Zeitschrift: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern
Herausgeber: Geographische Gesellschaft Bern
Band: 62 (2007)

Artikel: Hydrologie : im Wasserschloss Europas
Autor: Weingartner, Rolf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-960378

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

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

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

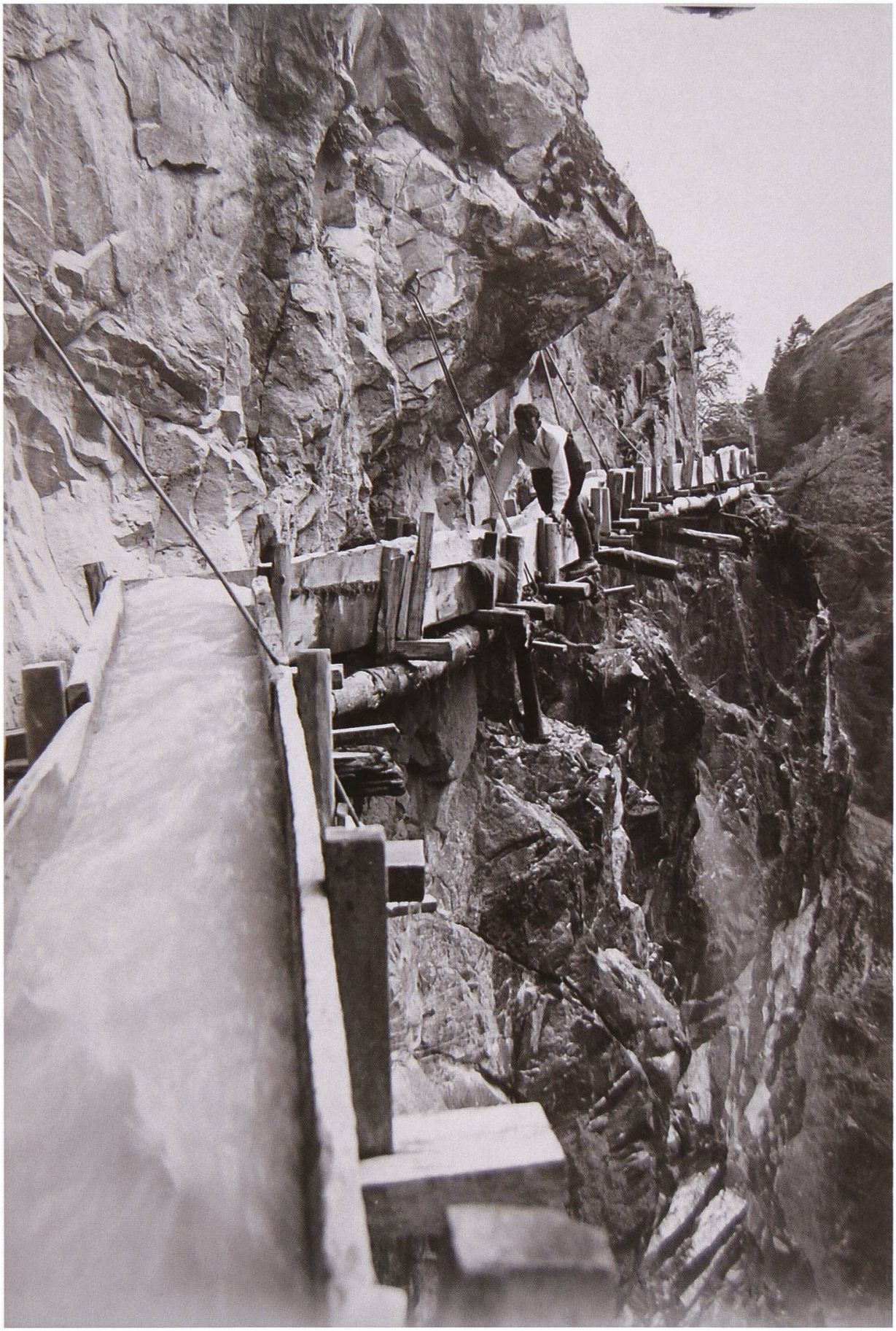
Download PDF: 18.08.2025

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

4

Hydrologie – Im Wasserschloss Europas

Rolf Weingartner



Hydrologische Grundlagen

4

Dank ihres Wasserