneebedeckung in diesen Jahren schon um den 5. Mai je etwa 50 %.

FAZIT:

Der Winter 1998/99 zählt im Berner Oberland, in den Schwyzer- und Glarneralpen sowie in Nordbünden zu den Wintern mit den höchsten gemessenen Wasseräquivalentwerten der letzten 50 Jahre. Ähnlich hohe Werte wurden in den Jahren 1951, 1968, 1970, 1975, 1982 und 1984 beobachtet. Die starken Schneefälle im Februar führten zu ungewöhnlichen Neuschneemengen, die als seltener einzustufen sind, als die Wasseräquivalentwerte am Ende des Winters. Erstere sind für die Lawinengefahr, letztere für die Hochwassergefahr entscheidend.

4.2 SCHNEESCHMELZE

Pierluigi Calanca, Mario B. Rohrer, Urs Steinegger

Ob und wie stark sich grosse Schneemengen auf den Wasserstand in den Gewässern auswirken, hängt entscheidend davon ab, wie das Abschmelzen dieses Schnees verläuft. Im Folgenden werden deshalb kurz die wichtigsten Faktoren erläutert, welche die Schneeschmelze beeinflussen. Im Weiteren wird das Abschmelzen des Schnees im Frühjahr 1999 an ausgewählten Stationen veranschaulicht.

Die erhebliche Bedeutung des Schnees für die hydrologischen Prozesse resultiert einerseits aus der temporären Wasserspeicherung und andererseits aus der Wasserabgabe infolge der Schneeschmelze. Wird ein Eiskristall geschmolzen, muss Energie zugeführt werden. Die sogenannte Schmelzenergie beträgt etwa 333 J/g. Der Energieaustausch erfolgt durch Wärmeaustausch an der Schneeoberfläche (Absorption von Strahlungsenergie, konvektiven Wärmetransport sowie Kondensation und Verdunstung), durch Wärmeaustausch an der Schneedeckenunterseite sowie mittels Sickerung von Schmelzwasser oder Regen durch die Schneedecke. Die Globalstrahlung alleine kann an einem Strahlungstag wie z.B. am 26. April 1999 mit einer Globalstrahlungs-Tagessumme von 22'400 kJ/m² theoretisch ca. 67 mm Schneewasseräquivalent zum Schmelzen bringen. Die Reflektivität der Schneedecke reduziert jedoch diesen Schmelzbetrag auf 20 - 50 %. Zusammen mit den übrigen Wärmeeinträgen in die Schneedecke sind in der Schweiz maximale Schmelzraten von etwa 40 - 50 mm Wasseräquivalent / Tag möglich (vgl. z.B. Rohrer, 1992).

Die ausführliche Energiebilanzgleichung berücksichtigt alle oben erwähnten Prozesse. Von den vereinfachten Energiebilanzmethoden hat das Taggradverfahren grosse Verbreitung gefunden, da allein die Temperatur als Einflussfaktor (Index) benötigt wird. In vielen Situationen ergibt diese Vereinfachung gute Resultate (Kuhn, 1984). In der vorliegenden Studie wurden deshalb die Tagesmittel-Temperaturen aufsummiert, sofern sie positiv waren. Diese Taggradsumme wurde mit einem an ANETZ-Stationen mit Schneemessungen ermittelten Taggradfaktor multipliziert, um so die Schmelze abzuschätzen.

Der Wasseraustritt aus der Schneedecke (Abflussbildung) kann einerseits durch den Kältegehalt und andererseits durch die Wasserrückhaltekapazität der Schneedecke zeitlich verzögert werden. Schmelzwasser tritt also erst aus einer Schneedecke aus, wenn diese isotherm (auf Null Grad erwärmt) ist und wenn die Speicherkapazität von bis zu 10 % des Wasseräquivalentwertes erschöpft ist.

4.2.1 INTERPOLATION DES SCHNEEWASSERÄQUIVALENTS AUS DER SCHNEEHÖHE

Für die in Kap. 5 erläuterten Analysen bildet das Gebietsschneewasseräquivalent, d.h. das über die ganze Fläche extrapolierte Wasseräquivalent der Schneedecke, eine wichtige Eingangsgrösse. Im untersuchten Gebiet werden aber nur an wenigen Stationen regelmässig Messungen des Wasseräquivalents der Schneedecke durchgeführt. Da an zahlreichen Stationen automatisch Schneehöhen gemessen werden, wurde beschlossen, aus diesen Messungen Wasseräquivalente abzuleiten. Diese konnten dann bei der Interpolation des Gebietsschneewasseräquivalents als weitere Stützpunkte verwendet werden.

Die Wasseräquivalentmodellierung an den ENET- und IMIS-Stationen beruht auf einem Modell, das ursprünglich von Bader et al. (1939) entwickelt und nachfolgend von Martinec (1977) stark vereinfacht und von Rohrer (1992) modifiziert wurde. Es musste für die vorliegende Arbeit erneut angepasst werden. Für die IMIS-Stationen liegen Modellierungen des SLF und der Meteodat GmbH vor. Zur Ergänzung wurden Stationen der MeteoSchweiz mit täglich gemessenen Gesamtschneehöhen und Neuschneehöhen beigezogen. Auch hier wurden mit dem Verdichtungsmodell tägliche Wasseräquivalentwerte bestimmt. Bei den Vergleichsstationen liegen Gesamt- und Neuschneehöhen, Wasseräquivalentmessungen bei Neuschneehöhen von über 10 cm und 14-tägliche Dichtemessungen vor. Aus den Gesamtschneehöhen und den Dichten wurden die Wasseräquivalente für jeweils die Monatsmitte und das Monatsende von Ende Januar bis Ende Juni bestimmt.

Die Schmelze an den IMIS- und den ENET-Stationen wurde aufgrund von modellierten Schneedichten bzw. Wasseräquivalenten jeweils für Perioden von 15 Tagen abgeleitet. An den Vergleichsstationen wurde die

Schneesmelze aus der Differenz der Wasseräquivalente unter Berücksichtigung der in der entsprechenden Periode gefallenen Neuschneemengen bestimmt.

4.2.2 SCHMELZPERIODEN AN MESSSTATIONEN

Die in diesem Kapitel beschriebenen Resultate stammen aus der Auswertung von 33 Stationen (14 Stationen unterhalb 2100 m ü.M. und 19 Stationen oberhalb 2100 m ü.M.). Die Schmelze wurde nur an den Stationen bestimmt, welche jeweils in den betrachteten Perioden schneebedeckt blieben.

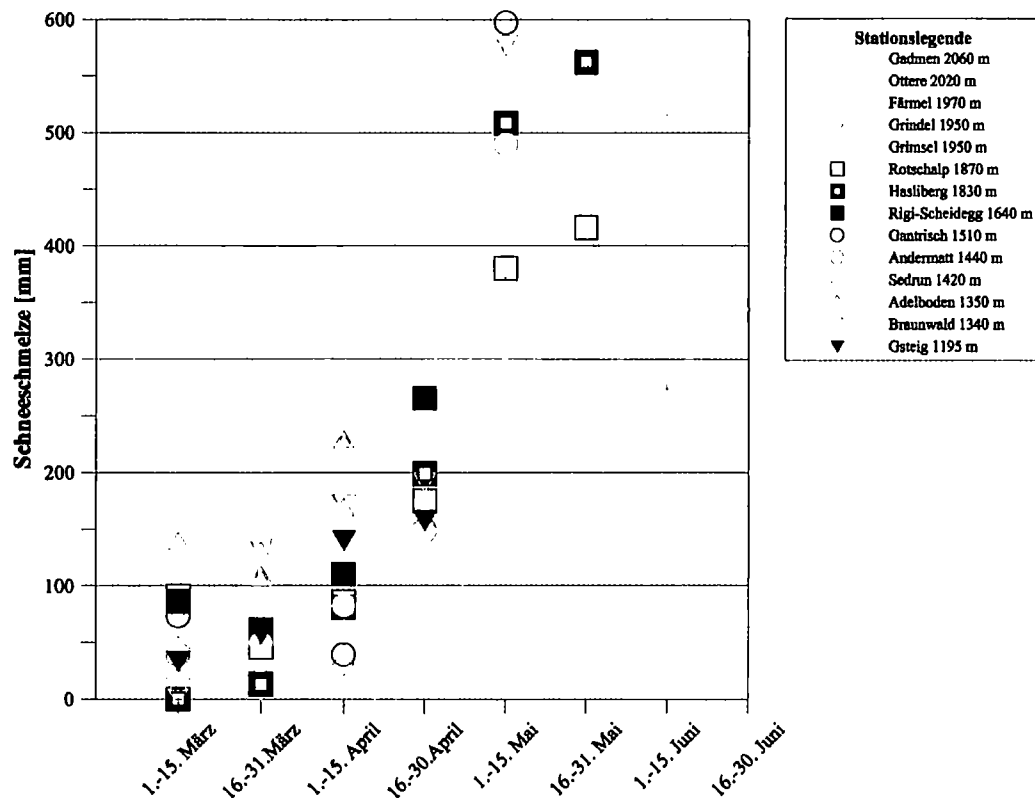


Fig. 4.10: Halbmonatssummen der Schneesmelze in mm zwischen 1. März und 1. Juli 1999 an ausgewählten Stationen zwischen 1200 und 2100 m ü.M.

Aus der Fig. 4.10 geht hervor, dass die halbmonatlichen Schmelzsummen an den Stationen zwischen 1200 und 2100 m ü.M. im März und April bescheiden ausfielen. Bis Mitte April waren grössere Schmelzwassermengen nur an Stationen unter ca. 1500 m ü.M. zu beobachten. Gegen Ende April setzte die Schmelze richtig ein. Die mittlere Schmelzmenge der 14 Stationen betrug in 16 Tagen ca. 174 mm. Zwischen Anfang und Mitte Mai setzte eine intensive Schneesmelze ein. Es wurde eine mittlere 15-Tagessumme von 422 mm registriert (10 Stationen). Zur betreffenden Zeit fand in dieser Höhenstufe temperaturbedingt kein Unterbruch der Schmelze statt (Fig. 4.12). Nur dadurch werden durchschnittliche Schmelzbeträge von fast 40 mm pro Tag (Gantrisch, 1510 m ü.M.) möglich. Zwischen dem 16. und 31. Mai, sind in der Höhenstufe von 1300 bis 2100 m ü.M. im Mittel 435 mm abgeschmolzen (vorausgesetzt, es war Ende Mai überhaupt noch eine Schneedecke vorhanden). Am Ende dieser Periode waren die Hälfte der untersuchten Stationen ausgeapert. Keine Station unter 1800 m ü.M. konnte mehr in die hier erläuterte Auswertung einbezogen werden. Eingedenk der Tatsache, dass 40 bis 50 mm Schneesmelze pro Tag für das Schweizer Alpengebiet einen Maximalwert darstellen, handelt es sich also um hohe bis sehr hohe Werte, insbesondere da um den 21. Mai eine Abkühlung erfolgt ist. Ab Ende Mai wird die Datengrundlage für diesen Höhenbereich immer schwächer. Der Schmelzwert von 343 mm vom 16. bis 31. Juni stammt von der Station Gadmen (2060 m ü.M.), welche am Ende dieses Monats als einzige noch Schnee aufwies.

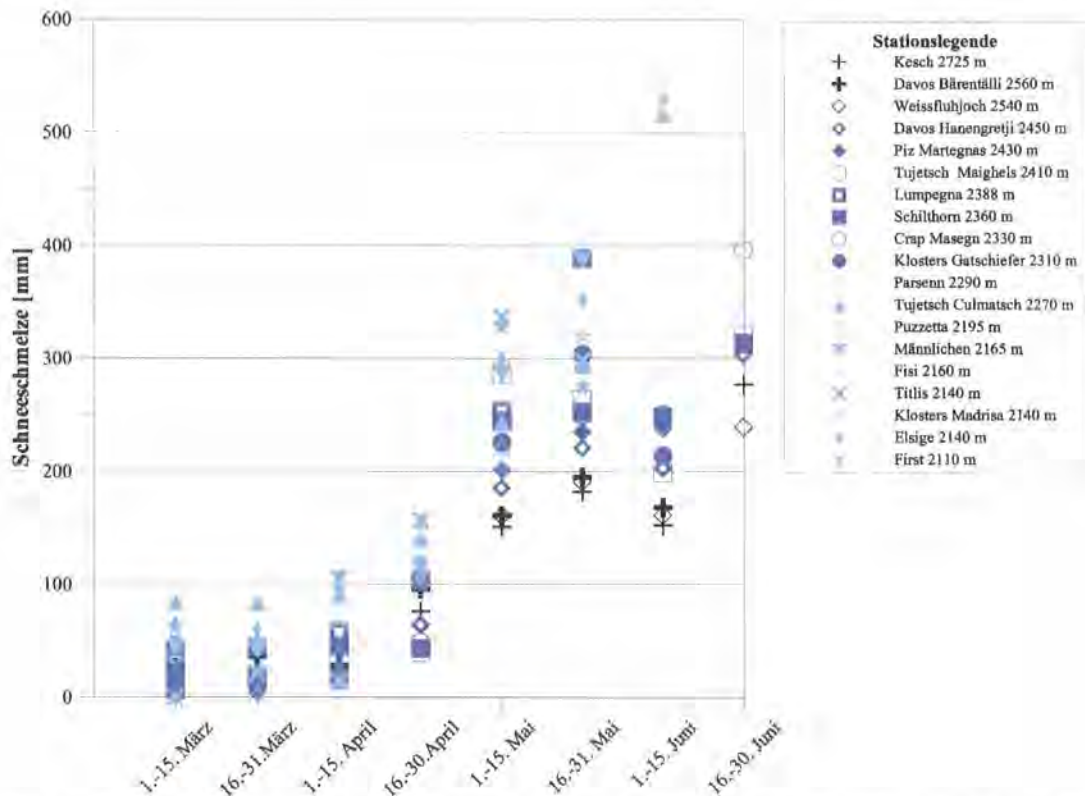


Fig. 4.11: Halbmonatssummen der Schneeschnmelze in mm zwischen 1. März und 1. Juli 1999 an ausgewählten IMIS- und ENET-Stationen zwischen 2100 und 2800 m ü.M.

Fig. 4.11 zeigt, dass in der Höhenstufe zwischen 2100 und 2800 m ü. M. die Abschmelzraten erwartungsgemäss allgemein geringer ausfielen. Bis Ende April lagen die Halbmonatssummen noch alle unter 160 mm. In der ersten Maihälfte hingegen wurde bereits eine mittlere (19 Stationen) 15-Tagessumme von 243 mm registriert. Auch in der Höhenstufe über 2100 m ü. M. sind zwischen dem 16. und 31. Mai mit im Mittel 285 mm sehr grosse Abflüsse aus der Schneedecke aufgetreten. Dies ist vor allem auf die ab dem 24. Mai sehr hohen Lufttemperaturen zurückzuführen. Gegen Ende Mai waren sogar auf dem 3600 m ü. M. gelegenen Jungfraujoch die Mittagswerte der Temperatur deutlich über Nullgrad gestiegen (vgl. Fig. 4.12). Anfangs Juni waren grosse Gebietsflächen ausgeapert. Wo noch Schnee lag, ging die Schmelze mit hoher Intensität weiter. In der Höhe erfolgte eine Abkühlung, welche im Vergleich zur Vorperiode zu einer grossen Differenzierung der Schneeschnmelze mit der Höhe führte. Um 2200 m ü.M. wurden noch immer Schmelzmengen von über 500 mm bestimmt, über 2500 m waren es weniger als 200 mm. Zwischen dem 16. und 30. Juni wurde an den 7 noch schneebedeckten Stationen eine mittlere Schmelzsumme von 313 mm bestimmt.

Die beiden wesentlichen Niederschlagsereignisse im Mai hatten auf die Schneeschnmelze einen unterschiedlichen Einfluss. Das Ereignis vom 10. bis 15. Mai lief bei gleichbleibend hoher Temperatur und damit auch Schneefallgrenze ab. Schneeakkumulation trat erst oberhalb von 2500 m ü.M. auf. Darunter lief die Schneeschnmelze ungehindert ab. Das Ereignis um den 21. Mai hingegen brachte eine markante Abkühlung und damit verbunden Schneefall bis in Gebiete unterhalb von 2000 m ü.M. Dies reduzierte für 2 bis 3 Tage die Schneeschnmelze, insbesondere in Gegenden wo der Neuschnee eine Reduktion der verfügbaren Schmelzenergie durch erhöhte Strahlungsreflektion (hohe Albedo des Neuschnees!) bewirkte.

In Höhenlagen von etwa 2100 bis 2800 m ü.M. setzte die Schneeschnmelze 1999 zwischen Ende April und Anfangs Mai ein. Dies ist im Vergleich zu anderen Jahren mit sehr hohen Schneewasseräquivalentwerten eher früh. So wurde beispielsweise im Winter 1969/70 das Maximum des Wasseräquivalentes auf dem Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) erst am 1. Juni erreicht. Die Fig. 4.12 zeigt, dass die Tagesmitteltemperaturen im Mai 1999 bis auf einige wenige Tage über dem Mittel der Periode 1980 - 1998 lagen. Aussergewöhnlich war dabei insbesondere, dass keine ausgeprägte Temperaturreduktion während der Niederschlagsphase vom 11./12. Mai stattfand.

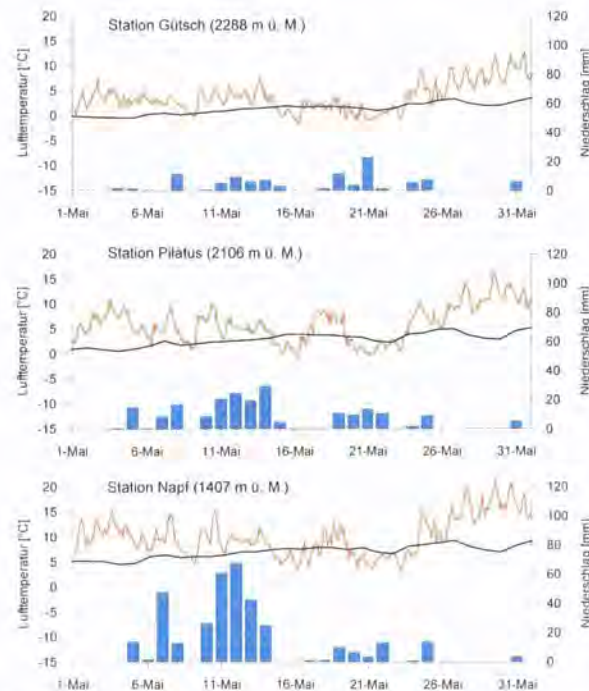


Fig. 4.12: Temperatur- und Niederschlagsverlauf an hochgelegenen ANETZ-Stationen der östlichen Alpen-nordseite im Mai 1999. Die schwarze Linie zeigt jeweils den Verlauf der mittleren Tagesmittel-Temperaturen der Periode 1980 - 1998 an diesen Stationen. Man beachte die Zwischenakkumulation in der Phase vom 19. bis zum 22. Mai.

FAZIT:

Die Schneeschmelze verlief im Frühjahr 1999 ab Ende April in einem breiten Höhenband mehr oder weniger ununterbrochen mit einer hohen bis sehr hohen Intensität. Dies führte dazu, dass an einzelnen Punkten über längere Perioden Schmelzraten auftraten, die nahe an die aus früheren Studien bekannten maximalen Abschmelzraten von 40 - 50 mm pro Tag heranreichten. Die Flächenbeiträge ganzer Einzugsgebiete sind wegen den verschiedenen Höhenstufen und der damit verbundenen Ausaperung jedoch deutlich kleiner.

4.3 NIEDERSCHLAG

Felix Forster, Dietmar Grebner, Hans Müller-Lemans, Thomas Roesch, Manfred Schwarb

4.3.1 VORREGEN

Grundlagen

Wenn der Regen auf ein feuchtes Einzugsgebiet trifft, fließt mehr Wasser ab als wenn er auf ein trockenes Einzugsgebiet fällt. Die Anfangsbedingungen beim Wassergehalt des Bodens und des geologischen Untergrundes spielen deshalb eine wichtige Rolle für die Hochwasserentstehung. Diese Anfangsbedingungen (auch als Vorbedingungen oder Vorfeuchte bezeichnet) hängen ab vom Regen und der Schneeschmelze vor dem betrachteten Niederschlagsereignis sowie von den Speichereigenschaften des Einzugsgebietes (vgl. auch Naef et al. 1999).

Zu den wesentlichen Speichern gehören die verschiedenen Bodenhorizonte, die Schneedecke, die Grundwasserträger und die Seen. Diese Speicher besitzen Zeitkonstanten in einem weiten Bereich von Minuten bis Monaten und reagieren entsprechend rasch oder langsam auf Zuflüsse und Trockenphasen. Wegen den

Unterschieden bei den Zeitkonstanten reicht eine einzige Kennzahl nicht aus, um den Feuchtezustand eines Einzugsgebietes zu charakterisieren. Verschiedene Varianten für einen Vorregen-Index sind jedoch in einem beschränkten Kontext durchaus brauchbar.

Eine der verwendbaren Kennzahlen für den Feuchtezustand eines Einzugsgebietes ist der Gerinneabfluss selbst. Wie ein Blick auf die Ganglinien von Hochwassern zeigt, reagieren die meisten Einzugsgebiete in der Schweiz relativ rasch auf Starkregen. Sogar in grossen Einzugsgebieten wie dem des Alpenrheins dauert der Anstieg bis zur Hochwasserspitze in der Regel nur einige Stunden bis etwa einen Tag, und die Hochwasserwelle klingt unmittelbar nach Niederschlagsende innerhalb weniger Tage wieder weitgehend ab. Dieses Reaktionsverhalten deutet darauf hin, dass das Erinnerungsvermögen des Einzugsgebietes für die Vorgeschichte in der Regel relativ kurz ist. Deshalb müssen die Verhältnisse für jedes Hochwasser neu analysiert werden. Wichtig ist dabei die Feststellung, dass man den Vorregen nicht einfach kumulieren darf, um seinen Einfluss abzuschätzen, denn der Füllungsgrad der Speicher hängt nicht nur vom Zufluss ab, sondern auch vom Abfluss aus den Speichern und daher von den verschiedenen Prozessen, die zu einer Drainage und Austrocknung der Böden führen.

Vorregen für die Hochwasser im Mai 1999

Bei der Untersuchung des Vorregens für die Hochwasser im Mai 1999 ist es aus obigen Gründen gerechtfertigt, die flüssigen Niederschläge vor dem April 1999 zu vernachlässigen. Im April 1999 lagen die Niederschläge nordalpin im Hauptniederschlagsgebiet durchschnittlich gut 50 % über dem langjährigen Mittelwert. Bei einigen Stationen war der April-Niederschlag mehr als doppelt so gross wie im langjährigen Mittel, z.B. in Aarberg (204 %), Jussy (205 %), Lohn SH (207 %) und Filisur (210 %). Als Vergleichsperiode diente dabei die von der WMO (World Meteorological Organisation) definierte Normperiode 1961-1990 (Climatological normals). In den Tagen vor dem ersten Ereignis im Mai war ebenfalls wiederholt Niederschlag zu verzeichnen. Beim zweiten Ereignis wirkte der Regen des ersten Ereignisses als zusätzlicher Vorregen. Diese Vorregen erhöhten die Bodenfeuchte und trugen dazu bei, eine günstige Grunddisposition für Hochwasser zu schaffen. In einigen Gebieten war es vor allem die Schneeschmelze, die zu den feuchten Vorbedingungen führte.

Ein Beispiel für den Feuchtezustand des Bodens liefern die Lysimetermessungen des Institutes für Klimaforschung der ETHZ im Rietholzbachgebiet. Die Messungen zeigen ab 21. April eine starke Feuchtezunahme, die in den niederschlagsfreien Tagen zwischen 25. April und etwa 10. Mai nur wenig abgebaut wurde (Grebner und Roesch 1999). Einen Hinweis auf die ausserordentlich feuchten Vorbedingungen in einem schneebedeckten Einzugsgebiet geben die langandauernden Hochstände der Grundwasserpegel im Alptal (vgl. Kap. 5.1). Diese hohe Vorfeuchte führte dann letztlich zu den ungewöhnlich hohen Abflusskoeffizienten, wie sie in Kap. 5.1 erläutert werden.

4.3.2 EREIGNISNIEDERSCHLAG

In einem gegebenen Einzugsgebiet hängt der Verlauf eines Hochwassers ab von den Anfangsbedingungen und dem Wasserinput durch Niederschlag in Form von Regen und durch Schneeschmelze. Was den Niederschlag betrifft, ist grundsätzlich der gesamte Intensitätsverlauf massgebend. Wichtige Kenngrössen sind die Niederschlagsdauer, die mittlere Intensität, der Zeitpunkt der maximalen Intensität usw. Der Intensitätsverlauf weist vor allem von Ereignis zu Ereignis, aber auch von Ort zu Ort, mehr oder weniger grosse Unterschiede auf. Um die Niederschlagsdaten vergleichen und statistisch einordnen zu können, muss man sie deshalb auf geeignete Art aggregieren. Für lange Perioden sind von den meisten Stationen nur Niederschlagsdaten in festen Tagesschritten greifbar, d.h. kalendarische 1-Tageswerte. Gemessen wird die Niederschlagssumme von 06 Uhr UTC (entspricht 0700 Schweizer Winterzeit) des Kalendertages bis 06 Uhr UTC des Folgetages. Zyklonale Niederschläge, die hier zur Diskussion stehen, lassen sich mit diesen Werten in den Grundzügen recht gut erfassen. Im Einzelfall können zwar die kalendarischen 1-Tageswerte deutlich von den nicht-kalendarischen 24-stündigen Werten abweichen und daher zu einer ungenauen statistischen Einordnung des Starkniederschlags führen. Die Starkniederschlagsstatistik als Ganzes wird dadurch aber nicht systematisch verfälscht. Die Auswirkung des Niederschlags auf den Abfluss hängt allerdings von den maximalen Intensitäten, d.h. von den nicht-kalendarischen Mengen ab.

Hauptniederschlagstage im Mai 1999 waren der 11., der 12. und der 21. Mai. Für die folgende Diskussion des Eintages - Ereignisniederschlags wurden der 12. und der 21. Mai ausgewählt.

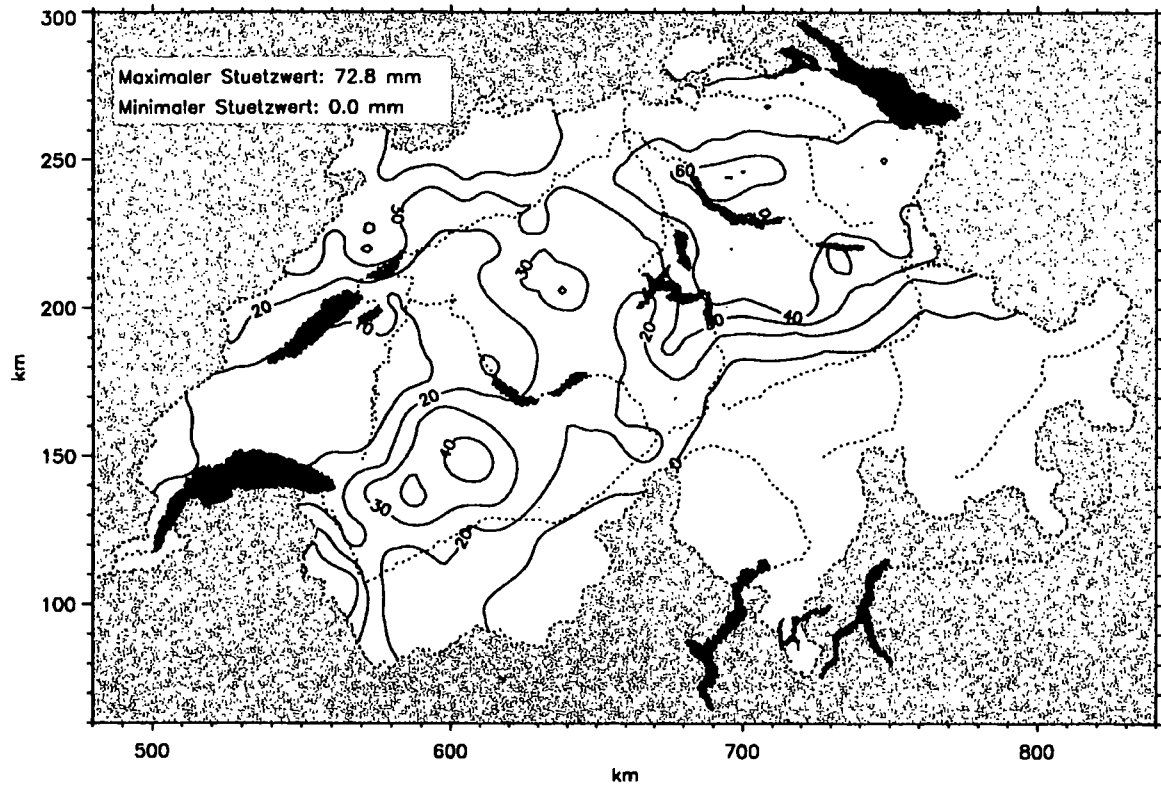


Fig. 4.13: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 12stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 11. - 15. Mai 1999 (ab 11. Mai 1999, 23 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

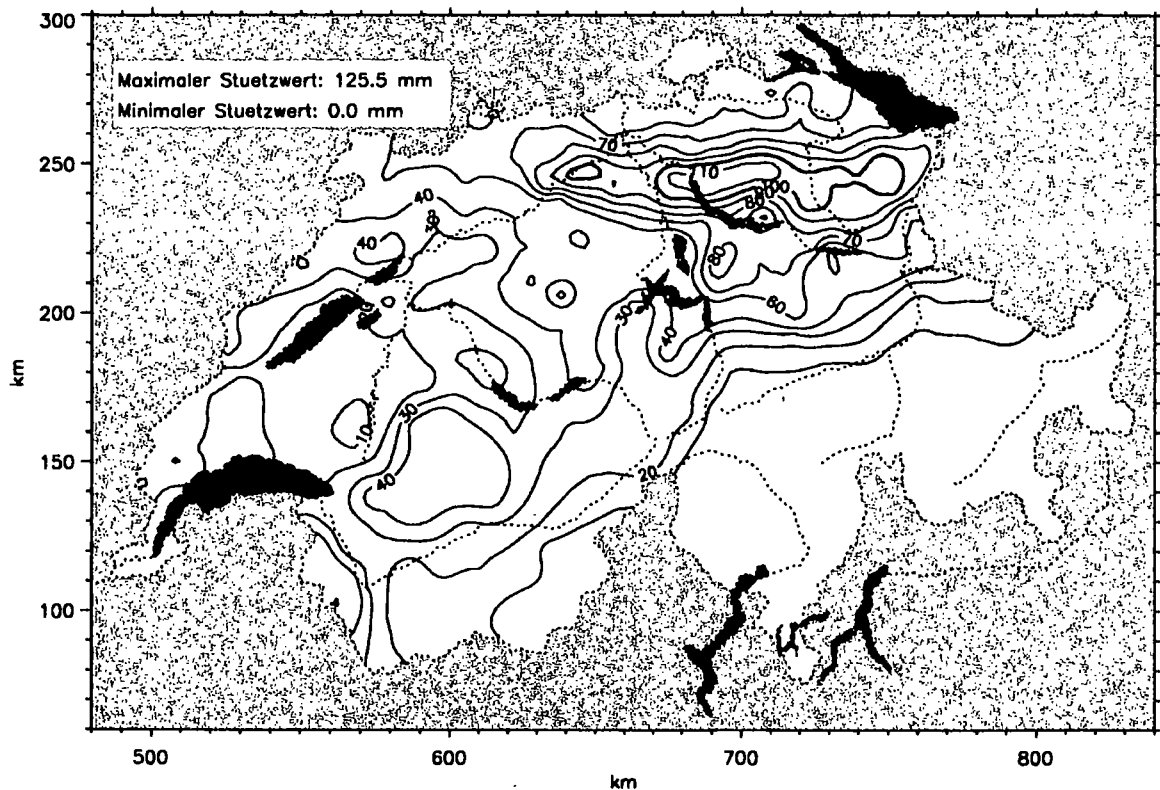


Fig. 4.14: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 24stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 11. - 15. Mai 1999 (ab 11. Mai 1999, 18 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

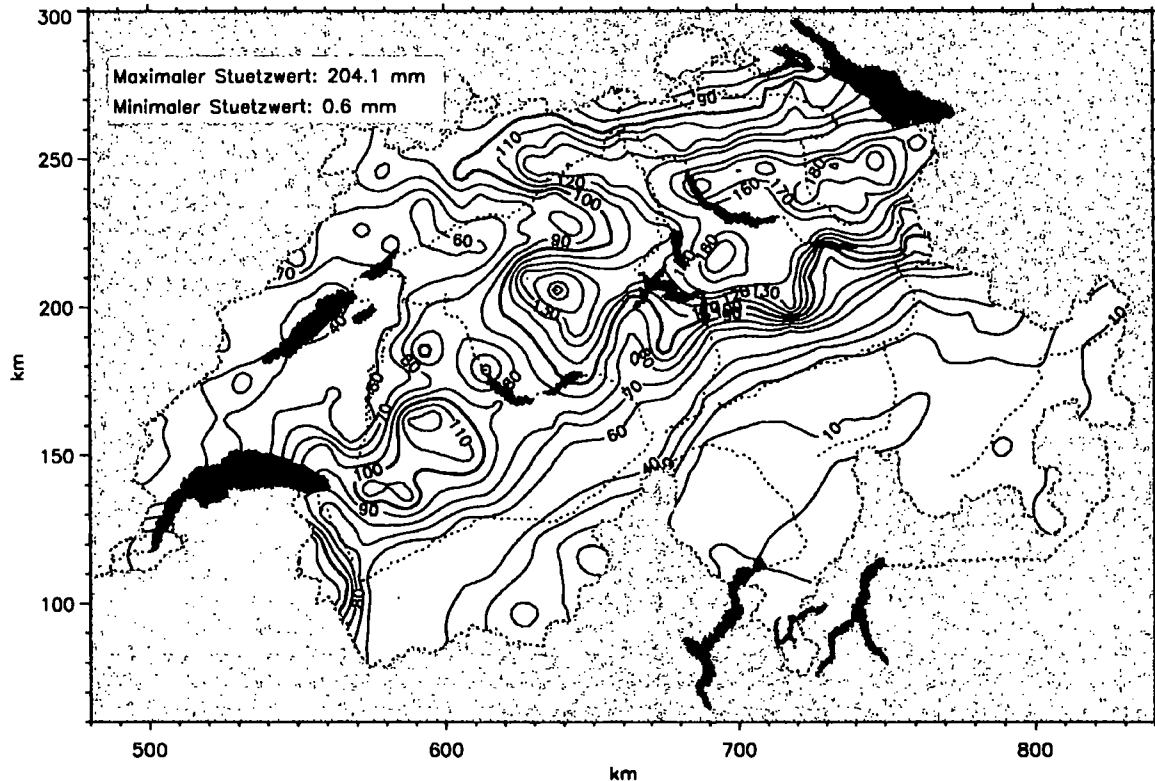


Fig. 4.15: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 72stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 11. - 15. Mai 1999 (ab 11. Mai 1999, 17 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

Niederschlag vom 12. Mai 1999

Die nicht-kalendarischen 24h-Werte vom 12. Mai 1999 sind in Fig. 4.14 dargestellt. Eine Maximalzone, die durch die Isolinie von 80 mm begrenzt ist, bildet einen schmalen, zonal angeordneten Streifen, der auf Höhe von Zürich etwa vom Jura bis ins Vorarlberg reicht. Das Niederschlagszentrum liegt nördlich des Zürichsees und somit in den Voralpen. Der maximale Stuetzwert beträgt 126 mm. Eine Nebenachse des Niederschlagsfeldes verläuft vom Napf über den Thunersee bis ins untere Wallis, d.h. von Nordosten nach Südwesten.

Mehrtagesniederschläge 10. - 15. Mai

Wie in Kap. 3 erläutert, zeichnete sich die Niederschlagsperiode vom 10. - 15. Mai, im Gegensatz zu jener vom 21. Mai, weniger durch extreme Tages- bzw. 24stündige Niederschläge als durch den Multitagesniederschlag aus. Insbesondere ausserhalb des oben beschriebenen Niederschlagszentrums des Hauptereignisses fielen wesentliche Anteile des Gesamtniederschlags vor bzw. nach dem 12. Mai. So ist der 72h-Niederschlag (Fig. 4.15) im Berner Oberland und im Napfgebiet mehr als doppelt so gross wie der 24h-Niederschlag vom 12. Mai (Fig. 4.14). Aber auch im Raume Zürich-Aargau fielen nochmals grössere Niederschlagsmengen. Die im Anhang (Fig. 9.5) beigefügte Karte des 5tägigen Niederschlags vom 10. - 14. Mai zeigt vor allem im Emmental grössere Niederschläge auf.

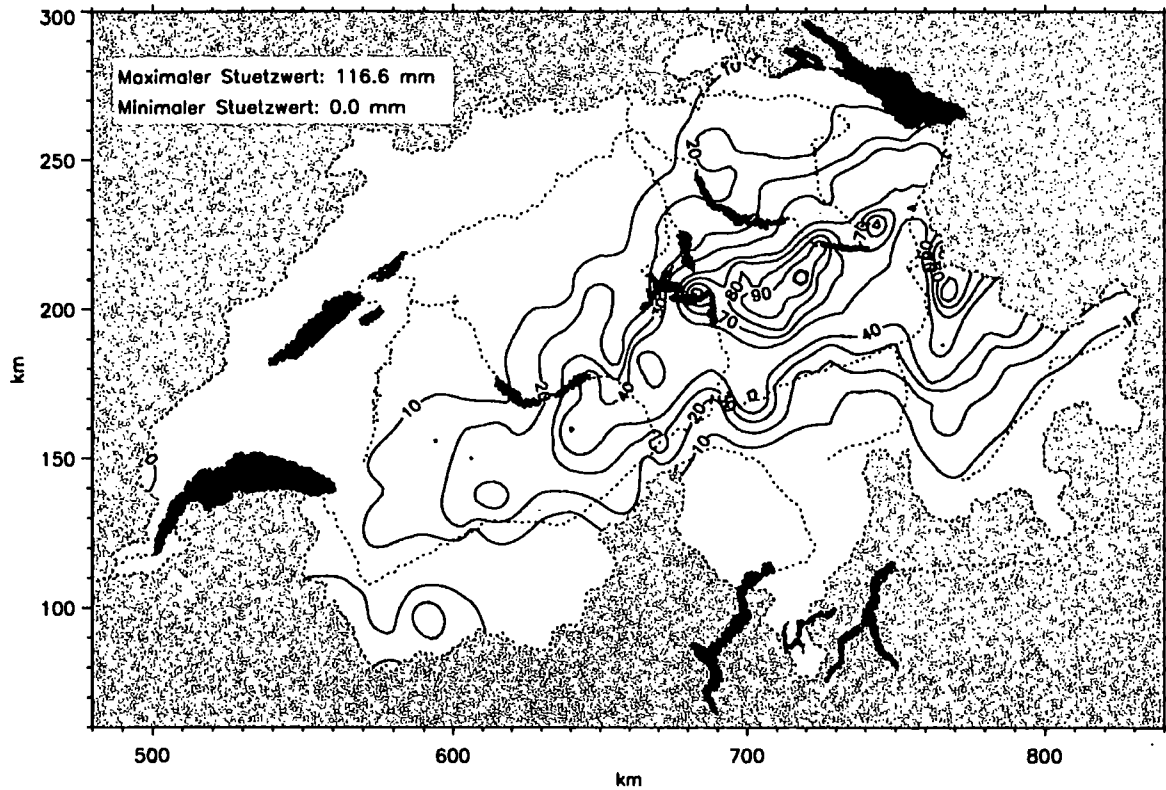


Fig. 4.16: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 12stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 19. - 22. Mai 1999 (ab 21. Mai 1999, 15 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

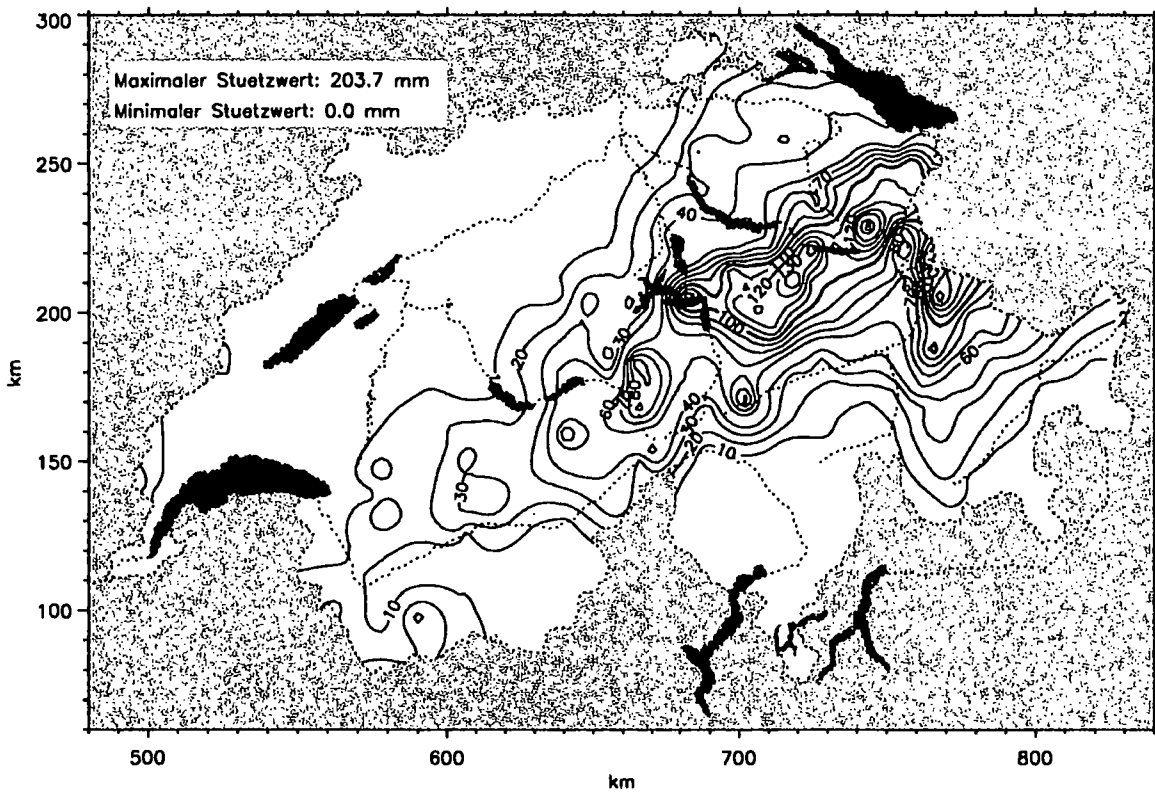


Fig. 4.17: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 24stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 19. - 22. Mai 1999 (ab 21. Mai 1999, 5 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

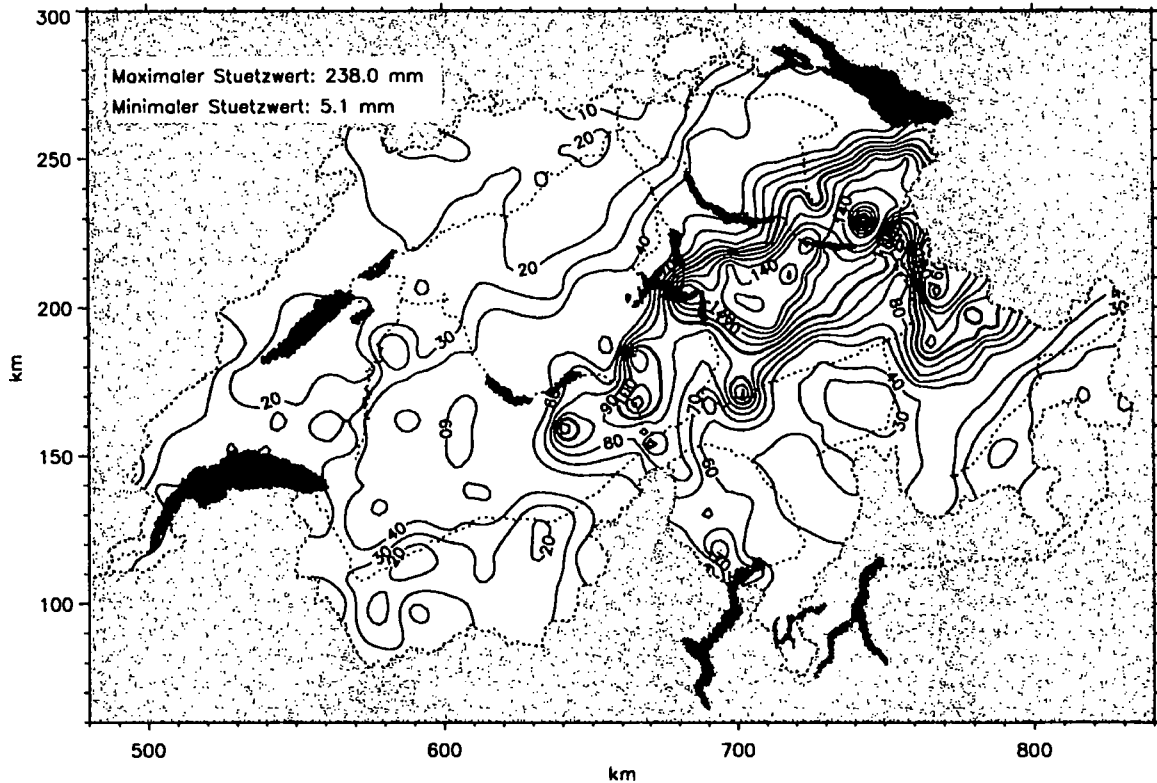


Fig. 4.18: Isohyetenanalyse des niederschlagsreichsten 72stündigen nicht-kalendarischen Intervalls während des Niederschlagsereignisses vom 19. - 22. Mai 1999 (ab 19. Mai 1999, 6 UTC). Datengrundlage: MeteoSchweiz.

Niederschlag vom 21. Mai 1999

Die nicht-kalendarischen 24h-Werte vom 21. Mai 1999 sind in Fig. 4.17 dargestellt. Im Unterschied zum 12. Mai verläuft hier das Hauptniederschlagsgebiet dem Alpenrand entlang, d.h. von Vorarlberg im Nordosten über Wildhaus, Weesen, Klöntal und Muotathal bis ins Haslital im Südwesten. Der maximale Stützwert in der Schweiz erreicht 204 mm (bei Wildhaus) und ist damit deutlich grösser als am 12. Mai. Ein sekundäres Maximum liegt im Prättigau.

Fig. 4.16 bis Fig. 4.18 zeigen zudem, dass dem geschilderten generellen Niederschlagsfeld einige eng umgrenzte Spitzen überlagert sind. Dort erreichten die Niederschläge aussergewöhnliche Beträge, die in einigen Gebieten sogar höher lagen als die 2-Tageswerte vom 11. + 12. Mai, obwohl die verwendete Interpolationsmethode dazu führt, dass die Extreme etwas geglättet sind, d.h. lokale Maximalwerte werden zu niedrig dargestellt.

4.3.3 SCHNEEFALLGRENZE

Die Schneefallgrenze ist eng mit der Temperatur in der freien Atmosphäre verknüpft und liegt meistens einige hundert Meter unter der Nullgradgrenze. Im Mai 1999 war die Nullgradgrenze für die Jahreszeit relativ hoch (vgl. Kapitel 3). Am 11. Mai befand sie sich im Tagesmittel auf rund 3100 m ü.M. und am 12. Mai auf rund 2900 m ü.M. Im Hauptniederschlagsgebiet reichte somit der Regen bis in die Gipfelregion hinauf. Am 21. Mai lag die Nullgradgrenze mit rund 2300 m ü.M. deutlich tiefer. Weil überdies das Niederschlagsfeld weit in die Alpen mit ihren hochgelegenen Gebieten hineinreichte, fiel ein namhafter Anteil des Niederschlags als Schnee. Andernfalls wäre noch eine Verschärfung des Abflusses zu erwarten gewesen.

4.3.4 ÄHNLICHE NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE

Es gibt verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Ähnlichkeit von Niederschlagsereignissen, beispielsweise die Niederschlagsmenge innerhalb bestimmter Zeitintervalle, die Form und Position des Niederschlagsfeldes und das Zirkulationsmuster. Ausgewählt werden hier Ereignisse im Sommerhalbjahr mit grossen Niederschlägen in der Nordostschweiz und in Vorarlberg. Im Laufe der Messperiode 1864-1999 beobachtete man solche Ereignisse in den Jahren 1874, 1876, 1881, 1906 und 1910. Eine nützliche (aber nicht hinreichende) Kennzahl zur Charakterisierung eines Ereignisses ist der höchste Punktniederschlag. In den erwähnten Vergleichsfällen und im Mai 1999 wurden im betrachteten Gebiet die in Tab. 4.1 dargestellten maximalen Tageswerte gemessen:

Tab. 4.1: Maximale 1-Tages Punktniederschläge von grossen Ereignissen die im Sommerhalbjahr in der Nordostschweiz und in Vorarlberg aufgetreten sind.

31.07.1874	Gäbris (Gais)	260 mm
11.06.1876	St. Gallen	200 mm
01.09.1881	St. Gallen	250 mm
20.05.1906	Horgen	192 mm
14.06.1910	Ebnit (Vorarlberg)	230 mm (in der Schweiz: Wildhaus 190 mm)
21.05.1999	Thüringerberg (Vorarlberg)	251 mm (in der Schweiz: Wildhaus 202 mm)

Drei der sechs Fälle traten somit im engen Zeitraum von 1874-1881 auf. In diesem Zusammenhang sei auf die Bemerkung von Geb und Sieland-Coradazzi (1997) hingewiesen, dass auch sehr seltene Grosswetterlagen eine Neigung haben, sich auf bestimmte Jahrzehnte zu konzentrieren.

Erste Abklärungen, die allerdings noch vertieft werden müssten, lassen vermuten, dass bei einigen dieser Fälle vergleichbare Zirkulationsverhältnisse herrschten. Erkennbar ist namentlich das Muster vom 31. Juli 1977 nach Grebner et al. (1999). Wie Grebner (1993) in einer grundlegenden Arbeit ausführte, ist dieses Muster auf kalte Höhentiefs oder Kaltlufttropfen zurückzuführen. Die Wetterlage ist mit derjenigen von Pfingsten 1999 vergleichbar, allerdings lag der maximale Tageswert mit 125 mm deutlich tiefer.

4.3.5 JÄHRLICHKEITEN

Eine verbreitete Methode zur statistischen Einordnung von Starkniederschlägen und zum Vergleich mit ähnlichen Ereignissen besteht in der Untersuchung von Jährlichkeiten. Bei den Jährlichkeiten sind drei mögliche Varianten zu unterscheiden:

1. Jährlichkeiten von Punktniederschlägen
2. Jährlichkeiten von Gebietsniederschlägen von meteorologisch gegebenen Niederschlagsfeldern
3. Jährlichkeiten von Gebietsniederschlägen für Einzugsgebiete

Variante 1 wird seit längerer Zeit zur Einordnung von Niederschlägen verwendet ist aber nicht unproblematisch. So ist die Jährlichkeit einer einzelnen Messstation nur für einen sehr begrenzten Umkreis aussagekräftig und vor allem sagt eine einzelne Station wenig aus über die Niederschlagsverhältnisse in einem ganzen Einzugsgebiet. Sie erlaubt aber den Vergleich mit bisherigen Analysen und kann mithelfen, wenn man sich der Zusammenhänge bewusst ist, ein Niederschlagsereignis statistisch einzuordnen.

Variante 2 wurde in den vergangenen Jahren am Institut für Klimaforschung der ETH Zürich (früher Geographisches Institut) stark entwickelt, ausgehend von den theoretischen Grundlagen bis hin zu Anleitungen für praktische Anwendungen (u.a. Grebner, 1995, Grebner und Roesch, 1998, Grebner et al., 1999). Die Variante dient in erster Linie zur Charakterisierung der atmosphärischen Niederschlagsleistung bei Starkniederschlägen und ihrer Ausdehnung. Um hydrologische Betrachtungen für konkrete Einzugsgebiete anstellen zu können, muss man die Position des Niederschlagsfeldes in Bezug auf die Einzugsgebiete berücksichtigen (vgl. Grebner et al., 1999). Weil die Position des Niederschlagsfeldes nicht bei jedem Ereignis gleich ist, bilden die Jährlichkeiten nach Variante 2 eine Untergrenze für die Jährlichkeiten nach Variante 3, d.h. sie sind in Variante 3 seltener.

Bei Variante 3 wird für ein bestimmtes Einzugsgebiet über eine möglichst lange Zeitperiode der Gebietsniederschlag bestimmt und anhand dieser Zeitreihe mit statistischen Methoden die Jährlichkeit bestimmt. Im Unterschied zur Variante 2, welche die Wahrscheinlichkeit des Niederschlagsereignisses in einer bestimmten Region, hier der Nordostschweiz, angibt, wird durch Variante 3 die Wahrscheinlichkeit für ein einzelnes hydrologisches Einzugsgebiet innerhalb dieser Region bestimmt. Letztere muss deshalb je nach Grösse des Einzugsgebiets kleiner sein als die Wahrscheinlichkeit nach Variante 2. Variante 3 wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung exemplarisch für zwei Einzugsgebiete durchgeführt.

Jährlichkeiten von Punktniederschlägen

Die Resultate des vorliegenden Abschnitts basieren auf den Frequenzanalysen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Zeller et al. 1976-1983, Geiger et al. 1991, Röthlisberger et al. 1991 - 1992). Berücksichtigt werden im folgenden rund 180 Stationen mit lückenlosen Reihen, die im Zeitraum von 1901-1910 beginnen und bis 1970 reichen.

Die Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 1-Tageswerte beim ersten Mai-Ereignis sind in Fig. 4.19 dargestellt. Die Abbildung zeigt in der Nordostschweiz eine Zone mit Jährlichkeiten von 10 Jahren und mehr. Die höchste Isolinie (Jährlichkeit 40 Jahre) umfasst den Nordzipfel des Zürichsees. In weiten Teilen der Schweiz liegen die Jährlichkeiten unter 5 Jahren.

Im Mittel lagen die Niederschläge am 11. Mai 1999 nahezu in der gleichen Grössenordnung wie am 12. Mai 1999. Es ist daher sinnvoll, auch die Jährlichkeiten der 2-Tageswerte vom 11. + 12. Mai zu untersuchen. Die entsprechenden Resultate finden sich in Fig. 4.20. Bedingt durch das verwendete Interpolationsverfahren erfassen die Isolinien vor allem den generellen Verlauf und weichen in Einzelfällen stark von den zugehörigen Punktwerten ab. Die Jährlichkeiten liegen deutlich höher als die der 1-Tageswerte. Bei der höchsten Isolinie beispielsweise ist die Jährlichkeit von 40 auf 60 Jahre angewachsen.

Die Jährlichkeiten für die 5-Tageswerte (Fig. 4.21) zeigen nochmals einen markanten Anstieg gegenüber den Resultaten für die 2-Tageswerte. Auf den ersten Blick könnte man aus den erhöhten Jährlichkeiten schliessen, dass beim ersten Hochwasser im Mai 1999 die 5-Tageswerte wichtiger waren als die 1- und 2-

Tageswerte. Diese Folgerung trifft aber für die meisten Einzugsgebiete nicht zu, denn die Zunahme der Niederschlagssummen bei den 5-Tageswerten ist zum grössten Teil nicht auf Vorregen zurückzuführen, sondern auf Niederschläge, die erst fielen, als das Hochwasser bereits abgeklungen war. Eine Ausnahme bilden die Einzugsgebiete, in denen die Hochwasser später auftraten und durch hohe Seestände geprägt waren. Für hohe Seestände ist bekanntlich nicht in erster Linie die Niederschlagsintensität verantwortlich, sondern das Niederschlagsvolumen und die Schneeschmelze. Das Einzugsgebiet des Thunersees wird nur bei den 5-Tageswerten und dann ganz am Rand von der 5-Jahresisohyete erfasst. Auch beim Walensee liegt der Hauptzufluss - die Linth - im Gebiet mit Niederschlagsmengen die häufig auftreten ($T < 5$), während das seenahe direkte Einzugsgebiet gleich wie beim Zürichsee im Bereich der seltenen Niederschläge liegt.

In Fig. 4.22 schliesslich sind die Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 1-Tageswerte vom 21. Mai 1999 wiedergegeben. Nach dieser Abbildung befindet sich im Osten der Schweiz eine Zone mit Jährlichkeiten von 10 Jahren und mehr. Die höchste Jährlichkeit beträgt 40 Jahre. Sie wird aber nur in einem kleinen Gebiet im Schanfigg erreicht. Dieses Ergebnis ist allerdings nicht ganz repräsentativ, weil das sekundäre Niederschlagsmaximum am 21. Mai nicht hier auftrat, sondern im Prättigau (vgl. Fig. 4.17), wo sich aber keine der betroffenen Stationen für eine Jährlichkeitsauswertung eignete. In den meisten Regionen der Schweiz liegen die Jährlichkeiten auch bei diesem Ereignis unter 5 Jahren. Wiederum treten zwischen den Punktwerten und den geglätteten Isolinien teilweise markante Unterschiede auf. In einem Fall beträgt die Differenz rund 60 Jahre.

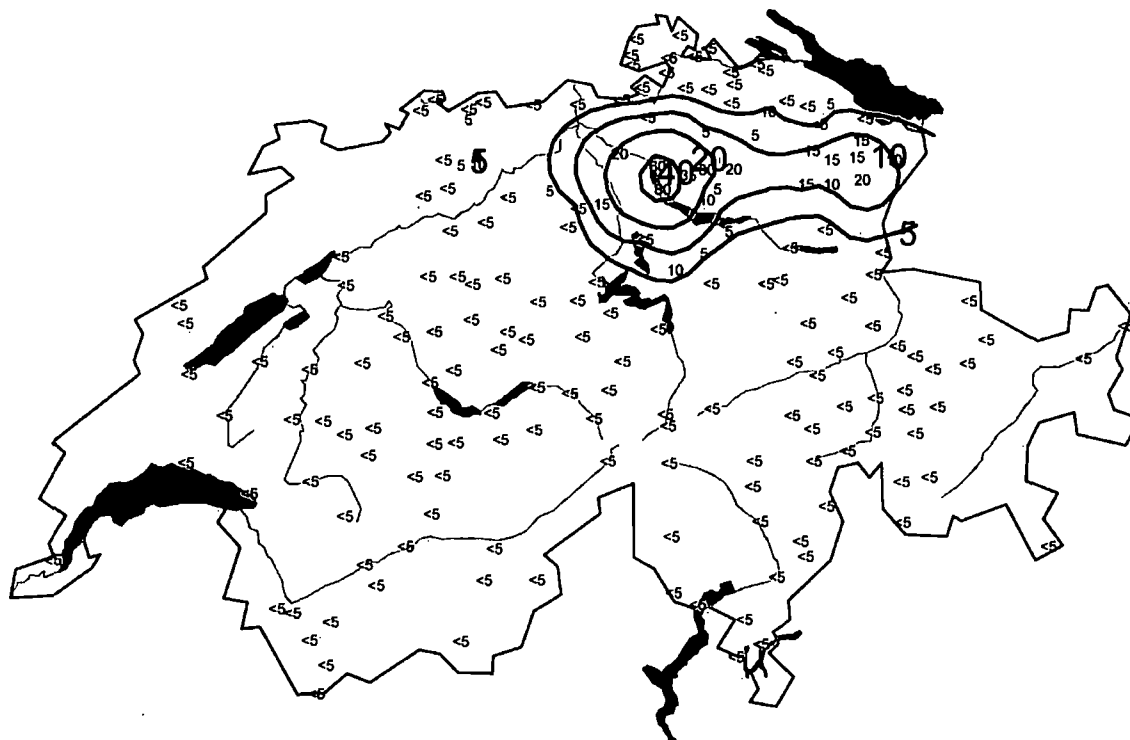


Fig. 4.19: Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 1-Tageswerte beim ersten Mai-Ereignis (11. oder 12. Mai 1999).

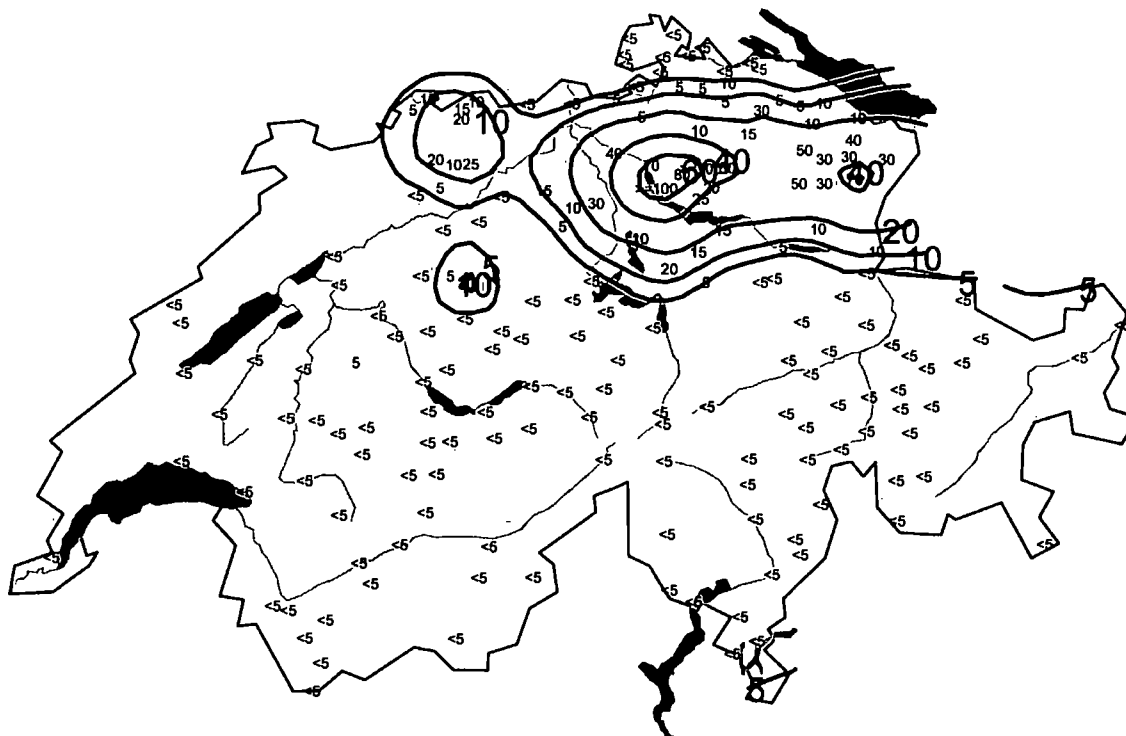


Fig. 4.20: Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 2-Tageswerte beim ersten Mai-Ereignis (11. und 12. Mai 1999).

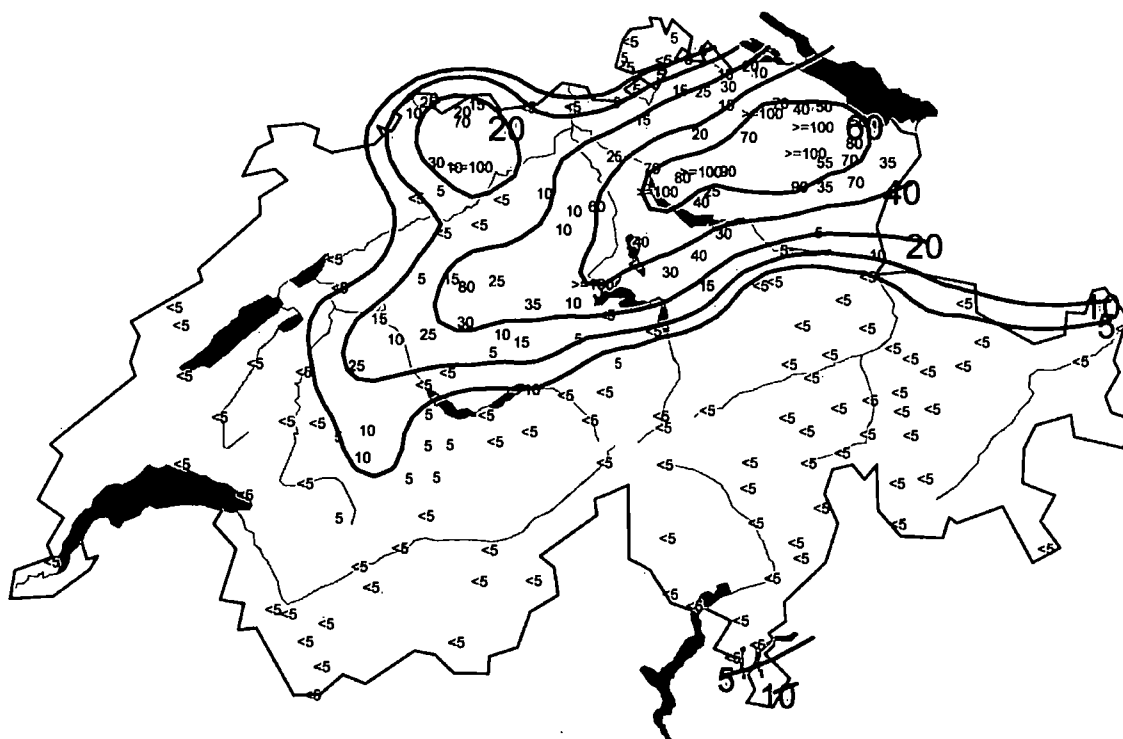


Fig. 4.21: Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 5-Tageswerte beim ersten Mai-Ereignis (10. - 14. oder 11. - 15. Mai 1999).

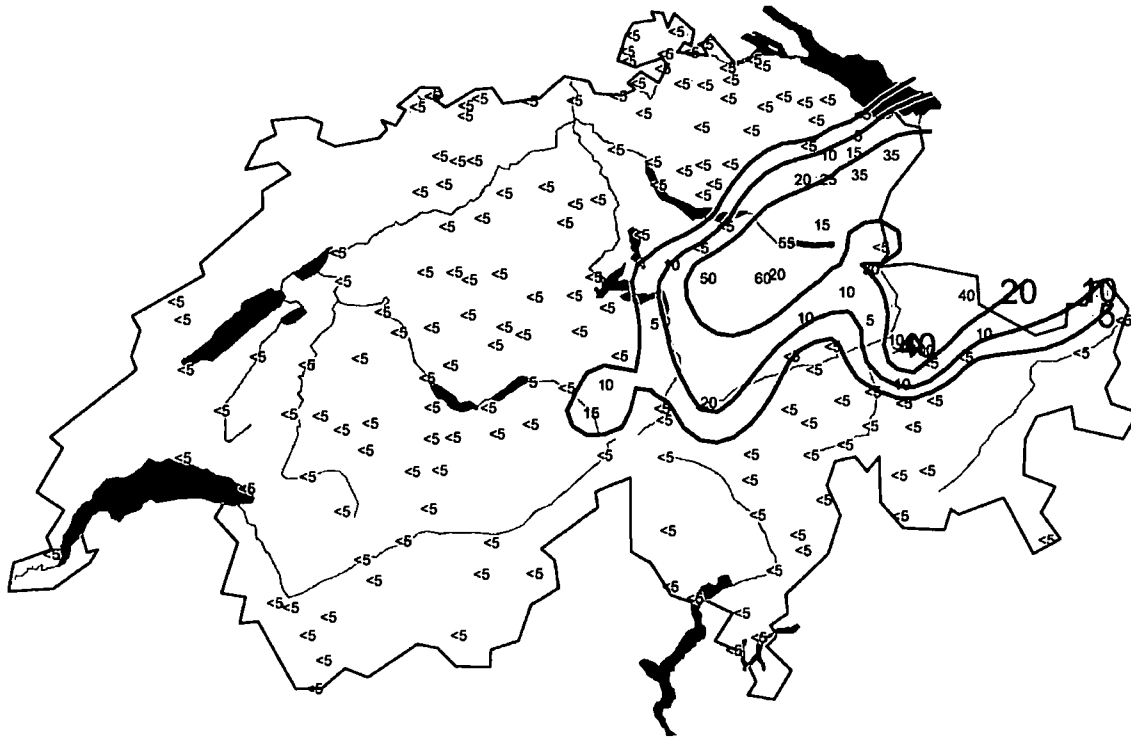


Fig. 4.22: Jährlichkeiten der Punktniederschläge für die 1-Tageswerte beim zweiten Mai-Ereignis (21. Mai 1999).

Jährlichkeiten der Gebietsniederschläge der meteorologisch bedingten Niederschlagsfelder

Die Analyse der Gebietsniederschläge in ihrer meteorologischen Ausbreitung gibt Auskunft über die atmosphärische Niederschlagsleistung jedes der beiden Ereignisse. Für die Abflusseffizienz eines Niederschlags sind seine grössten Mengen in nicht-kalendarischen Zeitintervallen während eines Ereignisses massgebend. Um dementsprechend für 12, 24 und 72 Stunden Dauer in jedem der beiden Ereignisse (Kap. 3) die höchsten Gebietsniederschläge ermitteln zu können, wurden die Tagessummen in stündliche Werte interpoliert. Anhand dieser Zeitreihen des Messnetzes wurden dann vom Maximum des interpolierten Niederschlagsfeldes aus die höchsten Gebietsniederschläge in den erwähnten 3 Dauerstufen der beiden Ereignisse bestimmt. Die untersuchten Flächengrössen reichen von 4 bis 5000 km². Für die daraus erzeugten Flächen-Mengen-Kurven lassen sich anhand der Frequenzdiagramme für Gebietsniederschläge (Grebner et al., 1999) die Wiederkehrperioden der beiden Ereignisse bestimmen (Fig. 4.23 und Fig. 4.24). Diese Abschätzung wurde anhand der Frequenzdiagramme des Mittellandes durchgeführt.

Für das erste Ereignis (10. - 15. Mai 1999) ist charakteristisch, dass es sich erst mit zunehmender Niederschlagsdauer als stark darstellt. Die 12stündigen Niederschlagsmengen von 50 - 60 mm über Flächen zwischen 1000 und 5000 km² entsprechen Wiederkehrperioden von kaum 5 Jahren. Unterhalb von 1000 km² ist die Bedeutung des Ereignisses noch geringer (Fig. 4.23).

Für längere Dauern steigt der Seltenheitsgrad etwas an. Die Niederschlagsmengen im intensivsten 24stündigen Intervall zeigen über Flächen von 500 bis 5000 km² Wiederkehrperioden zwischen 5 und 10 Jahren, bzw. für 72 Stunden um 25 Jahre. Die kleineren Flächen sind auch in diesen Dauerstufen von geringerer Bedeutung (Fig. 4.23).

Das zweite Ereignis (19. - 22. Mai 1999) hat im Gegensatz zum ersten seine stärkste Ausprägung in den kurzen Zeitintervallen. Seine Stärke nimmt mit der betrachteten Intervalllänge ab. Für 12 Stunden Dauer und Flächen über 1000 km² schwanken die Gebietsniederschläge zwischen 70 und 80 mm und deren Wiederkehrperioden zwischen 50 und näherungsweise 120 Jahren. Unter 1000 km² geht auch in diesem Ereignis wie schon im vorhergehenden Fall die Bedeutung deutlich zurück (Fig. 4.24).

Die 24stündigen Niederschlagssummen erreichen nur noch Wiederkehrperioden bis 25 Jahre; die 72stündigen Summen bis 10 Jahre (Fig. 4.24).

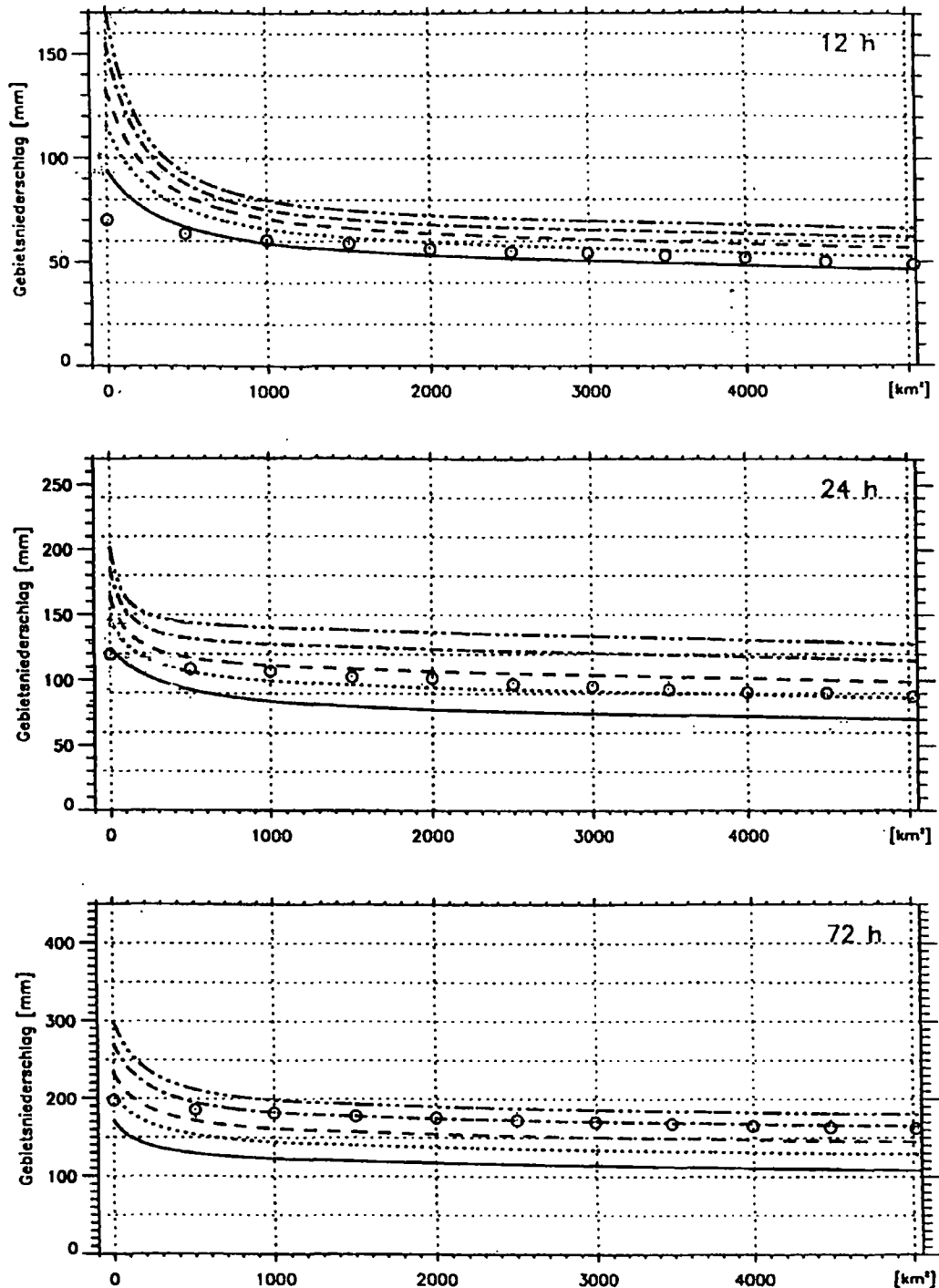


Fig. 4.23: Frequenzdiagramme für Flächen-Mengen-Verhältnisse von Gebietsniederschlägen im Mittelland mit den Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 25 und 50 Jahre (pro Diagramm Kurven von unten nach oben) für 12, für 24, für 72 Stunden Niederschlagsdauer. Kreise: Flächen-Mengen-Verhältnisse der niederschlagsreichsten nicht-kalendarischen Zeitintervalle des Ereignisses 10. - 15. Mai 1999. Diese Niederschlagsmengen akkumulierten sich für 12 Stunden ab 11. Mai 1999, 23 UTC, für 24 Stunden ab 11. Mai 1999, 18 UTC, bzw. für 72 Stunden ab 11. Mai 1999, 17 UTC (UTC: Universal time coordinated \approx GMT).

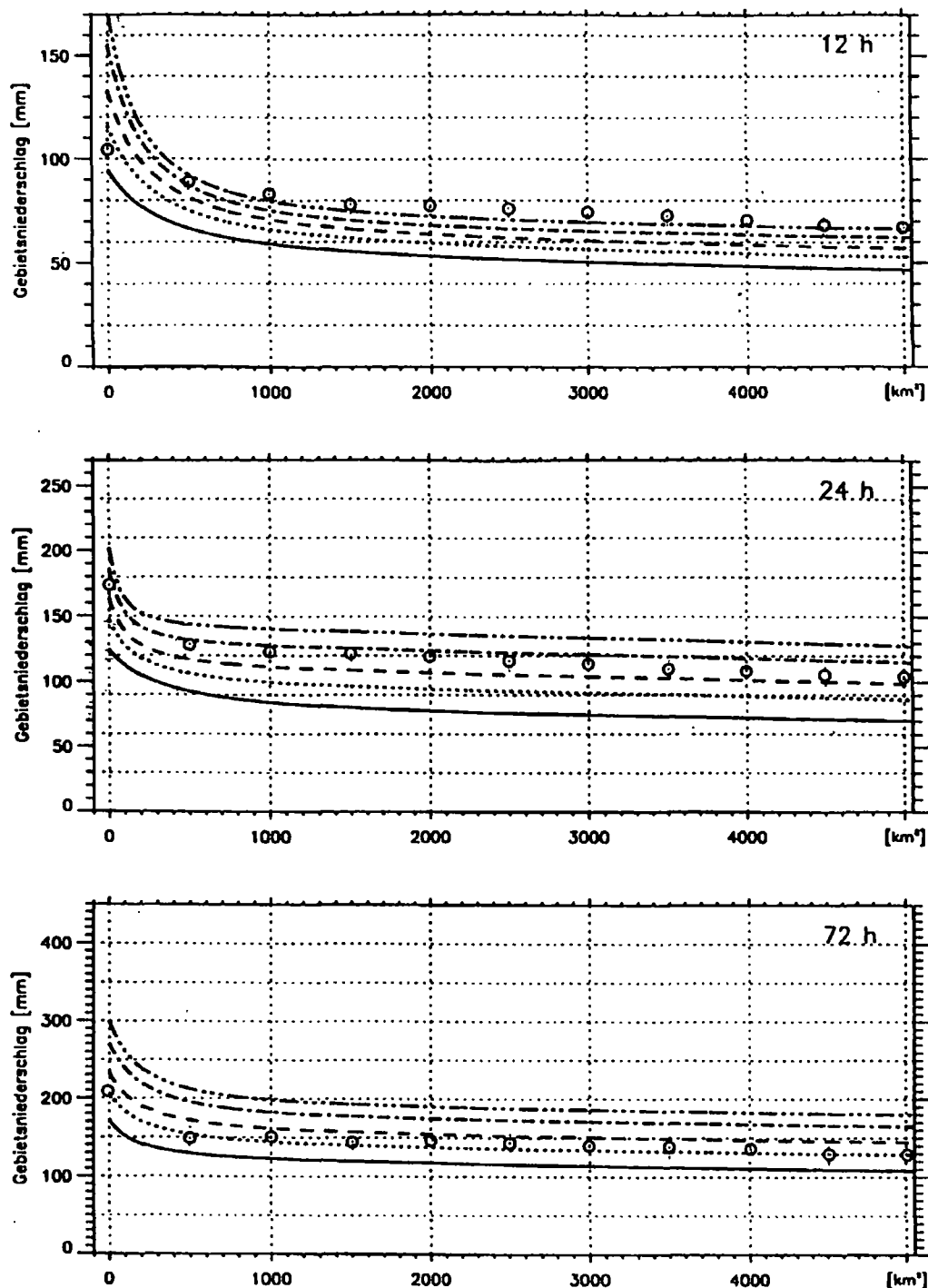


Fig. 4.24: Frequenzdiagramme für Flächen-Mengen-Verhältnisse von Gebietsniederschlägen im Mittelland mit den Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 25 und 50 Jahre (pro Diagramm Kurven von unten nach oben) für 12, für 24, für 72 Stunden Niederschlagsdauer. Kreise: Flächen-Mengen-Verhältnisse der niederschlagsreichsten nicht-kalendarischen Zeitintervalle des Ereignisses 19. - 22. Mai 1999. Das intensivste 12stündige Intervall begann am 21. Mai 1999, 15 UTC, das 24stündige am 21. Mai 1999, 5 UTC, bzw. das 72stündige am 19. Mai 1999, 6 UTC.

Werden diese Resultate in Bezug mit der hydrologischen Entwicklung gebracht, drängt sich eine klare Differenzierung des Niederschlagabflussvorgangs von kurzen zu langen Dauern auf. Zu Beginn der gesamten Entwicklung am 11. Mai 1999 ist vor allem im Zentrum des Niederschlagsfeldes die sehr rasche und starke hydrologische Reaktion mit Hochwasser die Besonderheit, obwohl die Niederschläge nicht als aussergewöhnlich zu betrachten sind, wie die obige Diskussion zeigt. Dieser rasche Beginn des Hochwassers zwingt, die Ursache dafür in der längeren Vorperiode zu suchen (Kap. 4).

Erst bei der Betrachtung zunehmender Dauern, bis 12 Tage (11. - 22. Mai 1999), ist das Prädikat des Aussergewöhnlichen für den atmosphärischen Einfluss, d.h. den Niederschlag, berechtigt. Dazu zählen die lange Dauer des ersten Niederschlagsereignisses mit hohen Niederschlagsvolumen und das bereits nach wenigen Tagen folgende zweite Ereignis. Sein Zentrum trat allerdings zum Alpennordhang der Ostschweiz verschoben auf. Diese Eigenschaften (Intensität, Position) zusammen mit der vorgängigen Entwicklung seit 11. Mai 1999 sowie Schneeschmelze aus dem alpinen Bereich generierten den aussergewöhnlichen Verlauf der Hochwasserstände.

Jährlichkeit der Gebietsniederschläge für Einzugsgebiete

Paolo Burlando, Wolfgang Ruf, Andrea Salvetti

Die Ereignisse im Mai 1999 haben die Schweiz grossflächig betroffen. In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von vergleichbaren Punktniederschlägen an ausgewählten Stationen und von meteorologisch bedingten Niederschlagsfeldern in der Nordschweiz aufgezeigt. Da sich im Hinblick auf die Hochwasserabschätzung die Gebietskala am geeignetsten erweist, wurden Frequenzdiagramme auf der Basis von Gebietsniederschlägen für ausgewählte Einzugsgebiete erstellt. Somit konnte eine statistische Einordnung der beobachteten Werte vom Mai 1999 vorgenommen werden. Die entwickelte Methode vereinigt das Konzept des Gebietsniederschlags (berechnet mit den Thyssen-Polygonen) mit dem traditionellen Konzept der Frequenzanalyse, wie es normalerweise für Punktniederschläge angewandt wird (Zeller et al. 1976-92).

Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeit wurden die Niederschläge der Jahre 1961 - 1998 für die Einzugsgebiete der Thur bis Halden bzw. Andelfingen und der Aare bis Bern anhand von Tagesniederschlägen (kalendarische Werte) analysiert (Burlando et al., unveröffentlichtes Manuskript). Die ausgewählte Beobachtungsperiode stellt einen Kompromiss aus einer möglichst langen Messperiode und einem flächendeckenden Messnetz dar. Somit standen für das Einzugsgebiet der Thur 34 und der Aare 33 Niederschlagsmessstationen zur Auswertung zur Verfügung. Die Verteilung über das jeweilige Gebiet ist als gleichmässig einzustufen.

Wie in Kap. 5.3.2 erläutert wird, traten in den Einzugsgebieten der Thur und der Aare unterschiedliche Typen von Hochwasserereignissen auf. Während in dem Thur-Gebiet vor allem die kurzen Niederschlagsdauern zur Bildung der Abflussspitze beitrugen, waren es im Einzugsgebiet der Aare die lange dauernden Niederschläge, welche den Thunersee und die Aare, zusammen mit der Schneeschmelze, im beobachteten Mass über die Ufer treten liessen. Bei der Thur werden deshalb im folgenden die Jährlichkeiten des Gebietsniederschlags für die kurzen Niederschlagsdauern erläutert und für die Aare jene der langen Dauern.

Im Einzugsgebiet der Thur findet sich mit dem Hochwasser vom August 1978 in der Periode 1961 - 1998 vor allem ein Ereignis, bei dem ähnliche Niederschläge registriert wurden wie im Mai 1999 (Tab. 4.2). Das Ereignis von 1978 war beim Eintagesniederschlag deutlich intensiver als beide Ereignisse von 1999 und beim Zweitagesniederschlag etwa gleich intensiv wie jenes vom 10. - 15. Mai 1999. Erst bei den langen Niederschlagsdauern (> 2 Tage) wird das Ereignis von 1978 durch das Auftaktereignis 1999 deutlich übertroffen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass für Thurhochwasser vor allem kurze Niederschlagsdauern (1 bis 2 Tage) von Bedeutung sind. Für lange Niederschlagsdauern hingegen, findet sich in der Untersuchungsperiode kein vergleichbarer Wert. Hinweise, dass auch die 3 - 5 tägigen Niederschlagssummen nicht völlig aus dem Rahmen fallen, geben Messungen an einzelnen Stationen, welche vor allem Ende des 19. Jahrhunderts zum Teil Tages-, vor allem aber auch Mehrtageswerte aufweisen, die deutlich über den 5-Tageswerten von 1999 liegen.

Betrachtet man die dazugehörigen Jährlichkeiten der Punkt-Niederschläge im Einzugsgebiet der Thur, also stationsweise, so zeigt sich, dass für 1- und 2-Tages-Niederschläge keine aussergewöhnlichen Jährlich-

keiten ermittelt wurden (vgl. Fig. 4.19 und Fig. 4.20). Interessant ist nun die statistische Einordnung der Gebiets-Niederschläge, da diese für die Abflussbildung im gesamten Einzugsgebiet interessant sind. Die Untersuchung wurde für das gesamte Gebiet bis Andelfingen (1696 km²) sowie für das Teileinzugsgebiet bis Halden (1085 km²) separat vorgenommen.

Die Jährlichkeit des 1-Tages-Gebietsniederschlags für das Auffahrtseignis vom 12. Mai beträgt für das Thur Einzugsgebiet bis Halden etwa 10 Jahre, für das ganze Einzugsgebiet bis Andelfingen sogar nur 7 Jahre. Da sich der Hauptniederschlag allerdings über zwei Tage erstreckte, ergibt die kalendarische Auswertung kleinere Jährlichkeiten im Vergleich zu den 24-Stunden-Werten (Fig. 4.25). Die 2-Tages-Gebietsniederschläge sind bedeutend seltener mit Jährlichkeiten über 50 Jahren.

Es ist interessant festzustellen, dass die beobachteten Wiederkehrperioden der Punktniederschläge (Dauerstufe 2 Tage, vgl. Fig. 4.20) an den Stationen im Thurgebiet unter den Abschätzungen für den Gebietsniederschlag liegen.

Tab. 4.2: Vergleich der Niederschlagssummen im Einzugsgebiet der Thur für das Auffahrtseignis (10. - 15. Mai 1999), das Pfingstereignis (19. - 23. Mai 1999) und das Hochwasser vom 7. - 8. August 1978, dem grössten Niederschlagsereignis in der Untersuchungsperiode 1961 - 1998.

Dauerstufe [Tage]	Thur bis Halden			Thur bis Andelfingen		
	10.-15. 5. 99 [mm]	19.-23. 5. 99 [mm]	7.-8. 8. 78 [mm]	10.-15. 5. 99 [mm]	19.-23. 5. 99 [mm]	7.-8. 8. 78 [mm]
1	82.0	91.1	117.8	68.6	66.6	107.7
2	138.2	111.5	138.1	116.5	82.7	125.8
3	165.8	127.3	148.5	142.0	93.6	133.7
4	188.7	131.2	151.4	160.8	96.9	136.1
5	197.5	131.3	154.7	173.1	96.9	142.4

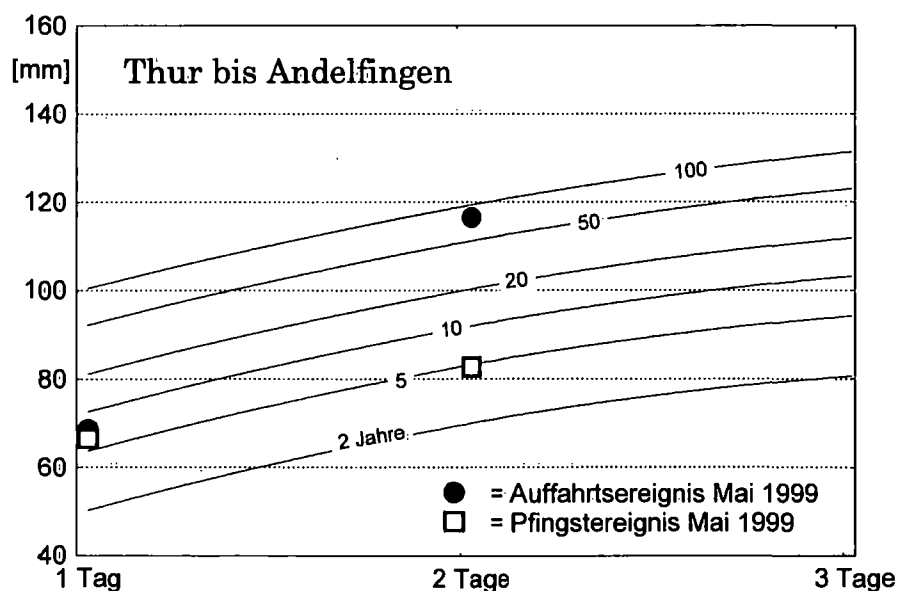


Fig. 4.25: Frequenzdiagramm der Gebietsniederschläge im Thur-Gebiet (Andelfingen). Die gekrümmten Linien entsprechen den unterschiedlichen Jährlichkeiten von 2 bis 100 Jahren. Man beachte, dass die 24-h-Werte grösser sind als die hier angegebenen kalendarischen 1-Tages-Werte.

Das untersuchte Aare-Einzugsgebiet umfasst das Berner Oberland bis Bern. Hier sind die Niederschläge, wie sie im Mai 1999 aufgetreten sind, grundsätzlich als häufig zu betrachten. Für alle untersuchten Niederschlagsdauern wurden in der Periode 1961 - 1998 mehrere Ereignisse gefunden, welche die Werte von 1999 erreichen oder zum Teil sogar um das doppelte übertreffen (Tab. 4.3). Allerdings traten vor allem bei

den langen Niederschlagsdauern die jährlichen Höchstwerte meist in den Monaten November oder Dezember auf, während die Schneeschmelzmonate Mai und Juni in der Untersuchungsperiode eine unterdurchschnittliche Anzahl von Jahreshöchstwerten aufwiesen (vgl. Fig. 4.26). In diesem Gebiet wurden die gleichen Untersuchungen wie für das Thurgebiet durchgeführt; aus dem soeben genannten Grund zusätzlich noch eine saisonale Betrachtung für die Sommermonate (Mai - August) sowie separat für den Monat Mai.

Tab. 4.3: Vergleich im Einzugsgebiet der Aare zwischen den Niederschlagssummen des Auffahrtsereignisses 1999 und den jährlich und saisonal grössten Niederschlagsereignissen in der Untersuchungsperiode 1961 - 1998: Mai 1985 saisonal, Weihnachten 1991 jährlich.

Dauerstufe [Tage]	Aare bis Bern		
	11. - 15. Mai 1999 [mm]	6. - 10. Mai 1985 [mm]	Weihnachten 1991 [mm]
1	32.7	45.8	63.8
2	48.0	86.0	102.8
3	68.9	94.5	116.2
4	91.2	95.4	130.8
5	99.0	95.5	148.8

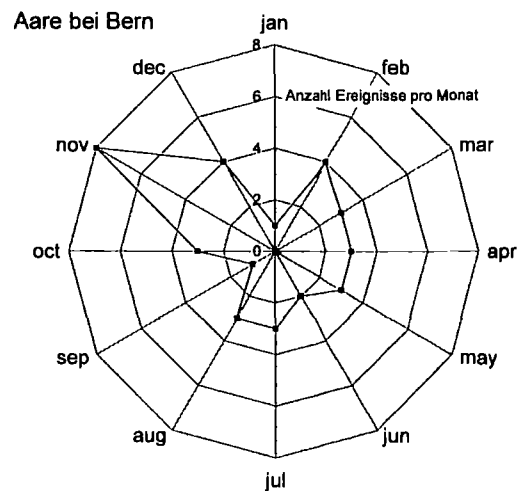


Fig. 4.26: Saisonale Verteilung der jährlichen maximalen 5-Tages-Gebiets-Niederschläge; Einzugsgebiet der Aare bis Bern: die Jahreshöchstwerte treten in den meisten Fällen in der Periode Oktober-Dezember auf

Für das Einzugsgebiet der Aare bis Bern beträgt die statistische Wiederkehrperiode des 5-Tages-Gebietsniederschlags vom 10. - 14. Mai 1999, berechnet aufgrund der Jahreshöchstwerte, etwa 3 Jahre. Die Wiederkehrperiode des Gebietsniederschlags liegt damit in einer ähnlichen Grössenordnung wie diejenige der Punktniederschläge der meisten Stationen in diesem Raum.

Wie oben kurz erwähnt, wurden für das Aare-Gebiet auf Jahresbasis allerdings nur sehr kleine Jährlichkeiten der Gebietsniederschläge verzeichnet, welche zunächst den Einfluss des Niederschlags auf das extreme Hochwassergeschehen im Mai 1999 vernachlässigbar erscheinen lassen. Berücksichtigt man jedoch den Zeitpunkt des Niederschlags und die Jährlichkeiten getrennt für den Monat Mai, so erhält man für die Dauerstufe von 4 bzw. 5 Tagen Werte um 50 Jahre. Im allgemeinen kann im Spätfrühling und Frühsommer aufgrund der Schneeschmelze und der damit erhöhten Bodenfeuchte und der relativ hohen Seewasserstände von einer erhöhten Hochwasserempfindlichkeit auf lang anhaltende Niederschläge ausgegangen werden. Zieht man im Mai 1999 die für diese Saison hohen Niederschläge in Betracht, kann man feststellen, dass der Niederschlag eine nicht vernachlässigbare Rolle gespielt hat.

Gesamtbeurteilung der Jährlichkeiten

Ein gutes Gesamtbild über die Jährlichkeiten ergibt sich aus einer Analyse der Gebietsniederschläge für meteorologische Niederschlagsfelder. Für eine Niederschlagsdauer von 24 Stunden lagen die entsprechenden Jährlichkeiten beim ersten Mai-Ereignis mehrheitlich zwischen 5 und 10 Jahren (Fig. 4.23) und beim zweiten Mai-Ereignis zwischen 10 und 25 Jahren (Fig. 4.24).

Die Analyse der Jährlichkeiten von Punktniederschlägen zeigt ein räumlich differenziertes Bild. Wenn man von den relativ kleinräumigen Maximalzonen absieht, lagen die Jährlichkeiten für die kalendarischen 1-Tageswerte im Hauptniederschlagsgebiet beim ersten Mai-Ereignis im Bereich von etwa 10 - 20 Jahren (Fig. 4.19) und beim zweiten Mai-Ereignis im Bereich von etwa 20 - 40 Jahren (Fig. 4.22).

Die beiden Auswertungen ergeben übereinstimmend, dass die Jährlichkeiten beim zweiten Mai-Ereignis rund doppelt so gross waren wie beim ersten. Im Übrigen waren die Jährlichkeiten für die meteorologischen Gebietsniederschläge erwartungsgemäss deutlich kleiner als jene für die Punktniederschläge einzelner Stationen. Mit Niederschlagsereignissen, wie sie am 11. und am 22. Mai 1999 aufgetreten sind, muss in der Nordostschweiz etwa alle 10 Jahre gerechnet werden. Als wesentlich seltener ist das zeitliche Zusammentreffen von zwei derartigen Niederschlagsereignissen innerhalb von 14 Tagen einzustufen. Entsprechend liegen die Monatsniederschläge für den Mai 1999 vor allem in der Nordostschweiz in vielen Gegenden im Bereich der bisher gemessenen Höchstwerte, überschreiten diese aber nur in wenigen Fällen deutlich.

FAZIT:

Die Starkniederschläge der beiden Ereignisse im Mai 1999 sind als beachtlich, jedoch nicht als extrem einzustufen. Mit vergleichbaren 24-h Gebietsniederschlägen muss in der Nordostschweiz etwa alle 10 Jahre gerechnet werden, wobei das Ereignis vom 11./12. Mai kleinere und jenes vom 21. Mai höhere Wiederkehrperioden aufweist.

In einigen Schadensgebieten lagen die Jährlichkeiten auch bei längeren Niederschlagsdauern zum Teil deutlich unter 5 Jahren, welche allerdings immer noch beachtlichen Niederschlagsmengen von ca. 100 mm in 5 Tagen entsprechen. Insbesondere in diesen Gebieten können die Niederschläge alleine die beobachteten Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse nicht erklären.

5 ANALYSE DES WASSERHAUSHALTS AUSGEWÄHLTER EINZUGSGEBIETE

Die vorangehenden Kapitel zeigen auf, dass weder die Schneeschmelze noch der Niederschlag für sich alleine die Geschehnisse vom Mai 1999 vollumfänglich erklären können. Dazu muss die Entwicklung dieser Faktoren in ihrem Zusammenspiel und im durch den Witterungsverlauf bestimmten zeitlichen Verlauf betrachtet werden. In einem ersten Teil des vorliegenden Kapitels werden dazu detaillierte Messungen aus kleinen Einzugsgebieten analysiert. In einem zweiten Teil werden mit Hilfe einfacher Modellvorstellungen ausgewählte Flusseinzugsgebiete betrachtet und der Einfluss von Niederschlag und Schneeschmelze auf die Hochwasserbildung abgeschätzt.

5.1 ANALYSE DES WASSERHAUSHALTS AUSGEWÄHLTER KLEINEINZUGSGEBIETE

Felix Forster, Christoph Hegg, Hans Kienholz, Serena Liener

Die Abteilung Wasser-, Erd- und Felsbewegungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL betreibt im Alptal (Kanton Schwyz) seit über 25 Jahren ein hydrologisches Untersuchungsgebiet, in dem unter anderem in mehreren kleinen Einzugsgebieten die wichtigen Parameter des Wasserhaushalts detailliert erfasst werden (vgl. z.B. Burch, 1994, Forster und Hegg, 2000). Diese Messungen erlaubten eine genaue Analyse des Zusammenspiels der Schneeschmelze mit den Starkregenereignissen im Mai 1999, welche nachfolgend kurz erläutert wird. Anschliessend werden die Messungen aus dem Spissibach präsentiert, einem relativ neuen Testgebiet des Geographischen Instituts der Universität Bern am Südufer des Thunersees, und im Vergleich zu den Messungen im Alptal bewertet.

5.1.1 EINORDNUNG DER EREIGNISSE IM ALPTAL

Wie Fig. 5.1 zeigt, traten die beiden Niederschlagsereignisse von Auffahrt (10. - 15. Mai) und Pfingsten (21. Mai) 1999 im Alptal am Ende bzw. unmittelbar nach Abschluss der Hauptschmelze der Schneedecke auf. Im Alptal umfasst die längste Datenreihe zum Wasseräquivalent der Schneedecke 28 Jahre und wird auf einer Höhe von ca. 1350 m ü.M. erhoben. Dort erreichte die Schneedecke im Winter 1998/99 mit einem maximalen Wasseräquivalent von ca. 500 mm zwar einen hohen, aber keinen ausserordentlichen Wert. In dieser Periode wurden die 1999 gemessenen maximalen Wasseräquivalente dreimal übertroffen und zweimal in etwa erreicht. Mit einem Wert von 500 mm Wasseräquivalent der Schneedecke oder mehr muss somit im Alptal auf einer Höhe von 1350 m ü.M. im Mittel etwa alle 5 Jahre gerechnet werden.

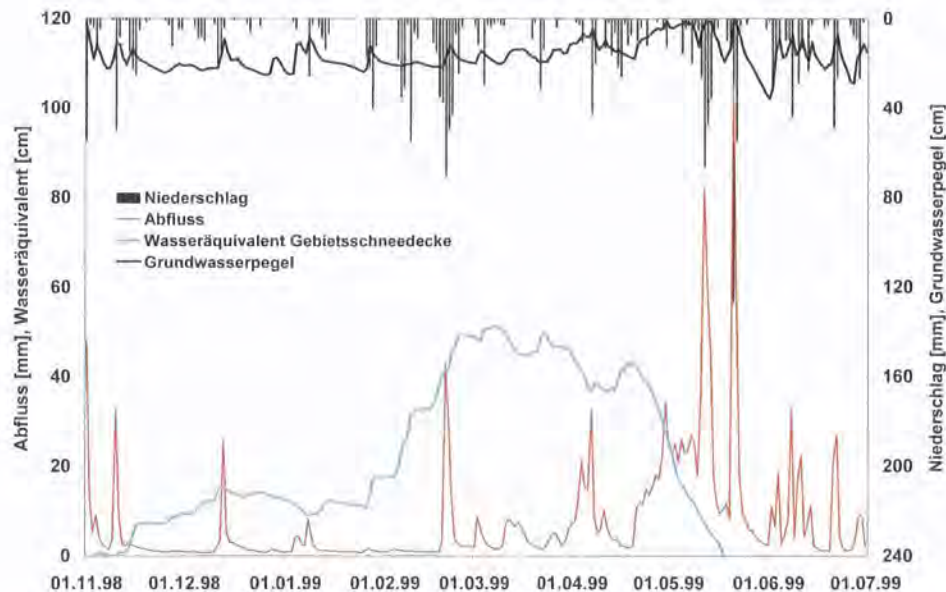


Fig. 5.1: Die gemessenen Niederschläge und Abflüsse im Winter 1998/99, sowie das mit dem Modell BROOK simulierte Wasseräquivalent der Gebietsschneedecke für das Einzugsgebiet des Erlenbachs (Alptal, Kt. Schwyz). Dargestellt sind jeweils die Tageswerte. Weiter ist der Grundwasserpegel aufgetragen, der etwa in der Mitte des Einzugsgebiets gemessen wird.

Die beiden Niederschlagsereignisse zeichnen sich vor allem durch die hohen Mehrtagesummen aus, wobei das Auffahrtsergebnis durch schauerartige Niederschlagsphasen und das Pfingstereignis durch eine konstante Intensität geprägt waren. Je nach Messstation, Ereignis und Bezugsdauer liegen die Wiederkehrdauern der Niederschläge zwischen 20 und 50 Jahren, wobei dieser Einordnung die etwa 30-jährigen Messreihen aus dem Alptal zugrundegelegt wurden.

5.1.2 EREIGNISABLAUF IN DEN EINZUGSGEBIETEN ERLENBACH, VOGELBACH UND LÜMPENENBACH

Für die Darstellung des Ereignisablaufs wird mit Beginn der Hauptschneesmelze Mitte April begonnen, da die praktisch vollständige Aufsättigung des Bodens durch den abschmelzenden Schnee eine wesentliche Vorbedingung für die weiter unten beschriebenen sehr hohen Abflusskoeffizienten bildete.

Während der Hauptschneesmelze wurden zum Teil sehr unterschiedliche Schmelzraten festgestellt. In Fig. 5.2 sind die aus den wöchentlichen Messungen berechneten Tagesschmelzraten für zwei Schneemessstrecken im Alptal dargestellt. Für die Freilandstrecken wurde die wöchentliche Schmelzrate proportional zur täglichen Globalstrahlung auf die einzelnen Tage verteilt. Im Wald dagegen erfolgte die Aufteilung proportional zur Summe der Vortagestemperatur und derjenigen des aktuellen Tages. Die beobachteten täglichen Abschmelzraten schwanken in Abhängigkeit der Witterung und der Bewaldung eines Standorts sehr stark. Im Mittel liegen sie bei der Freilandstrecke um 27 mm/d und bei der Waldstrecke knapp 10 mm tiefer.

Tab. 5.1: Tägliche Schmelzraten in den drei Alptaler Gebieten für die in der Hauptschmelze gelegene Schönwetterperiode vom 1.-3. Mai 1999.

Einzugsgebiet	Bewaldung [%]	Mittlere tägliche Gebietsschmelzrate [mm/d]
Erlenbach	40	24
Vogelbach	65	24
Lümpenenbach	20	30

Einen Eindruck der Abschmelzraten pro Einzugsgebiet vermittelt Tab. 5.1, in der die für die Schönwetterperiode vom 1. - 3. Mai 1999 aus den Abflusssummen zurückgerechneten Schmelzraten dargestellt sind. Die Schmelzraten liegen generell etwas tiefer als man es aufgrund der Werte in Fig. 5.2 erwarten würde. Dies liegt zu einem wesentlichen Teil daran, dass der unterste Teil der Einzugsgebiete – vor allem im Wald – überall schon teilweise schneefrei war. Andererseits kommt zum Ausdruck, dass nebst Witterung und Bewaldung noch andere Faktoren (v.a. die Exposition) die Schneeschmelze beeinflussen. Sonst könnten die sehr unterschiedlich bewaldeten, aber etwa gleich hoch liegenden Einzugsgebiete Vogelbach und Erlenbach nicht die praktisch gleiche Abschmelzrate aufweisen.

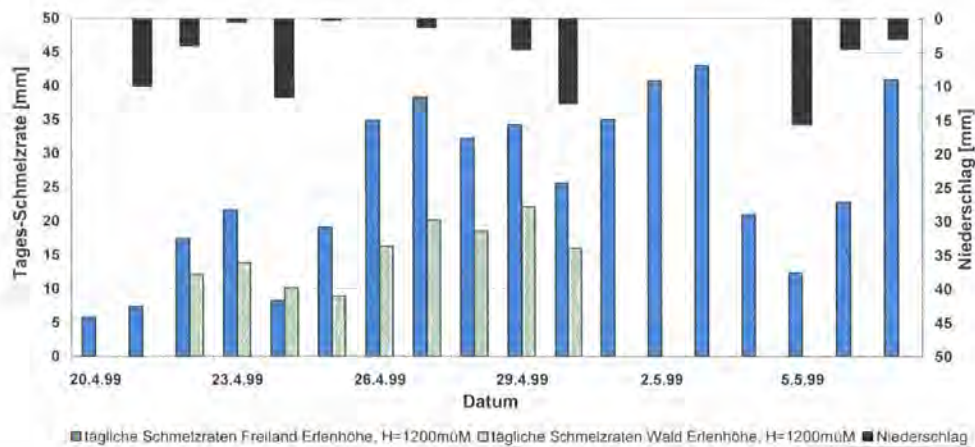


Fig. 5.2: Tägliche Schmelzraten an einem bewaldeten und einem unbewaldeten Standort im Einzugsgebiet des Erlenbaches (Alptal, SZ). Die Tageswerte wurden aufgrund von wöchentlichen Messungen des Schneewasseräquivalents auf zwei Messstrecken berechnet. Die Verteilung der wöchentlichen Schmelzrate auf die einzelnen Tage erfolgte proportional zur Globalstrahlung im Freiland und proportional zur Temperatur im Wald. Ab dem 1. Mai war die Waldmessstrecke schneefrei.

In Fig. 5.3 ist die Periode der Hauptschmelze sowie diejenige der beiden interessierenden Mai-Niederschlagsereignisse dargestellt. Die Abbildung zeigt die tägliche Abflussganglinie, den Verlauf des Gebiets-schneewasseräquivalents sowie die für die drei Phasen jeweils wieder neu angesetzten Summenkurven für Niederschlag, Abfluss und simulierte Schmelze. Die entsprechenden Zahlenwerte sind aus Tab. 5.2 ersichtlich.

Während der Hauptschmelzphase vom 19. April bis 10. Mai 1999 war das Abflussvolumen zu 80 % schmelzbedingt. Die darüber hinausgehenden ca. 80 mm Abfluss resultierten aus dem in der gleichen Periode gefallenen Regenniederschlag von 100 mm. Der Boden nahm somit während der Hauptschmelzperiode nur einige Millimeter Wasser auf, und war die ganze Zeit praktisch vollständig gesättigt. Dementsprechend lag das Niveau des gemessenen Grundwasserpegels während der ganzen Periode an oder zum Teil sogar über der Bodenoberfläche. Erst nach dem Pfingstereignis senkte sich der Grundwasserpegel wieder in normale Tiefen von ca. 50 cm unter der Bodenoberfläche ab (vgl. Fig. 5.1).

Das Auffahrtseignis zwischen dem 11. und dem 14. Mai traf also weitgehend auf gesättigten Boden. Mit Ausnahme von ein paar wenigen Millimetern wurde deshalb der gesamte Ereignisniederschlag abflusswirksam und addiert sich zu den Schmelzwasserabflüssen.

Beim etwa 10 Tage später folgenden Pfingstereignis war die Schmelze praktisch abgeschlossen und das Gebiet weitgehend ausgeapert. Damit wurde mehr Energie in Evaporation umgesetzt, welche im Boden ein gewisses Speichervolumen schaffen konnte. Entsprechend wurden vom Niederschlag des Hauptereignisses etwa 10 % im Boden zwischengespeichert und 90 % flossen direkt ab. Nur noch etwa 5 mm Abfluss waren schmelzbedingt.

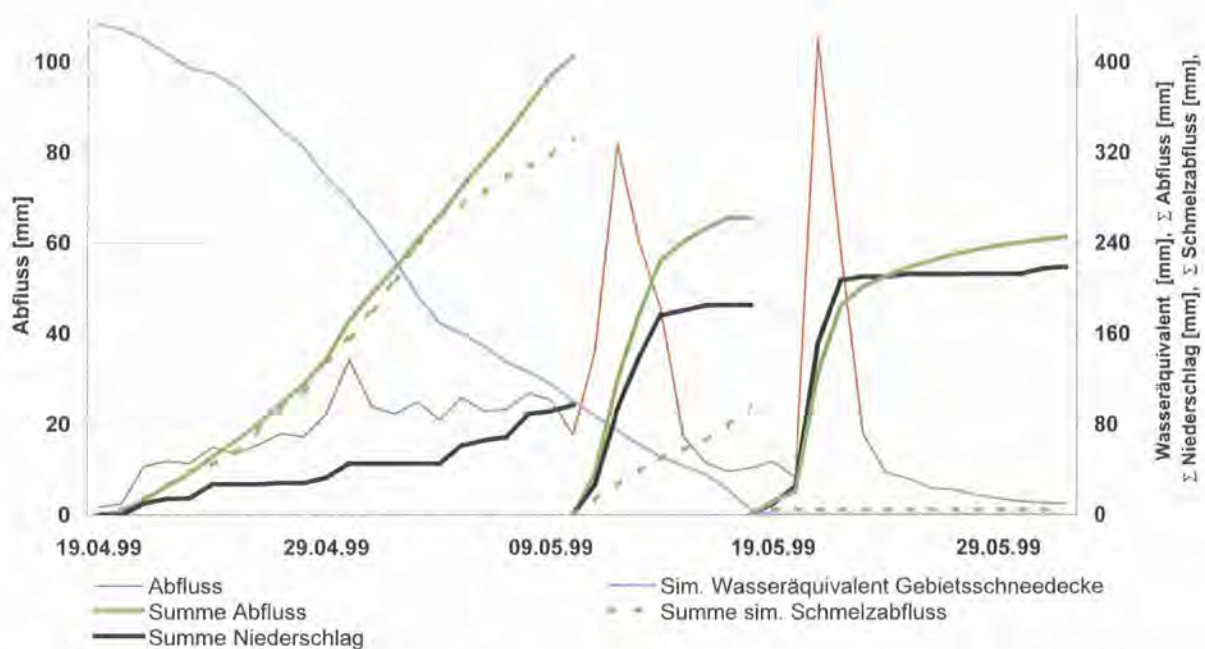


Fig. 5.3 : Darstellung der Hauptschmelzperiode sowie der nachfolgenden Mai-Niederschlagsperioden zwischen dem 19.4. - 1.6. 1999 im Einzugsgebiet des Erlenbachs.

In Tab. 5.2 sind die aus Fig. 5.3 bekannten hydrologischen Größen nochmals tabellarisch zusammengestellt und im Hinblick auf die wichtigsten Abflusskomponenten (Schmelzanteil und Niederschlagsanteil) ausgewertet. Die entsprechenden Werte sind für die einzelnen Ereignisperioden sowie für die Gesamtperiode aufgeführt. Zur Berechnung des Abflusskoeffizienten des Regens wurde der gemessene Abfluss im Verhältnis des Niederschlages und der Schmelze aufgeteilt, da beide Größen als gleichwertiger Input für die Abflusentstehung betrachtet werden können. Somit wurde z.B. für die Periode der Hauptschmelze die Abflusssumme von 405 mm im Verhältnis 330/100 aufgeteilt. Dies ergab einen Abflussanteil von 310 mm infolge Schmelze und einen solchen von 95 mm infolge Regen. Daraus resultierten einerseits ein Schmelzanteil von $310/405 = 0.77$ bzw. ein Abflusskoeffizient für den Regenniederschlag von $95/100 = 0.95$.

Der Schmelzanteil nahm verständlicherweise durch den Rückgang der schneebedeckten Fläche vom Zeitpunkt der Hauptschmelze über das Auffahrtseignis bis hin zum Pfingstereignis klar ab. Der Abflusskoeffizient des Regenniederschlages war, bedingt durch die hohe Bodensättigung, bereits während der Hauptschmelze sehr hoch. Während des Auffahrtseignisses war das Freiland im oberen Gebietsteil immer noch schneebedeckt, und das übrige Einzugsgebiet wies einen derart hohen Sättigungsgrad auf, dass die 175 mm Niederschlag praktisch vollständig abflossen. Bis zum Pfingstereignis hatte unter anderem die Evaporation wieder etwas Speichervolumen geschaffen, so dass von den 205 mm Niederschlag „nur“ noch etwa 88 % direkt abflossen.

Für die gesamte, ca. 30 Tage dauernde Periode, ergibt sich ein Schmelzanteil von knapp 50 %. Mit 92 % weist der Abflusskoeffizient für den Regenniederschlag einen sehr hohen Wert auf. Dies ist auf die schmelzbedingt hohe Bodensättigung, die im Erlenbach sehr geringmächtigen Böden sowie die saisonal bedingte geringe Evaporation zurückzuführen.

Tab. 5.2: Die massgebenden hydrologischen Grössen im Erlenbach während den verschiedenen Ereignisperioden. Die Werte sind einerseits absolut und andererseits als prozentuale Abflussanteile angegeben.

Ereignis	Datum	Niederschlag [mm]	Abfluss Q_{tot} [mm]	Schmelze [mm]	Schmelzanteil an Q_{tot} [%]	Abflusskoeff. des Regens [%]
Hauptschmelze	19.4.- 10.5.99	100	405	330	77	95
Auffahrtseignis	11.5.- 14.5.99	175	225	50	22	100
Pfingstereignis	19.5.- 22.5.99	205	185	5	3	88
Gesamtperiode	19.4.- 22.5.99	490	850	430	47	92

Beim Auffahrtseignis erreichte der Volumenabflusskoeffizient für den Regenniederschlag mit 1.0 einen Wert, wie er seit Bestehen der Messanlage im Erlenbach (1983) noch nie registriert wurde. Der Abflusskoeffizient des Pfingstereignisses dagegen liegt im Bereich der Werte, die auch früher schon bei feuchten Vorbedingungen festgestellt wurden.

Fig. 5.4 zeigt das Niederschlags- / Abflussverhalten der interessierenden Periode im Vogelbach analog zum Erlenbach (Fig. 5.3). Tab. 5.3 enthält die entsprechenden Zahlenwerte vergleichbar mit Tab. 5.2.

Während der Hauptschmelze unterscheiden sich die beiden Einzugsgebiete in ihrem Abflussverhalten kaum.

Beim Auffahrtseignis war der Anteil des abgeflossenen Niederschlages im Vogelbach deutlich kleiner als im Erlenbach. Die Summenkurve des Abflusses liegt eindeutig unter jener des Niederschlages, wobei etwa 10 % des Abflusses schmelzbedingt war.

Auch für das Pfingstereignis war der Anteil des abgeflossenen Niederschlages im Vogelbach deutlich kleiner als im Erlenbach. Ein Teil des Abflusses im Vogelbach war immer noch schmelzbedingt. Das unterschiedliche Abflussverhalten der beiden Gebiete dürfte einerseits durch den im Vogelbach im Vergleich zum Erlenbach eher tiefergründigen Boden im bewaldeten Einzugsgebietsteil und andererseits durch den grösseren Bewaldungsanteil im Vogelbach begründet sein. Im ausgeaperten Teil des Vogelbaches vermochte der Nadelwald durch Evapotranspiration im Bodenspeicher bereits etwas Speicherraum zu schaffen. Eine detaillierte Bewertung der verschiedenen Einflüsse auf Unterschiede in der Schneeschmelze zwischen Vogelbach und Erlenbach ist wegen der grossen Zahl von unterschiedlichen Einflussfaktoren (z.B. Bewaldung, Exposition, Bodeneigenschaften, unterschiedliche Beregnung) und ihrer zum Teil gegenläufigen Wirkungen nicht möglich.

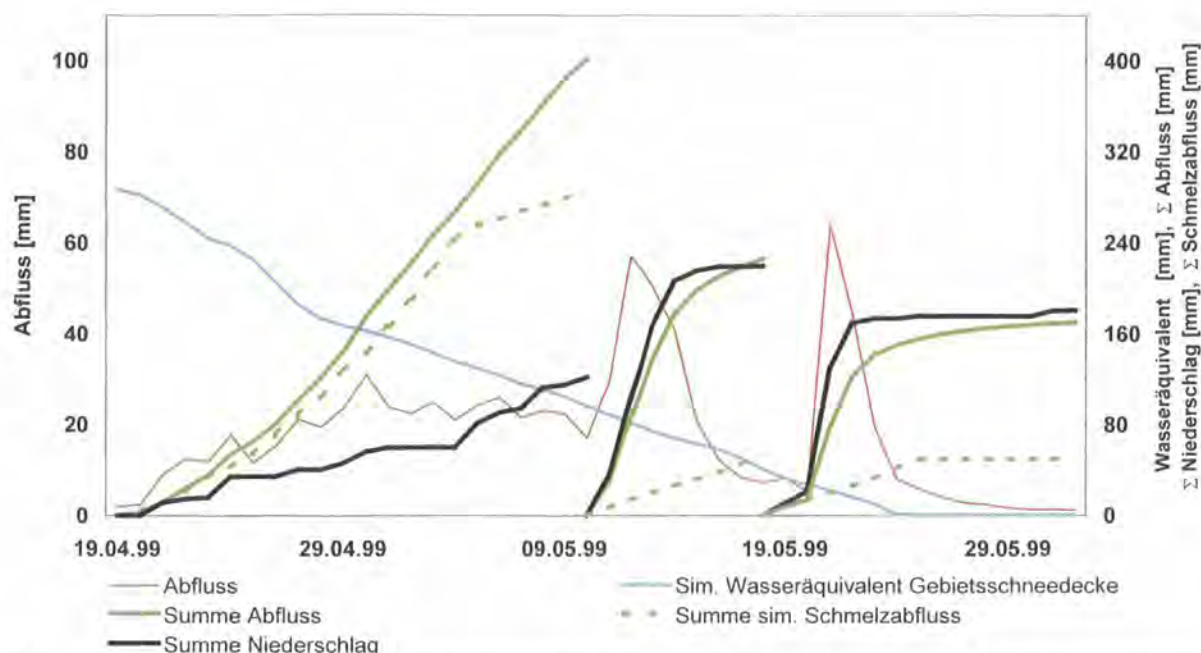


Fig. 5.4: Darstellung der Hauptschmelzperiode sowie der nachfolgenden Mai-Niederschlagsperioden zwischen dem 19. 4. - 1. 6. 1999 im Einzugsgebiet des Vogelbaches.

Für die gesamte betrachtete, ca. 30 Tage dauernde Periode, ergab sich ein Schmelzanteil von gut 40 %. Mit 85 % wies der Abflusskoeffizient für den Regenniederschlag für ein zu 65 % bewaldetes Einzugsgebiet einen sehr hohen Wert auf. Dies ist wie im Erlenbach auf die schmelzbedingt hohe Bodensättigung zurückzuführen.

Tab. 5.3: Die massgebenden hydrologischen Grössen im Vogelbach während der verschiedenen Ereignisperioden. Die Werte sind einerseits absolut und andererseits als prozentuale Abflussanteile angegeben.

Ereignis	Datum	Niederschlag [mm]	Abfluss Q_{tot} [mm]	Schmelze [mm]	Schmelzanteil an Q_{tot} [%]	Abflusskoeff. des Regens [%]
Hauptschmelze	19.4.-10.5.99	130	400	285	70	95
Auffahrtseignis	11.5.-14.5.99	205	175	25	11	78
Pfingstereignis	19.5.-22.5.99	170	120	25	13	62
Gesamtperiode	19.4.-22.5.99	510	750	370	42	85

Auch beim Vogelbach erreichte der Volumenabflusskoeffizient für den Regenniederschlag beim Auffahrtseignis mit 0.78 einen Wert wie er in den letzten 15 Jahren nicht beobachtet wurde. Der entsprechende Wert für das Pfingstereignis wurde dagegen bei früheren Ereignissen auch schon leicht übertroffen.

5.1.3 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE AUS DEM SPISSIBACH

Das nach Norden exponierte Einzugsgebiet des Spissibaches liegt am Südufer des Thunersees bei Leissigen. Es ist zu etwa 45 % bewaldet (vor allem im unteren Teil des Einzugsgebiets), weist eine Fläche von ca. 2,6 km² auf und erstreckt sich über einen Höhenbereich von 560 bis 2250 m ü.M. Dieses Einzugsgebiet umfasst somit einen wesentlich grösseren Höhenbereich als die Alptaler Gebiete, welche von rund 1100 bis 1600 m ü.M. reichen. Für den Vergleich der Kleineinzugsgebiete ist zudem zu berücksichtigen, dass das engere Umfeld des Thunersees beim Auffahrtseignis in einem Gebiet mit vergleichsweise geringen Niederschlägen lag (vgl. Fig. 4.15).

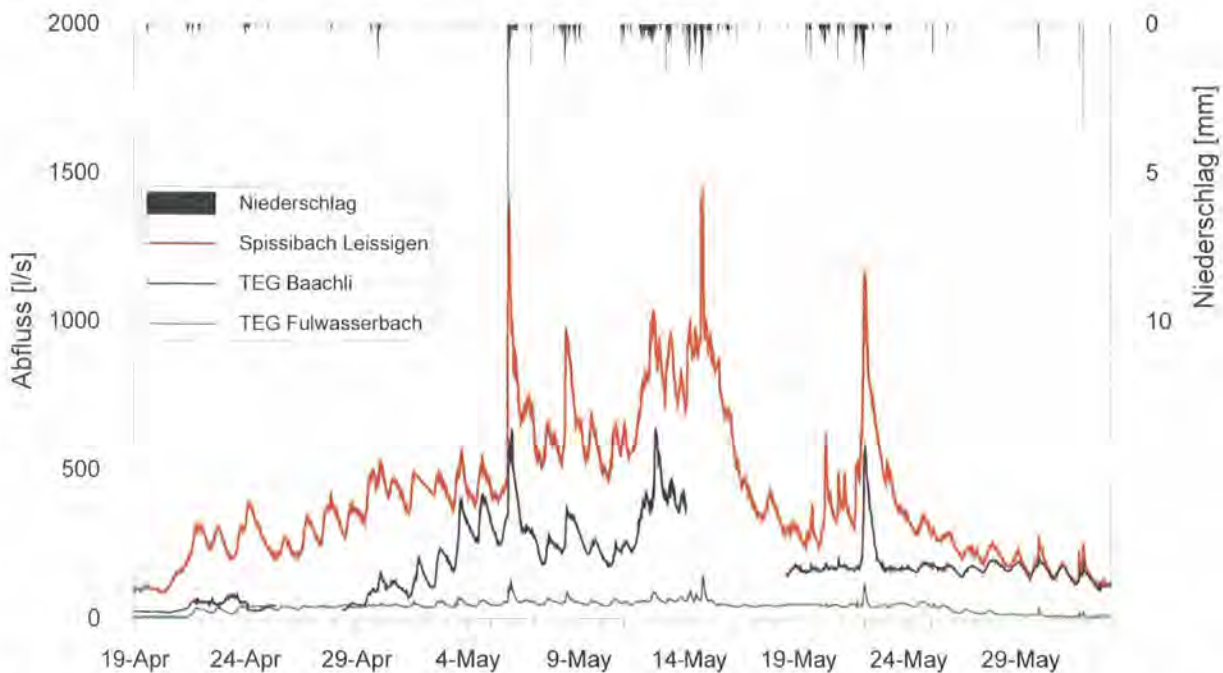


Fig. 5.5: Darstellung von Niederschlag und Abfluss für die Periode vom 19. April bis zum 1. Juni 1999 für das gesamte Einzugsgebiet des Spissibaches (Stationshöhe: 590 m ü.M.) sowie die Teileinzugsgebiete (TEG) Baachli (1320 m ü.M.) und Fulwasser (1190 m ü.M.).

Auf einer Höhe von 1350 m ü.M. wurde im Einzugsgebiet des Spissibaches am 25. April 1999 ein Wasseräquivalent der Schneedecke von 850 mm gemessen, was seit Messbeginn im Winter 1993/94 der höchste Wert ist. Dieser hohe Wert ist auf die nordexponierte Lage mit geringer Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

Die Abflussganglinien der verschiedenen Stationen im Einzugsgebiet des Spissibaches zeigen mit deutlichen Tagesgängen den Verlauf der Schneeschmelze auf (vgl. Fig. 5.5). Der Abfluss des Teileinzugsgebietes Baachli, welches den obersten Teil des Gesamteinzugsgebiets umfasst, machte im Verlauf der Schneeschmelze einen immer grösseren Anteil des Gesamtabflusses aus, was das Ausapern des Gebietes und die Verschiebung der Schneegrenze nach oben aufzeigt. Die Hauptschneeschmelze dauerte ähnlich wie im Alptal von Mitte April bis Anfang Juni. Grössere Abflussspitzen traten in Leissigen an Auffahrt und Pfingsten sowie zusätzlich am 6. Mai auf.

Die Unterschiede in den Gebietseigenschaften und im Ereignisablauf bewirkten ein zum Alptal unterschiedliches Abflussverhalten. So war in beiden Untersuchungsgebieten der Abfluss während der Schönwetterperiode vom 1. bis zum 4. Mai im Wesentlichen durch die Schneeschmelze bedingt. In den nach Westen bzw. nach Osten exponierten Einzugsgebieten im Alptal stiegen die Abflüsse dabei bis auf 30 bzw. 24 mm/d (vgl. Tab. 5.1). Im weitgehend nach Norden exponierten Spissibach (vgl. Fig. 5.6) dagegen erreicht der Abfluss nur etwa 15 mm/d, obwohl nur ein kleiner Teil des Einzugsgebiets zu diesem Zeitpunkt schon ausgeapert war. Hier wird der in Kap. 4.2 erläuterte Einfluss der Strahlung auf die Schneeschmelze deutlich sichtbar.

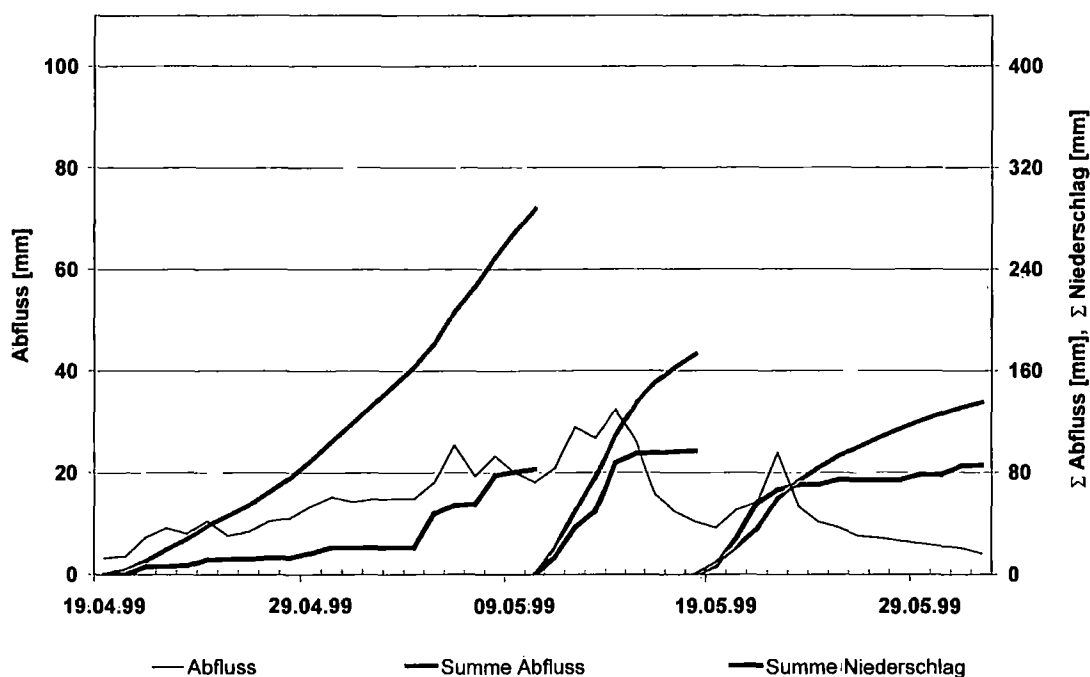


Fig. 5.6: Darstellung der Niederschlags- und Abflusssummen für die Periode vom 19. April bis zum 1. Juni 1999 für das Einzugsgebiet des Spissibaches.

Tab. 5.4: Niederschlag- und Abflusssummen während den verschiedenen Ereignisperioden.

Ereignis	Datum	Niederschlag [mm]	Abfluss [mm]
Hauptschmelze	19.4.-10.5.99	82.7	288
Auffahrtseignis	11.5.-18.5.99	97	174
Pfingstereignis	19.5.-22.5.99	66.4	60
Gesamtperiode	19.4.-22.5.99	246.1	521.5

Aus Fig. 5.6 kann der Beitrag der Schneeschmelze im Spissibach beim Auffahrtseignis auf etwa 50 mm abgeschätzt werden. Vergleicht man diesen Wert mit der entsprechenden Messung im Erlenbach, fällt auf, dass beide in der gleichen Grössenordnung liegen. Der Vogelbach weist mit 25 mm einen etwas geringeren Schmelzbeitrag auf. Die Tatsache, dass der Schmelzbeitrag im Spissibach etwa gleich gross war wie im Erlenbach, der zu diesem Zeitpunkt einen Abflusskoeffizienten von beinahe 1 aufwies, ist ein Hinweis darauf, dass auch im Spissibach die Abflussbereitschaft sehr hoch gewesen sein muss.

Obwohl der absolute Beitrag der Schneeschmelze gleich gross ist, trägt sie im Spissibach etwa 50 % zum Abfluss bei, im Erlenbach nur 22 %. Dies weil im Spissibach nur knapp die Hälfte des Niederschlages des Alptales gefallen ist. Aufgrund dieser wesentlich geringeren Niederschläge sind auch die absoluten Abflusswerte im Spissibach mit maximal 30 mm/d etwa halb so gross wie im Vogelbach. Der Erlenbach mit bis 100 mm/d Abfluss kann aufgrund seiner besonders abflussfördernden Bodenbedingungen nicht direkt mit dem Spissibach verglichen werden.

Der Abfluss beim Pfingstereignis ist im Spissibach aufgrund der viel kleineren Niederschläge kaum mit jenen im Alptal vergleichbar. Allerdings sank der Abfluss nach dem Ereignis weniger stark und auch langsamer ab, weil in diesem hochreichenden Einzugsgebiet immer noch viel Schnee lag. Das Ereignis war deshalb im Spissibach, im Gegensatz zum Alptal, immer noch relativ stark von der Schneeschmelze beeinflusst.

FAZIT:

Bedingt durch die dauernde Aufsättigung der Böden aus der abschmelzenden Schneedecke, bestanden im Alptal während der ganzen Schneeschmelze und in der unmittelbar anschliessenden Periode derart abflussfördernde Ausgangsbedingungen, wie sie bisher noch nie beobachtet wurden. Dies zeigt sich in den aussergewöhnlich hohen Abflusskoeffizienten während dem Auffahrtseignis vom 10. - 15. Mai 1999. Vor dem Pfingstereignis war die Schneeschmelze deutlich weiter fortgeschritten. Entsprechend reagierten dann die Gebiete ähnlich wie bei früheren Ereignissen mit feuchten Vorbedingungen.

Einen Hinweis auf die Bedeutung der Gebietseigenschaften ergibt der Vergleich der drei untersuchten Einzugsgebiete Erlenbach und Vogelbach im Alptal und Spissibach bei Leissigen am Thunersee. Wohl haben überall grundsätzlich die gleichen Prozesse, nämlich Niederschlag und Schneeschmelze, zur Abflussbildung beigetragen, aber je nach den spezifischen Eigenschaften, dem lokalen Witterungsverlauf und der Vorgeschichte beeinflussten sie die Hochwasserbildung in einem unterschiedlichen Zusammenspiel. Die generellen Aussagen, dass verbreitet sehr abflussfördernde Bedingungen bestanden haben und dass die Schneeschmelze auch während einem Niederschlagsereignis einen wesentlichen Beitrag zum Abfluss leisten kann, gelten aber in allen Gebieten.

5.2 FLUSSEINZUGSGEBIETE

Peter Mani

Für die Analyse des Wasserhaushaltes wurden 37 Einzugsgebiete bzw. Teileinzugsgebiete im Bereich der Alpennordseite, des Mittellandes und des Juras ausgewählt (Fig. 9:6). Das Wallis, das Tessin und das Engadin wurden nicht in die Analyse mit einbezogen, da diese von den Ereignissen nicht oder nur am Rande betroffen waren, und deshalb auf eine Aufarbeitung der Grundlagendaten verzichtet wurde. Bei der Auswahl der Einzugsgebiete wurde darauf geachtet, dass verschiedene Höhenbereiche abgedeckt werden. Die mittlere Höhe der untersuchten Einzugsgebiete reicht von 536 bis 2364 m ü.M. (vgl. Tab. 9.2). Ein weiteres Auswahlkriterium war die Beeinflussung durch die Kraftwerknutzung. Wenn möglich wurden Gebiete ausgewählt, die wenig beeinflusst sind. Einige wichtige Gebiete, beispielsweise das Einzugsgebiet der Linth, wurden aber trotz recht starker Beeinflussung in die Analyse mit einbezogen. Ein Sonderfall stellt das Einzugsgebiet des Rheins bei Diepoldsau dar. Dort fehlen die Daten aus Österreich und aus Liechtenstein. Analysen sind daher für dieses Gebiet nur beschränkt möglich.

5.2.1 VORGEHEN

Für die Untersuchung des Wasserhaushaltes in den Flussgebieten wurde der Zeitraum zwischen dem 1. Feb. 1999 und dem 15. Juni 1999 in mehrere Zeitabschnitte unterteilt. Für den Abschnitt vom 1. Feb. bis zum 30. April erfolgte eine monatsweise Betrachtung. Diese wurde für den Zeitraum des Hochwassers im Februar (20. - 22. Feb.) sowie für den Hochwassermonat Mai mit einer tageweise Auswertung ergänzt. Im Juni wurde die erste Monatshälfte wieder zusammengefasst analysiert. Die Auswertungen umfassen folgende Arbeitsschritte:

1. Ermittlung der Gebietsschneesmelze (Wasserangebot aus der Schneesmelze).
2. Ermittlung des Gebietsniederschlages.
3. Ermittlung des Wasserangebotes aus dem Niederschlag (nicht in der Schneedecke gespeicherter Niederschlagsanteil).
4. Ermittlung des Gesamtwasserangebotes aus der Schneesmelze und dem nicht in der Schneedecke gespeicherten Niederschlagsanteil.
5. Ermittlung des Abflussvolumens aus den Messungen der LHG.

Mit dem angewendeten Verfahren wurde eine prozessbezogene Differenzierung innerhalb der Einzugsgebiete erreicht. Die Speicherung von Niederschlag in der Schneedecke in einem Teil eines Einzugsgebietes und die Schneesmelze in einem anderen Teil wurden nicht miteinander verrechnet.

Die Grundlage für die Ermittlung der Gebietsschneesmelze bildete das räumlich interpolierte Wasseräquivalent der Schneedecke, das in Form eines Rasters mit einer Auflösung von 2 x 2 km vorlag (vgl. Kapitel 4.2.1). In einem ersten Schritt wurden für die Zeitabschnitte 1. - 28. Feb., 1. - 31. März, 1. - 30. April, 1. - 15. Mai, 16. - 31. Mai und 1. - 15. Juni die Veränderungen des Wasseräquivalents auf jeder Rasterzelle berechnet. Die Abnahme des Wasseräquivalents entspricht dem Wasserangebot aus der Schneesmelze für diese Rasterzelle. Diese Werte wurden für jeden Zeitabschnitt über die Einzugsgebiete aufsummiert. Das Resultat stellt das Wasserangebot aus der Schneesmelze für das betrachtete Einzugsgebiet dar.

Zusätzlich zu diesen Auswertungen über Monats- oder Halbmonats-Perioden wurde eine tageweise Berechnung des Schmelzwasseranfalls für das Hochwasserereignis im Februar und für den Monat Mai vorgenommen. Dazu wurden tägliche, mit dem Taggradverfahren berechnete, Schmelzraten verwendet (vgl. Kap. 4.2). Diese lagen ebenfalls in einem 2 x 2 km Raster vor. Ausgehend vom räumlich interpolierten Wasseräquivalent per Ende April bzw. per 19. Feb., wurde die weitere Entwicklung des Wasseräquivalents

der Schneedecke aus den täglichen Schmelzraten und den Tagesniederschlägen für jede Rasterzelle berechnet. Dazu kam das in Fig. 5.7 beschriebene Verfahren zum Einsatz.

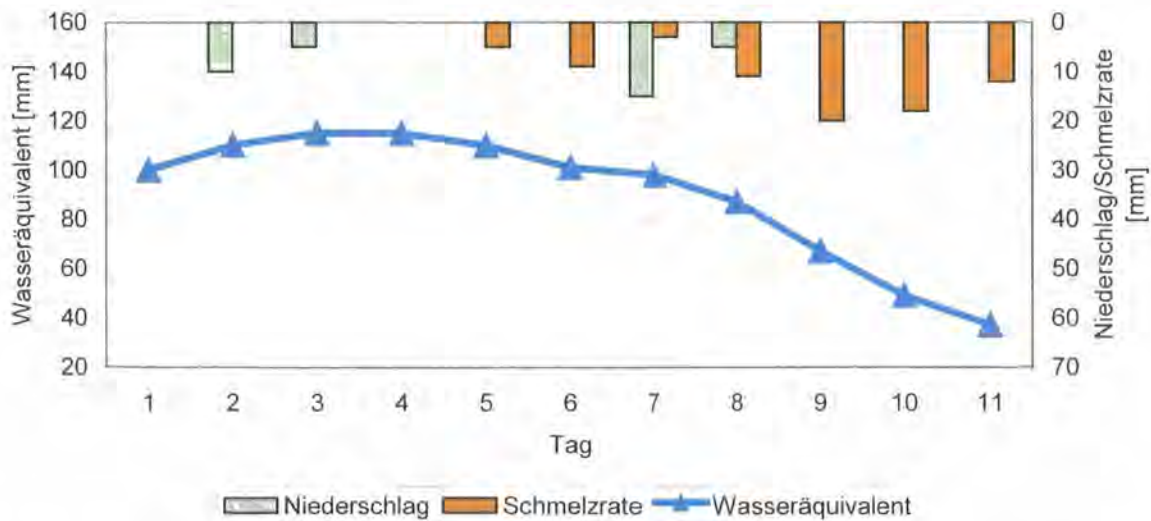


Fig. 5.7: Beispiel für die tägliche Fortschreibung des Wasseräquivalents. Bei einer Schmelzrate = 0 wird der Niederschlag in der Schneedecke gespeichert. Bei einer Schmelzrate > 0 wird die Schneedecke abgebaut. In diesem Fall wird kein Niederschlag in der Schneedecke akkumuliert.

Die mit diesem Verfahren per Mitte und Ende Mai berechneten Wasseräquivalente wurden mit den räumlich interpolierten Werten verglichen. Die Schmelzraten führten tendenziell zu einem zu schnellen Schneedeckenabbau. Deshalb wurde für beide Perioden ein Fehlerausgleich vorgenommen, indem die Differenzen zwischen dem räumlich interpolierten und dem fortgeschriebenen Wasseräquivalent proportional zur Schmelzrate verteilt wurden. Auf dieser Basis liess sich für jeden Tag und für jede Rasterzelle das Wasserangebot aus der Schneeschmelze berechnen. Dieses wurde wiederum über die Einzugsgebiete aufsummiert.

Grundlage für die Ermittlung der Gebietsniederschläge bildeten die räumlich interpolierten Niederschläge, die in Form eines 2 x 2 km Rasters vorlagen. Diese Werte wurden über die Einzugsgebiete aufsummiert. Im so ermittelten Gebietsniederschlag ist aber auch fester Niederschlag enthalten sowie Regen, welcher in der Schneedecke zurückgehalten wurde. Dies führt zu einer Erhöhung des Wasseräquivalents der Schneedecke und ist deshalb für den Abfluss zu diesem Zeitpunkt nicht relevant. Der übrige Niederschlagsanteil wird als "Wasserangebot aus dem Niederschlag" bezeichnet. Um dieses für die Monats- bzw. Halbmonatsperioden zu ermitteln, wurde folgendes Vorgehen gewählt (Fig. 5.8):

1. Niederschlag der auf Flächen fällt, die zu Beginn und am Ende des betrachteten Zeitabschnitts keine Schneedecke aufweisen, wird dem Wasserangebot aus dem Niederschlag zugerechnet.
2. Niederschlag auf Flächen, auf denen das Wasseräquivalent im betrachteten Zeitabschnitt abnimmt, wird ebenfalls dem Wasserangebot aus dem Niederschlag zugerechnet.
3. Beim Niederschlag auf Flächen, auf denen das Wasseräquivalent im betrachteten Zeitabschnitt zunimmt, müssen zwei Fälle unterschieden werden:
 - a) Wenn der Niederschlag grösser ist als die Zunahme des Wasseräquivalents, wird die Differenz zwischen der Niederschlagsmenge und der Zunahme des Wasseräquivalents dem Wasserangebot aus dem Niederschlag zugerechnet.
 - b) Wenn der Niederschlag geringer oder gleich der Zunahme des Wasseräquivalents ist, ist das Wasserangebot aus dem Niederschlag null.

Bei diesem Vorgehen ist zu beachten, dass Prozesse, die innerhalb eines Zeitabschnittes ablaufen, nicht erfasst werden. Dies ist vor allem in tieferen Lagen zu berücksichtigen, wo sich Schneedeckenaufbau und -abbau in kurzen Abständen folgen können.

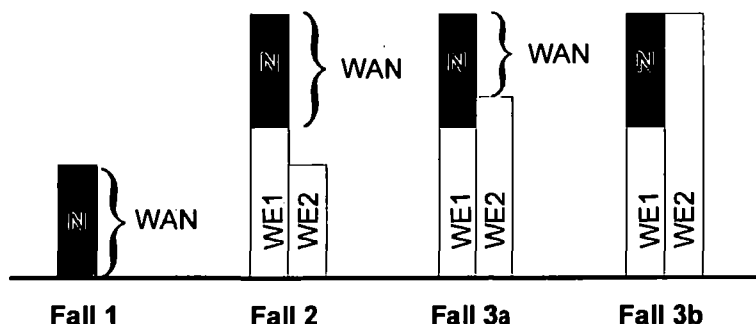


Fig. 5.8: Schema für die Ableitung des abflussrelevanten Niederschlages

N: Niederschlag

WE1, WE2: Wasseräquivalent der Schneedecke zum Zeitpunkt 1 bzw. 2

WAN: Wasserangebot aus Niederschlag

Das nach diesem Verfahren für jede Rasterzelle ermittelte Wasserangebot aus dem Niederschlag wurde für die einzelnen Einzugsgebiete über die definierten Zeitabschnitte aufsummiert und durch die Einzugsgebietsfläche dividiert. Daraus resultierte das Wasserangebot in mm pro Zeitabschnitt.

Die tageweise Ermittlung des Wasserangebotes aus dem Niederschlag erfolgte nach einem vereinfachten Verfahren:

- Schmelzrate = 0: In diesem Fall wird kein Niederschlag dem Wasserangebot zugerechnet, da er in der Schneedecke gespeichert wurde.
- Schmelzrate > 0: In diesem Fall wird der ganze Niederschlag dem Wasserangebot zugerechnet.

Im vierten Schritt wird das Wasserangebot aus dem Niederschlag mit dem Wasserangebot aus der Schneeschmelze zum Gesamtwasserangebot zusammengezählt.

Für die Ermittlung der Abflussvolumina wurden die Messwerte der Abflussmessstationen über die zu analysierenden Zeitabschnitte aufsummiert. Um bei den Tageswerten eine Vergleichbarkeit mit den Niederschlägen zu erreichen, wurden die Stundenwerte der Abflüsse ebenfalls in einem Zeitfenster von 7.00 bis 7.00 Uhr des darauffolgenden Tages aufsummiert. In einem weiteren Schritt wurden aus den Tageswerten die monatlichen Abflussvolumina berechnet.

5.2.2 ZEITLICHER VERLAUF

Im Februar zeigten die Gebietsniederschläge eine grosse räumliche Variabilität. Niedrige Werte wiesen Einzugsgebiete auf, deren hauptsächlich Flächenanteil im (höheren) Mittelland liegt (Fig. 5.9). Die niedrigen Werte für die Einzugsgebiete Hinterrhein und Rhein-Domat/Ems sind allenfalls auf Interpolationsprobleme zurückzuführen, da südlich dieser Gebiete Stützwerte fehlen. Mit über 350 mm wiesen die Aare-Brienzwiler, die Linth-Mollis und der Schächen-Bürglen die höchsten Gebietsniederschläge auf. Von diesen Niederschlägen ist jedoch nur ein kleiner Teil im Februar abgeflossen. Dies zeigen einerseits die Werte des Wasserangebotes aus dem Niederschlag (Fig. 5.9), andererseits die Abflusskoeffizienten, die in den höhergelegenen Gebieten meist unter einem Wert von 0,25 lagen. In den höhergelegenen Einzugsgebieten wurden bedeutende Teile des Niederschlages in der Schneedecke gespeichert. In diesen Gebieten kam es im Verlauf des Februars mindestens zu einer Verdoppelung des Wasseräquivalents (Fig. 9.7 und Fig. 9.8). Dieses erreichte in einigen Einzugsgebieten Werte um einen Meter. Ein Vergleich der Wasseräquivalentszunahmen mit den Niederschlägen zeigt allerdings, dass vor allem in den höhergelegenen Einzugsgebieten der Anstieg um einen Faktor 1.5 bis 2.0 über den Niederschlagssummen des Februars liegt. Diese Differenz dürfte zum Teil auf die Höhenabhängigkeit des Niederschlages zurückzuführen sein. Die Niederschlagsmessstationen liegen im Mittel tiefer als die Schneemessstationen. Bei der räumlichen Interpolation der Niederschläge können daher für die höhergelegenen Gebiete

systematisch zu tiefe Werte resultieren. Ebenfalls zu einer Unterschätzung der Niederschläge führt das bekannte Problem, dass bei Schneefall oftmals nicht der ganze Niederschlag im Sammler aufgefangen wird (vgl. z.B. Sevruk, 1985). Demgegenüber ist eine Überschätzung des Wasseräquivalents in diesem Umfang wenig wahrscheinlich, da bei der Festlegung der Vergleichsstationen auf die Repräsentativität des Standortes geachtet wurde. Für die weiteren Arbeiten wird deshalb davon ausgegangen, dass das interpolierte Wasseräquivalent in etwa die realen Verhältnisse abbildet.

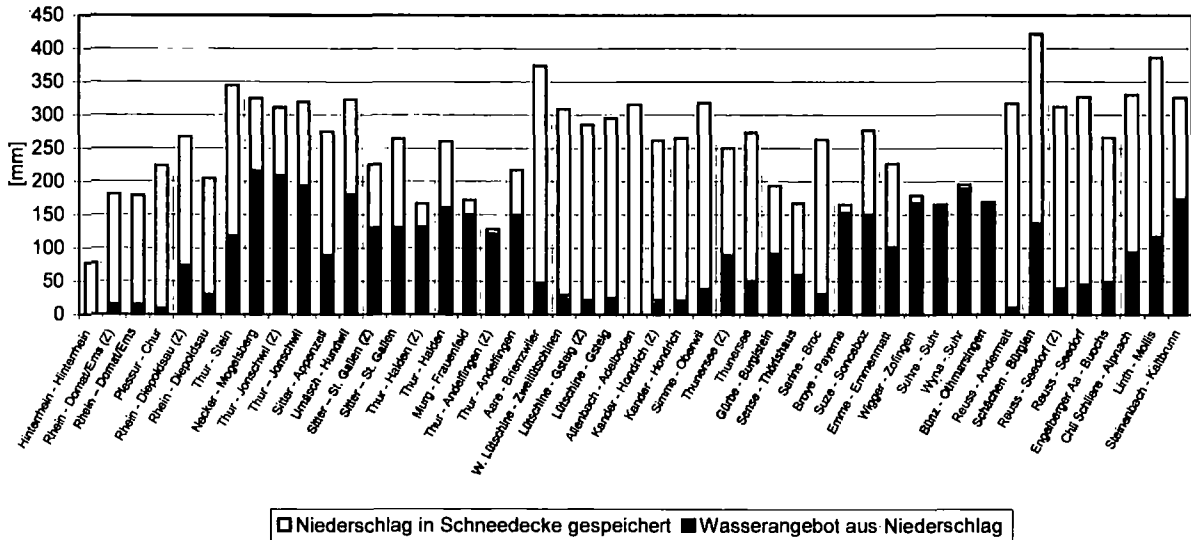


Fig. 5.9: Gebietsniederschläge Februar: Ein Teil des Niederschlags wurde in der Schneedecke gespeichert, der Rest trug zum Wasserangebot bei.

In den Einzugsgebieten im Kanton Aargau (Wigger, Suhre, Wyna, Bünz), der Broye und den tiefergelegenen Teileinzugsgebieten der Thur wurde kaum Wasser in der Schneedecke zurückgehalten. Der grösste Teil des Niederschlags floss noch im Februar ab. Eine Zwischenauswertung des Wasseräquivalents für den 19. Feb. zeigt aber, dass auch hier in der ersten Februarhälfte ein Teil des Niederschlags in der Schneedecke gespeichert wurde. Selbst in den Mittelland-Einzugsgebieten wurden Wasseräquivalentwerte von 100 mm (Wyna) erreicht. Die anschliessende deutliche Erwärmung führte zusammen mit intensiven Niederschlägen vor allem im Mittelland zu einer Hochwassersituation (vgl. Kap. 5.3.1).

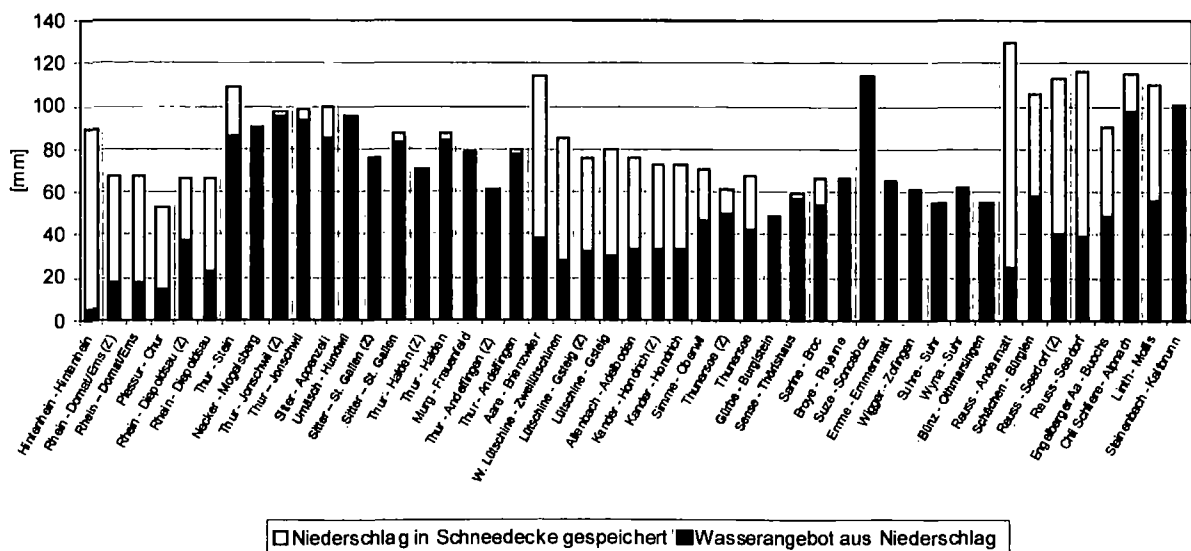


Fig. 5.10: Niederschlag März: in den höhergelegenen Einzugsgebieten wurde ein Teil des Niederschlags in der Schneedecke gespeichert, der Rest trug zum Wasserangebot bei.

Im März lagen die Gebietsniederschläge in allen untersuchten Einzugsgebieten deutlich unter den Werten des Vormonats. Die maximalen Gebietsniederschläge lagen knapp über 100 mm (Fig. 5.10). Wiederum verzeichneten die Teileinzugsgebiete der Thur recht hohe Gebietsniederschläge. In den tiefergelegenen Einzugsgebieten wurde kaum mehr Niederschlag in der Schneedecke zurückgehalten. In den hochgelegenen Gebieten nahm das Wasseräquivalent nochmals deutlich zu (Fig. 9.10). Im Voralpengebiet und im Jura setzte die Schneeschmelze ein. Die Einzugsgebiete der Necker, der Emme, der Suze und der Sense wiesen Schmelzbeträge von 100 - 150 mm auf. Als Folge der intensiveren Schneeschmelze erreichte das Gesamtwasserangebot in den Voralpengebieten Werte von über 150 mm, im Einzugsgebiet der Suze wurde sogar ein Wert von 245 mm erreicht (Fig. 9.11). Die Abflüsse zeigten im März keine grösseren Schwankungen.

Im April fiel wieder bedeutend mehr Niederschlag als im Vormonat. Das Schwergewicht lag im Voralpengebiet, wo der Gebietsniederschlag vielerorts deutlich über 150 mm lag (Fig. 5.11). In den alpinen Einzugsgebieten nahm das Wasseräquivalent nochmals zu und erreichte im Verlauf des Aprils (Fig. 9.12) den maximalen Wert. In den tiefergelegenen Gebieten war der grösste Teil des Niederschlags dem Wasserangebot zuzurechnen. Für das Einzugsgebiet der Chli Schliere übertraf das Wasserangebot aus dem Niederschlag 200 mm. Weitere Einzugsgebiete mit einem hohen Wasserangebot waren die Thur, der Steinenbach, die Emme, die Sense und die Suze. Im April gewann die Schneeschmelze auch in höhergelegenen Einzugsgebieten an Bedeutung. Nach einer ersten Intensivierung zu Beginn des Monats, ging sie während der Abkühlungsphase Mitte Monat zurück. Ab dem 24. April setzte mit der starken Erwärmung eine intensive Schneeschmelze ein. Diese war im Westen intensiver und reichte in grössere Höhen als im Osten (Fig. 9.12). Die höchsten Schmelzbeträge wiesen die Einzugsgebiete der Saane, der Simme, des Allenbaches und des Steinenbaches auf. In diesen Gebieten nahm das Wasseräquivalent im Gebietsdurchschnitt um mehr als 200 mm ab. Auffallend ist, dass in den übrigen Einzugsgebieten die Schmelzbeträge wesentlich tiefer lagen. Sie wiesen alle Werte unter 150 mm auf. Beim Gesamtwasserangebot wiesen die Einzugsgebiete der Chli Schliere, des Allenbaches und der Simme Werte von mehr als 300 mm auf und der Wert der Saane lag nur wenig darunter. Dabei lag der Schmelzanteil in diesen Gebieten, mit Ausnahme der Chli Schliere, um 60 % (Fig. 9.13). Das Gesamtwasserangebot im Allenbach-Einzugsgebiet von 358 mm entspricht ungefähr einem 80-jährlichen Monatsniederschlag der Station Adelboden, die Gebietsschmelze von 220 mm ungefähr einem 2-jährlichen Monatsniederschlag.

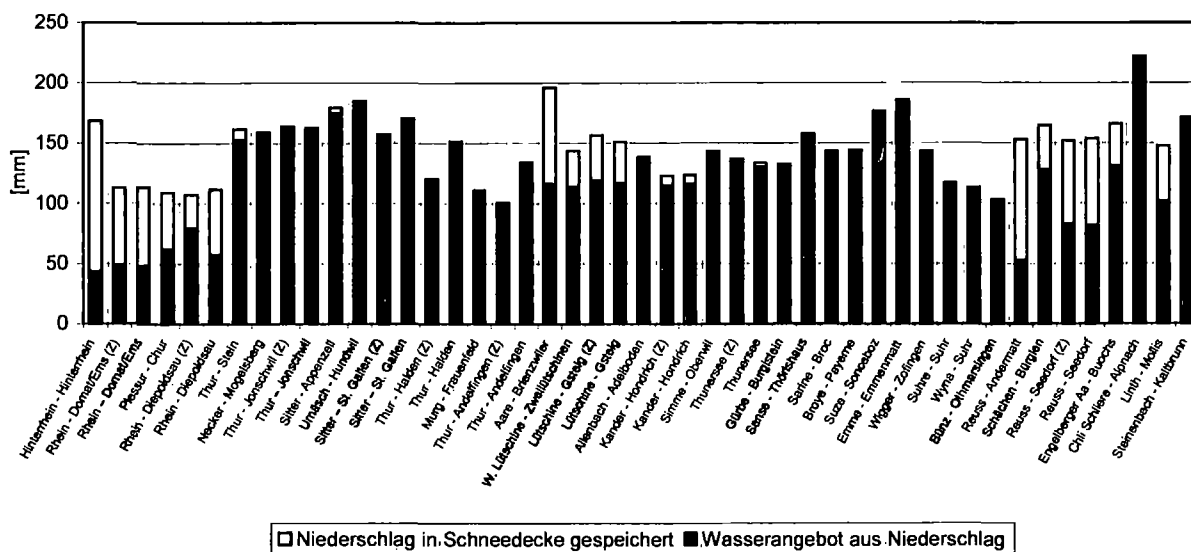


Fig. 5.11: Niederschlag April: Nur noch in den höhergelegenen Einzugsgebieten wurde ein Teil des Niederschlags in der Schneedecke gespeichert, in den anderen Gebieten trug der grösste Teil zum Wasserangebot bei.

In den tiefergelegenen Einzugsgebieten, beispielsweise in der Broye (Fig. 5.12), stiegen die Abflüsse infolge der Niederschläge in der Monatsmitte leicht an. Die Abflüsse aus den voralpinen Einzugsgebieten (z.B. der Schächen) wiesen zu Monatsbeginn einen schmelzbedingten Anstieg auf. Der Temperaturrückgang Mitte Monat führte zu einem Rückgang der Abflüsse. Ab dem 20. April stiegen die Abflüsse aus den höhergelegenen Einzugsgebieten als Folge der wieder einsetzenden Schneeschmelze erneut an.

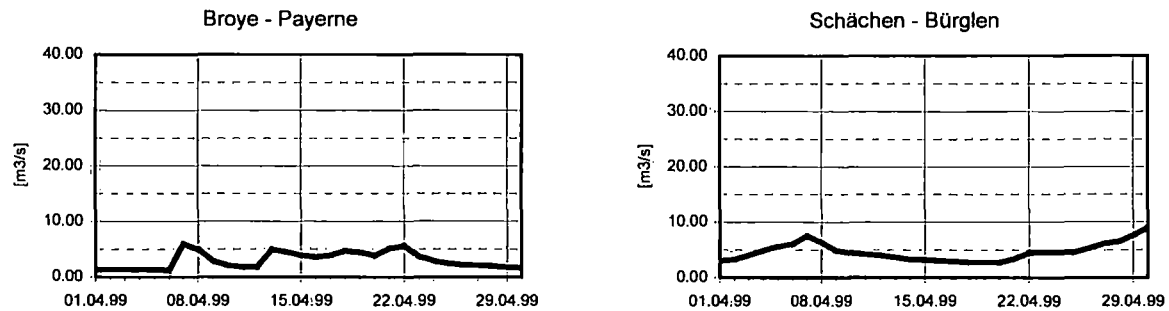


Fig. 5.12: Tagesabflüsse Broye (mittl. Höhe ca. 700 m ü.M.) und Schächen (mittl. Höhe ca. 1714 m ü.M.) für den Monat April. In den Abflüssen des tiefergelegenen Gebietes zeichnen sich die Niederschläge Mitte Monat ab, in denen des höhergelegenen Gebietes die Schmelzperioden zu Beginn und gegen Ende des Monats.

Betrachtet man die Periode zwischen dem 1. Feb. und 30. April 1999 als Ganzes, lässt sich folgendes feststellen (vgl. Tab. 9.3):

- Die höchsten Gebietsniederschläge fielen in den höhergelegenen Teileinzugsgebieten der Thur sowie im angrenzenden Steinenbach, in den Einzugsgebieten der Zentralschweiz sowie in den Einzugsgebieten der Aare-Brienzwiler und der Suze.
- Die höchsten Abflussvolumina verzeichneten höhergelegene Teileinzugsgebiete der Thur und ihre Zubringer, der daran angrenzende Steinenbach und die Suze im Jura. Diese Gebiete zeichnen sich auch durch einen sehr hohen Abflussanteil, bezogen auf das Gesamtwasserangebot aus.
- In den Gebieten mit den höchsten Abflussvolumina lag der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtwasserangebot im Bereich von 30 - 40 %.
- Das Wasseräquivalent der Schneedecke erreichte in den hochgelegenen alpinen Einzugsgebieten Ende April Werte von über einem Meter. Mittlere Werte im Bereich von 500 mm wiesen randalpine Gebiete auf (z.B. Thunersee-Einzugsgebiet, Saane, Engelberger Aa oder Schächen).

In den ersten 9 Tagen des Mai fielen in den untersuchten Einzugsgebieten nur geringe Regenmengen. Die höchsten Gebietsniederschläge mit Werten über 40 mm wiesen die Broye, die Emme, die Sense, die Chli Schliere sowie die drei Aargauer-Einzugsgebiete Wigger, Suhre und Wyna auf. Die Gebietsniederschläge entsprachen in diesen Gebieten auch dem Wasserangebot. Wesentlich höhere Wassermengen lieferte in dieser Periode die Schneeschmelze. In verschiedenen Einzugsgebieten lag das Wasserangebot aus der Schneeschmelze deutlich über 100 mm. Die Gebietschmelze in den ersten fünf Tagen im Mai im Einzugsgebiet des Allenbaches entsprach ungefähr einem 2 jährlichen Niederschlag der Station Adelboden. Vor allem im Berner Oberland sowie im Reuss-, Linth- und Rhein-Einzugsgebiet lag der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtwasserangebot über 80 %. Dies führte vor allem in den randalpinen Gebieten zu einem weiteren Anstieg der Abflüsse.

Am 10. Mai setzte Regen ein, der bis zum 14. Mai andauerte. Am stärksten betroffen waren einmal mehr die Thur und ihre Zuflüsse sowie der angrenzende Steinenbach (Fig. 5.13). Der Gebietsniederschlag erreichte dort Werte um 200 mm. In den Hochwassergebieten des Kantons Aargau betrug der Gebietsniederschlag 100 - 150 mm. Im Thunersee-Einzugsgebiet, in der Saane und Sense lagen die Gebietsniederschläge bei 100 mm. Nur geringe Niederschläge fielen im oberen Rheineinzugsgebiet (Rhein-Donat/Ems 18 mm, Plessur-Chur 13 mm). Innerhalb dieser Niederschlagsperiode war die zeitliche Verteilung unterschiedlich. Im Thur-Einzugsgebiet, im Steinenbach, im Lintheinzugsgebiet und in den Einzugsgebieten im Kanton Aargau fiel der grösste Niederschlagsanteil, ca. 70 %, am 11. und 12. Mai. Im Thunersee-Einzugsgebiet waren die Niederschläge zeitlich gleichmässiger verteilt. Hier fielen in diesen zwei Tagen ca. 50 % des gesamten Niederschlages der Periode.

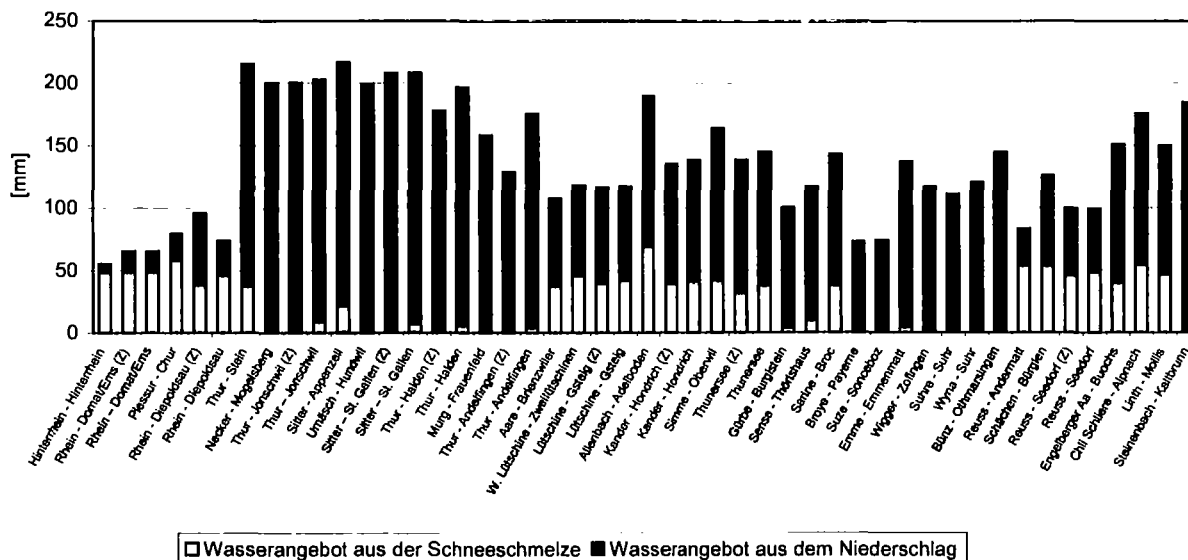


Fig. 5.13: Gesamtwasserangebot für das Hochwasserereignis vom 10. - 14. Mai. Die maximalen Gesamtwasserangebote wurden in den Teileinzugsgebieten der Thur erreicht, wobei die Schneeschmelze nur noch einen geringen Beitrag leistete.

Der Schneeschmelzanteil am Gesamtwasserangebot war in der Ereignisperiode sehr unterschiedlich. In den voralpinen Gebieten betrug er höchstens einige Prozente. In den randalpinen Gebieten (z.B. Thunersee, Engelberger Aa) lag er im Bereich von einem Viertel bis einem Drittel und in den alpinen Gebieten (z.B. Reuss, Rhein) erreichte er Werte von 50 % und mehr, wobei zu beachten ist, dass dort das Gesamtwasserangebot wesentlich tiefer lag, als in den anderen Gebieten. In absoluten Werten bedeutet dies für das Einzugsgebiet Thur-Andelfingen 4 mm, für das Thunersee-Einzugsgebiet 38 mm und für die Reuss-Seedorf 48 mm.

Im Verlauf der Abflusskurven des Ereignisses zeigen sich deutliche Unterschiede. An allen Messstationen des Thur-Einzugsgebietes und im Steinenbach wurden sehr ausgeprägte Abflussspitzen registriert. In den übrigen hier untersuchten Einzugsgebieten waren die Hochwasserspitzen weniger deutlich ausgeprägt (vgl. auch Kap. 2.3). Die Unterschiede in den Abflusskurven widerspiegeln die Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Niederschläge. Ausgeprägte Abflussspitzen weisen Einzugsgebiete auf, in denen am 11./12. Mai deutliche Niederschlagsspitzen auftraten. Diese Kongruenz zeigt auch, dass nur wenig Wasser in den Einzugsgebieten zurückgehalten werden konnte. Dies wird durch die hohen Abflussanteile am Gesamtwasserangebot bestätigt. In den meisten hier betrachteten Gebieten, in denen massgebliche Hochwasser auftraten, betragen diese 80 % und mehr (vgl. Tab. 9.4).

Die Periode vom 15. - 18. Mai war niederschlagsarm. In den höhergelegenen Einzugsgebieten setzte sich die Schneeschmelze fort, wenn auch nicht mehr so intensiv wie anfangs Mai. Am 19. Mai setzte erneut Niederschlag ein, der sich in verschiedenen Gebieten bis zum 22. Mai hinzog. Die grössten Niederschlagsmengen fielen erneut im Thur-Einzugsgebiet (Fig. 5.14). Der höchste Gebietsniederschlag wurde mit 194 mm für das Einzugsgebiet Thur-Stein ermittelt. Grosse Niederschlagsmengen fielen auch in den angrenzenden Gebieten, z.B. Linth (133 mm) oder Rhein zwischen Domat/Ems und Diopoldsau (120 mm, nur Anteil Schweiz). Der Hauptteil des Niederschlags fiel am 21. Mai. In den stark berechneten Gebieten fielen an diesem Tag zwei Drittel bis drei Viertel des gesamten Niederschlags. Der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtwasserangebot war bei diesem Ereignis nur noch gering. Im Einzugsgebiet Rhein-Diopoldsau erreichte er gerade noch 10 %, im Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen war er mit 1 % vernachlässigbar. Dies ist einerseits auf die zunehmende Ausaperung der Einzugsgebiete zurückzuführen, andererseits sank die Schneefallgrenze während des Ereignisses auf eine Höhe von ca. 2200 m ü.M. ab.

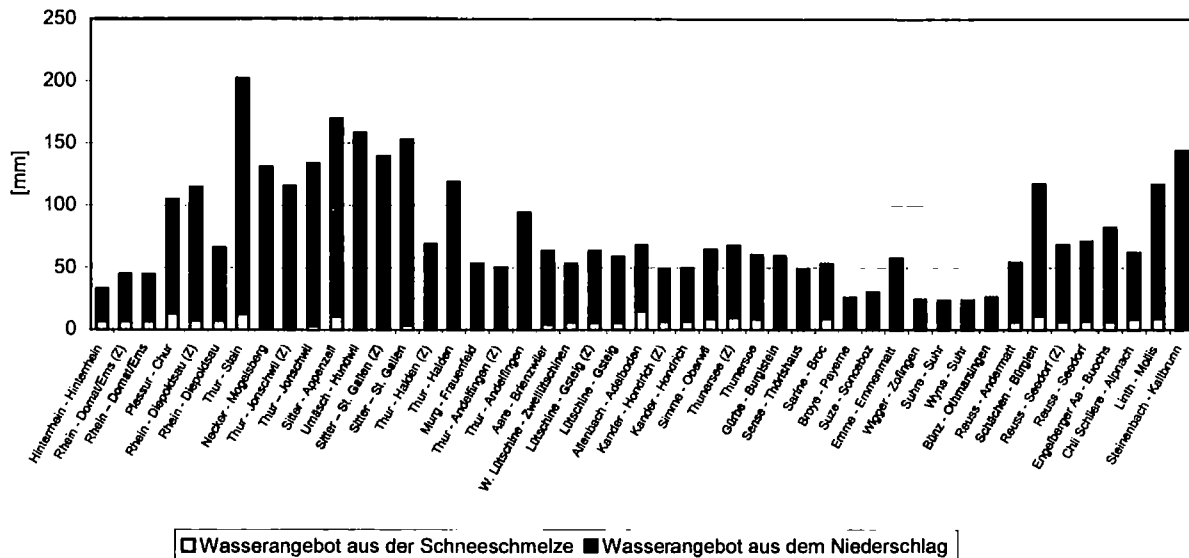


Fig. 5.14: Gesamtwasserangebot für das Hochwasserereignis vom 19. - 22. Mai. Erneut wurden in den Thur-Teileinzugsgebieten die höchsten Werte registriert.

Wie schon im ersten Ereignis stiegen die Abflüsse an den verschiedenen Messstellen der Thur und ihrer Zuflüsse sehr rasch und stark an, wobei die höchsten Abflüsse in den obersten Teileinzugsgebieten auftraten. Der Anteil des Abflusses am Gesamtwasserangebot lag dort beim zweiten Ereignis eher noch höher als beim ersten. Nach Westen hin nahm die Ausprägung des Hochwassers schnell ab. Im Schächen und in der Engelberger Aa wurde noch ein deutlicher Anstieg der Abflüsse verzeichnet, weiter westlich reagierten die Abflüsse kaum mehr.

Im Verlaufe des Monats Mai wurde die Schneedecke in den höhergelegenen Einzugsgebieten massiv abgebaut. Die Gebietsschmelze erreichte in den Einzugsgebieten des Rheins, der Linth, der Reuss und des Thunersees Werte zwischen 200 und 300 mm (vgl. Fig. 9.16). Entsprechend hoch war der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtwasserangebot. In den erwähnten Gebieten lag dieser im Monatsmittel zwischen knapp 50 und 60 % (Fig. 9.17). In den voralpinen Gebieten war der Anteil der Schneeschmelze aber kaum mehr von Bedeutung.

In der ersten Junihälfte wiesen das Rhein-Einzugsgebiet, Teile des Thur-Einzugsgebietes und die Reuss-Andermatt die höchsten Gebietsniederschläge auf. Neben dem Niederschlag war in den höhergelegenen Gebieten die wieder verstärkt einsetzende Schneeschmelze von Bedeutung (Fig. 9.18). Die höchsten Gesamtwasserangebote wiesen daher das Rhein-Einzugsgebiet (Rhein-Diepoldsau: 303 mm - nur Schweiz), die Reuss-Seedorf (268 mm) mit ihren Zuflüssen und die Linth-Mollis (254 mm) auf. Der Anteil der Schneeschmelze lag in diesen Gebieten zwischen 40 und 50 % (Fig. 9.19). Die mittleren Wasseräquivalent-Werte lagen Mitte Juni in diesen Gebieten noch immer im Bereich von 300 mm (Linth) bis 600 mm (Reuss).

Die Abflüsse aus den hochgelegenen Einzugsgebieten stiegen in der ersten Junihälfte nochmals leicht an oder verharrten auf hohem Niveau. In den tiefergelegenen Einzugsgebieten gingen die Abflüsse zurück, wobei vor allem in den Thur-Teileinzugsgebieten und im Steinbach mehrere deutlich ausgeprägte niederschlagsbedingte Abflussspitzen zu verzeichnen waren. Dies deutet auf eine nach wie vor hohe Abflussbereitschaft hin, auch wenn die Abflussspitzen unter den Spitzen der beiden Mai-Ereignisse lagen.

5.2.3 MASSGEBENDE PROZESSE

Aufgrund des zeitlichen Verlaufs und der räumlichen Ausprägung der Ereignisse wurde versucht, Hinweise auf Zusammenhänge und Prozesse zu finden, die das Abflussgeschehen wesentlich beeinflusst haben.

In den untersuchten Gebieten lagen die Gebietsniederschläge, über die ganze Periode betrachtet, zwischen 600 und gut 1200 mm (Fig. 5.15), was in vielen Fällen 60 - 70 % des mittleren Jahresniederschlags entspricht. Das Mittelland wies die niedrigsten, die östlichen Voralpen die höchsten Werte auf, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Gebietsniederschlag in den höhergelegenen Gebieten unterschätzt wurde.

Im Weiteren zeigt Fig. 5.16 deutliche Unterschiede im Anteil des Niederschlages, der nicht in der Schneedecke zwischengespeichert wurde (Wasserangebot aus Niederschlag). Dabei ist zu beachten, dass es sich nicht um eine Bilanzierung über ganze Einzugsgebiete und die ganze Untersuchungsperiode handelt, sondern um eine prozessbezogene Auswertung für jede Rasterzelle in Monatsschritten (vgl. Kap. 5.2.1).

Die Zwischenspeicherung ist erwartungsgemäss stark mit der Höhe der Einzugsgebiete korreliert (vgl. Fig. 5.16). Andere Abhängigkeiten, z.B. ein West-Ost-Gradient, scheinen zumindest in der analysierten Periode keine Rolle gespielt zu haben. In Einzugsgebieten mit einer mittleren Höhe von über 1500 m ü.M. wurden mindestens 30 % des Niederschlages in der Schneedecke zwischengespeichert, oberhalb 2000 m ü.M. sogar die Hälfte. Darin sind Zwischenspeicherungen, die innerhalb eines analysierten Zeitabschnittes stattgefunden haben, nicht enthalten (z.B. Februar oder April).

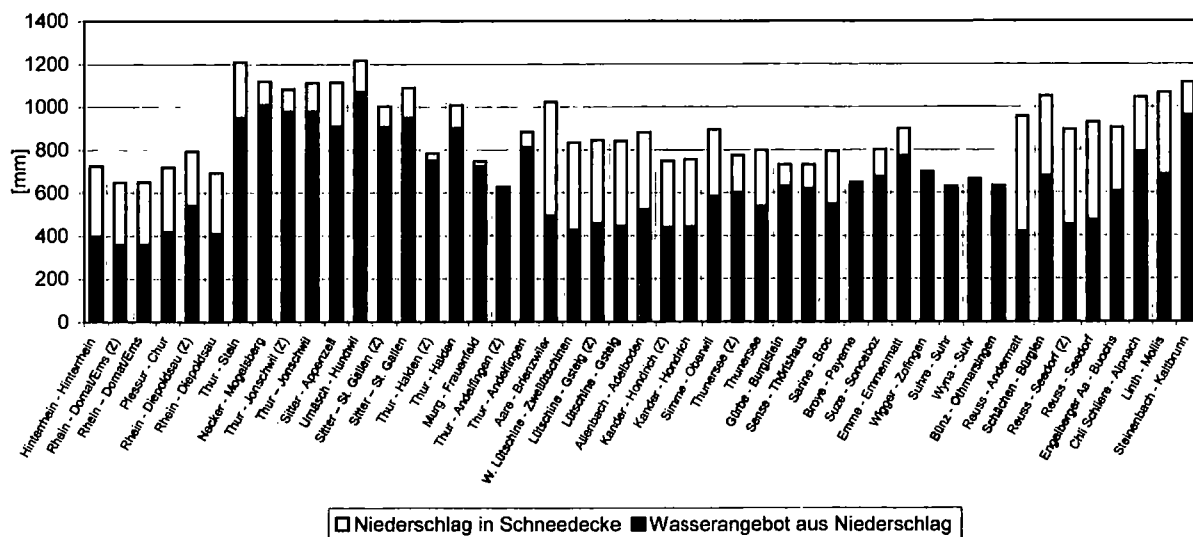


Fig. 5.15: Summe der Monatsniederschläge, aufgeteilt in Wasserangebot aus Regen und Speicherung in der Schneedecke. In den Einzugsgebieten des Mittellandes und der Voralpen ist die Zwischenspeicherung in der Schneedecke von untergeordneter Bedeutung.

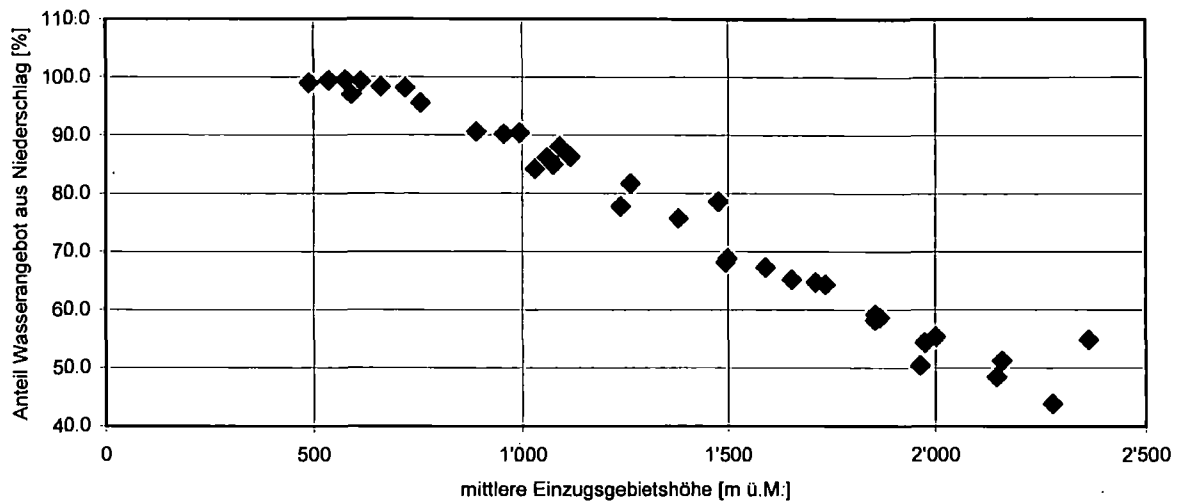


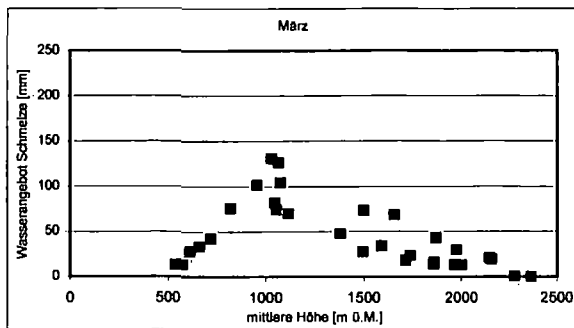
Fig. 5.16: Direktes Wasserangebot aus dem Niederschlag in Abhängigkeit der mittleren Einzugsgebietshöhe (Betrachtungsperiode: 1. Feb. - 16. Juni 1999).

Der Abbau des Schneedeckenspeichers durch die Schneeschmelze ist durch den Energie-Input aus der Atmosphäre limitiert, welcher in einer ersten Näherung durch die Temperatur beschrieben wird. Deshalb nimmt die Schneeschmelze an einzelnen Stationen mit zunehmender Höhe über Meer ab (vgl. Kap. 4.2.2). Stellt man aber das Wasserangebot aus der Schneeschmelze aus ganzen Einzugsgebieten der mittleren Höhe dieser Gebiete gegenüber (vgl. Fig. 5.17), zeigt sich einzig in den Monaten März und April ein entsprechender Trend. Im Juni nimmt die Schneeschmelze sogar mit zunehmender Höhe zu. Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin, dass die Schneeschmelze in einem Einzugsgebiet nicht nur durch den Energie-Input begrenzt ist. Dieser bestimmt die Obergrenze der Fläche unter Schmelzbedingungen sowie die Schmelzrate in dieser Fläche. Die Untergrenze der Fläche unter Schmelzbedingungen wird durch die fortschreitende Ausaperung gebildet. Dementsprechend zeigt Fig. 5.18 für alle Monate einen engen Zusammenhang zwischen dem von der Schmelze betroffenen Flächenanteil und dem Wasserangebot aus der Schneeschmelze. Eine grosse beitragende Fläche erfordert, dass grosse Teile eines Einzugsgebietes schneebedeckt sind und dass auf dieser Fläche auch ein Schneedeckenabbau stattfindet. Beides war im Frühling 1999 der Fall. Die grossen Schneemengen oberhalb ca. 1500 m ü.M. und der rasche Anstieg der Nullgradgrenze in der zweiten Aprilhälfte führten dazu, dass grosse Höhenbereiche von der Schneeschmelze betroffen waren. Besonders empfindlich reagierten dabei Einzugsgebiete mit einem grossen Flächenanteil in einem engen Höhenbereich. Dies zeigt ein Vergleich verschiedener Einzugsgebiete bezüglich der Schmelze im Monat April (Fig. 5.19). Die Saane, die Simme und der Allenbach wiesen Wasserangebote aus der Schneeschmelze von 210 - 220 mm auf, die Engelberger Aa und der Schächen dagegen nur 107 bzw. 120 mm. Die mittlere Höhenlage der fünf Einzugsgebiete ist vergleichbar, die Einzugsgebiete mit den hohen Schmelzbeträgen weisen aber flachere hypsometrische Kurven auf, als die beiden anderen Gebiete. Dies schlägt sich in der beitragenden Fläche nieder: In den Einzugsgebieten des westlichen Berner Oberlandes sind es 87 bis 100 %, in den anderen Gebieten 60 bzw. 66 %.

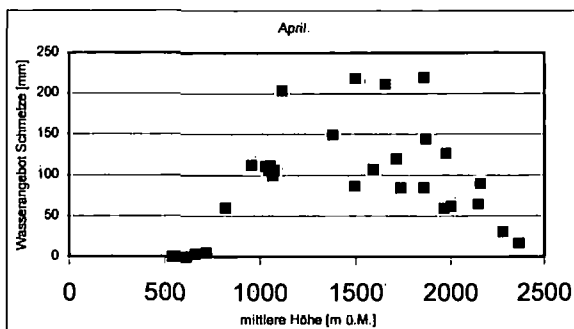
Dass die Schneeschmelze auf die Hochwasserereignisse im Mai generell einen Einfluss hatte, zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung von Ereignisniederschlag und Abfluss einerseits und Gesamtwasserangebot und Abfluss andererseits (Fig. 5.20). Die Abflüsse werden durch das Gesamtwasserangebot besser erklärt, als durch den Niederschlag alleine. Dies zeigt auch eine statistische Auswertung: Beim Auffahrtseignis resultiert bei Verwendung des Niederschlags ein Bestimmtheitsmass von 0.75 gegenüber 0.81 bei Gebrauch des Gesamtwasserangebotes. Beim Pfingstereignis beträgt das Bestimmtheitsmass 0.79 bzw. 0.83. Beim zweiten Ereignis liefert also der Einbezug der Schneeschmelze einen etwas geringeren Erklärungsbeitrag als beim ersten, was auch leicht mit der Tatsache vereinbar ist, dass mit fortschreitender Jahreszeit die vorhandenen Schneereserven abnehmen.

Ein Vergleich des während des Auffahrtseignisses (12. - 15. Mai) abgeflossenen Anteils am Gesamtwasserangebot mit der Vorgeschichte lässt keine differenzierten Aussagen zum Einfluss der Vorgeschichte auf das Abflussgeschehen zu (Fig. 5.21). Das bedeutet aber nicht, dass kein solcher Zusammenhang

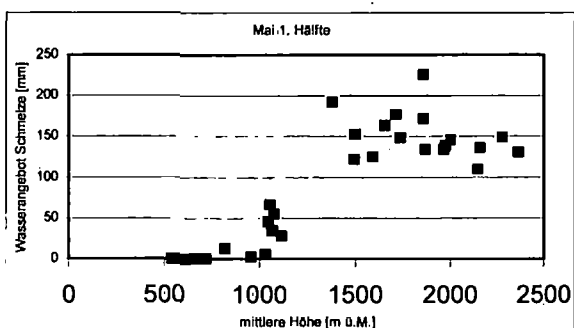
besteht. Die hohen Abflussanteile deuten vielmehr darauf hin, dass auch relativ geringe Wassermengen aus Niederschlag und Schneeschmelze genühten, um eine hohe Abflussbereitschaft zu erhalten.



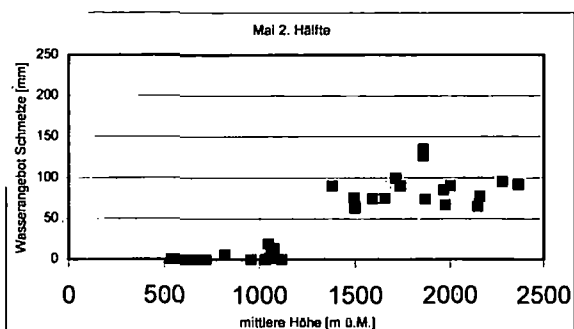
Die Zunahme des Wasserangebotes aus der Schneeschmelze mit der Höhe ist auf die beschränkten Schneereserven bis in eine Höhe von 1000 m ü.M. zurückzuführen. Oberhalb 1500 m ü.M. ist aufgrund des limitierten Energieinputs die Schneeschmelze noch kaum in Gang gekommen.



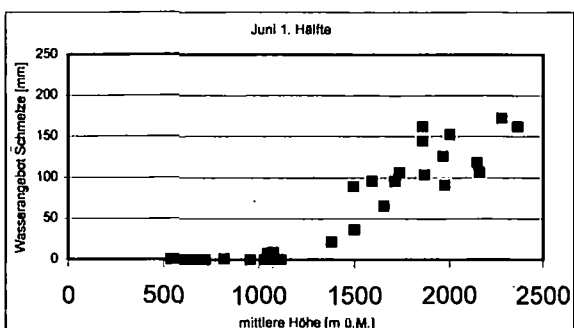
Der Einfluss der Ausaperung wirkt sich bis in eine Höhe von 1000 m ü.M. aus. Oberhalb weisen die Gebietsschmelzen eine grosse Streuung auf, die über die Höhe nicht erklärt werden kann. Erst oberhalb 2000 m ü.M. zeichnet sich die limitierende Wirkung des Energie-Inputs ab.



Einzugsgebiete mit einer mittleren Höhe < 1000 m ü.M. sind weitgehend ausgeapert. Oberhalb 1500 m ü.M. weisen die Gebietsschmelzen eine durch die Höhenlage nicht zu erklärende Streuung auf.



Die Situation ist mit jener in der ersten Monatshälfte vergleichbar. Einziger Unterschied ist, das die tieferen Temperaturen generell tiefere Schmelzraten zur Folge hatten.



Die zunehmende Ausaperung wird zum dominierenden Faktor. Eine Limitierung durch den Energieinput ist nicht mehr erkennbar.

Fig. 5.17: Wasserangebot aus der Schneeschmelze in Abhängigkeit der mittleren Einzugsgebietshöhe.

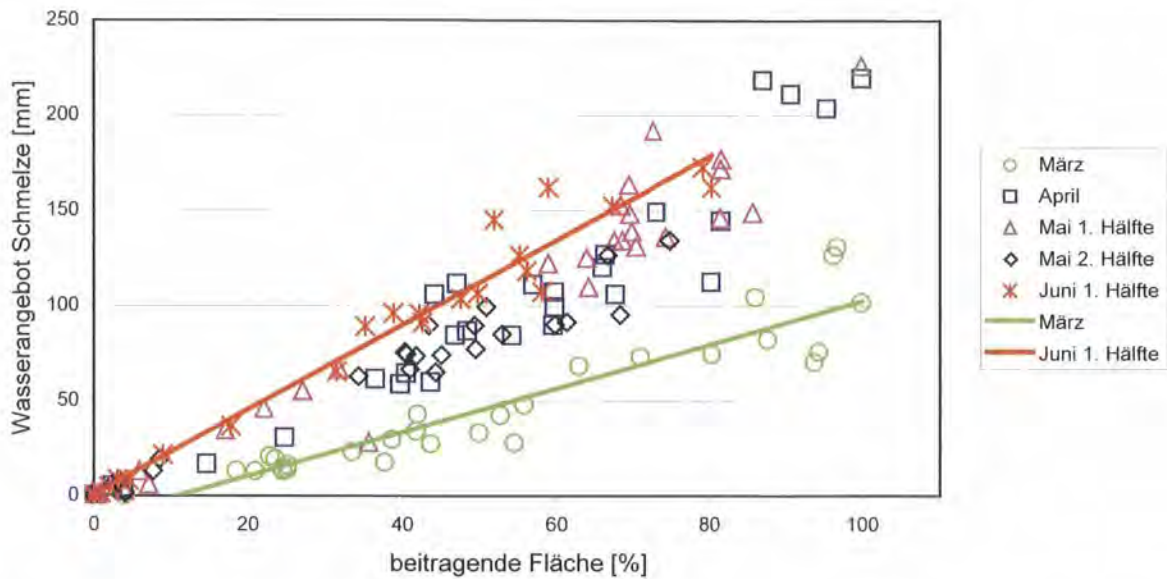


Fig. 5.18: Beitragende Fläche und Wasserangebot aus der Schneeschmelze. In allen betrachteten Zeitabschnitten besteht ein enger Zusammenhang zwischen den beiden Parametern.

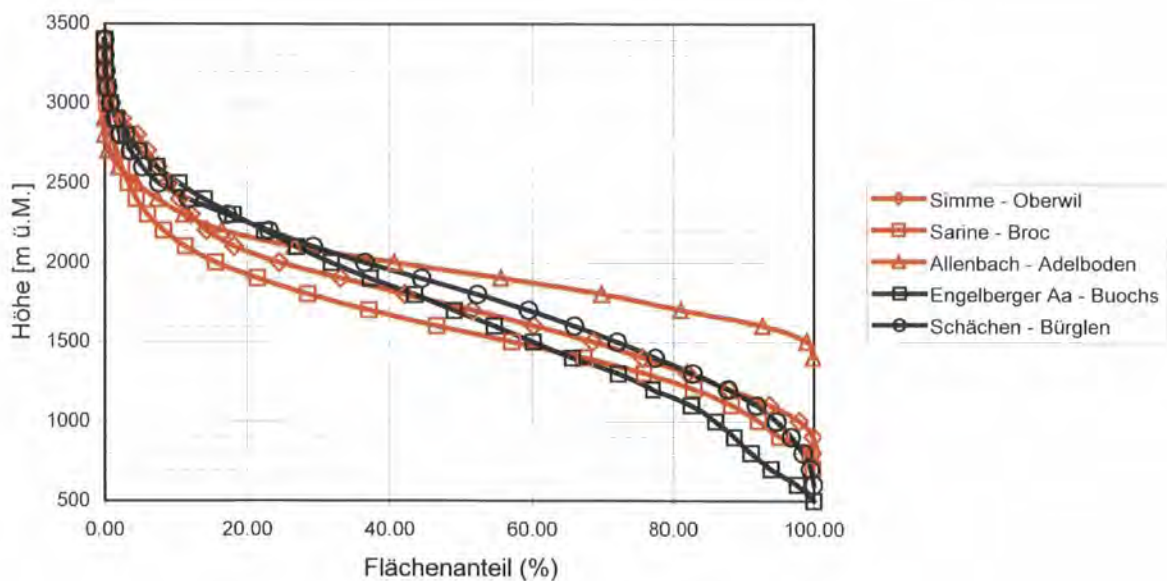


Fig. 5.19: Vergleich der hypsometrischen Kurven für 5 vom Hochwasser im Mai 1999 betroffene Gebiete. Simme, Sarine und Allenbach wiesen ein wesentlich höheres Wasserangebot aus der Schneeschmelze auf, als die Engelberger Aa und der Schächen. Dies ist auf einen grösseren Flächenanteil im kritischen Höhenbereich von 1300 - 2000 m ü.M. zurückzuführen.

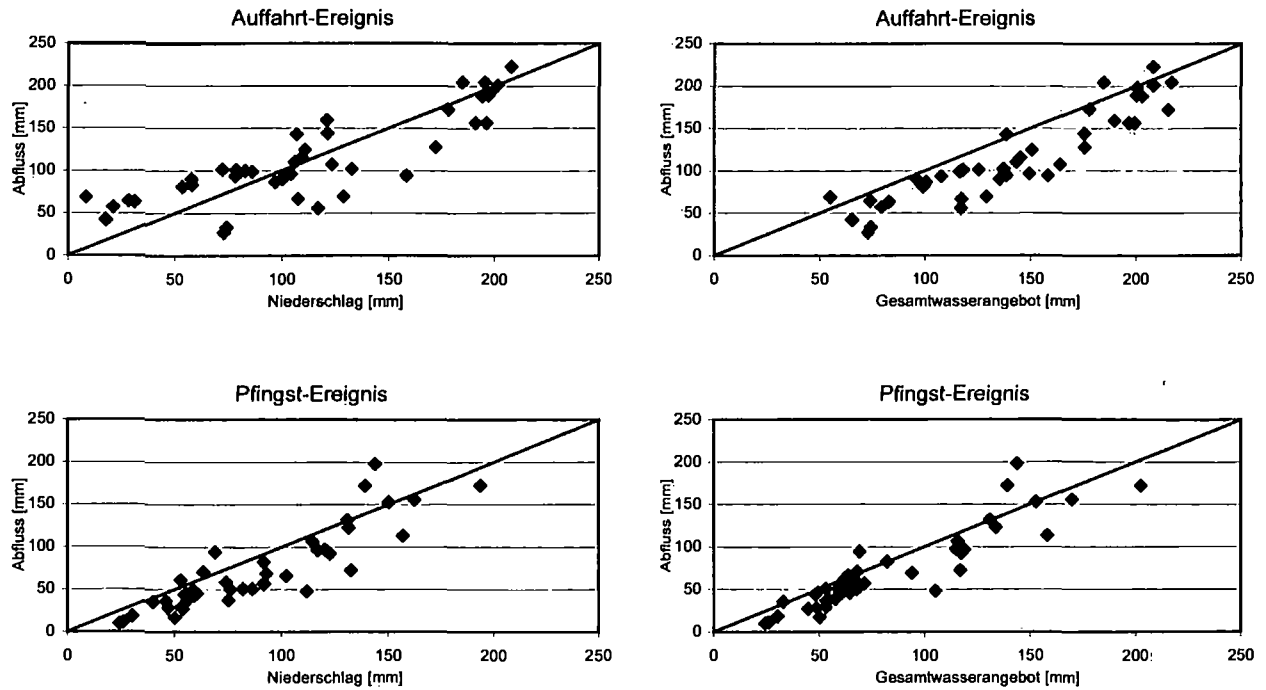


Fig. 5.20: Gegenüberstellung Niederschlag bzw. Gesamtwasserangebot und Abfluss für Auffahrt- und Pfingstereignis. Der Abfluss wird durch das Gesamtwasserangebot besser erklärt, als durch den Niederschlag allein.

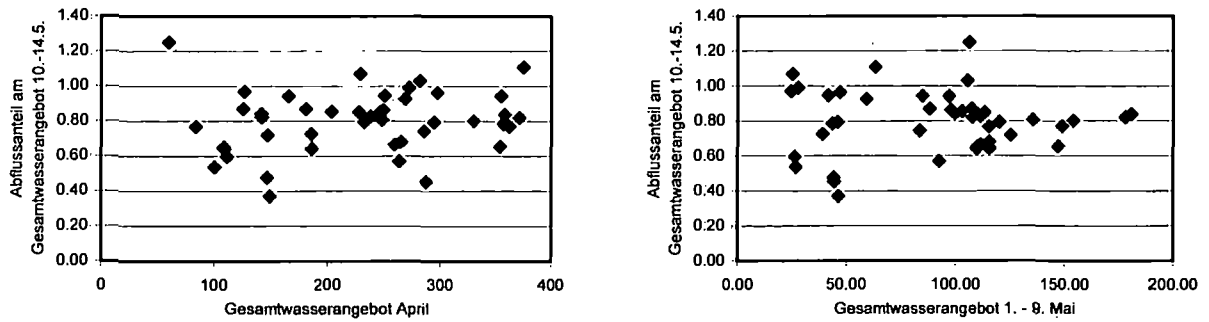


Fig. 5.21: Einfluss der hydrologischen Vorgeschichte auf das Ereignis vom 12. - 15. Mai 1999. Der Abflussanteil am Gesamtwasserangebot zeigt bei diesem Ereignis keinen Zusammenhang mit der hydrologischen Vorgeschichte. Die hohen Abflussanteile machen aber deutlich, dass die Abflussbereitschaft in den untersuchten Einzugsgebieten generell sehr hoch waren.

5.3 FALLBEISPIELE

Peter Mani, Urs Steinegger

5.3.1 DER EINFLUSS DER SCHNEEDECKE AUF DAS MITTELLANDHOCHWASSER IM FEBRUAR 1999

Nachfolgend wird anhand des Ereignisses vom 20. - 22. Feb. ein Spezialfall der Schneeschmelze erläutert, der auftritt, wenn im Mittelland eine geschlossene Schneedecke liegt und diese während einem Starkniederschlag mit ansteigender Schneefallgrenze abschmilzt.

Die intensiven Niederschläge vom 16. - 24. Feb. (Kap. 3.1) fielen ab dem 19. Feb. bis in eine Höhenlage von 1500 m ü.M. als Regen. Zuvor wurden Schneefälle bis in die Niederungen beobachtet. Das gesamte Mittelland wies zu dieser Zeit eine kompakte Schneedecke mit einem Wasseräquivalent von etwa 30 bis 80 mm auf. Ab dem 19. Feb. wurde diese Schneedecke rasch abgebaut.

Zu Beginn des Regenereignisses wurde der flüssige Niederschlag wie von einem Schwamm zurückgehalten. Nachdem der Speicher voll war und die Schneedecke abgebaut wurde, reduzierte sich das Speichervolumen und das Wasser aus dem Speicher, Regen- und Schmelzwasser wurden rasch abflusswirksam. Dies führte vornehmlich in Einzugsgebieten mit flacher Hypsographie und geringer Schneemächtigkeit ($WE < 100$ mm) zu sogenannten Taufluten.

Bis zum 22. Feb. war das Gebiet bis gegen 700 m ü.M. ausgeapert. Schmelzmengen von gegen 80 mm traten in der Höhenlage zwischen 500 und 900 m ü.M. verbreitet auf. Die grösste Schmelzmenge von 120 mm wurde in Adelboden (1320 m ü.M.) bestimmt. Begünstigt wurde der Schmelzprozess in exponierten Lagen, wo restliche Kaltluft durch die feucht-warmen Nordwestwinde effizient ausgeräumt wurde und durch die anhaltenden, zum Teil ergiebigen Regenfälle. In einigen voralpinen und alpinen Einzugsgebieten betrug der Gebietsniederschlag zwischen dem 20. und 22. Feb. mehr als 100 mm, mit maximalen Tageswerten um 50 mm. In den Einzugsgebieten des Mittellandes war die Niederschlagssumme deutlich geringer. Sie erreichte für die drei Tage Werte den Bereich von 40 - 50 mm. Die Gebietsniederschläge allein sagen aber noch wenig aus, da in den höhergelegenen Gebieten der Niederschlag in Form von Schnee fiel, und statt zu einem Hochwasser zu einer prekären Lawinensituation führte. Hohe Wasserangebote aus dem Niederschlag ergaben sich für die Thur-Einzugsgebiete, den Steinenbach und die Suze. Ein Vergleich mit der Flächen-Mengen-Dauer-Beziehung von Grebner und Roesch (1998) zeigt, dass das Gesamtwasserangebot von 130 mm für das Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen einem Niederschlag mit einer Wiederkehrperiode von ungefähr 2 Jahren entspricht. Für das Einzugsgebiet der Necker-Mogelsberg entsprechen die 182 mm Gesamtwasserangebot einem ungefähr 5-jährlichen Gebietsniederschlag. In diesen Gebieten fielen Schneeschmelze und intensive Niederschläge zusammen. Dies führte in verschiedenen Einzugsgebieten zu einem sehr hohen Gesamtwasserangebot (Fig. 5.22). Werte von über 150 mm erreichten die Thur-Jonschwil, die Urnäsch, die Necker, der Steinenbach und die Suze. Der Anteil der Schneeschmelze lag in diesen Gebieten zwischen 40 und 50 %. Im Mittelland und im westlichen Voralpengebiet, wo die Niederschläge geringer waren, lag das Gesamtwasserangebot im Bereich von 100 mm und mehr. Hier lag der Anteil der Schneeschmelze in den meisten Fällen über 50 %.

Hochwasserabflüsse traten vor allem in den Mittelland-Einzugsgebieten und im Jura auf (Fig. 5.22). Die Hochwassersituation dauerte über vier Tage an. Besonders deutlich ausgeprägt war das Hochwasser in der Thur und in ihren Teileinzugsgebieten. Sogar das höchstgelegene Teileinzugsgebiet, Thur-Stein zeigt noch einen deutlichen Anstieg im Abfluss. Dass diese Region besonders stark reagierte, zeigt sich auch daran, dass der Bodensee von zunächst unterdurchschnittlichen Werten um über 50 cm auf ein für diese Jahreszeit deutlich überdurchschnittliches Niveau anstieg, obwohl der Rhein kaum höhere Abflüsse aufwies.

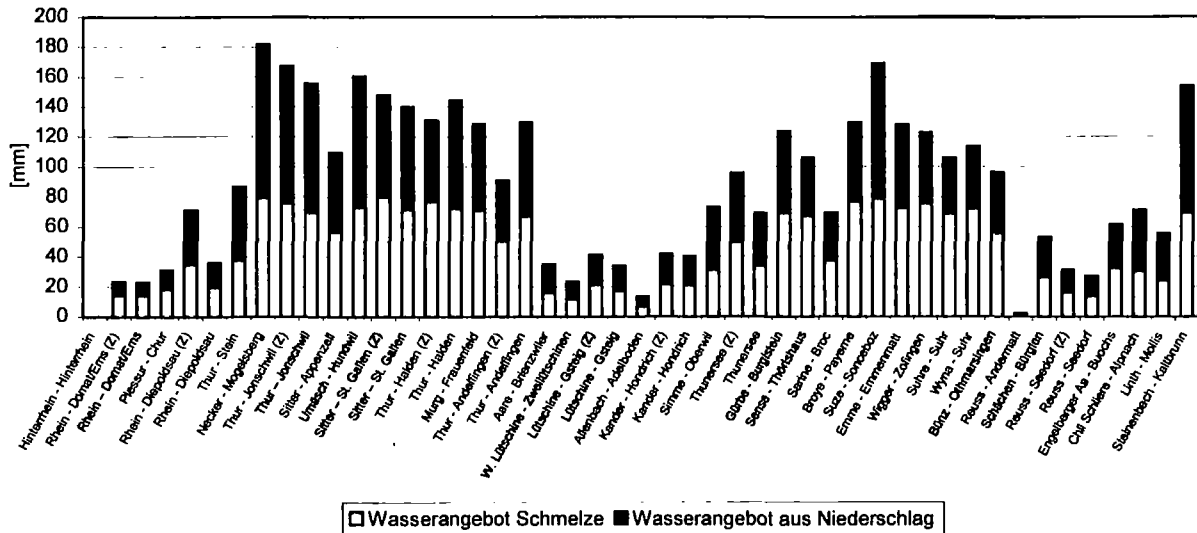


Fig. 5.22: Gesamtwasserangebot für das Hochwasserereignis 20. - 22. Feb.

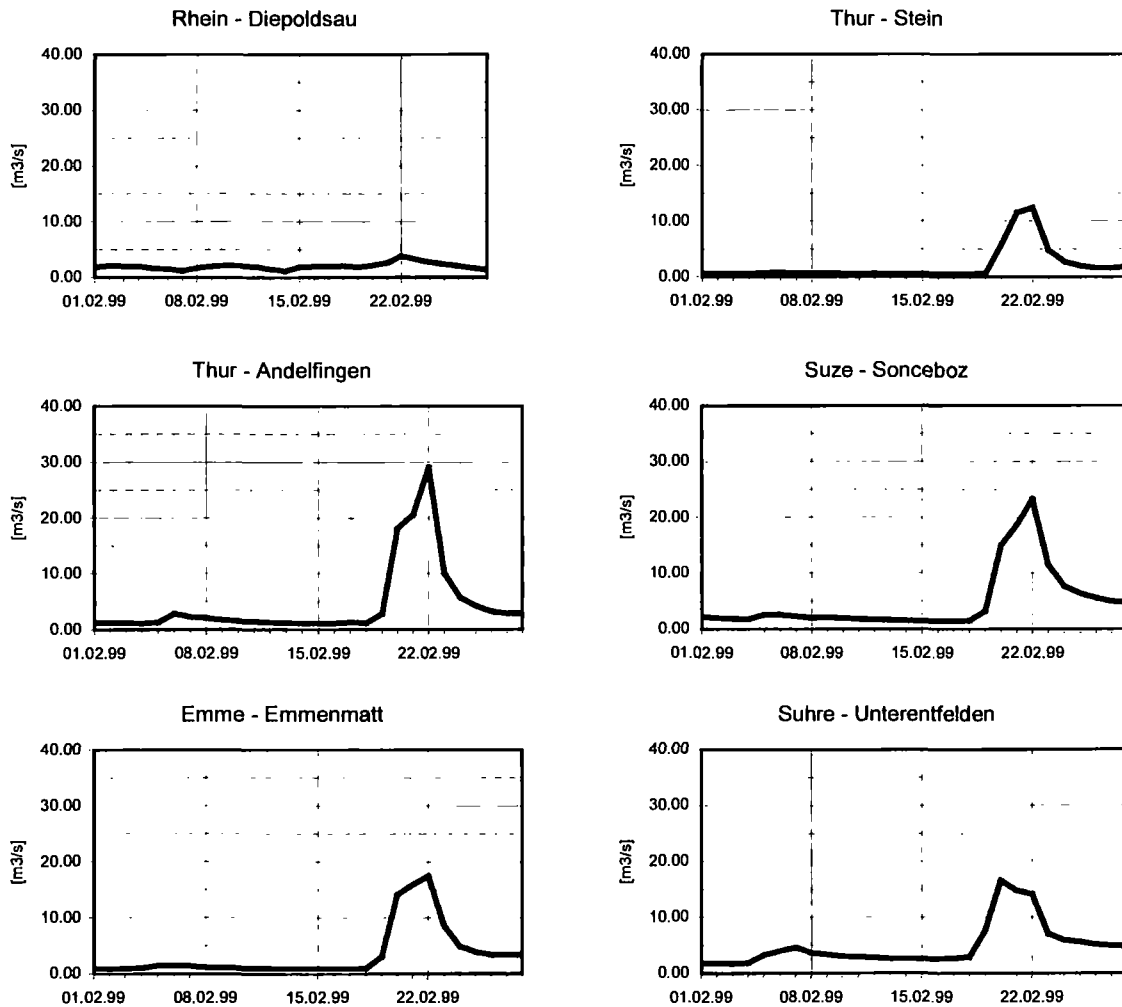


Fig. 5.23: Tagesabflüsse von ausgewählten Einzugsgebieten im Februar.

Der Vergleich des Gesamtwasserangebotes für die Periode vom 20. - 22. Feb. mit dem Abflussvolumen vom 20. - 24. Feb. ergibt für das Thur-Einzugsgebiet Abflussanteile von 40 bis 50 %, für die übrigen von Hochwasser betroffenen Gebiete Werte zwischen 30 und 40 %. Dieser für Hochwasserverhältnisse im Winter relativ niedrige Anteil des Abflusses am Gesamtwasserangebot könnte ein Hinweis dafür sein, dass das Gesamtwasserangebot eher überschätzt wurde.

Die am Abend des 22. Feb. einsetzende Abkühlung mit Schneefällen bis in die Niederungen brachte eine rasche Beruhigung der Lage an den betroffenen Gewässern.

5.3.2 FALLSTUDIE THUR UND THUNERSEE

Die Fallstudie hat zum Ziel, anhand einer detaillierteren Analyse und eines Vergleichs der beiden Gebiete, eine weitere Differenzierung bezüglich der relevanten Prozesse vorzunehmen. Die Analysen basieren auf dem in Kap. 5.2 erläuterten Datenmaterial. Bei der Thur wurden neben dem Einzugsgebiet Thur-Andelfingen sieben weitere Teileinzugsgebiete ausgewertet. Beim Thunersee wurde das Einzugsgebiet des Brienersees nur über die gemessenen Zuflüsse in den Thunersee berücksichtigt. Die Aussagen zu den Prozessen in den Einzugsgebieten gelten nur für jene Gebiete, die direkt in den Thunersee entwässern. In diesem Einzugsgebiet wurden drei weitere Messstationen ausgewertet. Anstelle des Abflusses wurden für den Thunersee die von der Landeshydrologie und –geologie aus der Veränderung des Seespiegels und dem Ausfluss berechneten Seezuflüsse verwendet.

Vorgeschichte

In den Monaten Februar bis April fielen im Thur-Einzugsgebiet 423 mm Niederschlag, wovon ungefähr 360 mm nicht in der Schneedecke zwischengespeichert wurden. Zu Beginn der Untersuchungsperiode betrug das Wasseräquivalent der Schneedecke 66 mm. Bis Mitte Februar stieg es auf den maximalen Wert von 168 mm an. Ende März war der im Februar in der Schneedecke gespeicherte Niederschlag wieder geschmolzen, was sich auch darin zeigt, dass sich in Fig. 5.24 die Kurven des aufsummierten Gesamtwasserangebotes und des aufsummierten Niederschlages schneiden. Im April setzte sich der Abbau der Schneedecke fort, so dass das Wasseräquivalent Ende Monat lediglich noch 27 mm betrug.

Die Auswertungen für das Thunersee-Einzugsgebiet ergeben für die Monate Februar bis April einen Gebietsniederschlag von 475 mm. Knapp 50 % wurden nicht in der Schneedecke zwischengespeichert, sondern können dem Wasserangebot aus dem Niederschlag zugewiesen werden (Differenz zwischen Gesamtwasserangebot und Schneeschmelze in Fig. 5.24). Das Wasseräquivalent betrug anfangs Februar gut 250 mm. Bis Ende Februar stieg es auf ca. 650 mm, und verhartete bis Ende März auf ungefähr gleichem Niveau. Dem Anstieg des Wasseräquivalents um 400 mm steht ein Gebietsniederschlag von 217 mm gegenüber, was wiederum zeigt, dass die Niederschläge im Februar unterschätzt wurden (vgl. Kap. 5.2.2). Dies wird auch dadurch bestätigt, dass die aufsummierten Zuflüsse in den Thunersee bis Ende März das Gesamtwasserangebot übertreffen. Die Unterschätzung der Niederschläge ist in den höhergelegenen Teileinzugsgebieten wesentlich grösser als in den tiefergelegenen.

Im April setzte auch im Thunersee-Einzugsgebiet der Abbau der Schneedecke ein. Ende Monat betrug das Wasseräquivalent noch 500 mm. Es betrug damit das knapp 20-fache des Wasseräquivalents im Thur-Einzugsgebiet. Im Einzugsgebiet des Thunersees waren die hydrologischen Bedingungen Ende April demnach noch stark von den grossen Niederschlagsmengen im Februar geprägt, während sich im Thur-Einzugsgebiet die Schneefälle des Februars höchstens noch in Form einer hohen Bodensättigung auswirkten.

Dies wirkte sich dann vor allem in den ersten Mai Tagen aus. Diese waren niederschlagsarm und durch hohe Temperaturen gekennzeichnet. Die Schneeschmelze war entsprechend intensiv. Im Thur-Einzugsgebiet beschränkte sich diese aber nur noch auf die höchstgelegenen 10 % des Einzugsgebietes. Im Einzugsgebiet der Thur-Stein reduzierte sich das Wasseräquivalent täglich um 10 - 20 mm, im Einzugsgebiet der Sitter-Appenzell noch um ca. 10 mm (Fig. 5.25). Auf das ganze Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen machte dies indes nur noch 1 - 2 mm aus. Das Gesamtwasserangebot betrug zwischen dem 1. und dem 9. Mai ungefähr 40 mm, wovon rund 80 % in der gleichen Periode zum Abfluss kamen.

Im Thunersee-Einzugsgebiet waren demgegenüber grosse Teile von der Schneeschmelze betroffen. Auswertungen mit Hilfe eines Schneeschmelz-Modelles (vgl. Mani, 2000) zeigen, dass in der Periode vom 22. April zum 9. Mai ca. 180 mm schmolzen, was einer täglichen Schmelzrate von 10 mm entspricht (vgl. auch Fig. 5.26). Maximale Tageswerte lagen, bezogen auf das ganze Einzugsgebiet des Thunersees, knapp unter 20 mm. In dieser Periode wurden an der Untergrenze des Schmelzbereichs Schmelzraten von 40 mm/Tag erreicht. Zu Beginn waren die Höhenlagen zwischen 800 und 1400 m ü.M. von der Schmelze betroffen. Am Schluss reichte die Schneeschmelze bis in eine Höhe von 2400 m ü.M. Damit fiel in dieser Periode aus gut 70 % des Einzugsgebietes Schmelzwasser an. Die massive Schneeschmelze führte zu einem entsprechend hohen Gesamtwasserangebot. Dieses betrug für die ersten neun Maitage 120 mm. Davon flossen ungefähr 80 % ab. Die spezifischen Zuflüsse zum Thunersee lagen damit rund 3 Mal höher

als die Abflüsse in der Thur-Andelfingen. Diese hohen Zuflüsse liessen den Thunersee in den ersten neun Maitagen um 44 cm auf ein Niveau von 558,07 m ü.M. ansteigen, obwohl die Schleusen in Thun seit Anfang Mai vollständig geöffnet waren.

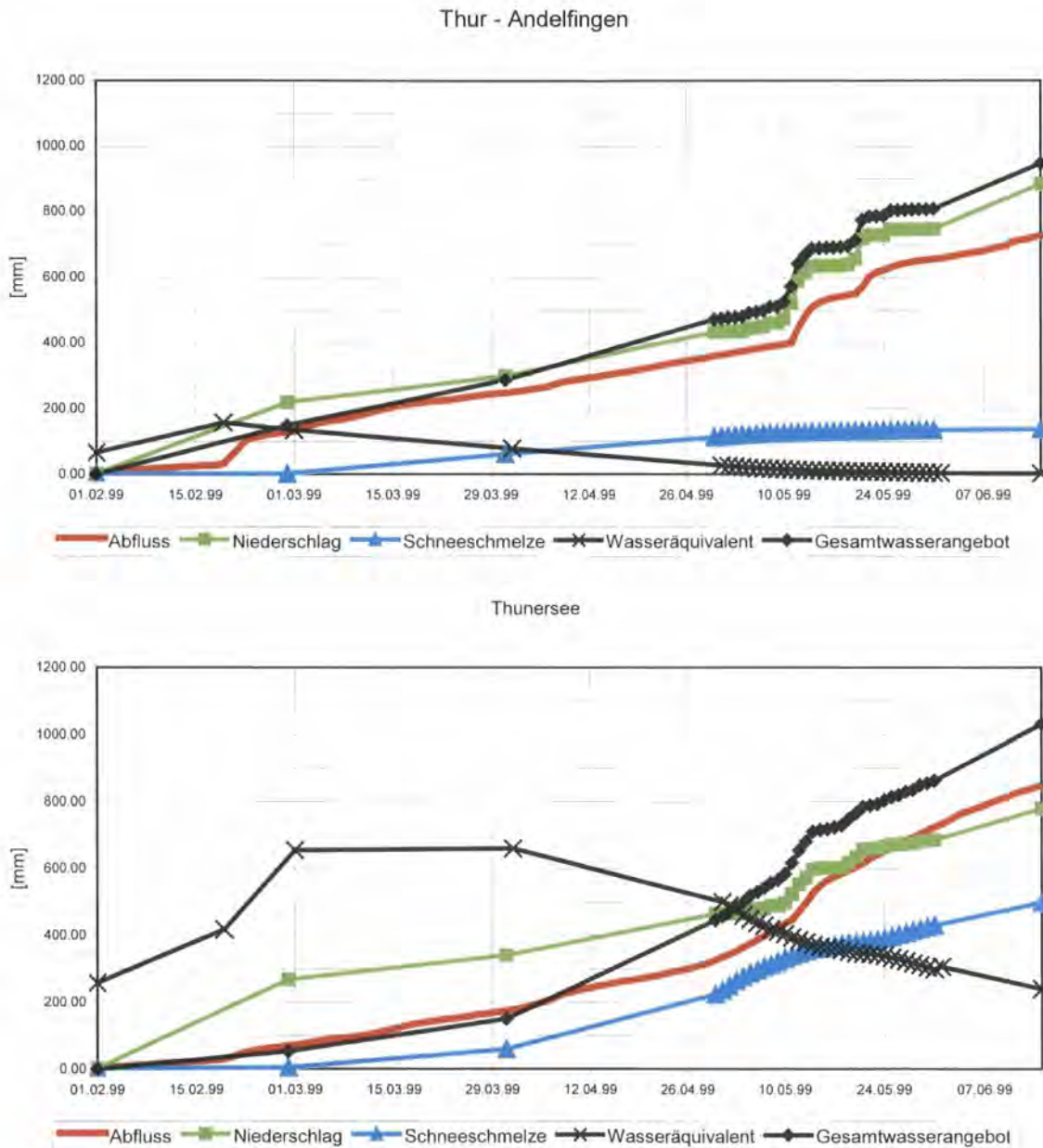


Fig. 5.24: Entwicklung von Abfluss, Niederschlag, Schneeschmelze, Wasseräquivalent und Gesamtwasserangebot in den Einzugsgebieten der Thur und des Thunersees. Obwohl das Gesamtwasserangebot per 15. Juni für beide Einzugsgebiete im gleichen Bereich lag, zeigen sich deutliche Unterschiede. Im Thur-Einzugsgebiet stieg das Gesamtwasserangebot bis zum 10. Mai kontinuierlich an und nahm dann mit den Ereignisniederschlägen stark zu. Im Thunersee-Einzugsgebiet setzte erst im April ein deutlicher Anstieg des Gesamtwasserangebotes ein. Die Ereignisniederschläge waren im Mai aber wesentlich geringer als im Thur-Einzugsgebiet.

Hochwasserereignisse 10. - 15. Mai

Am 10. Mai begann es in beiden Einzugsgebieten zu regnen. Die Niederschlagsintensität nahm im Ganzen Thur-Einzugsgebiet am 11./12. Mai stark zu. Im Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen fielen im Durchschnitt 116 mm Niederschlag, im Einzugsgebiet der Sitter-St. Gallen betrug der Wert sogar 150 mm. An den zwei folgenden Tagen regnete es noch weiter, wenn auch deutlich weniger intensiv. In der gesamten Periode vom

10. - 14. Mai fielen im Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen 172 mm Niederschlag. Das Wasserangebot aus der Schneedecke betrug in dieser Periode bezogen auf das Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen nur noch 1 mm/Tag, im Einzugsgebiet der Thur-Stein waren es noch ca. 10 mm/Tag.

Die Abflüsse reagierten in allen Teileinzugsgebieten der Thur sehr rasch und stark (Fig. 5.25). Der Tagesabfluss der Thur-Andelfingen erreichte am 12. April einen Wert von ca. 44 mm (74 Mio. m³). Die höchsten Tagesabflüsse wurden in den mittleren Einzugsgebieten registriert (Thur-Jonschwil 74 mm, Necker-Mogelsberg 95 mm, Sitter-St. Gallen 96 mm). In den obersten Gebieten gingen die Tagesabflüsse wieder zurück, in der Thur-Stein beispielsweise auf einen Wert von 50 mm. Während des ganzen Ereignisses flossen in der Thur-Andelfingen 128 mm (218 Mio. m³) ab. Der Anteil des Abflusses am Gesamtwasserangebot betrug in dieser Periode mit Ausnahme der Murg mindestens 70 %. In der Sitter und der Necker wurden sogar Werte von über 90 % erreicht.

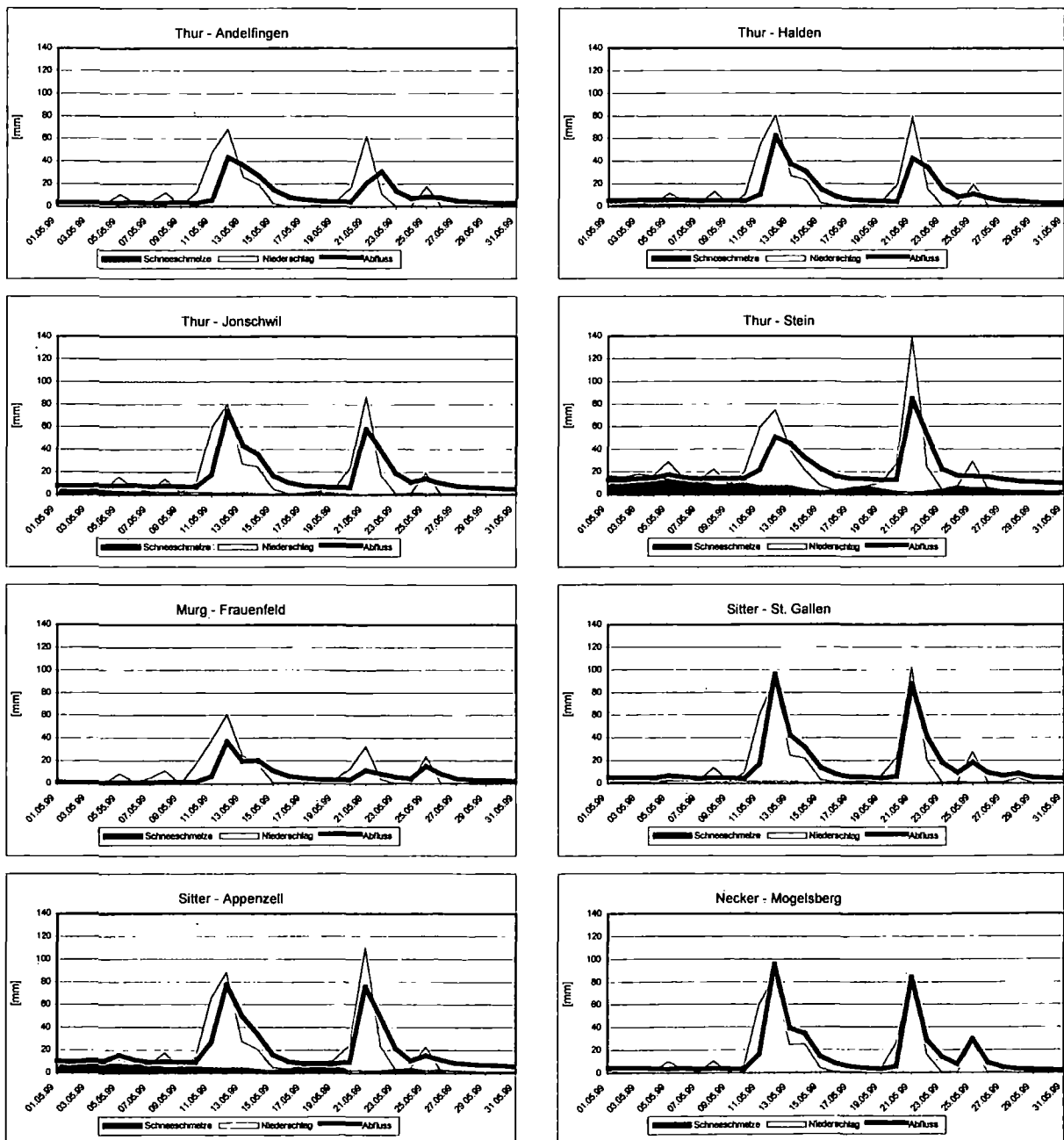


Fig. 5.25: Wasserangebot aus Regen und Schneeschmelze sowie Abfluss in den Thur-Einzugsgebieten im Mai.

Auch im Thunersee-Einzugsgebiet wurden die Niederschläge am 11. Mai intensiver. Der Tagesniederschlag lag aber mit 26 mm deutlich unter den Werten des Thur-Einzugsgebietes. Mit ähnlichen Tageswerten regnete es weiter bis zum 14. Mai. Höhere Niederschlagswerte wurden im Gebiet von Adelsboden erreicht. Für das Einzugsgebiet des Allenbaches wurde für den 11./12. Mai ein Zweitagesniederschlag von 76 mm ermittelt. Die Schneeschmelze ging während des Niederschlagsereignisses deutlich zurück: Ihr Anteil am Gesamtwasserangebot schwankte zwischen 15 und 30 %. Das Gesamtwasserangebot lag für das Thunersee-Einzugsgebiet im Bereich von gut 30 mm/Tag. Die Summe des Gesamtwasserangebots betrug für die Periode vom 10. bis 14. Mai 145 mm.

Im Thunersee-Einzugsgebiet waren die Abflussspitzen weniger hoch als in der Thur, dafür breiter (Fig. 5.26). Die Abflüsse lagen während drei Tagen ungefähr auf dem gleichen Niveau. Der höchste Abfluss wurde im Allenbach mit 39 mm erreicht. Der maximale Zufluss zum Thunersee betrug noch knapp 30 mm. Der gesamte Zufluss zum Thunersee betrug 115 mm (153 Mio. m³). Damit sind dem Thunersee ungefähr 80 % des Gesamtwasserangebots zugeflossen. Simme-Oberwil und Kander-Hondrich weisen Abflussanteile um 65 % auf.

Die Ereignisvolumina lagen damit in beiden Gebieten im gleichen Bereich. Von der Charakteristik her waren die Hochwasserereignisse aber unterschiedlich. In der Thur prägten hohe Abflussspitzen das Ereignis, während im Thunersee-Einzugsgebiet die Abflüsse während drei Tagen ungefähr auf dem gleichen Niveau verharren.

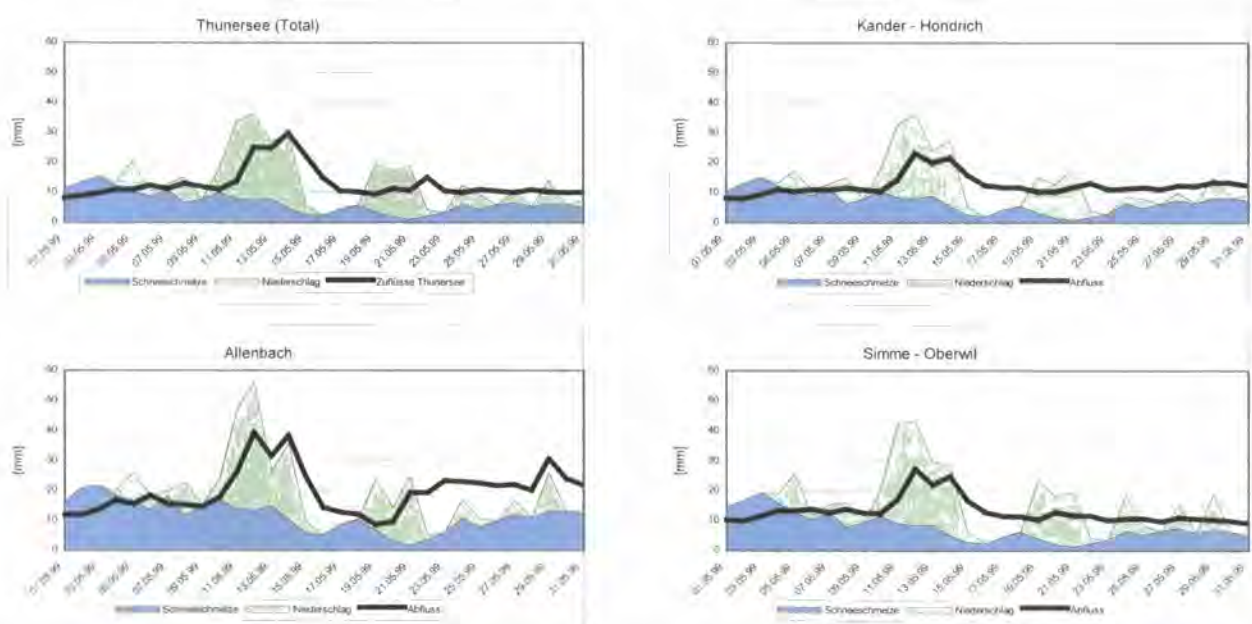


Fig. 5.26: Wasserangebot aus Regen und Schneeschmelze sowie Abfluss in den Thunersee-Einzugsgebieten im Mai.

Hochwasserereignisse 19. - 22. Mai

Im Einzugsgebiet der Thur-Andelfingen betrug der Gebietsniederschlag für die Periode vom 19. bis 22. Mai 93 mm. Für die höhergelegenen Gebiete ergaben sich aber wesentlich höhere Werte. Für die Thur-Stein betrug der Ereignisniederschlag 194 mm, für die Sitter - Appenzell 162 mm. Der Wasseranfall aus der Schneeschmelze war bei diesem Ereignis vernachlässigbar. Die Abflussspitze lag in den tieferliegenden Teileinzugsgebieten unter denen des ersten Ereignisses. In der Thur-Stein wurde aber der Tagesabfluss des ersten Ereignisses mit einem Wert von 84 mm deutlich übertroffen. In der Sitter, der Necker und der Urnäsch waren die Tagesabflüsse mit dem ersten Ereignis vergleichbar. Das Verhältnis von Abfluss zu Gesamtwasserangebot lag im zweiten Ereignis noch leicht höher als im ersten. In den Einzugsgebieten der Sitter, der Necker und der Thur-Jonschwil wurden Werte von gegen 100 % erreicht.

Das zweite Ereignis an Pfingsten betraf das Thunersee-Einzugsgebiet nicht. Der Gebietsniederschlag betrug dort für die Periode vom 19. - 22. Mai nur 52 mm, wobei die Niederschläge über die Periode gleichmässig verteilt waren und ein Teil aufgrund der tieferen Temperaturen teilweise als Schnee fiel.

Sensitivitätsanalyse Thunersee

In Ergänzung zur Analyse der Ereignisabläufe wurde für das Thunersee-Einzugsgebiet eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu wurde ein Simulationsmodell verwendet, das im Frühling 1999 für die Schneeschmelz- und Abflussprognose im Kanton Bern eingesetzt wurde (vgl. Mani, 2000). Folgende Szenarien wurden definiert:

- A. Wasseräquivalent minus: Anfang April ist im Einzugsgebiet des Thunersees nur das halbe Wasseräquivalent vorhanden.
- B. Niederschlag minus: Am 11., 12., 13. und 14. Mai fällt nur die Hälfte des effektiv gemessenen Niederschlags (48 mm anstelle von 96 mm).
- C. Niederschlag plus: Der Niederschlag an den vier Tagen ist erhöht und entspricht dem Gebietsniederschlag, der für die Thur-Halden ermittelt wurde¹ (138 mm anstelle von 96 mm).
- D. Nur Schmelze: Zwischen dem 10. und 15. Mai wird der Niederschlag auf Null gesetzt. Im Gegenzug werden die Temperaturen um 2 Grad erhöht. Diese entsprechen damit ungefähr den Temperaturen von Anfang Mai.

Die Szenarien ergeben folgende Resultate (Fig. 5.27):

- A. Wasseräquivalent minus: Ab Ende April liegen die täglichen Zuflüsse 1 - 4 Mio. m³ unter den 1999 aufgetretenen Werten. Während des Ereignisses selbst liegen die simulierten täglichen Zuflüsse 4 - 7 Mio. m³ unter den Werten von 1999. Bezogen auf den Seespiegel bedeutet dies, dass dieser eine maximale Kote von 558,78 erreicht und damit 37 cm unter der Kote vom 15. Mai liegt.
- B. Niederschlag minus: Dieses Szenario wirkt sich erst ab Beginn des Ereignisses aus. Der Zufluss zum Thunersee erreicht einen maximalen Wert von 25 Mio. m³ und liegt damit 11 Mio. m³ unter dem Wert von 1999. Der Seespiegel steigt in diesem Fall noch auf eine Höhe von 558,62 m, was einer Differenz von -53 cm gegenüber dem Höchstwert von 1999 entspricht, wobei die Schadensgrenze trotzdem um 32 cm überschritten wird.
- C. Niederschlag plus: Auch dieses Szenario wirkt sich erst ab Beginn des Ereignisses aus. Der Zufluss erreicht in diesem Szenario einen Maximalwert von 58 Mio. m³. Dieser Wert liegt 21 Mio. m³ über dem Wert von 1999. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei einem solchen Ereignis wahrscheinlich Ausuferungen entlang der Zuflüsse aufträten, welche die Hochwasserspitze dämpften. Aussagen zur Auswirkung auf den Seespiegel sind nur noch bedingt zulässig, da für diesen Bereich keine Seestands-Ausfluss Beziehung mehr existiert und auch nicht ausgeschlossen werden kann, dass zusätzliche Fliesswege und Rückhalteräume wirksam werden. Rechnet man mit einer extrapolierten Beziehung, ergibt dies einen Seestand von 559,37 m ü.M.
- D. Nur Schmelze: Der Zufluss zum Thunersee steigt nur noch schwach an und erreicht einen Maximalwert von 20 Mio. m³. Dadurch übersteigt der Seespiegel die Schadensgrenze von 558,3 m ü.M. um wenige Zentimeter. Dies bedeutet, dass auch ohne Niederschlag die Schadensgrenze erreicht worden wäre.

¹ Laut mündl. Mitteilung von Hr. D. Grebner sind solche Niederschlagssysteme nicht ortsgebunden und hätten damit auch über dem Berner Oberland auftreten können.

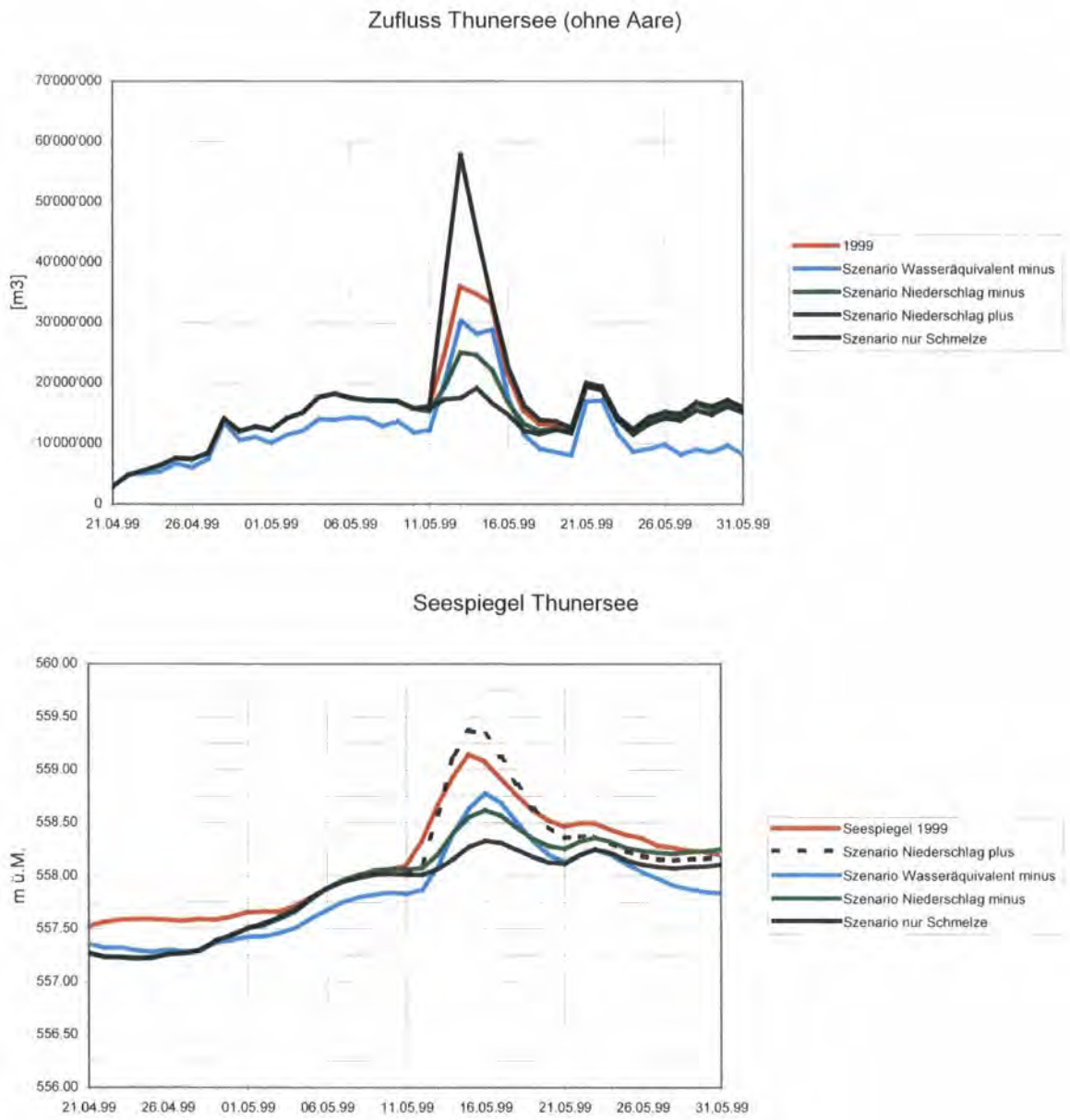


Fig. 5.27: Szenarien Thunersee.

Zusammenfassend lassen sich im Jahr 1999 drei unterschiedliche Typen von Hochwasserereignissen bestimmen, die sich insbesondere in der Bedeutung der Schneeschmelze bei der Hochwasserbildung unterscheiden:

- **"Winterhochwasser"**

Das Hochwasser vom 20. - 22. Feb. wurde durch ein Ansteigen der Schneefallgrenze aus den Niederungen auf etwa 1500 m ü.M. bei fortdauernden Niederschlägen ausgelöst. Die Niederschläge führten zusammen mit dem abschmelzenden Schnee im Mittelland verbreitet zu Überschwemmungen und Erdrutschen. Im Mittelland betrug der Anteil der Schneeschmelze am gesamten Abfluss in der Regel etwa 50 %.

- **"Starkniederschlaghochwasser"**

Die Mai-Hochwasser in den Einzugsgebieten des Mittellandes und der Voralpen (Thur, Kantone Aargau und Zürich) wurden im Wesentlichen durch die Starkniederschläge von Auffahrt und Pfingsten 1999 ausgelöst. Der Einfluss der Schneeschmelze beschränkte sich, sofern überhaupt vorhanden, auf wenige Prozente des gesamten Abflusses. Die durch eine intensive Schneeschmelze und anhaltende leichte Niederschläge geprägte Vorgeschichte, hatte verbreitet zu einer hohen Abflussbereitschaft geführt, welche sich in hohen Abflussanteilen und einem raschen Ansteigen der Abflüsse auswirkte. Dieser grundsätzlich bei jedem grossflächigen Starkniederschlag zu erwartende Ereignistyp kann am Fallbeispiel Thur detailliert studiert werden.

- **"Schneesmelz- und Niederschlagshochwasser"**

Die Tatsache, dass der Auffahrtsniederschlag während einer schon länger andauernden Phase intensiver Schneeschmelze fiel, hatte zur Folge, dass am Alpenrand auch in Gebieten ausserhalb der eigentlichen Niederschlagszentren sehr grosse Wasservolumen anfielen. Die beschränkten Ausflusskapazitäten der randalpinen Seen führten dazu, dass die hohen aber nicht extremen Abflüsse in den zufließenden Gewässern sehr hohe Seeständen verursachten. Diese Situation kann sich bei langandauernden Hochwasserabflüssen immer wieder einstellen. Je nachdem welche Periode zugrunde gelegt wird, lag der Anteil der Schneeschmelze z.B. im Einzugsgebiet des Thunersees zwischen 50 - 60 % (ganzer Monat Mai 1999) und 15 - 30 % (Niederschlagsereignis vom 10. - 15. Mai 1999). Dieser nur beim Zusammentreffen einer intensiven Schneeschmelze mit einem grossflächigen Niederschlagsereignis zu erwartende Ereignistyp, kann am Fallbeispiel Thunersee detailliert studiert werden.

Die beiden letztgenannten Prozessmuster erlauben, oft in verschiedenen Mischformen, eine grobe Charakterisierung der Ursachen für alle im Frühling 1999 von Hochwassern betroffenen Gebiete.

FAZIT:

Die Hochwasser vom Mai 1999 entstanden durch eine von Ort zu Ort und von Zeitpunkt zu Zeitpunkt unterschiedliche Überlagerung der drei Ursachen:

- feuchte Vorgeschichte
- langandauernde, intensive Schneeschmelze
- auslösende Niederschläge an Auffahrt und Pfingsten 1999

Der Anteil der Schneeschmelze am Abfluss betrug je nach Region oft nur wenige Prozente. Er stieg aber in Gebieten mit vergleichsweise geringen Niederschlägen und einem hohen Flächenanteil in der von der Schneeschmelze besonders betroffenen Höhenlage zwischen 1400 und 2300 m ü.M bis auf 30 % an. Generell wurden bei den Ereignissen 1999 sehr hohe Abflussanteile beobachtet, da der Boden wegen der feuchten Vorgeschichte, sowie in höheren Lagen wegen der fortdauernden Schneeschmelze, nur eine geringe Speicherkapazität aufwies.

6 VERGLEICH MIT ANDEREN EREIGNISSEN

In den vorangehenden Kapiteln wurde aufgezeigt, wie die Hochwasser vom Mai 1999 durch eine von Region zu Region unterschiedliche Kombination und teilweise Überlagerung von Schneeschmelze und Starkniederschlägen verursacht wurden. Die Einordnung in langjährige Messreihen erlaubte zudem eine grobe Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit eines vergleichbaren Ereignisses (Kap. 2). Ergänzend werden im nachfolgenden Kap. 6.1 historische Analogfälle zu den Ereignissen von 1999 aufgezeigt.

Bei den Ursachen von Hochwasserereignissen ist zwischen der längerfristig wirksamen Disposition und dem kurzfristig wirksamen auslösenden Ereignis zu unterscheiden (vgl. Kienholz, 1995). Die Disposition umschreibt die Voraussetzungen, die vor dem Eintritt des Ereignisses bestehen. Beispiele dazu sind in erster Linie lange Niederschlagsperioden, die zu einer Sättigung der Böden führen, oder die Akkumulation grosser Schneemassen. Ob bei gegebener Disposition ein Ereignis tatsächlich eintritt, ist vom Auslöser abhängig. Bei Hochwasserereignissen stehen dabei Starkniederschläge im Vordergrund. Um die Bedeutung der Disposition (grosse Schneemengen) und des Auslösers (Niederschlag) bei den Hochwassern vom Mai 1999 gegeneinander abzuwägen, soll in Kap. 6.2 analysiert werden, wie sich die in Kap. 4.1 erläuterten grossen Schneemengen, die sich in den Jahren 1951, 1968, 1970, 1975, 1982 und 1984 in den Schweizer Alpen aufgetürmt haben, auf die Hochwassersituation in diesen Jahren ausgewirkt haben.

6.1 HISTORISCHE ANALOGFÄLLE

Christian Pfister², Franziska Schmid

Nach dem Eintreffen von Naturkatastrophen wird in der Öffentlichkeit regelmässig die Frage aufgeworfen, ob das Schadenereignis nicht rechtzeitig hätte vorhergesehen werden können. Bei den Hochwassern vom Mai 1999 wurde diese Diskussion heftiger geführt als üblich, weil kantonale Fachstellen bereits Ende Februar einen Stab zur Überwachung der Entwicklung gründeten und an einer Pressekonferenz vom 2. März 1999 auf Grund von zwei historischen Analogfällen (1566, 1817) vor einem erhöhten Hochwasserrisiko gewarnt worden war. Vergleiche neueren Datums sind die Hochwasser von 1910 und 1970.

Zwei Bemerkungen seien vorausgeschickt:

1. Schwere Überschwemmungen treten so selten ein, dass sich innerhalb des 20. Jahrhunderts, das mit instrumentellen Messreihen einzig ausreichend dokumentiert ist, oft keine Vergleichsfälle finden lassen. In solchen Situationen bieten Beschreibungen von Analogfällen aus historischen Dokumenten einen gewissen Ersatz. Unter Analogfällen werden Ereignisse verstanden, die von ihrer Grössenordnung, ihrer Disposition und ihrem Auslöser her deutliche Ähnlichkeiten aufweisen. Die Rekonstruktion historischer Analogfälle ist dann sinnvoll, wenn eine grössere Zahl von Beobachtungen vorliegt, die Disposition, Auslöser, Grösse und Dauer von Überschwemmungen ausführlich beschreiben. Generell gilt: Je extremer eine Naturkatastrophe, desto zahlreicher und ausführlicher sind die Aufzeichnungen darüber und um so besser stützen und ergänzen sich diese gegenseitig. Die extremsten Naturkatastrophen der Vergangenheit, welche schon damals in der Gesellschaft ein grosses Echo auslösten, lassen sich damit anhand von Beobachtungen aus historischen Dokumenten relativ zuverlässig rekonstruieren.
2. Dank der jüngsten Fortschritte der historischen Klimaforschung ist es möglich geworden, die mittleren monatlichen Luftdruckverhältnisse in Europa anhand von historischen Beobachtungen für die letzten Jahrhunderte mit synoptischen und statistischen Methoden zu rekonstruieren. In manchen Fällen lassen sich dadurch die klimatischen Ausgangsbedingungen, die Überschwemmungen zugrunde liegen, räumlich breiter abstützen, stringenter vergleichen und meteorologisch erklären.

²: Dieser Artikel ist teilweise im Rahmen des Nationalfonds-Projekts 11-52786.97 FLOODRISK entstanden.

Berichte über Naturkatastrophen aus dem Mittelalter sind in Chroniken, vom späten 15. Jahrhundert an auch in Witterungstagebüchern und Aktenbeständen, vom späten 17. Jahrhundert an schliesslich auch in frühen Messjournalen übermittelt. Den meisten Beobachtern war es ein Anliegen, die Grössenordnung der Ereignisse mit den ihnen zur Verfügung stehenden Kenntnissen und Informationen in einer Weise zu umschreiben, die einen grössenmässigen Vergleich mit früheren Ereignissen erlaubte. Diese naturnahen „Kodesysteme“ orientierten sich an bekannten Punkten im Gelände und Erscheinungen aus der Landwirtschaft, weil diese Referenzen den Zeitgenossen am ehesten geläufig waren. Zur Dokumentation von Hochwassern bezogen sich Chronisten auf objektive Merkmale im Gelände - Brücken, Mauern und Gebäude. Gelegentlich wurden Hochwassermarken angebracht. In ähnlicher Weise sind extrem niedrige Wasserstände durch Marken an Steinen im Flussbett oder auf dem Seeboden dokumentiert, die in solchen Situationen vorübergehend trocken lagen.

Für Vergleiche historischer Hochwassermarken mit rezenten Wasserständen muss abgeklärt werden, ob sich Gebäude gesenkt haben oder ob sich das Gerinne des Flusses verändert hat. Präzise Aussagen sind dabei nicht möglich. Beim Risikodiskurs geht es jedoch weniger um die Stellen hinter dem Komma als um die plausible Abschätzung der Grössenklasse von Ereignissen. Ein oft guter Indikator für die Hochwasserdisposition sind die Wasserstände des Bodensees (Fig. 6.1). Dieser ist unreguliert und widerspiegelt die Fülle der Zuflüsse. Hohe frühe Seestände deuten auf eine reichliche Schneeschmelze und/oder ein nasses Frühjahr. Wenn im Frühsommer Starkniederschläge bei diesen Ausgangsbedingungen eintreten, sind Schadenhochwasser wahrscheinlich.

6.1.1 DAS HOCHWASSER VOM FRÜHSOMMER 1566

Dieses Schadenereignis ist auf Grund der ähnlichen Disposition ein möglicher historischer Analogfall zu den Hochwasserereignissen von 1999. Die Disposition wurde auf Grund von vier in sich stimmigen Indizien rekonstruiert.

1. Im Voralpen- und Alpengebiet türmten sich im Verlaufe des Winters 1566 gewaltige Schneemengen auf: Die Kühe "ertranken" im Schnee, als man sie von einem Heustall zum anderen führen wollte, und der Schnee war auch zu tief, um Heu mit Schlitten heranzuführen. Für den Höhenbereich von 1000 bis 1600 m sind Schneemengen von mehr als 3 m überliefert. Keine Quelle berichtet für die folgenden 332 Jahre von vergleichbaren Schneemassen.
2. Die rekonstruierte mittlere Bodendruckverteilung vom Januar und Februar 1566: Nach einem kühlen und feuchten Januar prägte sich im Februar auf der Ostflanke eines von den Azoren bis England reichenden Hochdruckkeils eine anhaltende Nordwestlage aus. Damit sind die Berichte über aussergewöhnlich grossen Schneemengen im Voralpen- und Alpengebiet stimmig, ebenso wie die Berichte von einer katastrophalen Dürre in Katalonien.
3. Der Bodensee erreichte im Sommer 1566 einen mit Hochwassermarken dokumentierten Hochstand, der möglicherweise dem Rekordstand vom Sommer 1817 gleichkam. Für den Wasserstand des Bodensees ist das Volumen der Schneeschmelze im Einzugsgebiet (Nord- und Mittelbünden, Vorarlberg) in der Regel von grösserer Bedeutung als das Niederschlagsgeschehen (Gasser, 1957).
4. In Basel floss der Rhein während rund sechs Wochen etwa 45 cm unterhalb den Jochen der alten Brücke. Diese bemerkenswerte Dauer des Hochwassers am Wassertor der Schweiz deutet auf eine ausserordentlich ergiebige Schneeschmelze hin.

Ausgelöst wurde das Hochwasser in der letzten Juniwoche durch ergiebige Niederschläge und das gleichzeitige Abschmelzen grosser Schneemassen Ende Juni: Die Chronisten Heinrich Bullinger und Johannes Haller (beide Zürich) heben das grosse Volumen der Schneeschmelze, Renward Cysat (Luzern) das „überflüssige Regenwetter“ als Ursachen hervor. Simme und Kander führten extreme Wassermengen. Doch mündeten diese Flüsse vor der 1714 erfolgten Korrektur noch unterhalb von Thun in die Aare, so dass ein Hochstand des Thunersees nicht erwähnt ist. Im Mittelland wurden die meisten Brücken von den Fluten weggerissen.

6.1.2 DAS HOCHWASSER VOM FRÜHSOMMER 1817

Aufgrund der grossen Schneemengen war auch im Jahre 1817 die Disposition für ein Hochwasser ähnlich wie 1999 und das Hochwasser vom Juni 1817 bildet ebenfalls einen möglichen historischen Analogfall.

1. Schneemengen in den Alpen: Auf den schneereichen Winter 1815/16 folgte 1816 ein "Jahr ohne Sommer", in dem es selbst im Hochsommer immer wieder in tiefe Lagen herunterschneite. In den Alpen schmolz die Schneedecke nur unterhalb von 1800 bis 2200 Meter vollständig ab. In höheren Lagen türmte sich in den Sommermonaten laufend weiterer Schnee auf. Im Winter 1816/17 und im nass-kalten Frühjahr 1817 überlagerte sich diesem doppelten Schneepaket schliesslich ein drittes.
2. Im Juli 1817 stieg der Bodensee zum höchsten bisher bekannten Stand an, rund 2,26 Meter über dem mittleren Wasserstand im Sommer. Auf diesem Niveau blieb der Seespiegel 89 Tage lang. Als Ursache für den Hochstand des Sees wurde in den Quellen das Abschmelzen des „alten“ Schnees herausgestellt. Während dieser langen Zeit führte der Rhein Hochwasser.

Auslösung: Im Juni 1817 stellte sich während längerer Zeit warme und gewitterhafte Witterung ein. Im Westen der Schweiz (Genf, Bern) fielen durchschnittliche, im Osten (Schaffhausen) überdurchschnittliche Niederschläge. Wärme und Niederschläge förderten die Schmelzung der ungeheuren Schneemassen.

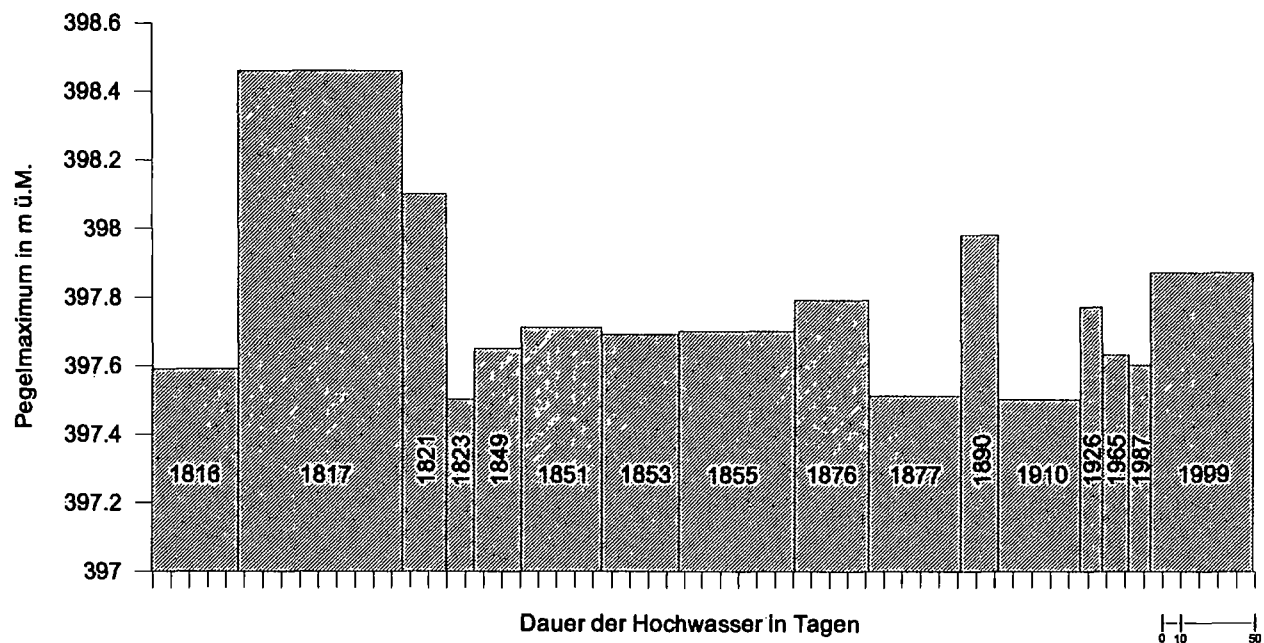


Fig. 6.1: Höhe und Dauer der maximalen Hochstände des Bodensees 1816-1999.

6.1.3 DAS HOCHWASSER VOM JUNI 1910

1. Schneemenge in den Alpen: Schon der Jahresbeginn wies hohe Niederschläge auf, so dass es vielerorts um den 19. Jan. zu Hochwasserschäden kam. Ende Monat kam es zu intensiven Schneefällen, die sich auch im Mittelland akkumulierten, was zu zahlreichen Verkehrsunterbrüchen führte. Nach den eher zu warmen Monaten Februar und März, folgte anfangs April ein erneuter Wintereinbruch. April und Mai waren im Durchschnitt zu kühl, nass und trübe. Um den 6. Mai fielen die Niederschläge sogar im Mittelland als Schnee. Am 21. Mai fand ein Umschwung zu veränderlichem Wetter statt mit häufigen Gewittern und höheren Temperaturen. Erst der Juni brachte sonniges und warmes Wetter mit vereinzelt strichweisen Gewitter. In dieser Periode ging die Schneeschmelze rasch vor sich. Am 9. und 10. Juni setzten Gewitterregen ein, zuerst im Westen und Norden, dann in der ganzen Schweiz. Ab 14. Juni wurde durch eine kräftige und anhaltende Nordströmung feucht-warme Luft gegen die Alpen gebracht, was sehr hohe Niederschlagsmengen zur Folge hatte. Eine bandartige Zone intensiver und langandauernder Niederschläge zog sich entlang dem östlichen Voralpengebiet (Vitznau 233 mm/d, Säntis 183 mm/d). Die Nullgradgrenze befand sich auf einer Höhe von 3000 m ü.M. Im Unterschied zu 1999 war der Schnee-Einfluss geringer, befand sich doch die Schneegrenze zu Beginn des Ereignisses auf ca. 1700 m ü.M.. Dies wurde jedoch durch die Vorregen wahrscheinlich ausgeglichen.

2. Aus 20 Kantonen wurden den Versicherungen Rutschungs- sowie Überschwemmungsschäden gemeldet. Das Hauptschadensgebiet lag aber eindeutig weiter südöstlich als im Mai 1999, nämlich entlang des Alpennordkammes. Die grössten Verheerungen richteten folgende Flüsse (mit ihren Zuflüssen) an: Landquart, Schächenbach, Muota, Linth, Thur, Sitter, Limmat, Sihl, Reuss, Engelberger Aa, Aare im Oberlauf, Emme. Die Bäche, zum Teil in steilem Gelände, führten viel Geschiebe mit sich. Vom Schächen (UR) wird berichtet, dass er "Fels und Tannen brechend" (Imhof, 1910) grossen Schaden anrichtete. Vielerorts wurde das Prozessgeschehen dominiert durch Rutschungen und Murgänge. Einzelne Rutschungsgebiete wurden auch im Frühling 1999 wieder aktiviert: So führte zum Beispiel der Murgang von Sörenberg oder die Ribi oberhalb Altdorf in beiden Jahren im jeweils gleichen Gerinne zu Schäden. Die betroffenen Gebiete reichten aber weit über die Voralpenregionen hinaus: alle Alpenrandseen wiesen Höchststände auf, ebenso die grossen Flüsse in ihren Unterläufen. Der Rhein bei Basel trat ebenfalls an mehreren Stellen über die Ufer.

In der Westschweiz (NE, GE, VD, VS) sowie im Tessin wurden keine Schäden verzeichnet. Dies deckt sich mit dem Umstand, dass diese Gebiete nahezu niederschlagsfrei blieben. Wie 1999 war aber auch Bayern schwer betroffen. Fig. 6.2 und Fig. 6.3 zeigen die Verteilung der Schäden pro Kanton für 1910 und 1999. Im Unterschied zu 1999 traten die schwersten Schäden oberhalb der grossen Seen des Alpenvorlandes auf, deren Wasserstände auch nicht ganz die Höhen von 1817 oder 1999 erreichten. Dies deutet auf eine vergleichsweise grössere Bedeutung der Niederschläge und deren Intensitäten hin.

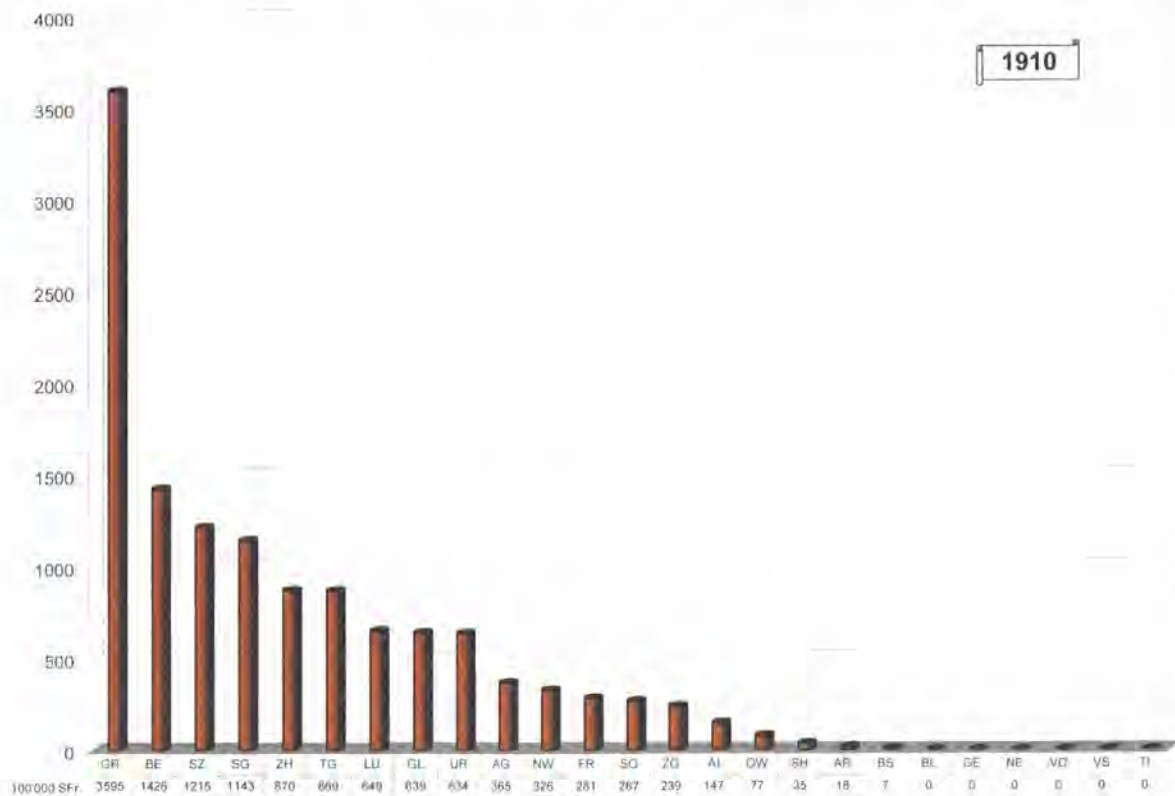


Fig. 6.2: Aufteilung der Privatschäden und der Schäden an Brücken, Strassen und Gewässern im Juni 1910 nach Kantonen. Datengrundlage: Lanz und Rommel, 1936.

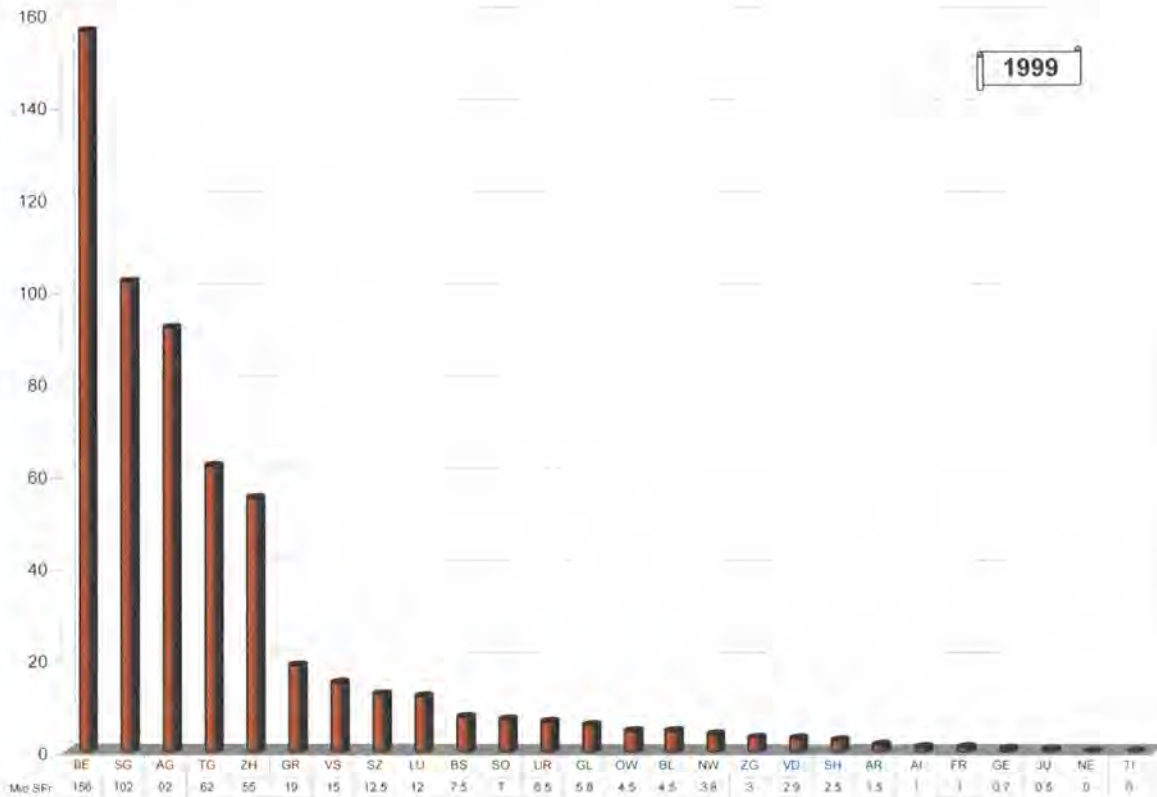


Fig. 6.3: Aufteilung der Gesamtschadenssumme 1999 nach Kantonen. Datengrundlage: WSL.

6.1.4 DIE HOCHWASSER DES JAHRES 1970

Auch 1970 war ein schneereicher Winter und die hydrologische Ausgangslage war in mancher Beziehung vergleichbar mit 1999. Dieses Jahr dient vor allem als Beispiel dafür, dass, wie eingangs erwähnt, eine gefährliche Disposition nicht immer zu einem schadenreichen Hochwasser führt.

1. Die Wetterlage: Besonders nördlich der Alpen und im Wallis dauerte das aussergewöhnliche Winterwetter mit tiefen Temperaturen lange an. Im Februar brachten stürmische Westwinde in drei Schüben Tauwetter und hohe Niederschlagsmengen gegen die Alpen. Grosse Lawinen und Hochwasser des Rheins bis nach Holland waren die Folgen. Die totale Neuschneesumme des Winters 1969/70 in Zürich von 260 cm und die 105 Tage mit schneebedecktem Boden bedeuten einen neuen Rekord in diesem Jahrhundert. Ende April lag die Schneegrenze an Nordhängen auf 1200-1300 m ü.M., die Ausaperung war um 25-30 Tage im Rückstand. Der Mai war zu kühl, Ende Mai gab es in der Zentralschweiz und im Graubünden sogar bis auf 1200 m Neuschnee. Erst der Juni brachte dann sommerliche Wärme und grosse Schmelzwassermengen, was von der Monatsmitte an zu Seeüberflutungen (Vierwaldstätter-, Thuner-, Bodensee) führte, da starke Gewitter dazukamen (16., 20., 27. 6.). Obwohl der Juni gesamthaft eher nass war, können die Niederschläge nicht als aussergewöhnlich bezeichnet werden. Schwerer wogen aber die Gewitter, die vielerorts lokale Überschwemmungen verursachten. Die hohen Wasserstände hielten über mehrere Wochen an, die Lage entspannte sich ab dem 25.6. (EAWW, 1970).
2. Der Untersee hatte schon am 10. Juni einen hohen Seespiegel, am 19. Juni war die Hochwassergrenze erreicht, es gab erste Überschwemmungen. Am 11. Juli war der Rückgang des Hochwassers feststellbar, der durchgehende Schiffsverkehr konnte wieder aufgenommen werden. Es wurde ein über dreiwöchiger Hochstand verzeichnet. Über den Thunersee liegen keine Meldungen von Überflutungen vor, es ist jedoch bekannt, dass Schleusen vollständig geöffnet wurden, um diese zu verhindern. Der Stand von 1910 wurde fast erreicht. Die Aare bei Bern, angereichert durch die Gürbe verursachte Überschwemmungen im Matte- und Altenbergquartier. Ebenfalls aus Luzern wurden Überflutungen vermeldet; die Bahnlinie Gisikon- Rotkreuz war unterbrochen.

Obwohl es doch recht viele Überschwemmungen gab, wurde wenig über die angerichteten Schäden berichtet. Dies lässt zwei Schlüsse zu: Entweder gab es tatsächlich kaum grössere Schäden oder sie wurden als tragbar und eher gering bewertet. Die Information, dass in Luzern die Sandsäcke noch unbenutzt in den Magazinen lagerten, deutet daraufhin, dass die Situation doch nicht allzu ernst war. (NZZ 25.6.1970).

Der wesentliche Unterschied zu 1999 war, dass in der kritischen Zeit der höchsten Seestände grossflächige Starkniederschläge ausblieben. Die verschiedenen Gewitter führten zwar zu örtlich begrenzten Schäden, liessen jedoch mangels Volumen die Seen nicht oder nur sehr knapp über die Schadengrenze steigen.

Fazit:

In der Vergangenheit Hochwasser sind verschiedentlich aufgetreten, die sich mit jenen von 1999 vergleichen lassen. Dementsprechend handelt es sich nicht um erstmalige Ereignisse, sondern es muss auch in Zukunft grundsätzlich mit ähnlichen Hochwasserereignissen gerechnet werden.

6.2 ANALYSE DER AUSWIRKUNGEN VON SCHNEEREICHEN WINTERN

Christoph Hegg, Peter Mani

Für die Analyse der Auswirkungen von schneereichen Wintern auf das Hochwassergeschehen wurden exemplarisch die Einzugsgebiete des Thunersees und des Bodensees untersucht. Der Thunersee wurde berücksichtigt, weil er vom Hochwasser 1999 besonders betroffen war, der Bodensee, weil sich dort aufgrund des unregulierten Abflusses die Zuflüsse direkt auf den Seestand auswirken.

In Fig. 6.4 sind an ausgewählten Stationen in den Schweizer Alpen die Schneewasseräquivalente am 1. April für die in Kap. 4.1 erläuterten Vergleichsjahre dargestellt, wobei nicht alle Teile der Schweiz in allen Jahren schneereich waren. Für drei dieser Stationen (Hasliberg, Mürren, Davos), die in den nachfolgend genauer betrachteten Einzugsgebieten liegen, wurde die Entwicklung des Wasseräquivalents ab diesem Datum mit dem gleichen Modell berechnet, das auch in den Fallstudien eingesetzt wurde (vgl. Kap 5.3). Die Überprüfung der Simulation mit den Ausaperungsdaten ergab in der Regel eine Differenz von maximal 10 Tagen.

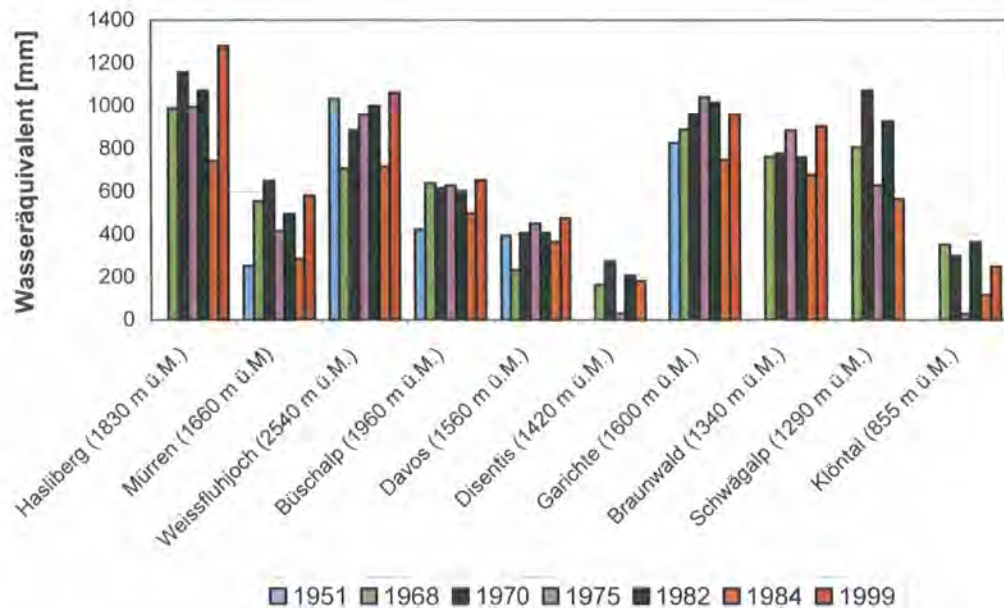


Fig. 6.4: Wasseräquivalente der Schneedecke an ausgewählten Messstationen in den Schweizer Alpen am 1. April der schneereichen Jahre 1951, 1968, 1970, 1975, 1982, 1984 und 1999.

Bodensee

In Davos erfolgte der Abbau der Schneedecke 1999 etwa ab dem 20. April sehr rasch und ohne Unterbruch (vgl. Fig. 6.5). Einen ähnlich raschen Abbau der Schneedecke zeigen die Jahre 1975 und 1982. Einen kleinen Unterbruch in der Schneeschmelze weist das Jahr 1970 um den 23. Mai auf. Von mehreren Stagnationsphasen unterbrochen waren die Schneeschmelzen in den Jahren 1951 und 1984. Eine nur wenig mächtige Schneedecke wies Davos im Jahr 1968 auf.

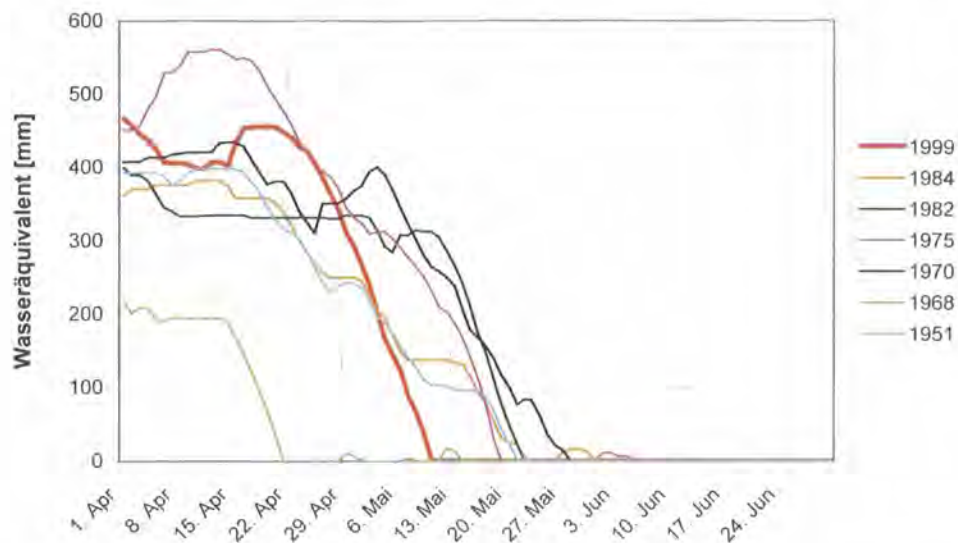


Fig. 6.5: Simulierte Entwicklung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Vergleichsjahren nach dem 1. April an der Messstation Davos.

Betrachtet man nun den Verlauf des Seespiegels im Bodensee (vgl. Fig. 6.6) fällt auf, dass die Jahre 1951, 1970, 1975 und 1982 Ende Juni praktisch den gleichen Seestand aufweisen, obwohl die Schneeschmelze sehr unterschiedlich verlaufen ist. Insbesondere für das Jahr 1951 würde eigentlich ein tieferer Pegel erwartet, etwa vergleichbar mit 1984, da in diesen beiden Jahren die Schneeschmelze stark verzögert ablief. 1951 ereignete sich zusätzlich während der Schneeschmelze um den 27. Mai ein Hochwasser, das in seinem Ausmass zwischen jenem von Auffahrt und Pfingsten 1999 liegt (vgl. Fig. 6.9).

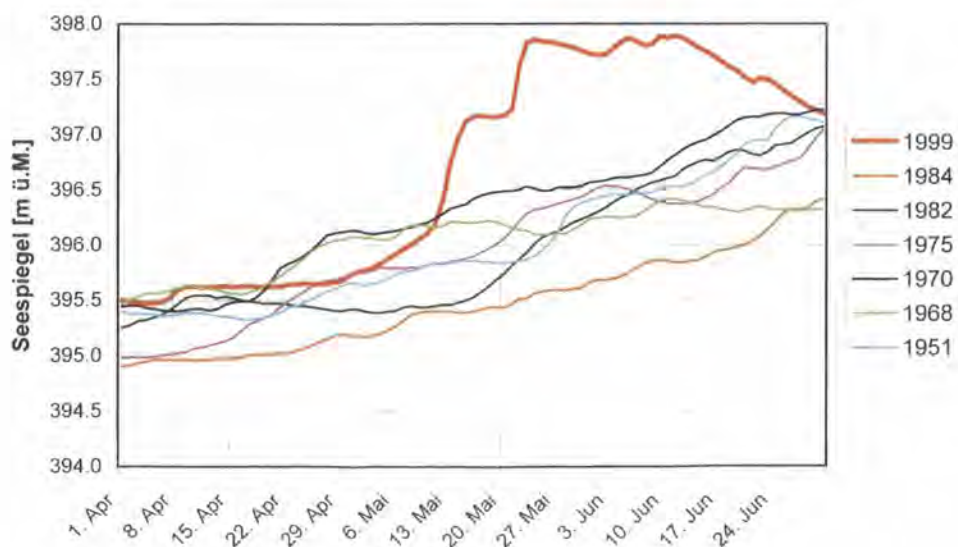


Fig. 6.6: Verlauf des Seespiegels des Bodensees in den Vergleichsjahren.

Mit Ausnahme des Jahres 1984, das auch das kälteste und das trockenste der untersuchten Jahre ist, weisen die Ganglinien des Seespiegels in allen untersuchten Jahren ausgeprägte Anstiegsphasen auf. Die meisten dieser Phasen dauerten ein bis zwei Wochen (z.B. im April 1968, 1970 und 1975) und fallen mit einem ausgeprägten Temperaturanstieg zusammen. Vergleichbar damit ist im Jahr 1999 der Anstieg des Seespiegels ab Ende April bis etwa zum 10. Mai. Auch 1999 war dieser Seespiegelanstieg mit einem raschen Temperaturanstieg und der entsprechend starken Schneeschmelze verbunden.

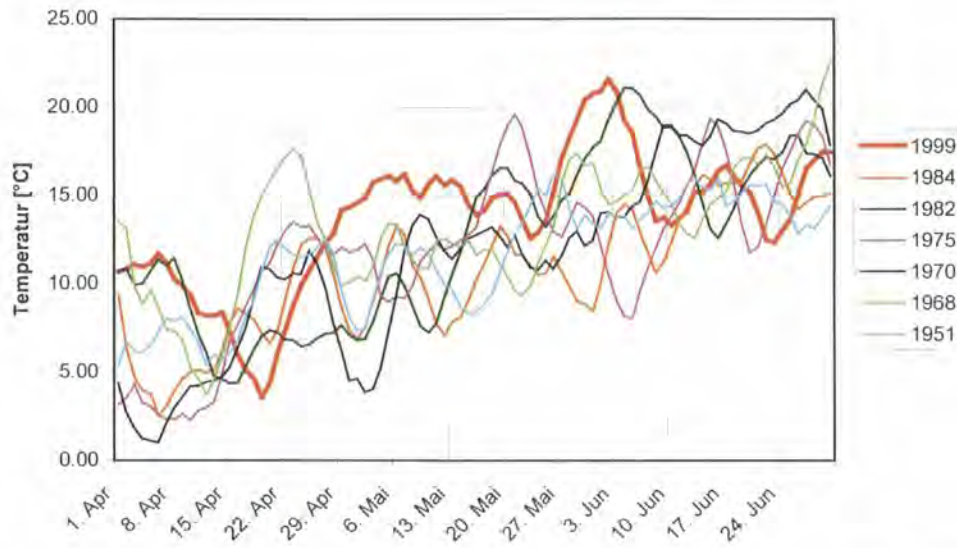


Fig. 6.7: Gleitendes 5-Tage Mittel der Temperatur an der Klimastation Chur für die schneereichen Vergleichsjahre.

Deutlicher ausgeprägte Anstiegsphasen weisen die Jahre 1951 und 1982 jeweils Ende Mai auf. Auch damals fiel der Anstieg mit einem raschen Temperaturanstieg zusammen, der zusätzlich von intensiven Niederschlägen (vgl. Fig. 6.8) begleitet war. Der absolute Anstieg des Seespiegels und insbesondere die Geschwindigkeit des Anstieges lag allerdings immer noch deutlich unter den Werten, die an Auffahrt und Pfingsten 1999 zu verzeichnen waren.

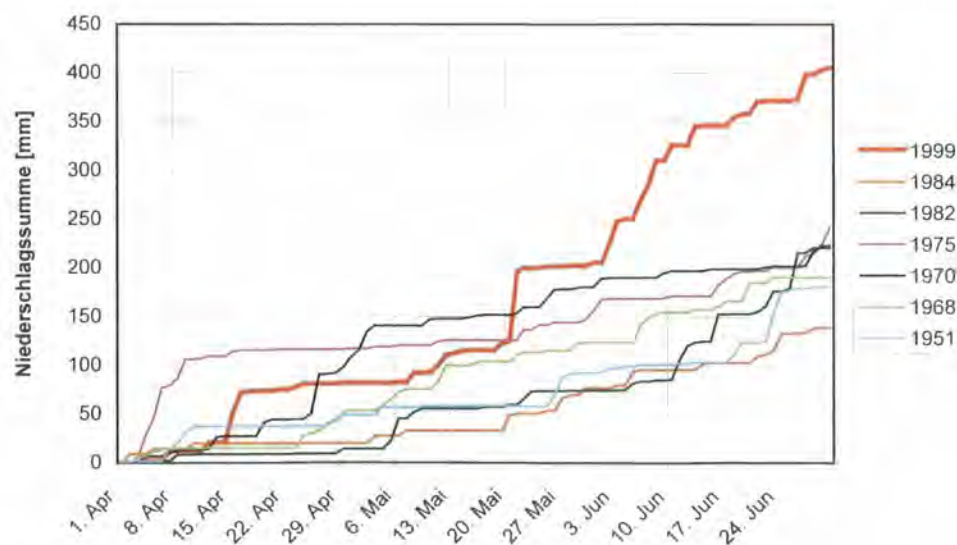


Fig. 6.8: Aufsummierte Niederschläge in den Vergleichsjahren nach dem 1. April an der Station Chur.

Die vorangehenden Erläuterungen lassen den Schluss zu, dass ein rasches Ansteigen des Bodensees vor allem durch Niederschlagsereignisse während Wärmeperioden im Frühjahr ausgelöst wird. Niederschläge

bei gleichzeitiger Abkühlung (z.B. Ende April 1970 oder Anfang April 1975) oder rascher Temperaturanstieg ohne ausgeprägte Niederschläge führen wohl zu einem Anstieg des Seespiegels, der aber wesentlich weniger ausgeprägt ist, als wenn Regen und Erwärmung zusammenfallen.

Weshalb erfolgte nun aber der Anstieg des Pegels des Bodensees 1999 so viel stärker und so viel schneller als 1951 und 1970? Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Niederschläge 1999 viel stärker und auch intensiver waren als 1970 und 1951 (vgl. Fig. 6.8). Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Messstation Chur durch das Auffahrtseignis vom 10. - 15. Mai praktisch nicht betroffen war. Ein Vergleich des Anstiegs des Sees an Auffahrt 1999 und um den 27. Mai 1951 mit den entsprechenden Ganglinien des Rheins bei Diepoldsau (vgl. Fig. 6.9) legt nahe, dass an Auffahrt 1999 ein erheblicher Anteil des Zuflusses zum Bodensee aus den unmittelbar angrenzenden Einzugsgebieten und nicht via Rhein erfolgt sein muss. Beim zweiten Ereignis (Pfingsten) vom 22. Mai ist dem Bodensee vor allem via Rhein, aber auch aus Deutschland viel Wasser zugeflossen.

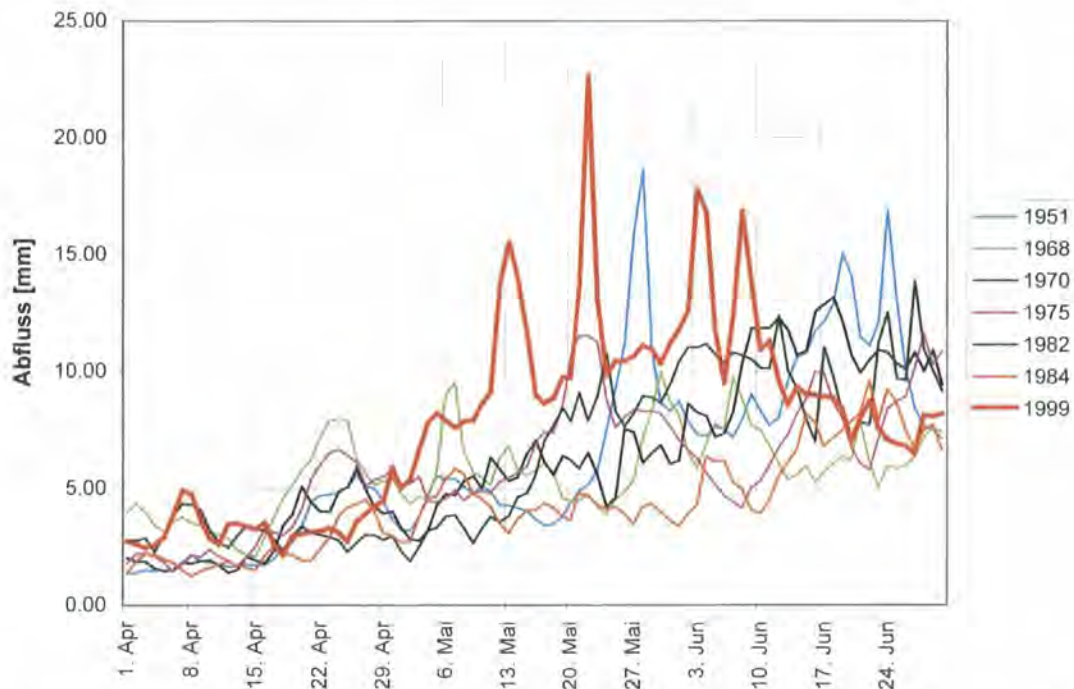


Fig. 6.9: Zuflüsse zum Bodensee aus dem Alpenrhein gemessen an der Abflussstation Rhein-Diepoldsau bzw. an der Vorgängerstation in den Vergleichsjahren (Fläche des Einzugsgebiets: 6119 km²)

Im Einzugsgebiet des Bodensees war aber nicht nur der Mai ausserordentlich niederschlagsreich. Auch im Juni 1999 fielen verbreitet überdurchschnittliche Niederschläge, welche bei Diepoldsau am 4. und 8. Juni zu zwei weiteren Hochwasserereignissen führten, die eine ähnliche Abflussspitze aufwiesen, wie das Hochwasser vom 13. Mai. Diese überdurchschnittlichen Niederschläge waren zusammen mit der in höheren Lagen andauernden Schneeschmelze im wesentlichen dafür besorgt, dass der Seespiegel erst nach dem 10. Juni langsam zu sinken begann.

Thunersee

Einen grundsätzlich anderen Verlauf des Seespiegels zeigt der Thunersee (vgl. Fig. 6.10), der im Gegensatz zum Bodensee reguliert wird. In den meisten Fällen bewegt sich der Seepiegel zwischen 557,5 und 558 m ü.M. Einzig in den Jahren 1970 und 1999 ist in der untersuchten Periode eine grössere Abweichung davon aufgetreten. Beide Jahre waren durch eine rasche Schneeschmelze (vgl. Fig. 6.11) und hohe Niederschläge (vgl. Fig. 6.12) gekennzeichnet.

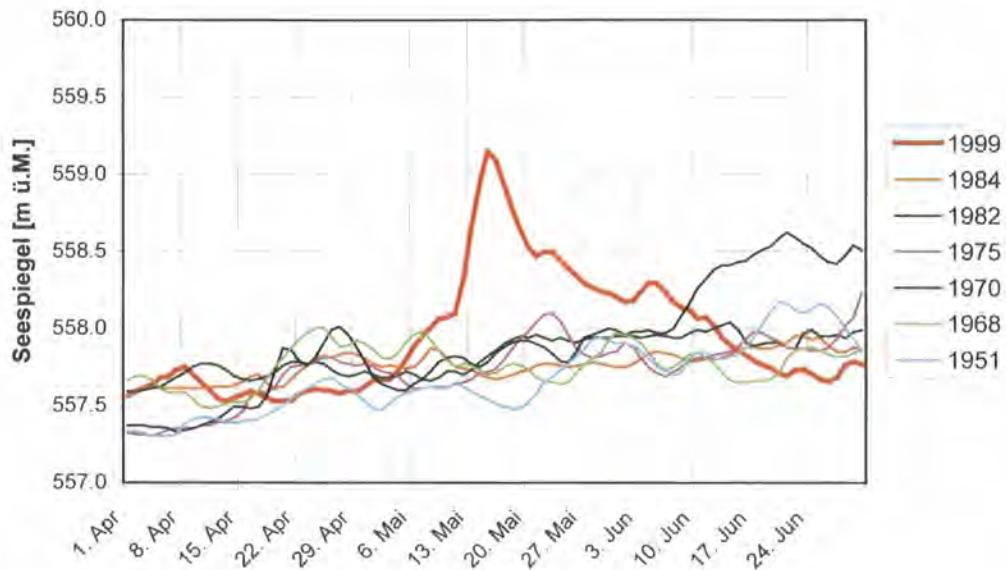


Fig. 6.10: Verlauf des Seespiegels des Thunersees in den Vergleichsjahren (Einzugsgebietsfläche: 2490 km²).

Auch im Jahr 1984 war ein sehr rascher Abbau der Schneedecke zu beobachten, der in den tieferen Lagen, repräsentiert durch die Station Mürren, Anfang Juni abgeschlossen war, sich aber in höheren Lagen noch bis Ende Juni weiterzog. Der Seespiegel lag 1984 ab Mitte Mai bis fast Ende Juni dauernd auf einem hohen Stand, der in einer ersten trockenen Phase weitgehend durch die verbreitete Schneeschmelze und in einer zweiten, eher feuchten Phase ab Anfang Juni im Wesentlichen durch die dauernden Niederschläge und die in hohen Lagen fortschreitende Schneeschmelze bedingt war. Dadurch dass die Niederschläge und die Schneeschmelze in den tieferen Lagen zeitlich nicht zusammentrafen, überstieg der Seepiegel nie die Schadensgrenze.

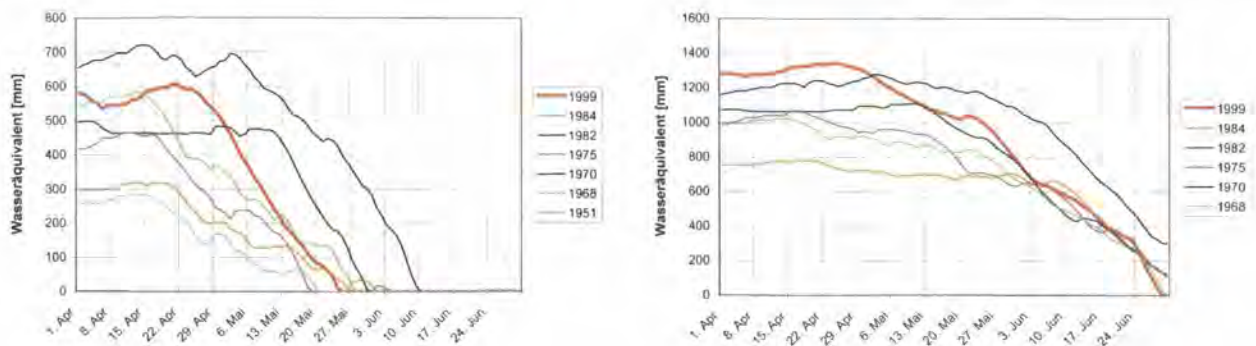


Fig. 6.11: Simulierte Entwicklung des Wasseräquivalents der Schneedecke in den Vergleichsjahren nach dem 1. April an den Stationen Mürren (links, 1660 m ü.M.) und Hasliberg (rechts, 1830 m ü.M.).

Einen auf den ersten Blick erstaunlichen Anstieg zeigt der Seespiegel des Thunersees um den 10. Juni 1970, da er weder mit einem Niederschlagsereignis noch mit einer deutlichen Zunahme der simulierten Schneeschmelze zusammentraf. Erst das Diagramm des 5-tägigen Temperaturmittels in Chur (vgl. Fig. 6.7), das etwa jenem in Interlaken entspricht, gibt einen Hinweis auf die Ursache. Der Anstieg des Seepiegels fiel zeitlich mit einem deutlichen Anstieg der Temperatur zusammen, der zu einer auch in hohen Lagen einsetzenden Schneeschmelze führte. Entsprechend rasch wurde die Schneedecke an der Station Hasliberg im Juni 1970 abgebaut (vgl. Fig. 6.11). Dieser Anstieg der Schneeschmelze wirkte sich besonders im Einzugsgebiet Aare - Ringgenberg aus (vgl. Fig. 6.13), bei dem 40 % der Fläche oberhalb von 2500 m ü.M. liegen. Im deutlich tiefergelegenen Einzugsgebiet der Simme dagegen (90 % der Fläche liegen unterhalb von 2500 m ü.M.) stieg der Abfluss nur kurz um etwa 25 % an, um dann rasch wieder auf den Stand vor dem 10. Juni zu sinken.

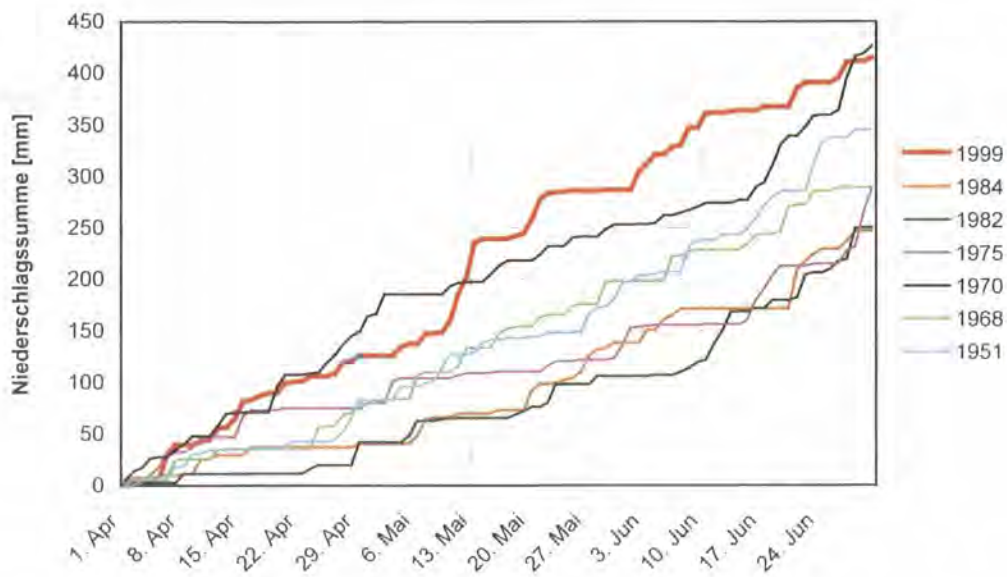


Fig. 6.12: Aufsummierte Niederschläge in den Vergleichsjahren nach dem 1. April an der Station Interlaken.

Noch während dieser intensiven Schneeschmelzperiode setzten um den 17. Juni bei gleichbleibend hohen Temperaturen Niederschläge ein, welche den Seepegel weiter leicht ansteigen liessen. Vergleicht man die Niederschläge in Interlaken von Ende Juni 1970 mit jenen vom Mai 1999, scheint es auf den ersten Blick erstaunlich, dass der Seespiegel 1970 nicht stärker angestiegen ist, da in beiden Perioden je etwa 150 mm Niederschlag fielen und sich auch die Intensitäten nur wenig unterschieden.

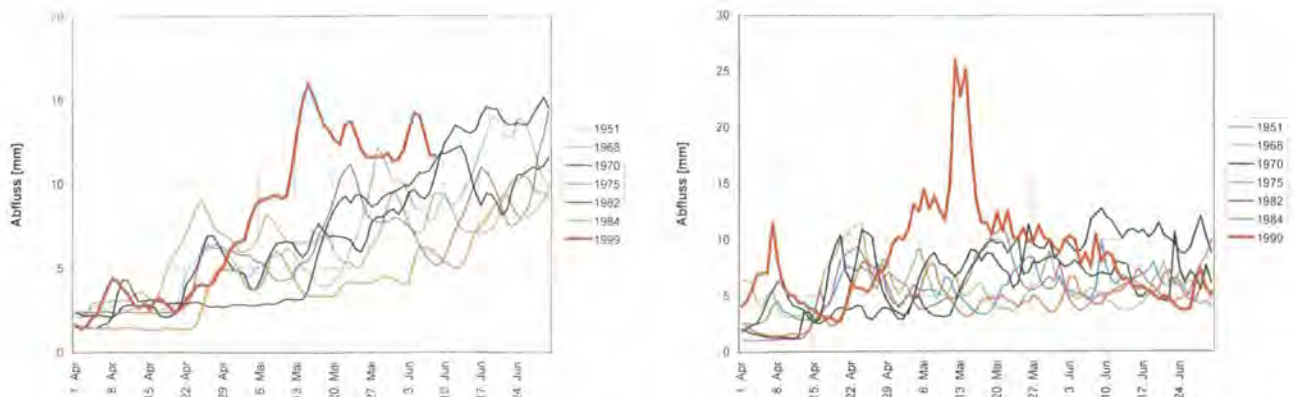


Fig. 6.13: Abflussganglinien der Abflussstationen Aare - Ringgenberg bzw. Unterseen (links, Fläche: 1129 km²) und Simme-Oberwil (rechts, Fläche: 344 km²) in den Vergleichsjahren.

Einen Hinweis auf den wesentlichen Unterschied zwischen 1999 und 1970 geben die Abflüsse, insbesondere derjenige der Simme. Während diese um den 13. Mai 1999 sehr hohe Abflussmengen aufwies, sind im Juni 1970 wohl erhöhte, aber keine ausserordentlichen Abflüsse festzustellen. Auch dem Abfluss aus dem Brienzensee bei Ringgenberg fehlte 1970 die ausgeprägte Spitze vom 15. Mai 1999. Einen weiteren wichtigen Hinweis geben die Witterungsberichte der SMA für den Juni 1970, welche für die Perioden vom 16. und 17., 22. und 23. sowie vom 26. und 27. Juni von verbreiteten Gewittern auf der Alpennordseite sprechen. Gewitter weisen nun nicht die gleiche räumliche Verbreitung auf wie die Starkniederschläge vom Mai 1999. Sie treten zudem oft zeitlich gestaffelt auf und führen deshalb zu weniger ausgeprägten Abflussspitzen in Einzugsgebieten wie der Simme oder der Aare. Weiter ist zu berücksichtigen, dass Ende Juni weite Teile der tiefergelegenen Einzugsgebiete trotz der sehr späten Schneeschmelze schneefrei waren, während 1999 die grossflächigen Starkniederschläge mit dem Abschluss der Schneeschmelze in diesen Gebieten zusammentrafen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Zuflüssen im Juni 1970, vor allem aus dem Bereich des Kandertals, stieg der Thunersee 1970 wesentlich weniger rasch an als 1999.

Beim Vergleich der Jahre 1999 und 1970 fällt weiter auf, dass in beiden Jahren der Thunersee in einer Periode mit vergleichsweise geringen Niederschlägen nahe an bzw. sogar leicht über die Schädengrenze stieg (Periode um den 6. Mai 1999 bzw. um den 10. Juni 1970). 1999 flossen dem Thunersee in dieser Periode täglich zwischen 25 und 30 Mio. m³ Wasser zu. 1970 lagen die Zuflüsse in einem ähnlichen Bereich. Dies entspricht etwa jener Wassermenge, die den Thunersee pro Tag verlässt, wenn der Pegel zwischen 558,0 m ü.M. und der Schädengrenze von 558,30 m ü.M. liegt und die Schleusen voll geöffnet sind. Da der Abfluss aus dem See kleiner ist, wenn der Seepegel tiefer liegt (vgl. Kap. 8.1), muss der Seepegel bei jeder länger andauernden Schmelzperiode, die ähnlich intensiv ist wie 1999 und 1970, auf ein Niveau nahe der Schädengrenze ansteigen. Fällt nun in einer derartigen Periode noch Niederschlag, ist eine Überschreitung der Schädengrenze unumgänglich und der See tritt über seine Ufer. Der Umfang der Überflutungen hängt dabei im Wesentlichen von der Intensität und vom Ausmass der Niederschläge ab.

Nicht mit den oben erläuterten Ereignissen vergleichen lässt sich das Hochwasser vom 13. Mai 1718 in Thun, das durch eine Messingtafel belegt ist (Niklaus, 1999). Damals stand das Wasser am ehemaligen Zunfthaus der Oberherren etwa einen halben Meter höher als 1999. Allerdings bestand damals, kurz nach dem Kander-Durchstich von 1714, in Thun nur die innere Aare als Ausfluss aus dem Thunersee, welche heute nur etwa einen Drittel des Abflusses aus dem See aufnimmt. Die äussere Aare wurde erst 12 Jahre nach dem Durchstich und somit nach dem Hochwasser von 1718 erstellt.

FAZIT:

Für den Thunersee wie für den Bodensee zeigt sich, dass es vor allem die grossflächigen Niederschläge vom Mai 1999 und ihr zeitliches Zusammentreffen mit einer intensiven Schneeschmelze in einem breiten Höhenbereich waren, die das Jahr 1999 von den anderen untersuchten schneereichen Jahren unterscheiden. Sowohl eine andere zeitliche Abfolge als auch eine weniger starke Ausprägung eines der beiden auslösenden Faktoren hätte zu einem wesentlich anderen Ereignisablauf geführt. Der ausserordentlich rasche Pegelanstieg auf einen sonst nicht erreichten Stand ist vor allem auf die Niederschläge zurückzuführen und wäre alleine aufgrund der Schneeschmelze nicht erreicht worden.

Dementsprechend lassen sich Hochwasserereignisse wie 1999 in ihrem ungefähren Ausmass nur dann voraussagen, wenn das Ausmass und die Intensität von allfälligen Niederschlägen prognostizierbar ist. Entsprechend ist eine langfristige Warnung für schwere Hochwasser nicht möglich. Grosse Schneeakkumulationen und eine anschliessende intensive Schneeschmelze sind aber wichtige Hinweise auf ein erhöhtes Risiko und sollen zur Vorsicht und zur Vorbereitung (Prävention) anregen. Verhindern lassen sich Überschwemmungen jedoch nicht.

7 ERFAHRUNGEN UND MASSNAHMEN

Im Zusammenhang mit Massnahmen und dem Mai Hochwasser von 1999 denkt man unweigerlich zuerst an Sandsäcke und Pumpen, also um den Kampf, den Feuerwehr, Zivilschutz, Militär und private Helfer während Tagen unmittelbar mit dem Hochwasser geführt haben. In diesem Bericht sollen aber nicht diese, in der Regel punktuellen Massnahmen, im Vordergrund stehen. Viel mehr soll in Kap. 7.1 auf die Möglichkeit eingegangen werden, die Hochwasser auf regionalem, ja nationalem Niveau zu beeinflussen: auf den Rückhalt grosser Abflussmengen in natürlichen oder künstlichen Seen. In Kap. 7.4 soll auf die überregional gültigen Erkenntnisse eingegangen werden, welche betroffene Krisenstäbe im Umgang mit dem Hochwasser gemacht haben. Sowohl die Regulierung von Seen zum Hochwasserschutz als auch die Massnahmen und Planungen von Krisenstäben basieren wesentlich auf Informationen über die zukünftige Entwicklung eines Hochwassers. Diese wiederum ist vor allem durch das Wetter bestimmt, weshalb in Kap 7.2 auf die Wettervorhersage und in Kap. 7.3 auf die Abflussvorhersage anlässlich der Unwetter vom Mai 1999 eingegangen werden soll.

7.1 RÜCKHALT IN DEN SEEN UND DEN KRAFTWERKS-SPEICHERN

Armin Petrascheck, Jean Python

7.1.1 GRUNDSÄTZLICHES ZUR SEEREGULIERUNG

Schneesmelzhochwasser sind durch hohe, aber nicht extreme Spitzen gekennzeichnet, die lange andauern und entsprechend in sehr grossen Abflussvolumina resultieren. Dies führt zu hohen Seeständen in den grossen Voralpenseen. Bei der Beurteilung des Verhaltens dieser Seen ist zu beachten:

- Der Seestand ergibt sich aus dem Wechselspiel zwischen Zufluss und Abfluss. Ist der Zufluss grösser als der Abfluss, steigt der Seespiegel, ist er kleiner, fällt er. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Seespiegels hängt von der Differenz zwischen Zu- und Abfluss und der Seeoberfläche ab. Wenn beim Bodensee die Differenz der Tagesmittel von Zu- und Abfluss ca. $60 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt, ergibt sich ein Anstieg von 1 cm/d . Beim wesentlich kleineren Thunersee verursacht bereits eine Zuflussdifferenz von nur $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ während 24 Stunden einen Anstieg um 1 cm .
- Der Seeabfluss ist eine Funktion des Seespiegels. Bei den unregulierten Seen (Bodensee, Walensee) entspricht dies der Kapazität des Flussbettes beim Seeausfluss. Dementsprechend ist der Seestand bei den kleinen Winterzuflüssen tief (z.B. Bodensee 395,05 m ü.M., Abfluss ca. $230 \text{ m}^3/\text{s}$), bei den reichlichen Sommerzuflüssen höher (Bodensee Juli 1999: 396,45 m ü.M., Abfluss ca. $620 \text{ m}^3/\text{s}$), was einer Änderung des Abflusses von ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$ pro cm Seestand entspricht. Im Bereich der höchsten Wasserstände (Bodensee 397.88 m ü.M., $Q = 1150 \text{ m}^3/\text{s}$) ist die Abflussänderung etwas grösser ($3,5$ bis $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ pro cm Seeanstieg). Entsprechend träge reagiert dieser See auf Abflussänderungen und widerspiegelt in den Seeständen gut das Abflussregime im Verlaufe des Jahres. Beim Thunersee steigt bei vollständig geöffnetem Wehr (559,17 m ü.M., $Q = 570 \text{ m}^3/\text{s}$) der Abfluss um $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ pro cm Anstieg des Seestandes. Die Differenz zum Zufluss ist aber vergleichsweise deutlich geringer, weshalb sowohl Seespiegel als auch Abfluss rasch auf Änderungen des Zuflusses reagieren.
- Bei regulierten Seen (Thunersee, Juraseen, Zürich- und Vierwaldstättersee) gilt ebenfalls, dass der Seeausfluss nicht über die Kapazität des Flussbettes bzw. der Wehranlage gesteigert werden kann. Durch entsprechende Einstellung der Wehröffnungen kann der Abfluss im Vergleich zu diesem Grenzwert verringert, aber nicht erhöht werden. Sind alle Wehrfelder geöffnet, wie dies beim Thunersee ab dem 2. Mai der Fall war, verhalten sich regulierte und nicht regulierte Seen gleich und es besteht auch bei einem regulierten See keine Möglichkeit zur Abflusserhöhung mehr.
- Für die regulierten Seen wurden Reglemente erarbeitet, welche die Interessen der Seeanstösser, der Unterlieger, der Schifffahrt, der Fischerei und anderer Umweltaspekte bestmöglich zu optimieren

versuchen. Dementsprechend sollen je nach Jahreszeit optimale Seestände herrschen. Diese Reglemente sind verbindlich, da jedes Abweichen einer Interessengruppe Nachteile bringt. So wäre es im Interesse der Schifffahrt in Basel gewesen, die an 36 Tagen infolge Hochwasser unterbrochen war, verstärkt Wasser im Bieler und Neuenburgersee zurück zu halten, was aber dort zu Überschwemmungen der Seeufer geführt hätte. Das verzögerte Ansteigen der Seen zugunsten des Hochwasserretentionsraumes im Frühjahr 1999 führte zu nicht idealen Bedingungen für den Hechtlaich. Der Ermessensspielraum, mit dem auf aussergewöhnliche Situationen reagiert werden kann, ist somit klein. Dies insbesondere weil, wegen der Trägheit des Seeregimes lange vor einem allfälligen Ereignis reagiert werden müsste. Kurzfristige Reaktionen sind wegen der beschränkten Abflusskapazität wenig wirksam.

7.1.2 VORBEREITENDE MASSNAHMEN

Im März wurden sowohl im Kanton St. Gallen als auch im Kanton Bern Arbeitsgruppen gegründet, welche die Entwicklung der Abflüsse verfolgten und vorbereitende Massnahmen einleiteten. Für den Thunersee wurden regelmässige Vorhersagen erstellt. Der See selbst wurde im April – abweichend vom Reglement – am tiefsten Stand gehalten, der die Schifffahrt noch ermöglichte. Der Hagneckkanal zwischen Aare und Bielersee wurde kontrolliert und wo erforderlich verstärkt und von Gehölz befreit, um eine Abflusskapazität von 1300 m³/s sicher zu stellen. Risikokarten wurden an die anstossenden Gemeinden verteilt. Auch alle anderen regulierten Seen wurden auf dem tiefstmöglichen Stand gehalten. Deshalb stand im Bieler- und Neuenburgersee Anfang Mai noch das volle Rückhaltevolumen von 300 Mio. m³ zur Verfügung.

7.1.3 RÜCKHALT IN DEN SEEN

Während der eigentlichen Hochwasserperiode ab dem 10. Mai waren bei allen betroffenen Seen die Wehre ganz geöffnet und kein zusätzlicher Rückhalt zum Schutze der Unterlieger mehr möglich. Eine begrenzte Ausnahme war der Bielersee, an dem wegen der hochgehenden Emme zwischen dem 11. Mai 1999 und dem 12. Juni 1999 neun Mal der Abfluss beim Wehr Port kurzfristig reduziert werden musste, damit die Abflussmenge von 800 m³/s in der Aare bei Murgental nicht überschritten wurde. Wie bedeutend der Einfluss der Seen auf den Abfluss war, ist aus Tab. 7.1 ersichtlich, wobei der Walensee und verschiedene kleinere Seen nicht berücksichtigt wurden.

Der Rückhalt von 950 Mio. m³ in den kritischen Tagen vom 10. bis 15. Mai entspricht in Rheinfeldern einem durchschnittlichen Abfluss von 2200 m³/s oder fast 50 % des beobachteten Spitzenabflusses von 4550 m³/s. Thuner- und Brienersee verminderten den durchschnittlichen Abfluss der Aare im gleichen Zeitraum um 175 m³/s oder um 30 % des Spitzenabflusses in Bern (620 m³/s). Durch den Bieler- und den Neuenburgersee wurden weitere 300 m³/s zurückgehalten, so dass in der Aare unterhalb von Biel Überschwemmungen verhindert werden konnten. Diese bedeutenden Rückhalte der Seen sind zum grossen Teil natürlich, wurden aber durch die Umleitungen der Aare, der Kander und der Linth im vergangenen Jahrhundert gezielt zum Hochwasserrückhalt ausgenützt.

7.1.4 RÜCKHALT IN DEN KRAFTWERKSSPEICHERN

War der ausserordentlich hohe Rückhalt bei den Seen von den Anliegern keineswegs geschätzt, so war der Rückhalt in den Kraftwerksspeichern nicht nur aus Gründen des Hochwasserschutzes, sondern auch der Energieerzeugung willkommen. Die Speicher waren am Ende des Winters weitgehend geleert und konnten das anfallende Schneeschmelzwasser gut aufnehmen. Der Einfluss der Kraftwerksspeicher auf die verschiedenen Seen wird in Tab. 7.2 gezeigt.

Tab. 7.1: Hochwasserrückhalt der grossen Seen im Rheineinzugsgebiet. Die maximalen Seestände sind hervorgehoben.

Seen	Fläche [km ²]	Schadens- grenze S m ü.M.	1	2	3	4	5	6
			Pegel- Stand 01.05.99 P _{1.5.99}	Pegel- Stand 10.05.99 P _{10.5.99}	Pegel- Stand 15.05.99 P _{15.5.99}	Pegel- Stand 24.05.99 P _{24.5.100}	Pegel- Stand 01.06.99 P _{1.6.99}	Pegel- Stand 21.06.99 P _{21.6.99}
Bielensee	39.8	430.25	429.38	429.32	430.19	429.97	429.70	429.42
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				-0.06	0.87	-0.22	-0.27	-0.28
				-2.4	34.6	-8.8	-10.8	-11.1
Bodensee, Obersee	541.2	397.14	395.77	396.12	397.16	397.88	397.72	397.47
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.35	1.04	0.72	-0.16	-0.25
				189.4	562.9	389.7	-86.6	-135.3
Brienzersee	29.8	564.80	563.98	564.38	565.16	564.79	564.66	564.20
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.40	0.78	-0.37	-0.13	-0.46
				11.9	23.2	-11.0	-3.9	-13.7
					16./17.Mai			
Lac Neuchâtel	217.9	430.35	429.29	429.39	429.82	430.06	429.81	429.49
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.10	0.43	0.24	-0.25	-0.32
				21.8	93.7	52.3	-54.5	-69.7
Thunersee	48.4	558.30	557.70	558.08	559.17	558.44	558.18	557.68
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.38	1.09	-0.73	-0.26	-0.50
				18.4	52.8	-35.3	-12.6	-24.2
Vierwaldstättersee	113.6	434.45	433.42	433.75	434.71	434.94	434.60	433.96
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.33	0.96	0.23	-0.34	-0.64
				37.5	109.1	26.1	-38.6	-72.7
						23.Mai		
Zürichsee	90.1	406.60	406.03	406.11	406.93	407.01	406.58	406.05
Pegelstandänderung <i>Speicherung</i> [Mio m ³]				0.08	0.82	0.08	-0.43	-0.53
				7.2	73.9	7.2	-38.7	-47.8
Summe	1080.8							
<i>Speicherung</i> [Mio m ³]				283	950	420	-245	-374

Tab. 7.2: Wöchentlicher Rückhalt in den Kraftwerksspeichern in Mio. m³ bzw. als durchschnittlicher Abfluss in m³/s.

Einzugsgebiet		26.4.	03.5.	10.5.	17.5.	24.5.	31.5.	7.6.	14.6.	21.6.	Summe
Bodensee(CH)	Mio. m ³	0	12.8	38.0	51.6	29.6	53.5	72.6	44.7	23.5	326.3
	m ³ /s		21.2	62.8	85.4	48.9	88.4	120.0	73.9	38.8	69
Bodensee (A) (siehe Text)	Mio. m ³ m ³ /s										
Thunersee	Mio. m ³	0	-0.8	2.7	14.2	7.2	11.3	21.9	3.2	4.7	64.4
	m ³ /s		-1.3	4.5	23.5	11.9	18.6	36.2	5.3	7.8	13
Bielersee ohne Aare	Mio. m ³	0	-2.1	32.6	49.4	69.9	0.8	4.4	3.0	-1.0	157.0
	m ³ /s		-3.5	53.9	81.7	115.6	1.3	7.3	5.0	-1.6	32.4
Vierwaldstättersee	Mio. m ³	0	2.5	6.2	10.3	18.6	13.0	10.9	8.6	3.4	73.5
	m ³ /s		4.1	10.3	17.1	30.8	21.4	18.0	14.2	5.5	15.2
Zürichsee	Mio. m ³	0	20.4	24.3	53.5	27.3	3.8	8.5	8.5	-2.2	144.1
	m ³ /s		33.8	40.1	88.5	45.1	6.3	14.1	14.1	-3.7	29.8
Summe	Mio. m³ m³/s	0	32.8	103.8	179.0	152.6	82.4	118.3	68.0	28.4	765.3 158

Das zurückgehaltene Volumen von 765 Mio. m³ in den erfassten 30 Kraftwerksspeichern entspricht ungefähr 50 % des Gesamtvolumens (1513 Mio. m³). Da sich am 26. April 1999 noch 402 Mio. m³ in den Speichern befanden, betrug der Gesamtfüllungsgrad am Ende der betrachteten Periode 77 % (1168 Mio. m³). Die in Tab. 7.2 aufgezeigten Abflussminderungen in m³/s gelten für den Zufluss zum jeweiligen See. Sie dürfen nicht zu einem Gesamteinfluss auf den Rhein bei Rheinfelden aufsummiert werden, da eine Umlagerung in den grossen Seen erfolgt wäre.

Nicht in der Tabelle enthalten ist ein Rückhalt der RADAG durch die Schluchseekraftwerke die am 13. Mai 1999 den Spitzenabfluss des Rheins bei Rheinfelden um ca. 200 m³/s verminderten.

Der Rückhalt in den Schweizer Kraftwerksspeichern hat am Bodensee den maximalen Seespiegel um etwa 20 cm verringert. Der Rückhalt in den österreichischen Seen ist nicht genau bekannt. Laut Mitteilung der Kraftwerksgesellschaft wurde eine Verminderung des Spitzenabflusses des Ills um 50 m³/s erreicht. Am Thunersee war der Einfluss auf den Höchststand am 15. Mai etwa 7-8 cm. Dadurch wurde auch ein zweites Überschreiten der Schädengrenze am 5. Juni 1999 verhindert.

Von besonderer Bedeutung war der Rückhalt an der Saane (Zeile Bielersee ohne Aare in Tab. 7.2). Da der Hagneckkanal durch die ausserordentlich hohen Abflussmengen der Aare in Bern, der Sense und der Saane sein Fassungsvermögen zu überschreiten drohte, haben die Entreprises électriques fribourgeoises (EFF) in einer ausserordentlichen Aktion im März die Speicher zur Schaffung von Retentionsraum sehr tief abgesenkt. So stand beim Hochwasser ein grosser Retentionsraum zur Verfügung, der vollständig genutzt wurde und so ein Überborden verhindern konnte.

Ähnlich wichtig war der Rückhalt im Einzugsgebiet des Walensees. In der untersuchten Periode wurden 58 Mio. m³ (12 m³/s) zurück gehalten. In der entscheidenden Woche vom 10. bis 17. Mai wurden 16 Mio. m³ zurückgehalten, was einem durchschnittlichen Abfluss von 27 m³/s entspricht. Dies mag angesichts eines Gesamtabflusses in Weesen von 320 m³/s als wenig erscheinen. Für den kleinen Walensee (24 km²) hätte das zusätzliche Zuflussvolumen aber einen merkbaren Anstieg verursacht. Da der Linthkanal schon über die Ufer zu treten drohte und an verschiedene Stellen nur durch Provisorien ein Überströmen verhindert werden konnte, bildete auch dort der Speicherrückhalt einen entscheidenden Beitrag zur Verhinderung einer schweren Überschwemmungskatastrophe.

Fazit:

Langdauernde, aber nur vereinzelt extrem hohe Zuflüsse führten zu Höchstständen in den Alpenrandseen der Deutschschweiz. Durch den dabei erfolgten Wasserrückhalt wurden die Hochwasserspitzen flussabwärts deutlich reduziert. Der Beeinflussung des Abflusses durch die Regulierung der Seen waren wegen der Grösse der Zuflüsse enge Grenzen gesetzt. Der Rückhalt in den Kraftwerksspeichern lieferte einen wesentlichen Beitrag zur Schadenminderung.

7.2 VORHERSAGEN DER BEIDEN NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE IM MAI 1999

Eugen Müller, Francis Schubiger, Patrick Hächler

Wettervorhersagen spielen im Umgang mit Hochwasserereignissen eine entscheidende Rolle. Zu unterscheiden sind dabei mittelfristige Vorhersagen von 3 bis 5 Tagen, Kurzfristvorhersagen von 1 bis 2 Tagen und das sogenannte „Nowcasting“, also die Kürzestfristvorhersagen (einige Stunden) während eines Ereignisses. Langfristvorhersagen über mehrere Wochen, wie sie bei den träge reagierenden Seen zur Ergreifung von Massnahmen erforderlich wären, sind heute nicht in ausreichender Güte verfügbar. Die mittelfristigen Vorhersagen sind für die Hochwasserwarnung und für vorbereitende Massnahmen von Bedeutung. Für die Krisenbewältigung während einem eingetretenen Hochwasser sind jedoch meist die Kurzfristvorhersagen zur Wetterentwicklung in den nächsten 24 Stunden entscheidend. Die Hochwasser des Jahres 1999 bildeten dabei insofern eine Ausnahme, als wegen des langsamen Reagierens der Seen eine Vorhersage über mehrere Tage zur Krisenbewältigung notwendig war.

Wichtig ist bei den Vorhersagen der zentralen Stellen, dass diese nach dem „Holprinzip“ bereit gestellt werden, was heute mit dem Internet möglich ist. Das Holprinzip ist wichtig, da in den Krisenstäben zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten rasch Entscheide getroffen werden müssen. Eine Kontaktnahme mit dem Prognostiker ist oft nicht möglich, führt zu Zeitverzögerungen und hält diesen von seiner eigentlichen Tätigkeit, der ständigen Verbesserung der Prognose, nur ab. Unnötig darauf hinzuweisen, dass in solchen Momenten sehr viele Personen eine Auskunft wünschen.

7.2.1 DIE SYNOPTISCHE ENTWICKLUNG DER BEIDEN EREIGNISSE, DIE ZUM HOCHWASSER FÜHRTEN

Die Hochwasser vom Mai 1999 wurden durch zwei Hauptniederschlagsereignisse ausgelöst, die sich von der grossräumigen Zirkulation her grundsätzlich unterscheiden. Der erste Starkniederschlag (11./12. Mai) wurde durch eine quasi-stationäre West-Südwestströmung über Mitteleuropa ausgelöst, der zweite (21./22. Mai) hingegen durch ein Tiefdruckwirbel, der von Italien nach Osteuropa zog.

Synoptische Entwicklung des Ereignisses vom 11./12. Mai

Über dem Ostatlantik lag am 10. Mai ein grosser langwelliger Höhentrog, auf dessen Vorderseite eine west-südwestliche Strömung zu einem sich verflachenden Rücken über Mitteleuropa (Achse Dänemark-Oesterreich) führte. Am 11. Mai füllte sich der ostatlantische Trog allmählich auf und verband sich mit dem über Skandinavien-Baltikum positionierten Trog. Durch diese Verbindung entstand eine gestreckte West-Südwestströmung, die vom Atlantik bis nach Osteuropa verlief. Im Bereich der Konfluenz über dem Ostatlantik wurde mit frontogenetischer Wirkung subtropische Meeresluft gegen frische Polarluft geführt und in die Zirkulation einbezogen. Dies führte zu einer weiteren Verschärfung des frontalen Temperaturgradienten, was sich auch in der Verstärkung der Höhenströmung äusserte. Der Kern der Höhenströmung (Jet streak) verlagerte sich stromabwärts Richtung Mitteleuropa und induzierte an der Bodenfront eine Welle. Auf den 12. Mai bildete sich zu den Westalpen hin ein sekundärer Ast des Jets. Dieser übernahm die weitere Steuerung der Bodenwelle. Verursacht durch die lange Stationarität der Frontalzone im Bereich der Alpennordseite (warme Kante, alpenparallele Ausrichtung) sowie durch die frontale Welle, die für verstärkte Hebung sorgte, wurden die sehr intensiven und anhaltenden Niederschläge ausgelöst. Einen wesentlichen Beitrag dazu lieferten sicherlich auch die beteiligten Luftmassen mit ihrem enormen Temperaturogegensatz. Die Radaraufzeichnungen geben auch einen Hinweis darauf, dass vor allem der relativ schmale Streifen grösster Regenmengen eventuell durch ein Zusammenlaufen der Strömung in den unteren Schichten bedingt durch eine Konvergenz der Front mit den Alpen verstärkt wurde. Zudem kann auch der Effekt der Reibungskonvergenz (Alpen/Vorland) mitgespielt haben. Dies wäre auch eine Erklärung für die Position des Hauptniederschlagbandes über dem Mittelland.

Synoptische Entwicklung des Ereignisses vom 21./22. Mai

Wie zu Beginn schon erwähnt, wurde die zweite Starkniederschlagsphase durch eine andere Wettersituation als im ersten Fall verursacht. Die Höhenströmung war gekennzeichnet durch einen Trog, der sich von den

Britischen Inseln bis zu den Balearen erstreckte. Er verlagerte sich mit anwachsender Amplitude nur noch sehr langsam ostwärts. Am 21. Mai schliesslich lag das abgespaltete Höhentief über Norditalien. In der Zirkulation des Höhentiefs war ein Teiltrog eingelagert, der von der Adria zu den Ostalpen schwenkte. Auf der Vorderseite dieses Teiltroges mit seinem sehr divergenten Strömungsfeld bildete sich ein beachtliches Hebungsgebiet. Dadurch entwickelte sich in den unteren Schichten eine Zyklone, die unter weiterer Vertiefung nach Osteuropa zog. Durch die Position des Tiefkerns über Osteuropa gelangte der östliche Alpenordhang in die rückseitige nördliche Strömung, was dort zu Stau führte. Nebst dieser beschriebenen Anordnung der Drucksysteme waren aber auch die beteiligten Luftmassen für die ausserordentlichen Regenfälle mitverantwortlich. Denn aus dem Mittelmeerraum wurde warm-feuchte Luft in höheren Schichten zyklonal und unter Aufgleiten um den Tiefdruckwirbel herum gegen den Alpennordhang geführt, was auch durch Trajektorienberechnungen nachgewiesen werden konnte. Dies führte nicht nur in den östlichen Landesteilen zu Starkniederschlägen und folgenden Überschwemmungen, sondern auch im benachbarten bayrischen Alpenvorland.

7.2.2 VORHERSAGEN DES SCHWEIZER MODELLS (SM)

Das Schweizer Modell (SM), das in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst entwickelt wurde, ist ein numerisches hochauflösendes, hydrostatisches Wettervorhersagemodell. Es hat in der Horizontalen 145 x 145 Gitterpunkte mit einer Maschenweite von 14 km und bedeckt ganz West- und Mitteleuropa (von Irland, Dänemark, Polen im Norden bis Spanien, Süditalien im Süden). In der Vertikalen verfügt das Modell über 20 Rechenflächen. Das SM rechnet zweimal täglich bis 48 Stunden im Voraus. Die Berechnung geschieht auf dem Hochleistungsrechner CRAY SV1-B der ETH in Zürich [weitere Informationen zum SM auf dem Internet unter: <http://www.meteoschweiz.ch/de/dienste/SM/>].

Die Resultate des SM werden in stündlicher Auflösung mit dem automatischen Beobachtungsnetz der MeteoSchweiz (ANETZ) verifiziert. Für den Niederschlag werden zudem die 6-Stundensummen in Kontingenztafeln ausgewertet und daraus verschiedene Gütemasse ("frequency bias", "false alarm rate", "probability of detection", "threat score") für die Schwellwerte 0.1, 2, 10, 30 und 50 mm/6h ermittelt. Im Schweizer Mittelland wurden im Frühling 1999 die schwachen Niederschläge (0.1 mm/6h) um ca. 15 % überschätzt und die starken (> 10 mm/6h) um ca. 15 % unterschätzt. In einzelnen Wetterlagen kann dieser systematische Fehler stark variieren, wie die beiden Niederschlags-Ereignisse von Mai 1999 aufzeigen. Mögliche Ursachen dafür sind: (1) Anfangszustand ungenügend erfasst (in der Atmosphäre wie auch im Boden, der für die Verdunstung wichtig ist), (2) Parametrisierung der Niederschlagsprozesse läuft über zwei ganz verschiedene Wege (stratiforme und konvektive Niederschläge), (3) Randfelder des übergeordneten Modells (im Mai 1999 das Europa Modell des Deutschen Wetterdienstes).

Im Sommer 2000 wird ein neues Modell am CSCS in Manno (TI) in einem präoperationellen Betrieb getestet: es ist nichthydrostatisch und hat eine horizontale Auflösung von 7 km.

Niederschlags-Vorhersagen für den 11./12. Mai 1999

Die beiden SM-Vorhersagen vom 11. Mai (00 UTC und 12 UTC) haben den Niederschlag des 11./12. Mai deutlich, bis zu einem Faktor 3, unterschätzt (vor allem im Gebiet mit den höchsten Regenmengen, vom Aargau bis St. Gallen). Der Beginn der Niederschläge am 11. Mai abends war korrekt. Die Niederschläge haben aber im SM am 12. Mai über dem Mittelland zu früh aufgehört. Einzig in den Voralpen (oberhalb 800 m), wo mengenmässig weniger Niederschlag fiel, war der zeitliche Verlauf bis am Abend des 12. Mai korrekt und die Unterschätzung geringer (ca. 30 %). Ein ähnliches Niederschlagsmuster am 18. Mai 1994 (24-Stundensummen des Niederschlags mit Maxima um 70-100 mm im nördlichen Mittelland vom Jura bis Alpstein) war vom SM hingegen recht gut wiedergegeben worden. Dies deutet auf Mängel in der Erfassung des Modell-Anfangszustandes, bzw. in den stündlichen Randfeldern des übergeordneten Modells hin. Denn auch die weniger hochaufgelösten Modelle (EZMW: europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, EM: Europa Modell des Deutschen Wetterdienstes) haben den Niederschlag deutlich unterschätzt.

auf Fig. 4.17 können mit einer Modellauflösung von 14 km nicht wiedergegeben werden. Eine genauere Verifikation des Niederschlags für eine bestimmte Fläche oder ein Einzugsgebiet muss mit den Radar-Niederschlagsdaten geschehen. Diese Arbeiten sind bei MeteoSchweiz in Entwicklung.

7.2.3 TEMPERATURVERHÄLTNISSE WÄHREND DEN HOCHWASSEREPISODEN IM MAI 1999

Die Temperaturen sind aus zwei Gründen für realistische Abflussprognosen von Bedeutung: die Höhe der Schneefallgrenze bestimmt, welcher Anteil des Niederschlags laufend in den Abfluss einbezogen wird und aufgrund der Höhe der Nullgradgrenze lässt sich das Schmelzpotential abschätzen.

Nach einem praktisch normal temperierten April wartete der Mai mit sehr milden Temperaturen auf. Im ganzen nordalpinen Bereich wurden auf der Basis der Messwerte des ANETZ im Mittel um rund 3 Grad höhere Temperaturen im Vergleich zur Norm gemessen. Bezogen auf die Nullgradgrenze ergibt sich eine positive Abweichung von etwa 500 Metern: anstelle des Durchschnittswertes von etwa 2400 wurden 2900 Meter registriert. Bezogen auf die beiden Niederschlagsereignisse zeigt es sich, dass die Nullgradgrenze besonders um den 13. Mai herum hoch lag, nämlich im Mittel auf 2800 Metern. Um den 21. Mai herum befand sie sich mit 2400 Metern wenigstens im normalen Bereich. Im anschliessenden Monat Juni waren dann übrigens die Temperaturverhältnisse wieder nahezu normal.

Zur Beurteilung der Schneefallgrenze und des Schmelzens der Schneedecke wäre es sinnvoller, nicht die Höhe der konventionellen Nullgradgrenze, sondern diejenige der Feuchttemperatur zu verwenden. Bei Schneefall wird mit einem Wert von $1,3^{\circ}\text{C}$ gerechnet, der den mittleren Übergang von Schnee zu Regen darstellt. Auch das Schmelzen einer Schneedecke orientiert sich an der Feuchttemperatur. Korrelationen mit den Schmelzprozessen sind für die Feuchttemperatur wesentlich besser als für die Trockentemperatur. Andererseits existiert aber keine Klimatologie der Feuchttemperatur, so dass notwendigerweise eben doch mit der gewöhnlichen Temperatur gearbeitet wird. Ein Blick auf die Feuchte zeigt übrigens, dass im Monatsmittel des Mai 1999 im alpinen Bereich etwa 2 % höhere Werte als im Normalfall zu verzeichnen waren. Dies verstärkte den Effekt der ohnehin schon hohen Nullgradgrenze. Dies ist um so erstaunlicher, als bei der übernormal ausgedehnten Schneedecke eher tiefere Taupunkte und somit tiefere Feuchte- oder Temperaturwerte zu erwarten gewesen wären. Dies deutet auf eine besonders massive und andauernde Zufuhr von warmfeuchten Luftmassen hin. Damit wurde offensichtlich der Abfluss drastisch erhöht.

Die Prognose der Nullgradgrenze wurde anhand von zwei Produkten von MeteoSchweiz überprüft. In den offiziellen Wetterberichten werden für den Folgetag stets quantitative Angaben dazu gemacht. Es zeigt sich, dass die jeweils im 3. Wetterbericht gemachten Aussagen im Durchschnitt für beide Niederschlagsereignisse auf weniger als 100 m genau stimmten, während die Streuung bei etwa 200 m lag. Auch die Tendenzen für die Folgetage wurden korrekt vorhergesagt. Anders sieht es bei den Temperaturprognosen aus, die eigens für hydrologische Zwecke gemacht werden. Auf der Basis der entsprechenden Temperaturprofile wurde die Höhe der Nullgradgrenze extrapoliert und mit den Messwerten verglichen. Für das erste Ereignis waren die Prognosen besser als auf 100 m genau. Merkwürdigerweise waren sie aber für das zweite Ereignis im Durchschnitt um etwa 300 m zu hoch, was $1,5^{\circ}\text{C}$ entspricht. Dies mag damit zusammenhängen, dass in diesen Prognosen der Effekt des Tagesganges zu hoch geschätzt wurde.

Fazit:

Die Wettervorhersagen anlässlich der Hochwasserereignisse vom Mai 1999 waren von sehr unterschiedlicher Qualität. Während die Niederschlagsprognose das Auffahrtseignis um etwa einen Faktor 3 unterschätzte, trafen die Vorhersagen beim Pflingstereignis sowohl zeitlich wie mengenmässig recht gut zu.

Niederschlags-Vorhersagen für den 21./22. Mai 1999

Das SM hat dieses Ereignis ab der Vorhersage vom 20. Mai 12 UTC gut vorhergesagt. Die drei Vorhersagen vom 20. Mai 12 UTC, 21. Mai 00 UTC und 21. Mai 12 UTC gaben sehr ähnliche Niederschlagssummen, selbst im Stundenrhythmus. Fig. 7.1 zeigt die Vorhersage der 24-Stundensumme des Niederschlags vom 21. Mai 1999 06 UTC bis 22. Mai 1999 06 UTC, ausgehend von der SM-Vorhersage des 20. Mai 1999 12 UTC. Es handelt sich also um den aufsummierten Modell-Niederschlag zwischen +18 bis +42 Stunden in einem Ausschnitt über der ganzen Schweiz. Die Farbskala oben zeigt die Einteilung in die verschiedenen Klassen: hellgelb > 20 mm/24h, dunkelgelb > 50 mm/24h, hellbraun > 100 mm/24h. Ein Niederschlagsband mit > 50 mm/24h erstreckt sich von Vorarlberg über das Glarnerland bis zum Berner Oberland. Einzelne Gitterpunkte in der Schweiz weisen Summen > 100 mm/24h; Maxima bei 110-130 mm/24h in der Innerschweiz bei Engelberg, in der Ostschweiz im Gebiet des Säntis und des Pizols, in Graubünden bei Davos/Lenzerheide; die höchsten Werte in der Schweiz befinden sich an der Grenze zu Liechtenstein und Österreich mit 208 mm bei Malbun (FL) und 135 mm bei St. Antönien. In Vorarlberg liegt ein grosses Gebiet mit extremen Niederschlagssummen > 100 mm/24h; das Maximum liegt dort bei 230 mm/24h. Im zeitlichen Ablauf des Ereignisses gab das Modell den stärksten Niederschlag am Abend des 21. Mai etwas zu früh: ca. 4-6 Stunden mit der Vorhersage vom 20. Mai 12 UTC und noch ca. 2-3 Stunden mit der Vorhersage vom 21. Mai 00 UTC. Ausser diesem zeitlichen Fehler waren die stündlichen Summen aber in der Menge bei allen drei Vorhersagen korrekt (keine Unter-/Überschätzung).

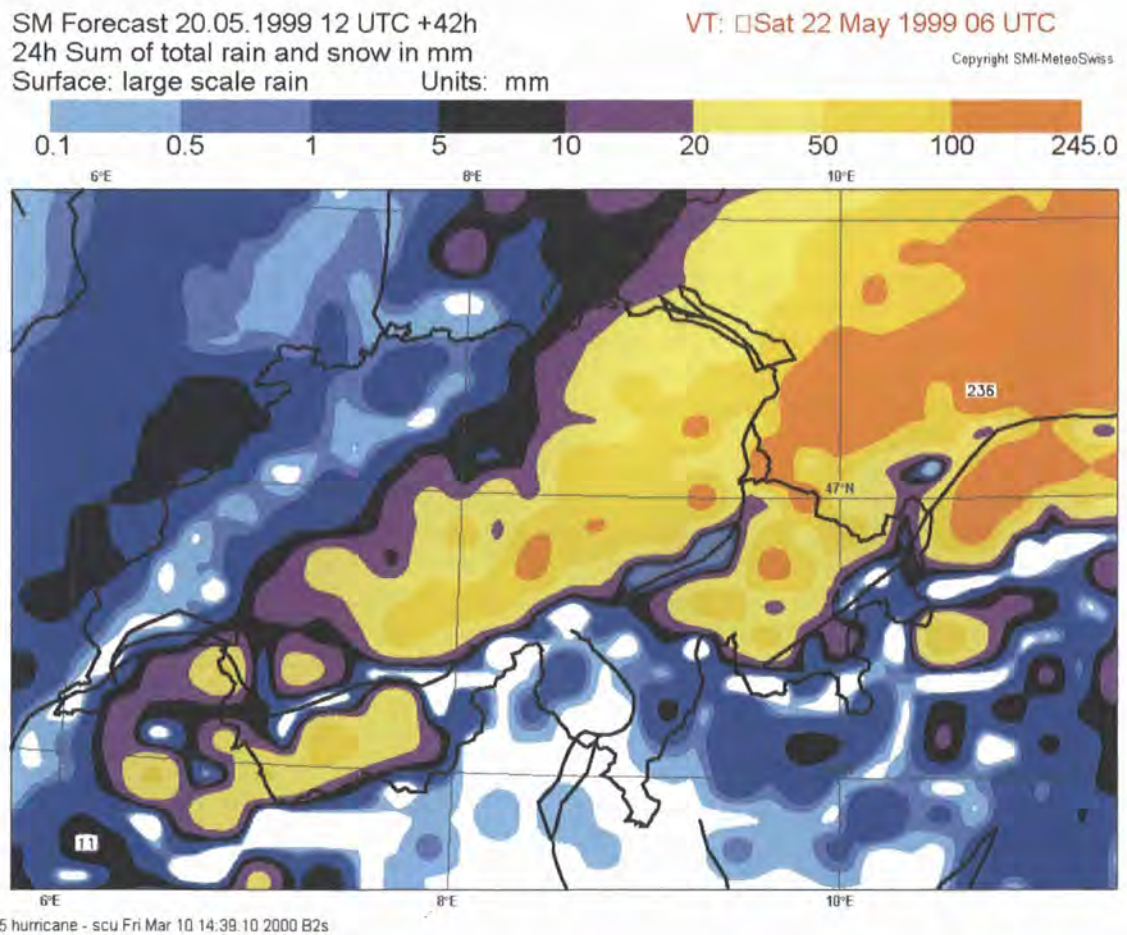


Fig. 7.1: Vorhersage der 24 Stundensumme des Niederschlags vom 21. Mai 1999 06 UTC bis 22. Mai 1999 06 UTC ausgehend von der SM-Vorhersage des 20. Mai 1999 12 UTC. Die Farbskala oben zeigt die Einteilung in die verschiedenen Klassen: hellgelb > 20 mm/24h, dunkelgelb > 50 mm/24h, hellbraun > 100 mm/24h.

Der Vergleich von Fig. 7.1 (SM-Niederschlag) mit Fig. 9.3 (beobachteter Niederschlag in der gleichen Periode) zeigt eine gute Übereinstimmung, wenn man bedenkt, dass der Modell-Niederschlag ein Mittel auf einem Gebiet von $14 \times 14 \text{ km}^2$ ist (Fläche einer Gitterzelle). Lokale extreme Ereignisse, wie die 203 mm/24h

7.3 ABFLUSSVORHERSAGEN

Therese Bürgi

7.3.1 VORHERSAGETÄTIGKEIT BEI DEN MAI HOCHWASSERN 1999

Seit vielen Jahren erarbeitet die LHG operationelle Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Rhein bei Rheinfelden. Diese in der Regel einmal täglich erstellten Werte werden per Fax an die Abonnenten verschickt. Bei Hochwasser erhalten die Kunden je nach Bedarf auch mehrmals täglich ein Vorhersagebulletin.

Die Vorhersagen der LHG basierten im Mai 1999 auf einem Modellansatz, in welchen die gemessenen 2-Stundenmittel von 13 Abflussmessstationen der LHG, die stündlichen Niederschlagssummen von ca. 40 Stationen der MeteoSchweiz (SMA) sowie eigens für die LHG erstellte Niederschlags- und Temperaturvorhersagen eingehen. Der Abfluss wird im Stundenschritt für die verschiedenen Teileinzugsgebiete berechnet und bis Rheinfelden zeitabhängig zusammengefügt.

Während des Hochwassers im Mai 1999 wurden vom 11. bis zum 31. Mai 1999 insgesamt 37 Vorhersagen für das Rheingebiet erarbeitet. Der 12. Mai, der Tag mit dem stärksten Anstieg des Wasserstandes, ist dabei mit 9 erarbeiteten Vorhersagen der Spitzenreiter.

Wie abhängig die Abflussvorhersage von der meteorologische Vorhersage ist, sei am Beispiel Rheinfelden aufgezeigt. Am 11. Mai wurden aufgrund der vorhergesagten Temperaturen und Niederschlagsmengen vom hydrologische Modell für den 12. Mai 23 Uhr ein Abfluss von rund 2300 m³/s vorhergesagt, eingetreten sind rund 4500 m³/s. Am Morgen des 12. Mai wurde die starke Abweichung zwischen vorhergesagten und eingetretenen Niederschlägen erkannt. Durch das nun folgende zweistündige Updating der Vorhersage während des steilen Anstieges konnten immer mehr effektive Messwerte und die verbesserte Prognosen der MeteoSchweiz ins Modell einbezogen werden. Ab 11 Uhr vormittags wurde der Spitzenabfluss und Zeitpunkt sehr genau erkannt. Am 21. Mai als die Vorhersage der MeteoSchweiz wesentlich zutreffender war, betrug die Abweichung zwischen dem gemessenen Spitzenabfluss vom 22. Mai von 3838 m³/s und vorhergesagten Prognosewert nur 17 %.

Eine Auswertung der seit Beginn der operationellen Vorhersageberechnungen erstellten Vorhersagen zeigt, dass der Fehler für den mittleren Tagesabfluss am Tag 0 (Ausgabetag) unter 10 % liegt, jener für den Tag 1 und den Tag 2 jedoch deutlich grösser ist (Schädler, 1993). Auch die Werte vom Mai 1999 liegen innerhalb des langjährigen Streubereiches.

Das hydrologische Vorhersagemodell der Landeshydrologie und -geologie ist in erster Linie für die Hochwasservorhersage des Rheins bei Rheinfelden konzipiert. Sein modularer Aufbau erlaubt es jedoch, auch Vorhersagen für die Teileinzugsgebiete der Aare, der Reuss, der Limmat und der Thur zu berechnen. Trotz einiger Unsicherheitsfaktoren, mit welchen die Modelle dieser Einzugsgebiete behaftet sind, geben ihre Vorhersagebulletins in Hochwasserfällen wichtige Hinweise für den Verlauf des Abflusses und dienen daher vielen Behörden als Grundlage für die Planung der Hochwasserschutzmassnahmen. Deshalb wurden während des Hochwassers zusätzlich zu den Vorhersagen des Rheins bei Rheinfelden auch solche für die Stationen Rhein-Rekingen, Thur-Andelfingen, Limmat-Baden, Reuss-Mellingen, Aare-Murgenthal sowie Aare-Brugg berechnet und als Bulletin an die betroffenen Behörden der Kantone Aargau, Thurgau und Zürich versandt.

7.3.2 BERATUNG UND INFORMATION

Neben den langjährigen Kunden, insbesondere den Vorhersagezentren flussabwärts in Frankreich, Deutschland und Holland, waren zahlreiche kantonale Fachstellen zu beraten. Besonders zahlreich waren die Medienanfragen nach Vorhersagen, was zu einer ausserordentlichen Zusatzbelastung führte.

7.3.3 AUSBLICK

Noch im selben Jahr wurde – wie schon lange geplant – ein neues Vorhersageverfahren eingeführt (Schädler, 1999). Das Verfahren ist sowohl von der Daten- wie auch von der Modellseite her völlig neu konzipiert. In die Berechnungen des neuen Modells fliessen automatisch abgefragte Abflusswerte von über 30 Stationen und die meteorologischen Messwerte (Niederschlag, Temperatur) von ca. 80 Regenmessstationen ein. Für die meteorologischen Vorhersagen werden nicht mehr speziell für die LHG konzipierte Vorhersagen verwendet, sondern das System rechnet normalerweise mit den numerischen Vorhersagen des so genannten Schweizmodells der MeteoSchweiz. Gleichzeitig mit der Verfeinerung der Eingabedaten wurde auch das Einzugsgebiet des Rhein in kleinere Teileinzugsgebiete unterteilt. Wurden im alten Modell Berechnungen für 13 Gebiete erstellt, so sind es heute an die 50 kleine Einzugsgebiete.

Nebst den Neuerungen im Vorhersageverfahren strebt die LHG laufend eine Verbesserung bei der Bereitstellung von aktuellen Daten an. Schon heute können für ausgewählte Stationen die Wasserstands- und Abflussganglinie der letzten 7 Tage via Internet abgefragt werden. Von Montag bis Freitag werden jeweils am Vormittag die aktuellsten Datenreihen zur Verfügung gestellt. In Zukunft soll dieses Update täglich und im Hochwasserfall sogar mehrmals täglich erfolgen. Ebenso soll während eines Hochwassers die jeweils aktuellste Vorhersage im Internet einem breiten Publikum zur Verfügung gestellt werden. Beides entspricht einem mehrfach geäusserten Bedürfnis der verantwortlichen kantonalen Fachstellen sowie der Medien.

7.4 ERFAHRUNGEN DER KRISENSTÄBE

Armin Petrascheck

Katastrophen müssen in erster Linie von den betroffenen Gemeinwesen bewältigt werden. Der Bund gewährt erst dann Hilfe, wenn Gemeinde und Kanton vom Ausmass des Ereignisses überfordert sind. 1999 wurden in diesem Sinne unter anderem vom Militär 6300 Manntage an verschiedenen Schadensschwerpunkten geleistet.

Der Schwerpunkt der Massnahmen zur Bewältigung lag demgemäss bei den lokalen Organisationen: Polizei, Feuerwehr, Gemeindebehörden, kantonale Verwaltung und Zivilschutz. Diese zahlreichen Arbeitstage der lokalen Dienste werden nicht zentral erfasst. Einen Hinweis dazu gibt aber der Bericht des Schweizerischen Feuerwehrverbandes über mehr als 70'000 Einsatztage im Zusammenhang mit den Hochwasserereignissen, sowie die 21'500 beim Bundesamt für Zivilschutz gemeldeten Einsatztage. Zudem liegen Berichte verschiedener Führungsstäbe (Thun, Nidwalden, Sörenberg, Linthebene, Bodensee) vor. Diese zeigen, dass trotz der Unterschiede in der Grösse der betroffenen Gemeinden und der Art der Prozesse (Rutschungen und/oder Überschwemmungen), die zu überwindenden Schwierigkeiten ähnlich waren, so dass durchaus einige allgemein gültige Erfahrungen aufgeführt werden können.

- Der Einsatz und die Motivation der Verantwortlichen war vorbildlich. Weil aber die Krise sehr lange dauerte, zeigte sich bald Folgendes:
 - Die Krisenstäbe müssen sich früh organisieren und Vertretungen sicher stellen, um die Erschöpfung einzelner Personen zu vermeiden.
 - Stellvertretungen erfordern einen klar organisierten Informationsfluss. Die administrativen Tätigkeiten (Materiallisten, Einsatzpläne) werden um so wichtiger je länger der Einsatz dauert.
 - Das Milizsystem wird bei sehr langen Einsätzen überfordert (bis eine Woche problemlos, bei mehreren Wochen muss mit administrativem Personal oder durch den Beizug von privaten Organisationen eine Ablösung sichergestellt werden).
 - Doppelfunktionen sind zu vermeiden. Politische Mandatsträger müssen bei lange dauernden Einsätzen früher oder später dem politischen Mandat den Vorrang geben.
- Innerhalb der Krisenstäbe sind entscheidend:
 - Regelmässige, kurze, klar strukturierte Rapporte ohne Zuschauer.
 - Klare Arbeits- und Kompetenzordnung.

- Immer neue Beurteilung ohne ständiges Hinterfragen getroffener Entscheide.
 - Früher Beizug des Gesundheitswesens (z.B. Evakuierung und Versorgung von Altersheimen).
 - Alarmierungen nur über die Kantonspolizei.
 - Überblick über Schadenplätze, Umleitungen und Sperrungen, Infrastrukturen, eingesetztes Material (auch wenn es von einem zum anderen Schadenplatz verschoben wird) führen.
 - Ausreichend Kommunikationsmittel (Fax, Natel, Funk) bereit stellen.
 - Lufttransportmittel erlauben nicht nur den Medienvertretern werbewirksame Bilder zu schiessen, sondern ermöglichen den Verantwortlichen eine echte Lagebeurteilung.
- Informationspolitik der Medien und der Bevölkerung
 - Eine Stelle oder Person bezeichnen und diese von operativen Aufgaben befreien.
 - Informationsmittel zum „Abholen“ einsetzen (Telefonbeantworter, Internetseite).
 - Dokumentationen und genügend Raum und Telefonlinien bereit stellen.
 - Nur mit Offenheit und möglichst vollständiger Information kann die Bevölkerung zur Mitwirkung gewonnen werden. Daher über alle Fakten berichten, zu dem was eingetreten ist, aber keine Spekulationen verbreiten.
 - Entscheide und voraussehbare Dauer von Beschränkungen bekanntgeben.
 - Zukunftsperspektiven auf Grund der derzeitigen Lage aufzeigen.
 - Der Bevölkerung klar machen, dass eine Eigenverantwortung zum Schutz des eigenen Hauses besteht. Die primäre Aufgabe der Wehrdienste besteht darin, die Infrastruktur (Strom, Wasser, Verkehrswege, Abwasser) aufrecht zu erhalten und erst in zweiter Linie, Keller leer zu pumpen und individuellen Objektschutz einzurichten.
 - Notwendige Entscheidungsgrundlagen:
 - Dort wo Gefahrenkarten vorhanden waren, haben sie sich als Entscheidungsgrundlage für mögliche Entwicklungen bewährt. Als Grundlage für sichere Umleitungen, Evakuationsstandorte ist das „worst case“ Szenario wichtig. Spezielle Intensitätskarten für spezifische Ereignistypen mit Wassertiefen und Fliesswegen würden die Grundlagen noch verbessern.
 - Kenntnis der sensiblen Stellen. Diese wird meist durch erfahrene Mitarbeiter der betroffenen Betriebe (Wasser, Abwasser, Elektrizität, u.a.) vermittelt. Diese können auch oft alternative Lösungen aufzeigen.
 - Kenntnis der möglichen Entwicklung. Wetter und Abflussvorhersagen können den Handlungsablauf entscheidend beeinflussen. Aktuelle Daten sind von den zentralen Stellen (BWG-LHG, Meteo Schweiz, u. a.) via Internet bereit zu stellen.
 - Der Beizug von Experten als Berater ist bei der Beurteilung der Lage sowohl in Bezug auf die hydrologische Entwicklung als auch bei der Beurteilung der gefährdeten Objekte und der möglichen Gegenmassnahmen wichtig.
 - Vorbereitungsphase (Warnung oder Alarmierung)

Besteht eine gefahrenträchtige Situation, ohne die genaue Kenntnis ob und wann ein Ereignis tatsächlich eintreten könnte (z.B. starke Bewegungen in einem Rutschhang, hohe Seestände und ungünstige Wettervorhersagen), so kann die Zeit genutzt werden für:

 - Falls nicht in den Gefahrenkarten vorhanden, erarbeiten eines „worst case“ Szenario.
 - Überprüfung der Einsatzbereitschaft aller Sachmittel (auch Funkfrequenzen, Telefonlinien einrichten, Kartenmaterial, Demonstrationsmaterial, etc.) und des Krisenstabes.
 - Risikopunkte identifizieren (z.B. Transformatoren, Pumpwerke, Verkehrsknoten, Altersheime).
 - Beurteilung der Schutzbauten und exponierter Bauten und Sicherstellung der Zugänglichkeit.
 - Übungen der Stäbe und Mannschaften, Vorbereitung von Entscheidungsdispositiven.

- Vorsorgliche Information anderer Dienststellen.

Es ist grundsätzlich zwischen einer Warnung bzw. einer Alarmierung und Vorhersage zu unterscheiden. Eine Vorhersage bezieht sich auf einen konkreten Ort und eine konkrete Zeit und kann nur kurzfristig (Stunden bis 3 Tage je nach Bedingungen) erfolgen. Eine Warnung zeigt eine überdurchschnittlich gefährliche Situation auf. Sie gibt keine Angaben ob, wann und in welchem Ausmass ein allfälliges Ereignis eintreten wird, sondern zeigt einzig eine erhöhte Wahrscheinlichkeit auf. Je nach Verhältnissen können verschiedene Warn- oder Alarmierungsstufen unterschieden werden. Eine Alarmierung oder Vorhersage dient dazu, eine Handlung oder eine Aktion, z.B. das Abfüllen von Sandsäcken, auszulösen. Eine Warnung dient dazu die Einsatzbereitschaft von Mitteln und Personen zu erhöhen bzw. sicher zu stellen. Diese Möglichkeiten wurden im Vorfeld der Ereignisse von 1999 eher zu wenig ausgeschöpft.

Fazit:

Die lokalen Stellen haben ihre Aufgabe im Einsatz gut bewältigt. Trotz der frühzeitigen Warnung der erhöhten Hochwassergefahr wurden allerdings eher selten geeignete Vorbereitungsmaßnahmen getroffen. Die Krisenstäbe mussten sich wie bisher „aus dem Stand“ organisieren. Gefahrenkarten sind auch für die Einsatzplanung eine wichtige Grundlage.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 1999: Vorsorgliche Absenkung des Zürichsees garantiert keinen Schutz vor extremen Hochwasserständen. *wasser, energie, luft*, 91. Jg., Heft 5/6: 105.
- Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, 1910: 51. Jahrgang.
- Aschwanden H., 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen, Nr. 28, BWG/LHG, Bern.
- Aschwanden H., Schädler B., 1988: Hochwasserereignisse im Jahre 1987 in der Schweiz. Mitteilungen der LHG, Nr. 10, Bern.
- Bader, H. et al., 1939: Der Schnee und seine Metamorphose. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Geotechnische Serie – Hydrologie, Lieferung 3. Kümmerli und Frey, Bern.
- Burch, H., 1994: Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 35: 18-33.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft), 1999: Unwetterschäden des Jahres 1999, Bericht einer Arbeitsgruppe der Bundesverwaltung zu Handen des Bundesrates.
- Cressie, N.A.C., 1993: Statistics of spatial data. New York.
- EAWW, 1970: Mitteilungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, 1970. *wasser, energie, luft*. 62. Jg. Heft 7/8: 229.
- Eidg. Linthverwaltung: Sitzungsprotokolle der Linthkommission.
- Forster, F., Hegg, Ch., 2000: Die Hochwasser vom Mai 1999: eine Analyse anhand von hydrologischen Messungen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweiz. Z. Forstwes.* 151. Jg. (im Druck)
- Gasser, O., 1957: Die Wasserspiegelschwankungen des Bodensees und ihre meteorologischen Grundlagen. *Ber. Dt. Wetterd.*, 5 / 35: 1 - 24.
- Geb, M., Sieland-Coradazzi, H., 1997: Anmerkungen zum Oder-Hochwasser-Niederschlag im Juli 1997: ein Sommerereignis, wie es im Buche steht? - Beilage zur Berliner Wetterkarte vom 4.9.1997.
- Geiger, H., Zeller, J., Röthlisberger G., 1991: Starkniederschläge des Schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes, Bd. 7: Grundlagen, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.
- Gemeindeführungsstab Thun, 1999: „Acqua, Auswertungs und Gesamtbericht“ Sept 1999, interner Bericht.
- Grebner, D., 1993: Synoptische Zirkulationen während Extremniederschlägen in der nordalpinen Schweiz. In: Grebner, D. (Ed.), Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. - Zürcher Geographische Schriften, Heft 53: 39-48, Verlag Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Grebner, D., 1995: Klimatologie und Regionalisierung starker Gebietsniederschläge in der nordalpinen Schweiz. - Zürcher Geographische Schriften, Heft 59, Verlag Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Grebner, D., Roesch, T., 1998: Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte in der Schweiz, Schlussbericht NFP 31. - vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich.
- Grebner, D., Roesch, T., 1999: Zusammenhänge und Beurteilung der Hochwasserperiode in der Schweiz vom 11. bis 15. Mai 1999. *wasser, energie, luft*, 91. Jg., Heft 5/6: 127-132.
- Grebner, D., Roesch, T., Schwarb, M., 1999: Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981-1993. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.5. - Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Gumbel, E.J., 1967: Statistics of extremes. 4th edition. New York.
- Hegg, Ch., Badoux, A., Graf, Ch., Röthlisberger, G., 2000: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1999. *wasser, energie, luft*. 92. Jg. Heft 3/4: 59-68.
- Imhof, B., 1910: Die Wassernot in Uri im Juni 1910. Altdorf.
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, 2000: Das Bodenseehochwasser im Frühsommer 1999. Erfahrungsbericht (Entwurf).
- Kanton Nidwalden, 1999: Schlussbericht Einsatz Erdrutsch Ischenwald Beckenried/ Emmeten“ Dezember 1999; interner Bericht.
- Kienholz, H., 1995: Gefahrenbeurteilung und -bewertung - auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. *Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen*, 146. Jg. Heft 9: 701-725.
- Kleindienst, H., Voigt, S., Wunderle, S., 2000: Monitoring und Prognose der Schneedeckenentwicklung anhand von Satellitendaten. *wasser, energie, luft*. 92. Jg. Heft 3/4: 73-76.
- Kocher, R., 2000: Fallbeispiel Thun aus der Sicht der Gewässerregulierung. Vortrag an der FAN Tagung Zürich.

- Kuhn, M., 1984: Physikalische Grundlagen des Energie und Massenhaushaltes der Schneedecke. Mitteilungen Nr. 7 des Deutschen Vereins der Wasserwirtschaft und Kulturbau, pp. 4-55.
- Lanz-Stauffer, H., Rommel, C., 1936: Elementarschäden und Versicherung. Studie des Rückversicherungsverbandes kantonalschweizerischer Feuerversicherungsanstalten zur Förderung der Elementarschadenversicherung. Bern (Eigenverlag)
- LHG, 1994: Die Hochwasser 1993 im Wallis und Tessin – Messdaten und ausgesuchte Auswertungen. Mitteilung der landeshydrologie und Geologie Nr. 19, Bern.
- Luder B., 1996: Digitale Messwerterfassung in der Hydrologie. Gas-Wasser-Abwasser, Heft 5: 387-392.
- Luft, G., van den Eertwegh, G., Vieser, H., 1990: Veränderung der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987. Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt, Stuttgart.
- Mani, P., 2000: Schneeschmelz- und Abflussprognose für das Berner Oberland im Frühling 1999. wasser, energie, luft. 92. Jg. Heft 3/4: 69-72.
- Martinec, J., 1977: Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data. J. of Glaciol., 19 (81), pp.185-195.
- Naef, F., Scherrer, S., Zurbrügg, C., 1999: Grosse Hochwasser - unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7. - Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Niklaus, M., 1999: Das Jahrhunderthochwasser vom Mai 1999 im Briener- und Thunersee. Jahrbuch vom Thuner- und Brienersee 1999: 23 - 56. Uferschutzverband Thuner- und Brienersee.
- Rohrer, M.B., 1992. Die Schneedecke im Schweizer Alpenraum und ihre Modellierung. Zürcher Geographische Schriften No.49, Verlag der Fachvereine Zürich.
- Röthlisberger, G., Geiger, H., Zeller, J., 1991 und 1992: Starkniederschläge im Schweizer Mittelland und Jura, Bd 8 und Bd. 9, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.
- Schädler, B., 1993: Operationelle Abflussvorhersagen für Rhein-Rheinfeldern - Grenzen und Möglichkeiten. Aktuelle Aspekte der Hydrologie, Zürcher Geographische Schriften Nr. 53, Zürich
- Schädler, B., 1999: Abflussvorhersagen im Rheingebiet. Nouvelles, Nr. 99/2:6-7, Landeshydrologie und -geologie, Bern
- Schneider, Th., Liniger M., 2000: Rutschungen und Murgänge, Laui Sörenberg, Kanton Luzern. Vortrag an der FAN Tagung Zürich.
- Sevruck, B. (Redaktion), 1985: Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie in der Schweiz – Hydrologie Nr. 31.
- SLF (Hrsg.) 2000: Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- Wächter, H.P., Kalt, L., 2000: „Hochwassermangement am Linthkanal und Bodensee. Vortrag am Forum Hochwasser Februar 2000 in Bern.
- Zeller, J., Geiger, H., Röthlisberger, G., 1976 bis 1983: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes, Bd. 1 bis Bd. 6, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.

9 ANHANG

Tab. 9.1: Maximaler Wasserwert der Gesamtschneedecke von 28 SLF-Vergleichsstationen im Winter 1998/99 im Vergleich zu früheren Wintern (Mittel- resp. Maximalwert). Man beachte die unterschiedliche Messdauer (Anzahl Tage); Stationen mit weniger als 10 Messjahren sind vom Vergleich ausgeschlossen. Die Stationen, an denen im Winter 1998/99 ein neuer Rekord erreicht wurde, sind fett hervorgehoben. Werte in Klammern basieren auf Datenreihen die im Winter 1998/99 unvollständig sind, d.h. Maximum und Zeitpunkt sind unsicher.

Station	Meeres- höhe	maximaler Wasserwert 1998/99	Vergleich zu früher				
			Anzahl Jahre	Mittelwert		Maximum	
[m ü. M.]	[mm]			Zeitpunkt	[mm]	Winter	[mm]
über 1800 m ü. M.							
Hasliberg	1830	1280	26	Ende März	832	1994/95	1380
Weissfluhjoch	2540	1211	63	Ende April	861	1944/45	1447
Gründel	1950	1142		Mitte April			
Büschalp	1960	664	53	Mitte April	464	1991/92	734
Juf	2120	458		Mitte April			
Arosa Valsana	1850	448	19	Mitte März	377	1991/92	590
1500 bis 1800 m ü. M.							
Trübsee	1770	1000	46	Ende März	795	1969/70	1474
Elm	1690	(374)					
Göscheneralp	1750	812	11	Ende März	467	1998/99	812
Rigi Scheidegg	1640	752	38	Ende März	425	1969/70	839
Gantrisch	1510	736	20	Mitte April	316	1998/99	736
Mürren	1660	600	50	Mitte März	348	1974/75	694
Davos Flüelastrasse	1560	523	53	Mitte März	285	1998/99	523
Malbun	1610	522	26	Ende Februar	316	1987/88	602
San Bernardino	1640	484	27	Mitte März	349	1974/75	765
Zervreila	1735	482	37	Mitte März	374	1974/75	686
unter 1500 m ü. M.							
Braunwald	1340	1003	39	Mitte März	494	1974/75	1026
Flumserberg	1310	775	28	Mitte März	473	1981/82	945
Schwägalp	1290	(188)	26		494	1981/82	997
Andermatt	1440	723	53	Mitte April	463	1974/75	939
Stoos	1280	629	45	Ende Februar	404	1969/70	946
Morgins	1380	505	36	Ende Februar	355	1969/70	791
Klosters KW	1200	498	51	Ende Februar	370	1969/70	666
Gsteig	1195	446	11	Mitte März	216	1998/99	446
Sedrun	1420	422	34	Mitte März	272	1967/68	561
Fuorns	1480	381		Mitte März			
Splügen	1460	350	39	Mitte März	235	1974/75	626
Adelboden	1350	346		Ende Februar			

Karten der kalendarischen Niederschläge

Um die Analyse des Wasserhaushaltes in Einzugsgebieten durchführen zu können (Kap. 5), würden für die gemessenen Niederschlagssummen räumliche Informationen (Gitterpunktinformationen) und zum Teil kartographische Darstellungen für die folgenden Perioden erarbeitet: Tagesniederschläge vom 19.- 22. Feb., 11., 12. und 21. Mai; 2-Tagesniederschläge vom 11. und 12. Mai, 5-Tagesniederschläge vom 10. - 15. Mai; 15-tägige Niederschlagssummen für die erste und zweite Maihälfte sowie die erste Junihälfte; Monatsniederschlagssummen für Februar, März und April.

Die Berechnung der räumlichen Verteilung der Niederschlagssummen stützt sich auf Messungen der kalendarischen Tagesniederschlagssummen (07 Uhr des Kalendertages bis 07 Uhr des Folgetages) an ca. 350 Stationen der SMA-MeteoSchweiz. Für jede Periode wurde die räumliche Verteilung der Niederschläge mittels zweidimensionalem Kriging berechnet (vgl. Kap. 4.1.1).

Die Fig. 9.1 bis Fig. 9.3 zeigen die Darstellungen der Interpolationen für die drei Tage mit den bedeutendsten 1-Tagesniederschlägen im Mai 1999, nämlich den 11., 12. und 21. Mai. Fig. 9.4 zeigt die 2-Tagesniederschläge vom 11. bis 12. Mai und Fig. 9.5 die 5-Tagesniederschläge vom 10. bis 14. Mai.

Die kalendarischen Tagesniederschläge (07-07 Uhr) wurden als Basis für die hydrologischen Auswertungen verwendet, um eine möglichst breite Datenbasis zu gewährleisten und um die Daten mit historischen Messungen und Kartendarstellungen vergleichen zu können. Zum Beispiel findet sich auf Seite 15 der Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt (1910) eine Karte der Niederschlagsmengen vom 14. Juni 1910.

Die Messperiode von 07-07 Uhr wird seit dem Beginn der offiziellen Niederschlagsmessung 1864 für die ganze Schweiz verwendet. Für lange Perioden sind von den meisten Stationen nur Niederschlagsdaten in diesem festen Tagesschritt verfügbar. Die Werte lassen sich auch mit den Frequenzanalysen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Zeller et al., 1976-1992) vergleichen.

Im Einzelfall können die kalendarischen 1-Tageswerte deutlich von den nicht-kalendarischen (Kap. 4.3.2) abweichen. Für die Analyse der meteorologischen Situation während der Hochwasser im Mai 1999 wird von nicht-kalendarischen 1-Tageswerten ausgegangen. Zur Analyse der Hochwasser und für die statistische Einordnung der Ereignisse werden hingegen die kalendarischen 1-Tageswerte verwendet, um damit die Vergleichbarkeit mit den langjährigen Reihen sicherzustellen.

Fig. 9.1: Kalendarische 1-Tagesniederschläge vom 11. Mai 1999 (d.h. Niederschlag vom 11. Mai, 7 Uhr bis 12. Mai, 7 Uhr).

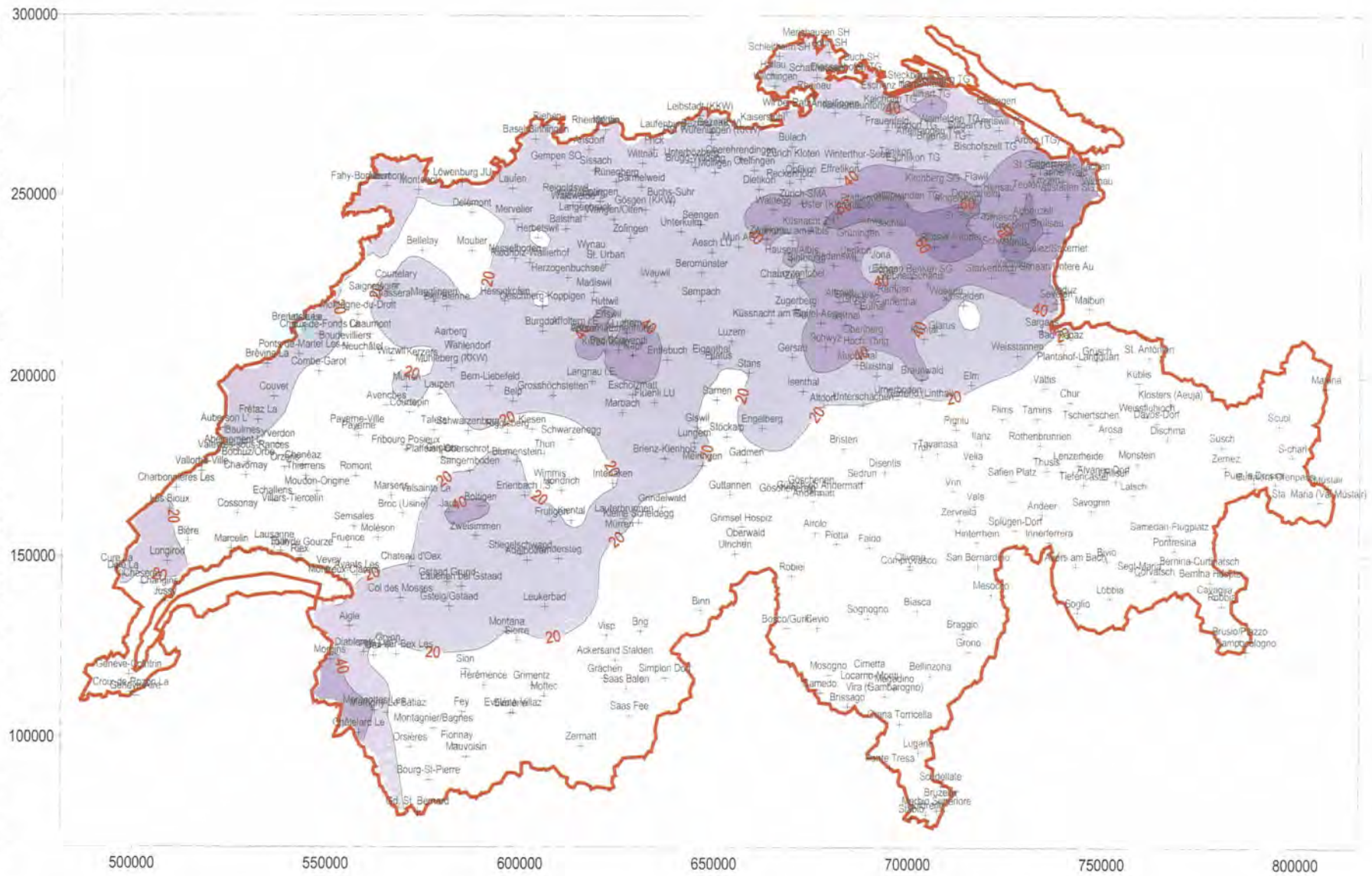


Fig. 9.2: Kalendarische 1-Tagesniederschläge vom 12. Mai 1999 (d.h. Niederschlag vom 12. Mai, 7 Uhr bis 13. Mai, 7 Uhr).

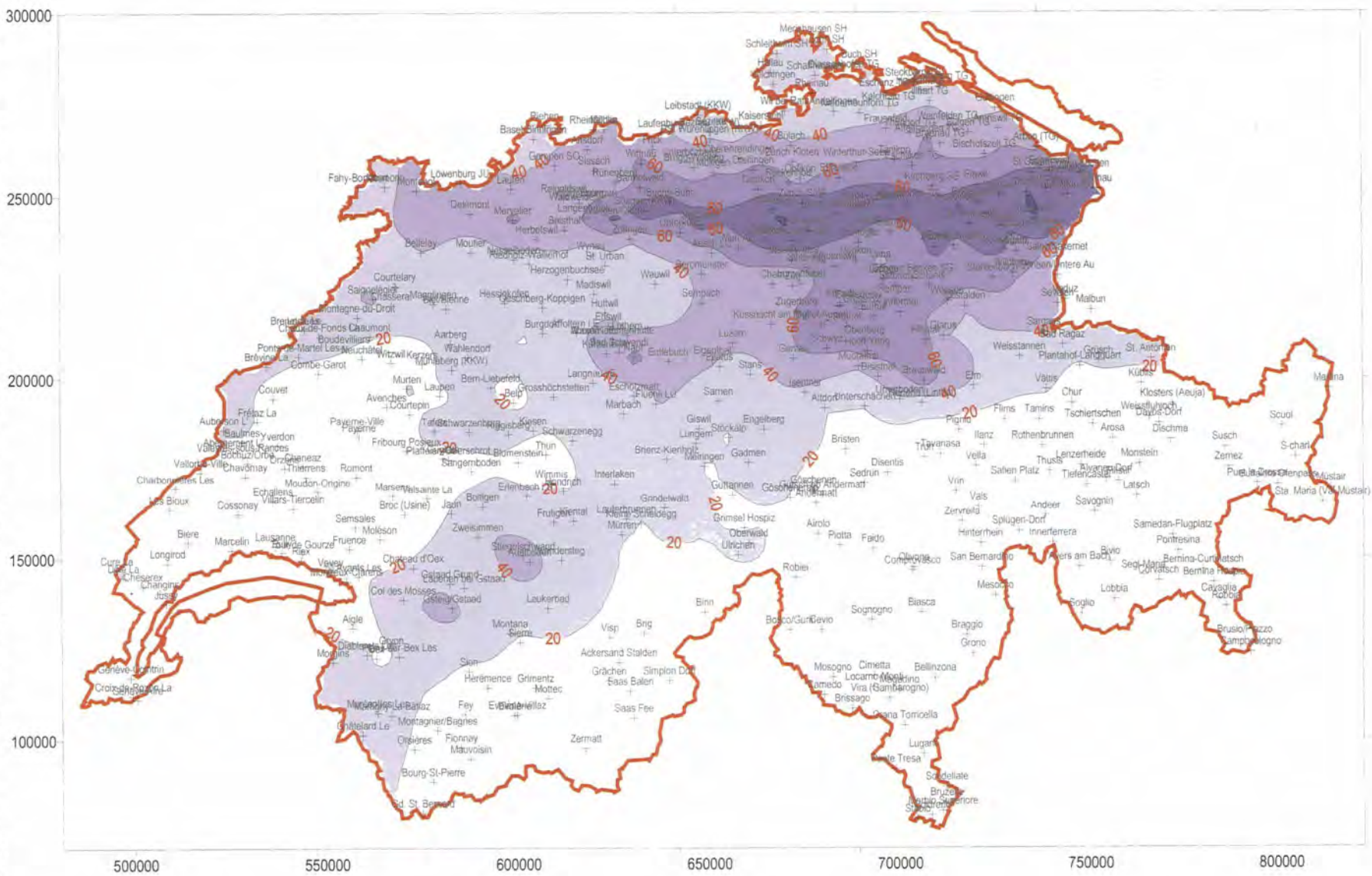


Fig. 9.3: Kalendrische 1-Tagesniederschläge vom 21. Mai 1999 (d.h. Niederschlag vom 21. Mai, 7 Uhr bis 22. Mai, 7 Uhr).

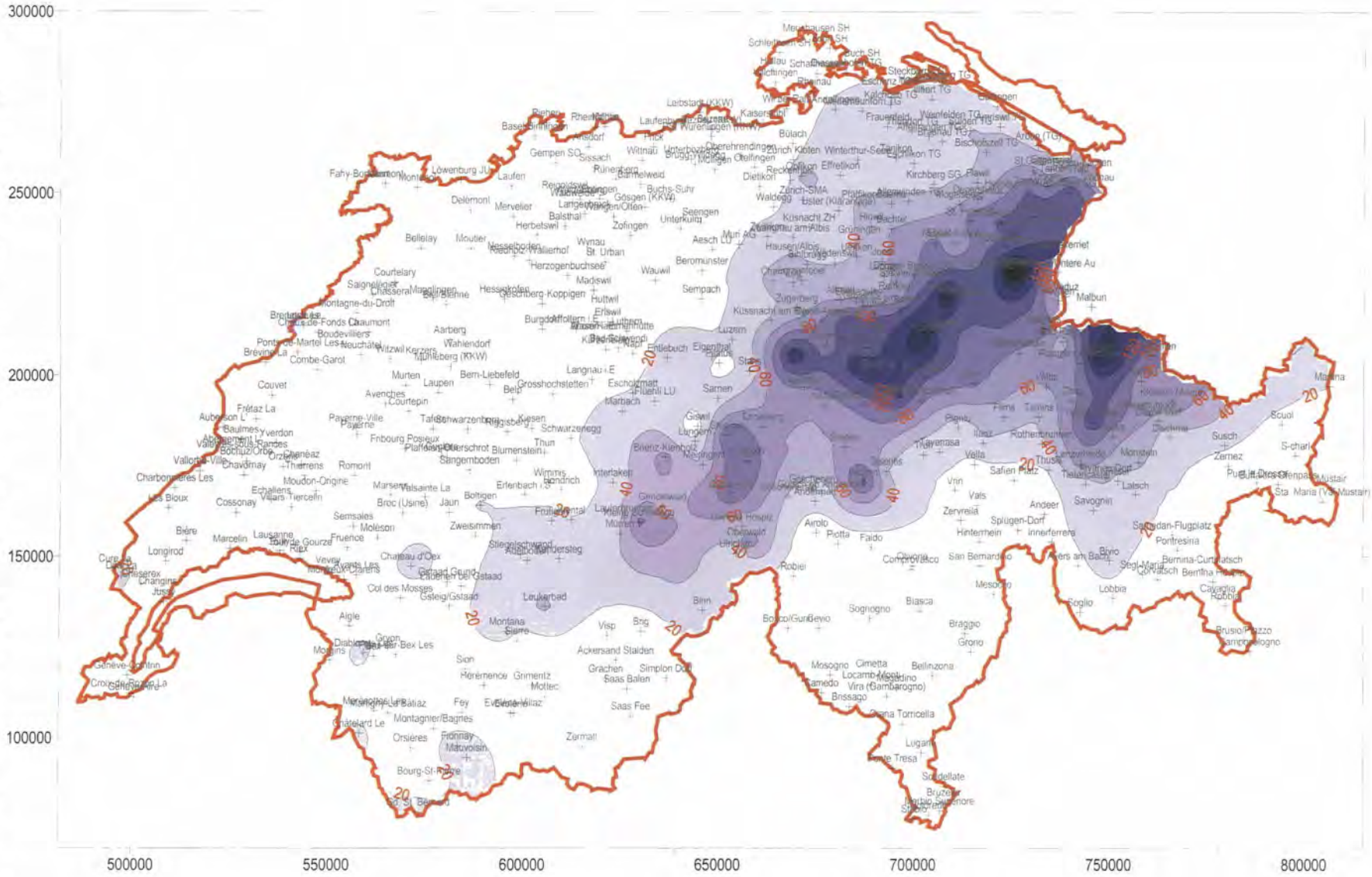


Fig. 9.4: 2-Tagesniederschlag vom 11. - 12. Mai 1999. (d.h. Niederschlag vom 11. Mai, 7Uhr bis 13. Mai 7 Uhr).

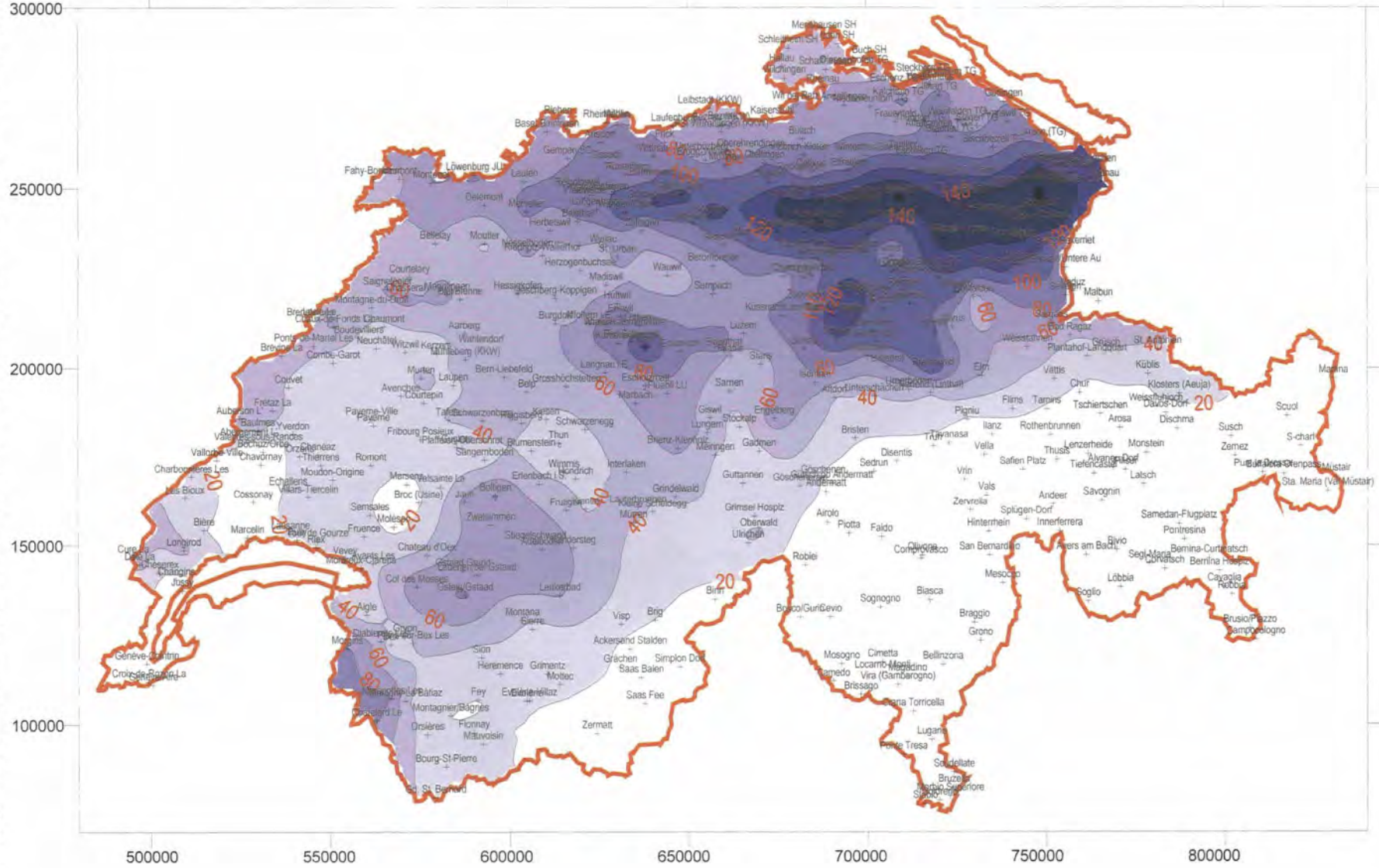
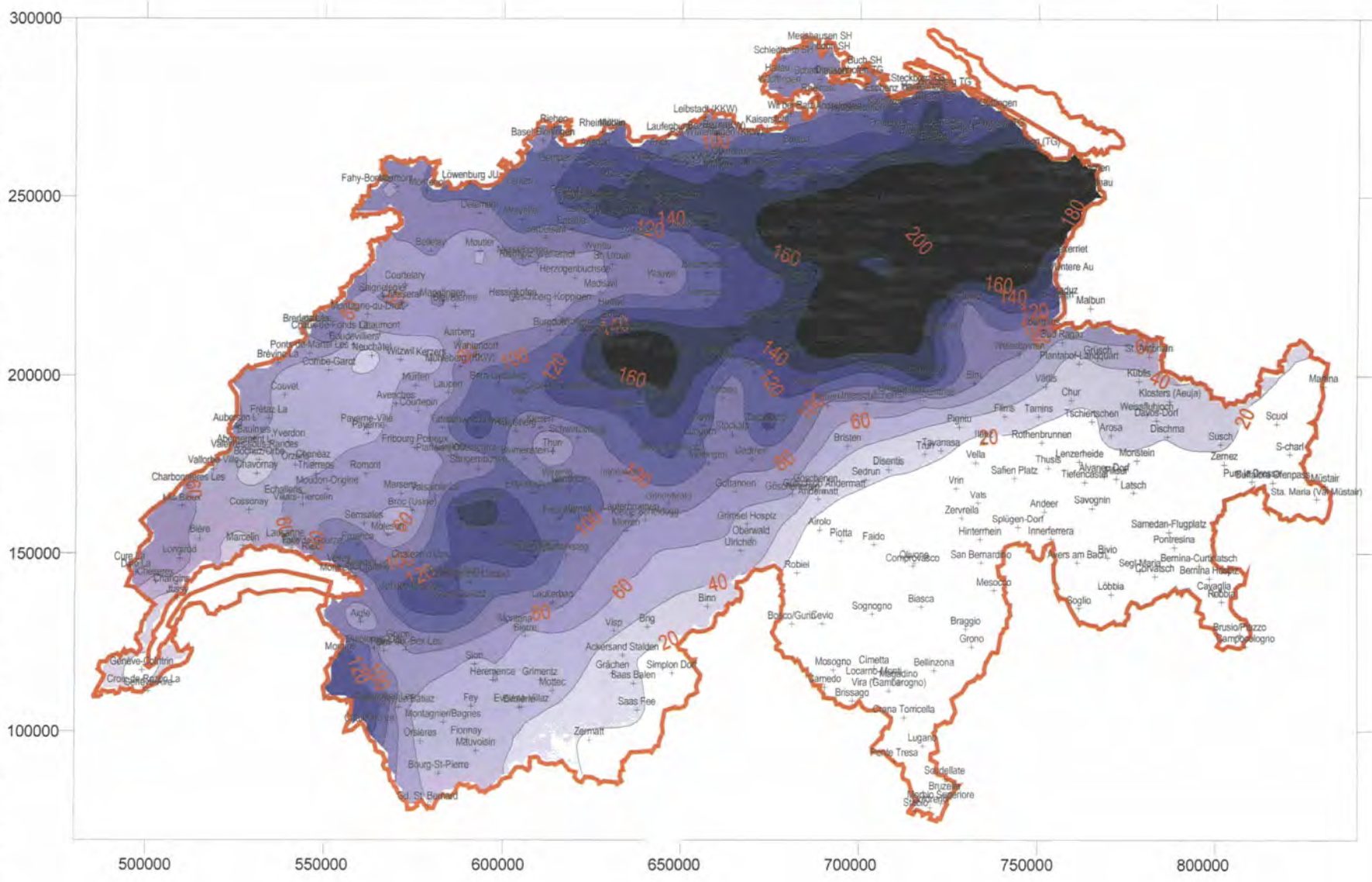


Fig. 9.5: 5-Tagesniederschlag vom 10. - 14. Mai (d.h. Niederschlag vom 10. Mai, 7 Uhr bis 15. Mai, 7 Uhr).



Die Untersuchungsgebiete

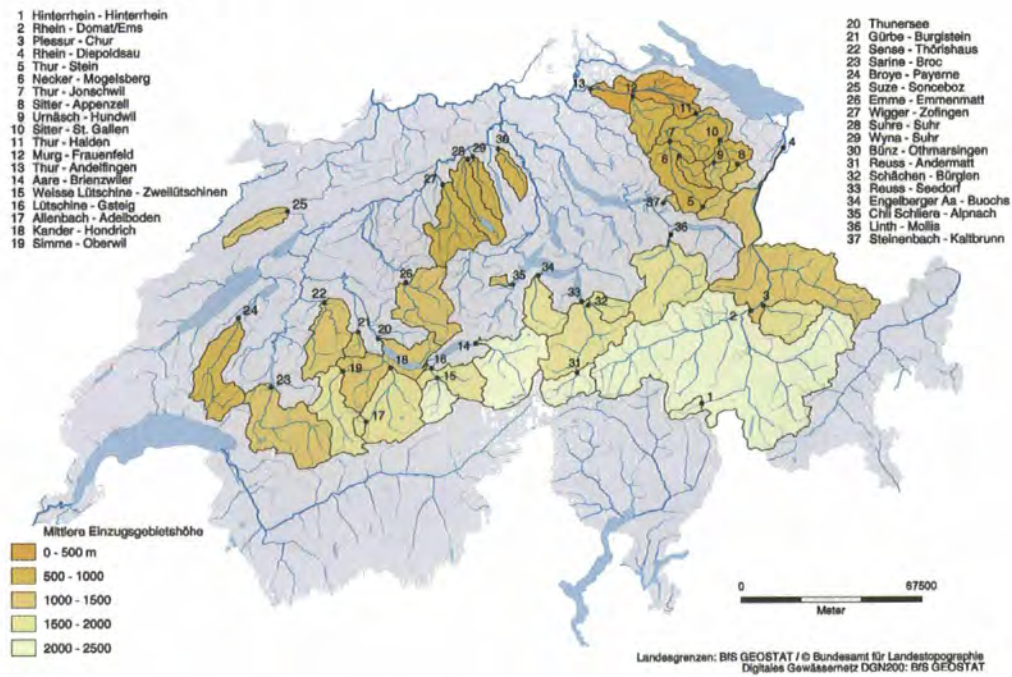


Fig. 9.6: Überblick über die untersuchten Teileinzugsgebiete.

Wasseräquivalentsänderung [mm]
 1.2. - 19.2.1999

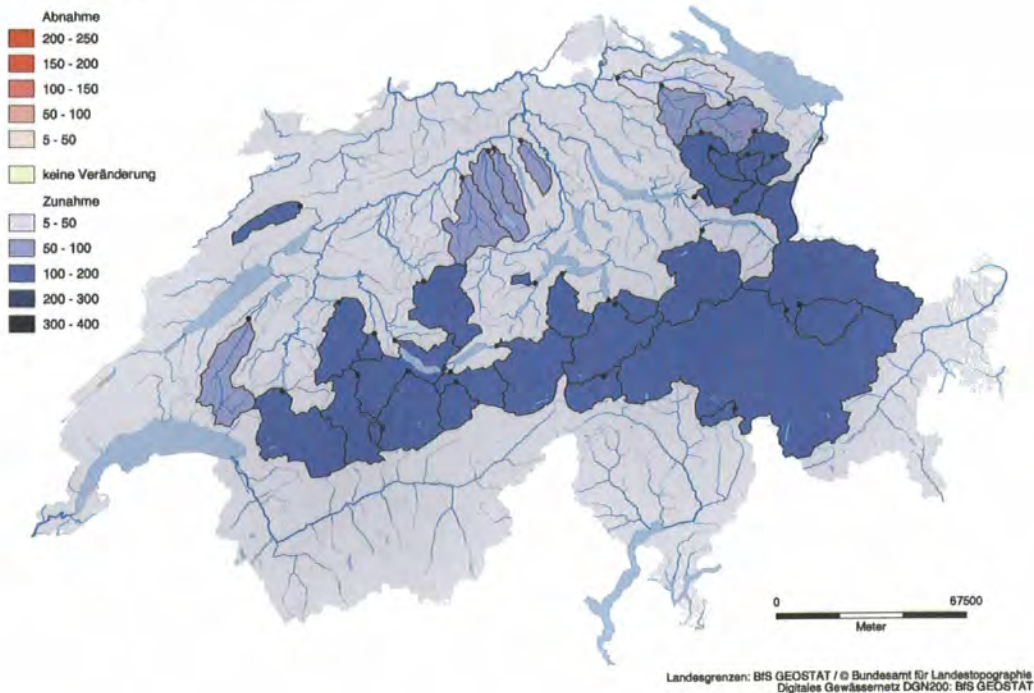


Fig. 9.7: Veränderung Wasseräquivalent Februar (1. Feb. - 19. Feb. 1999).

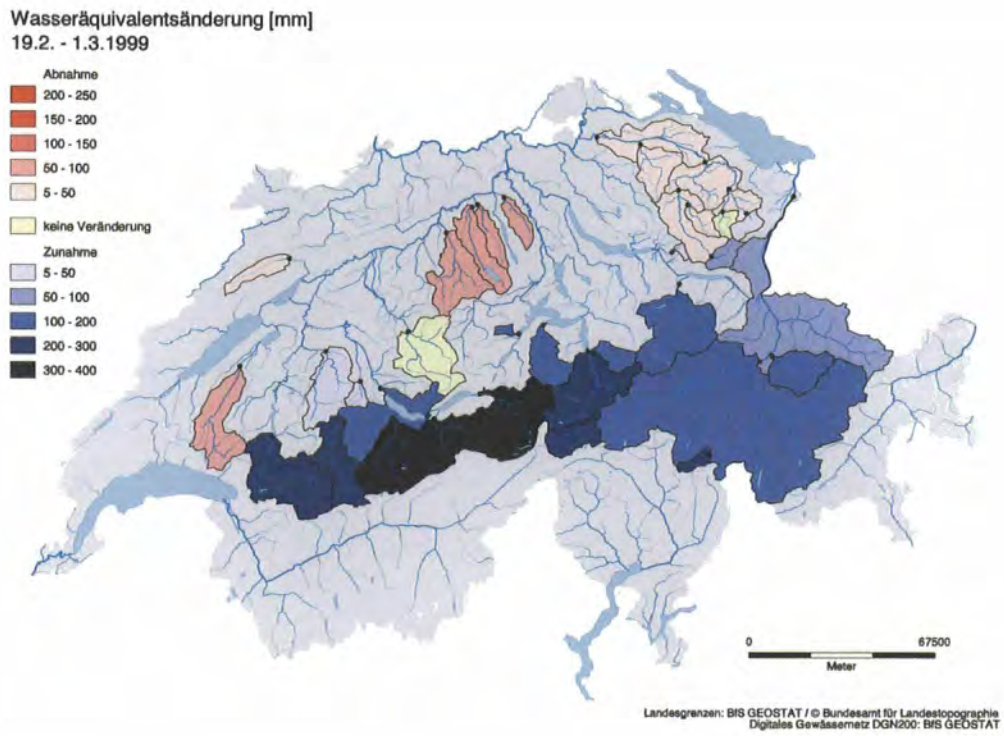


Fig. 9.8: Veränderung Wasseräquivalent Februar (19. Feb. - 1. März 1999).

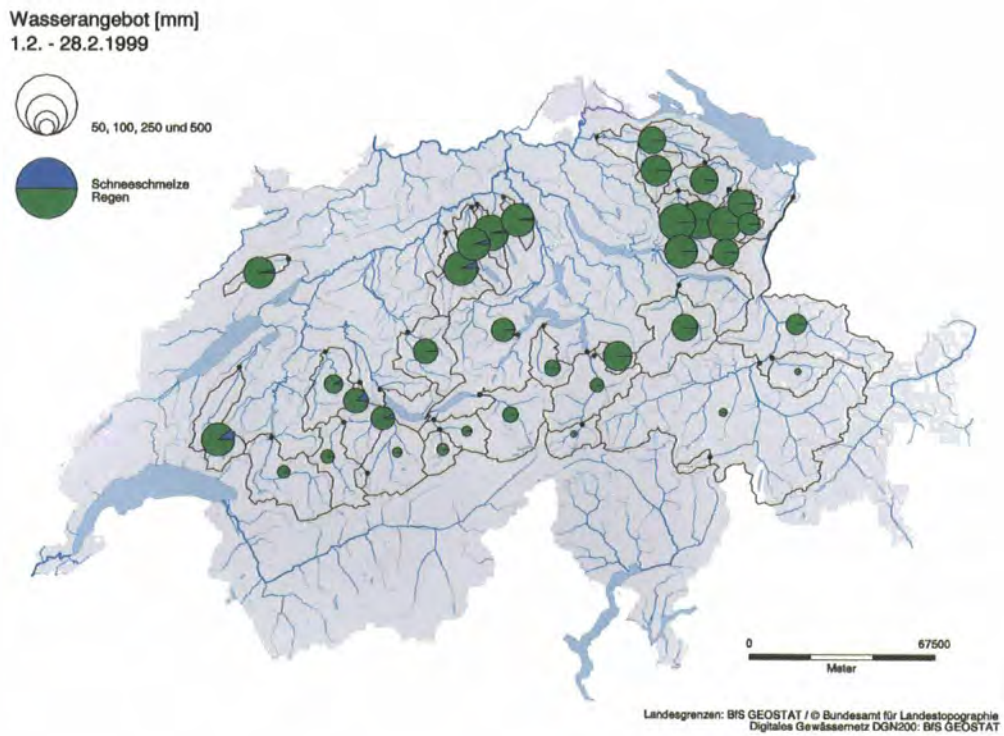


Fig. 9.9: Gesamtwasserangebot Februar.

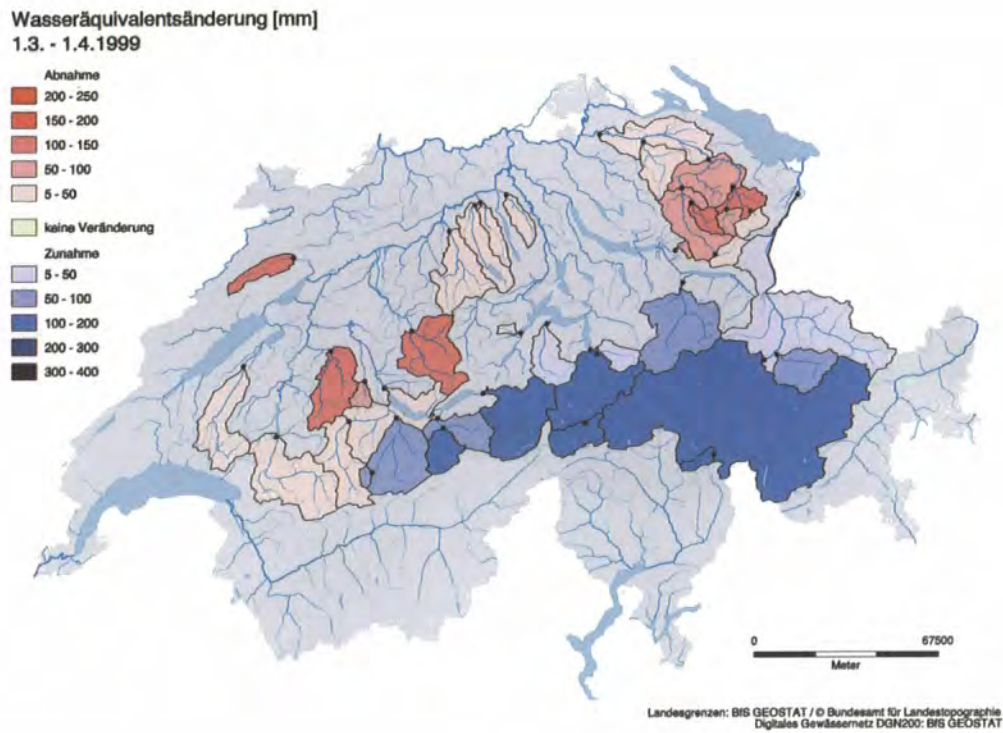


Fig. 9.10: Veränderung Wasseräquivalent März.

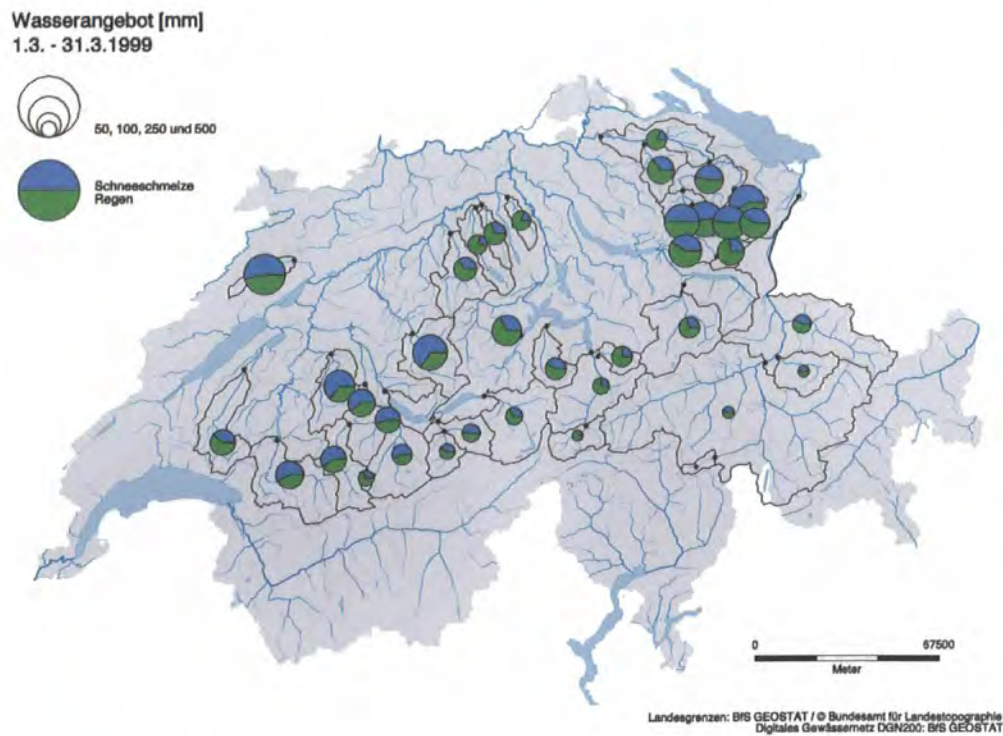


Fig. 9.11: Gesamtwasserangebot März.

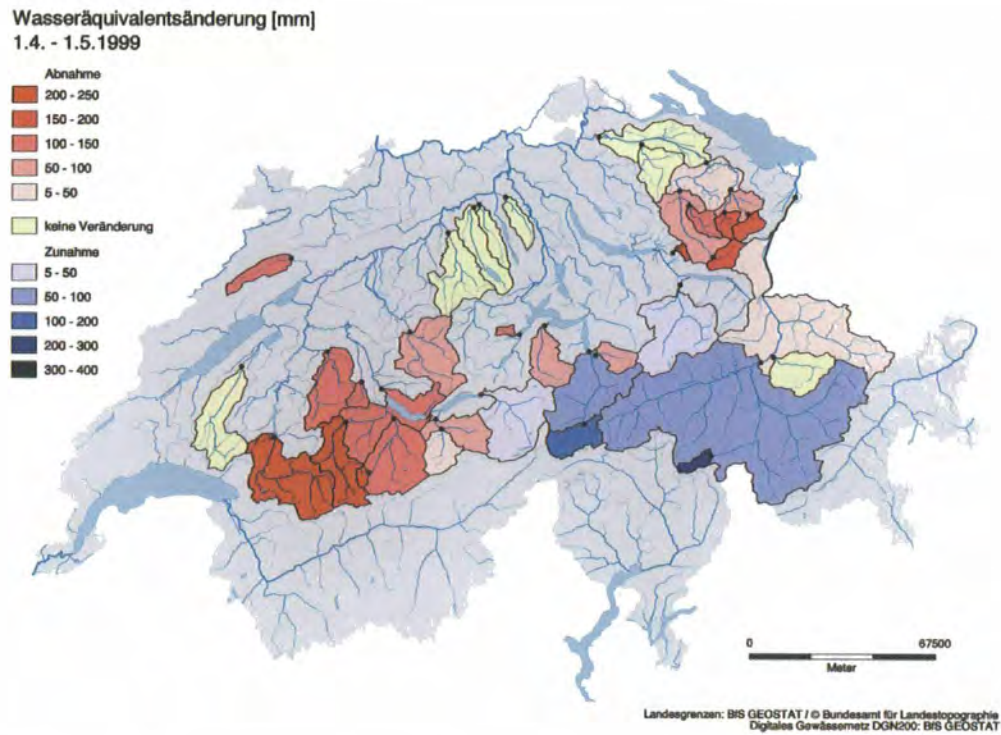


Fig. 9.12: Veränderung Wasseräquivalent April.

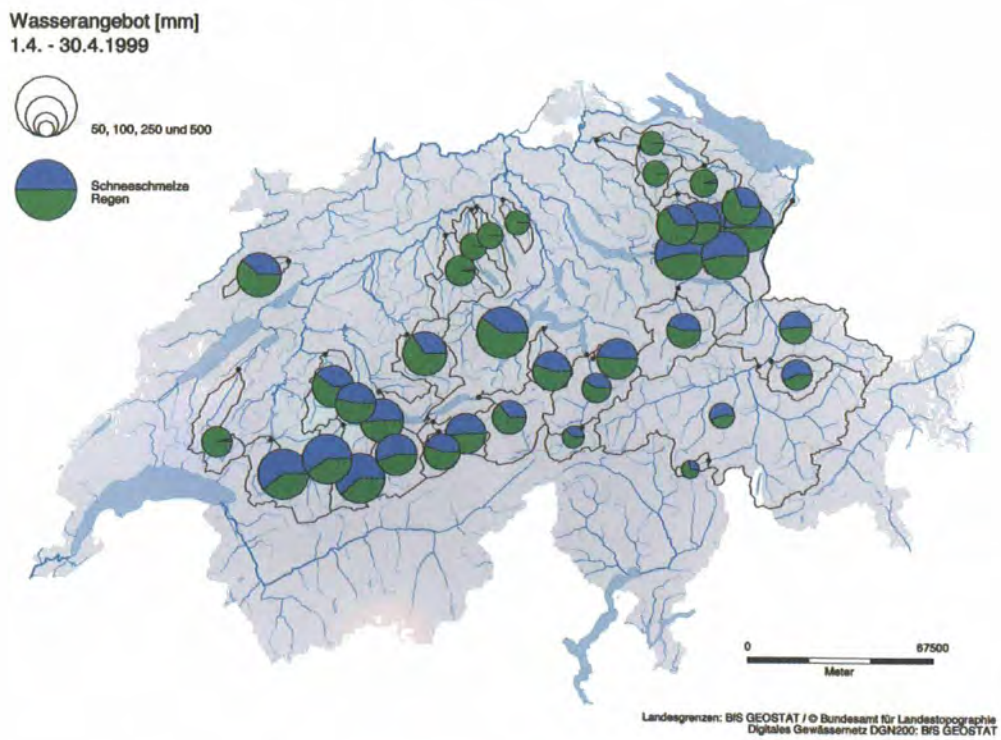


Fig. 9.13: Gesamtwasserangebot April.

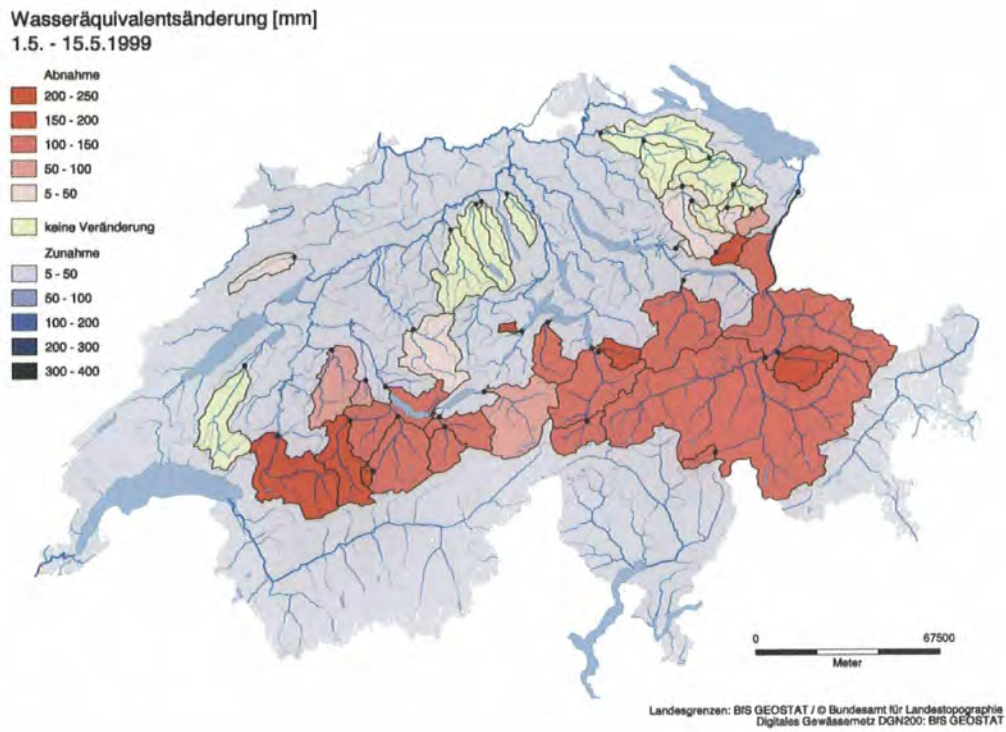


Fig. 9.14: Veränderung Wasseräquivalent Mai (1. Mai - 15. Mai 1999).

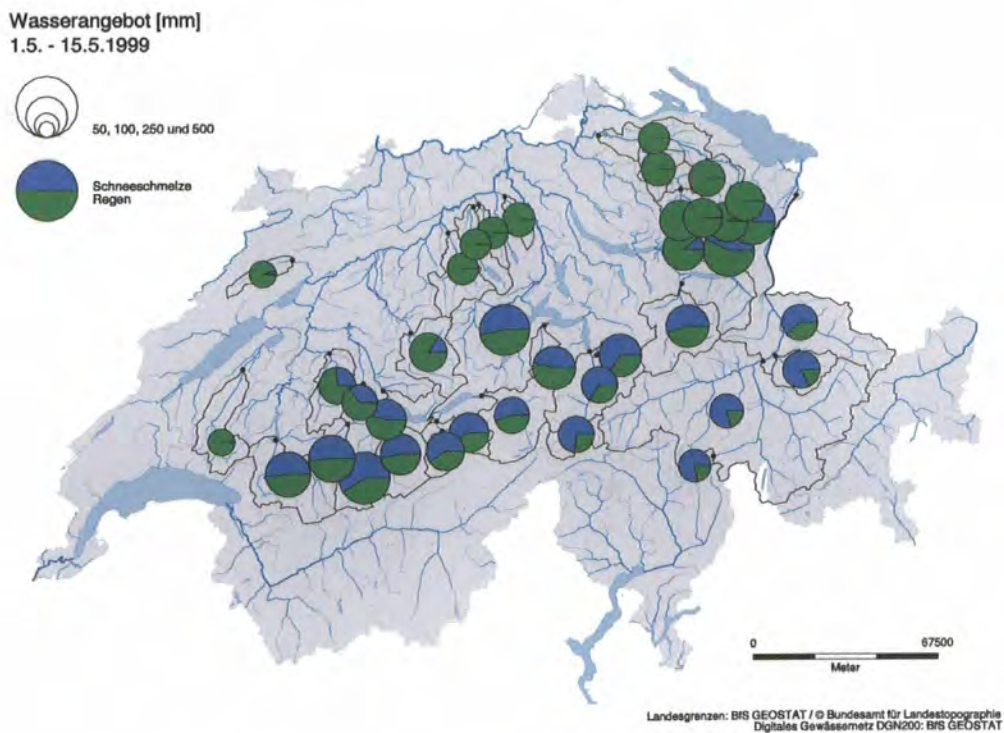


Fig. 9.15: Gesamtwasserangebot Mai (1. Mai - 15. Mai 1999).

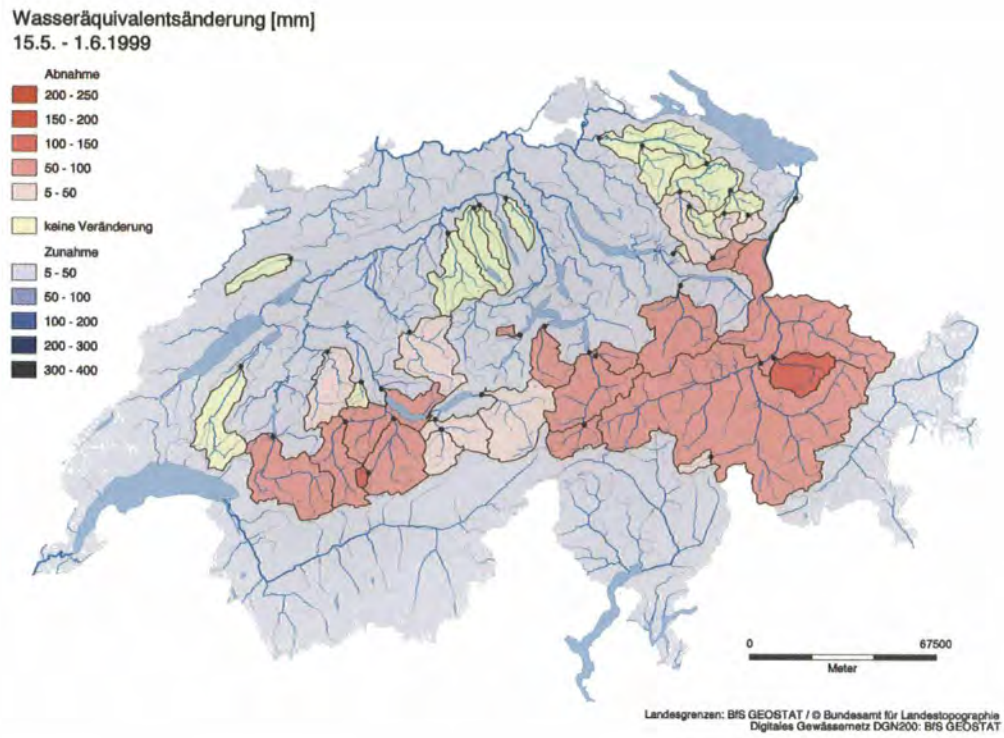


Fig. 9.16: Veränderung Wasseräquivalent Mai (15. Mai - 1. Juni 1999).

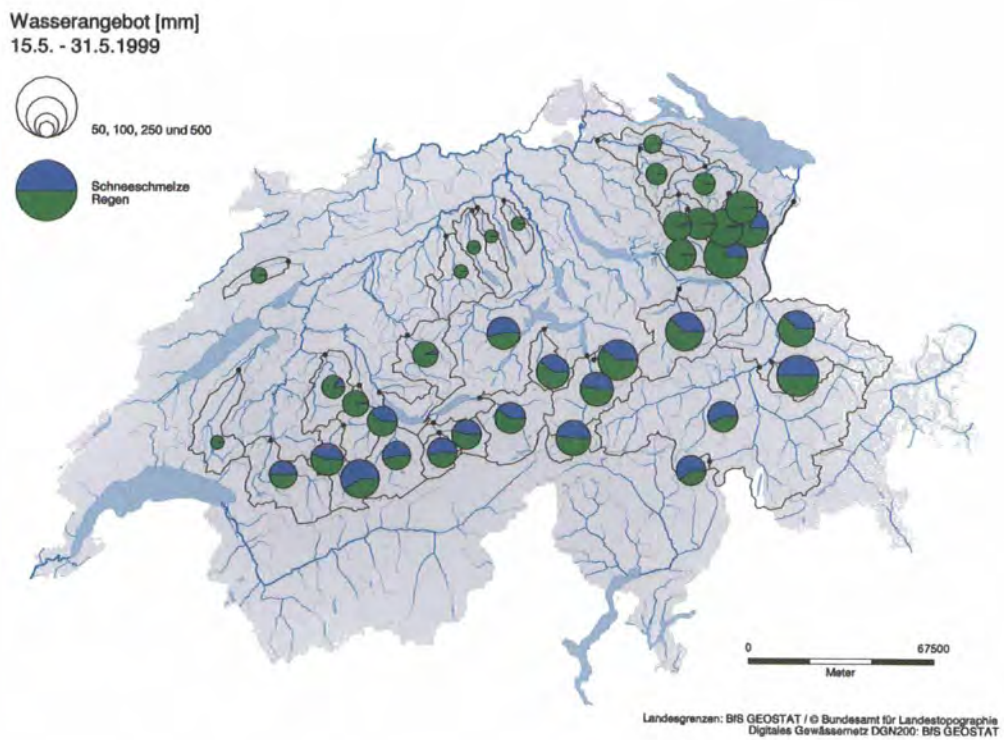


Fig. 9.17: Gesamtwasserangebot Mai (15. Mai - 31. Mai 1999).

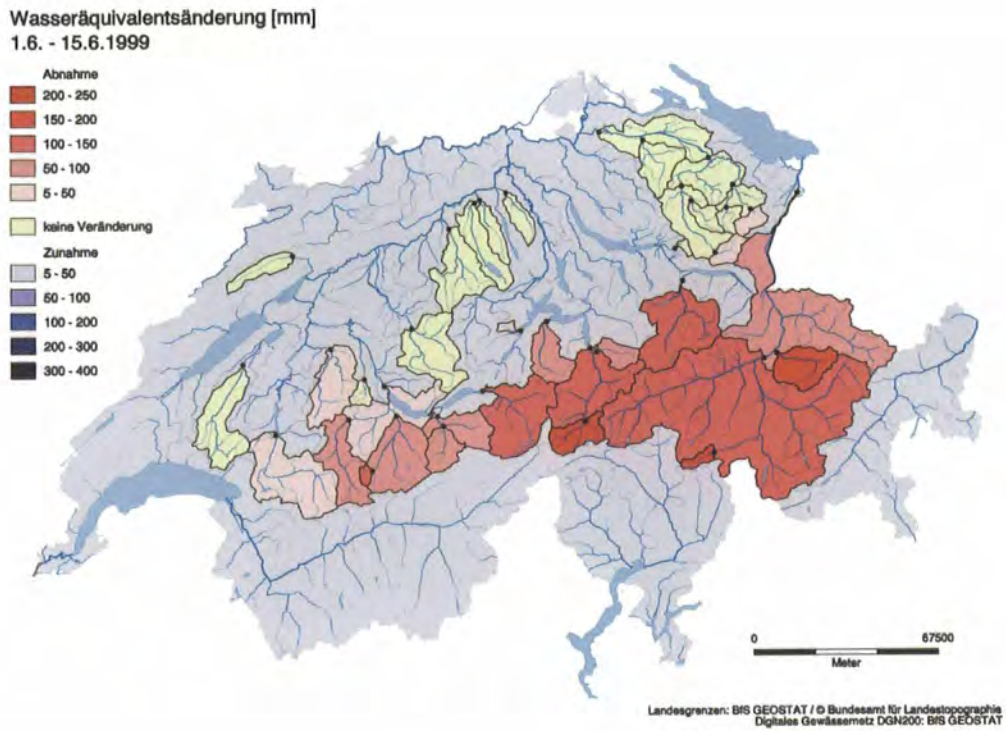


Fig. 9.18: Veränderung Wasseräquivalent 1. Hälfte Juni.

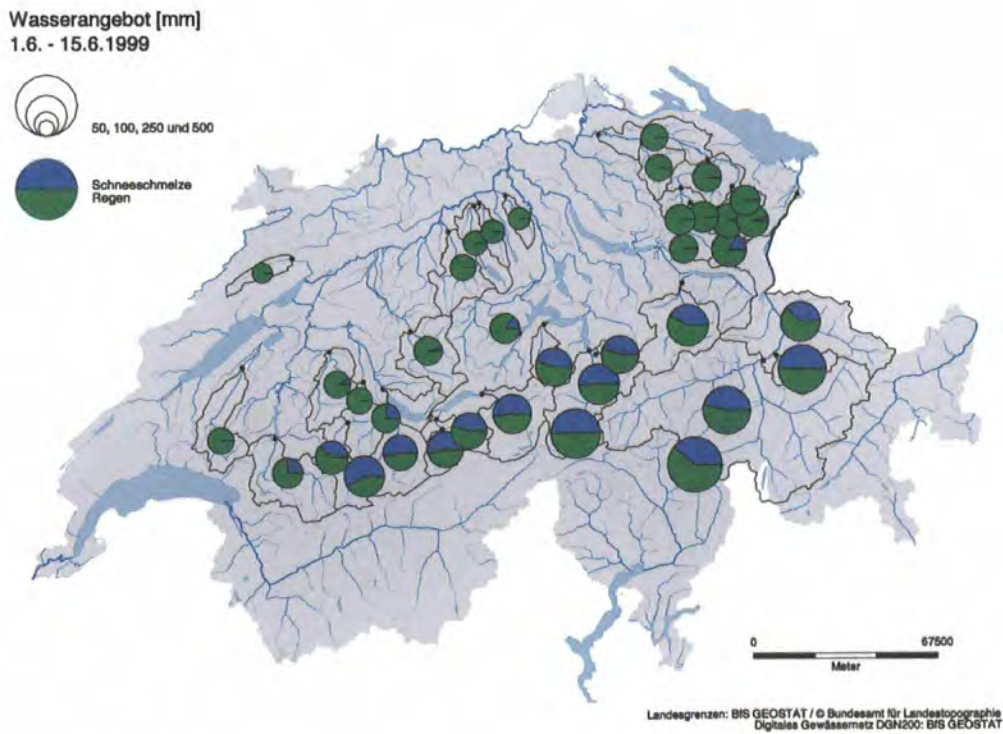


Fig. 9.19: Gesamtwasserangebot 1. Hälfte Juni.

Tab. 9.2: Charakteristik der Untersuchungsgebiete (Zwischeneinzugsgebiete sind kursiv geschrieben).

Name	Fläche [km ²]	mittl. Höhe [m ü. M.]	Beeinflussung (gemäss HADES)
Hinterrhein - Hinterrhein	54.39	2364	Ableitung
<i>Rhein - Domat/Ems (Z)</i>	<i>3186.60</i>	<i>2002</i>	<i>Schwallbetrieb</i>
Rhein - Domat/Ems	3240.99	2008	Schwallbetrieb
Plessur - Chur	266.22	1858	-
<i>Rhein - Diepoldsau (Z)</i>	<i>1232.30</i>	<i>1494</i>	<i>Ausland fehlt</i>
Rhein - Diepoldsau	4739.51	1866	Ausland fehlt
Thur - Stein	87.97	1476	
Necker - Mogelsberg	87.48	956	-
<i>Thur - Jonschwil (Z)</i>	<i>320.26</i>	<i>1046</i>	-
Thur - Jonschwil	495.71	1106	
Sitter - Appenzell	74.35	1261	
Urnäsch - Hundwil	64.38	1090	
<i>Sitter - St. Gallen (Z)</i>	<i>119.13</i>	<i>889</i>	
Sitter - St. Gallen	257.86	1046	
<i>Thur - Halden (Z)</i>	<i>327.14</i>	<i>756</i>	-
Thur - Halden	1080.71	986	-
Murg - Frauenfeld	217.80	591	
<i>Thur - Andelfingen (Z)</i>	<i>406.99</i>	<i>489</i>	
Thur - Andelfingen	1705.50	817	
Aare - Brienzwiler	556.92	2146	Schwallbetrieb
W. Lüttschine - Zwei Lüttschinen	163.79	2158	-
<i>Lüttschine - Gsteig (Z)</i>	<i>216.27</i>	<i>1975</i>	-
Lüttschine - Gsteig	380.06	2054	-
Allenbach - Adalboden	28.36	1859	-
<i>Kander - Hondrich (Z)</i>	<i>467.97</i>	<i>1869</i>	-
Kander - Hondrich	496.33	1868	-
Simme - Oberwil	347.93	1655	-
<i>Thunersee (Z)</i>	<i>484.26</i>	<i>1238</i>	
Thunersee	1328.52	1577	
Gürbe - Burgstein	52.44	1060	-
Sense - Thörishaus	352.36	1075	-
Sarine - Broc	632.73	1499	Restwasser > 80 %, Zufluss Winter > 20 %
Broye - Payerne	404.66	719	-
Suze - Sonceboz	124.74	1031	unsicheres Einzugsgebiet
Emme - Emmenmatt	442.81	1066	-
Wigger - Zofingen	370.62	661	-
Suhre - Suhr	251.65	575	Abflussdaten nur von Station Unterentfelden
Wyna - Suhr	116.73	613	keine Abflussdaten verfügbar
Bünz - Othmarsingen	108.72	536	keine Abflussdaten verfügbar
Reuss - Andermatt	192.71	2279	Restwasser 61 - 80 %
Schächen - Bürglen	106.45	1714	-
<i>Reuss - Seedorf (Z)</i>	<i>538.44</i>	<i>1964</i>	<i>Schwallbetrieb</i>
Reuss - Seedorf	837.60	2005	Schwallbetrieb
Engelberger Aa - Buochs	231.72	1592	Restwasser > 80 %
Chli Schliere - Alpnach	22.11	1380	-
Linth - Mollis, Linthbrücke	598.40	1737	Schwallbetrieb
Steinenbach - Kaltbrunn	18.74	1116	-

Tab. 9.3: Niederschlag, Wasserangebot und Abfluss in der Periode 1.2. - 30.4.1999 und Wasser-äquivalent per 1.5.1999 (Zwischeneinzugsgebiete *kursiv*, Werte in [mm]). Gebiete, in denen das Gesamtwasserangebot unter dem Abflussvolumen liegt, sind entweder durch Kraftwerke beeinflusst oder weisen Flächenanteile im Ausland auf, die im Wasserangebot nicht berücksichtigt werden konnten.

Station	Niederschlag	WARegen	WASchmelze	WAGesamt	%Schmelze	Abfluss	Wasseräquivalent
Hinterrhein - Hinterrhein	335	49	17	65	26	96	1'319
<i>Rhein - Domat/Ems (Z)</i>	<i>361</i>	<i>81</i>	<i>73</i>	<i>155</i>	<i>47</i>	<i>171</i>	<i>918</i>
Rhein - Domat/Ems	360	81	72	153	47	170	925
Plessur - Chur	386	87	98	185	53	95	712
<i>Rhein - Diepoldsau (Z)</i>	<i>441</i>	<i>191</i>	<i>114</i>	<i>305</i>	<i>37</i>	<i>717</i>	<i>480</i>
Rhein - Diepoldsau	383	110	85	195	44	308	797
Thur - Stein	616	357	210	567	37	405	291
Necker - Mogelsberg	575	465	214	679	32	566	2
<i>Thur - Jonschwil (Z)</i>	<i>573</i>	<i>469</i>	<i>182</i>	<i>651</i>	<i>28</i>	<i>616</i>	<i>21</i>
Thur - Jonschwil	581	449	193	641	30	570	66
Sitter - Appenzell	554	350	239	589	41	533	158
Urnäsch - Hundwil	604	459	258	717	36	555	28
<i>Sitter - St. Gallen (Z)</i>	<i>459</i>	<i>364</i>	<i>187</i>	<i>551</i>	<i>34</i>	<i>395</i>	<i>0</i>
Sitter - St. Gallen	522	384	220	603	36	474	53
<i>Thur - Halden (Z)</i>	<i>357</i>	<i>322</i>	<i>69</i>	<i>392</i>	<i>18</i>	<i>342</i>	<i>0</i>
Thur - Halden	499	395	162	557	29	478	43
Murg - Frauenfeld	362	340	44	384	11	290	0
<i>Thur - Andelfingen (Z)</i>	<i>290</i>	<i>283</i>	<i>13</i>	<i>296</i>	<i>4</i>	<i>74</i>	<i>0</i>
Thur - Andelfingen	432	361	111	472	24	358	27
Aare - Brienzwiler	685	203	86	288	30	318	1'068
<i>W. Lüttschine - Zweilütschin</i>	<i>538</i>	<i>170</i>	<i>109</i>	<i>279</i>	<i>39</i>	<i>168</i>	<i>1'060</i>
Lüttschine - Gsteig (Z)	518	173	157	330	48	202	866
Lüttschine - Gsteig	526	172	136	308	44	187	950
Allenbach - Adelboden	531	172	236	408	58	239	750
<i>Kander - Hondrich (Z)</i>	<i>457</i>	<i>169</i>	<i>188</i>	<i>357</i>	<i>53</i>	<i>223</i>	<i>779</i>
Kander - Hondrich	461	169	190	360	53	224	777
Simme - Oberwil	531	228	280	507	55	314	481
<i>Thunersee (Z)</i>	<i>448</i>	<i>276</i>	<i>212</i>	<i>488</i>	<i>43</i>	<i>431</i>	<i>228</i>
Thunersee	475	223	222	445	50	323	499
Gürbe - Burgistein	375	273	204	477	43	292	71
Sense - Thörishaus	383	273	215	489	44	318	79
Sarine - Broc	474	228	293	521	56	370	337
Broye - Payerne	376	364	66	430	15	308	0
Suze - Sonceboz	568	441	246	688	36	547	6
Emme - Emmenmatt	479	352	227	579	39	429	46
Wigger - Zofingen	383	372	48	420	12	201	0
Suhre - Suhr	337	334	22	357	6	371	0
Wyna - Suhr	370	365	34	399	9	-	0
Bünz - Othmarsingen	328	324	17	341	5	-	0
Reuss - Andermatt	599	89	31	120	26	96	1'210
Schächen - Bürglen	692	323	138	461	30	248	574
<i>Reuss - Seedorf (Z)</i>	<i>577</i>	<i>163</i>	<i>72</i>	<i>235</i>	<i>31</i>	<i>142</i>	<i>913</i>
Reuss - Seedorf	597	166	71	237	30	145	938
Engelberger Aa - Buochs	522	229	141	371	38	324	549
Chli Schliere - Alpnach	668	414	197	612	32	334	302
Linth - Mollis	644	275	108	382	28	387	666
Steinenbach - Kaltbrunn	599	446	274	720	38	649	28

Tab. 9.4: Niederschlag, Wasserangebot aus Schneeschmelze, Gesamtwasserangebot und Abfluss für das Ereignis vom 10. - 14. Mai.

Station	Niederschlag [mm]	WA Schmelze [mm]	WA Total [mm]	Abfluss [mm]
Hinterrhein - Hinterrhein	8	48	55	69
<i>Rhein - Domat/Ems (Z)</i>	18	48	65	42
Rhein - Domat/Ems	18	48	65	42
Plessur - Chur	21	58	79	57
<i>Rhein - Diepoldsau (Z)</i>	58	38	96	90
Rhein - Diepoldsau	28	46	74	64
Thur - Stein	178	37	215	172
Necker - Mogelsberg	200	0	200	198
<i>Thur - Jonschwil (Z)</i>	197	3	200	189
Thur - Jonschwil	194	9	203	188
Sitter - Appenzell	195	21	217	204
Urnäsch - Hundwil	196	3	199	157
<i>Sitter - St. Gallen (Z)</i>	208	0	208	223
Sitter - St. Gallen	201	7	208	201
<i>Thur - Halden (Z)</i>	178	0	178	173
Thur - Halden	191	6	197	156
Murg - Frauenfeld	158	0	158	94
<i>Thur - Andelfingen (Z)</i>	129	0	129	69
Thur - Andelfingen	172	4	176	128
Aare - Brienzwiler	78	37	108	94
W. Lüttschine - Zweilütschinen	79	46	118	101
<i>Lüttschine - Gsteig (Z)</i>	86	39	116	99
Lüttschine - Gsteig	83	42	117	100
Allenbach - Adelboden	121	69	190	159
<i>Kander - Hondrich (Z)</i>	100	39	135	90
Kander - Hondrich	101	41	138	94
Simme - Oberwil	123	42	164	107
<i>Thunersee (Z)</i>	107	32	139	143
Thunersee	109	38	145	115
Gürbe - Burgistein	97	4	100	87
Sense - Thörishaus	108	10	117	67
Sarine - Broc	106	38	143	110
Broye - Payerne	73	0	73	27
Suze - Sonceboz	74	0	74	34
Emme - Emmenmatt	133	4	137	102
Wigger - Zofingen	117	0	117	56
Suhre - Suhr	111	0	111	0
Wyna - Suhr	121	0	121	0
Bünz - Othmarsingen	145	0	145	0
Reuss - Andermatt	31	54	83	64
Schächen - Bürglen	72	53	126	101
<i>Reuss - Seedorf (Z)</i>	58	45	100	84
Reuss - Seedorf	54	48	99	81
Engelberger Aa - Buochs	111	40	151	125
Chli Schliere - Alpnach	121	54	175	144
Linth - Mollis	104	46	150	96
Steinenbach - Kaltbrunn	185	0	185	204

Tab. 9.5: Niederschlag, Schneeschmelze, Gesamtwasserangebot und Abfluss für das Ereignis vom 19. - 21. Mai.

Station	Niederschlag [mm]	WA Schmelze [mm]	WA Total [mm]	Abfluss [mm]
Hinterrhein - Hinterrhein	40	6	33	36
<i>Rhein - Domat/Ems (Z)</i>	54	7	45	27
Rhein - Domat/Ems	54	7	45	27
Plessur - Chur	112	13	105	48
<i>Rhein - Diepoldsau (Z)</i>	120	8	115	97
Rhein - Diepoldsau	74	7	66	59
Thur - Stein	194	13	202	172
Necker - Mogelsberg	131	0	131	132
<i>Thur - Jonschwil (Z)</i>	115	1	116	107
Thur - Jonschwil	131	3	134	123
Sitter - Appenzell	162	11	170	156
Urnäsch - Hundwil	157	1	158	113
<i>Sitter - St. Gallen (Z)</i>	139	0	139	173
Sitter - St. Gallen	150	4	153	153
<i>Thur - Halden (Z)</i>	69	0	69	94
Thur - Halden	117	2	119	97
Murg - Frauenfeld	53	0	53	29
<i>Thur - Andelfingen (Z)</i>	50	0	50	17
Thur - Andelfingen	93	1	94	69
Aare - Brienzwiler	102	4	64	66
W. Lüttschine - Zweilütschinen	76	6	53	51
<i>Lüttschine - Gsteig (Z)</i>	86	6	64	51
Lüttschine - Gsteig	82	6	59	51
Allenbach - Adalboden	64	15	68	71
<i>Kander - Hondrich (Z)</i>	55	6	48	44
Kander - Hondrich	55	7	49	46
Simme - Oberwil	61	9	65	46
<i>Thunersee (Z)</i>	59	10	68	50
Thunersee	58	9	60	47
Gürbe - Burgistein	59	0	60	43
Sense - Tihörishaus	47	2	49	28
Sarine - Broc	46	9	53	36
Broye - Payerne	26	0	26	11
Suze - Sonceboz	30	0	30	19
Emme - Emmenmatt	56	1	58	38
Wigger - Zofingen	24	0	24	10
Suhre - Suhr	24	0	24	0
Wyna - Suhr	24	0	24	0
Bünz - Othmarsingen	26	0	26	0
Reuss - Andermatt	75	6	54	38
Schächen - Bürglen	123	11	117	92
<i>Reuss - Seedorf (Z)</i>	92	7	68	57
Reuss - Seedorf	92	7	71	57
Engelberger Aa - Buochs	92	7	82	83
Chli Schliere - Alpnach	53	9	62	62
Linth - Mollis	133	9	117	72
Steinenbach - Kaltbrunn	144	0	144	198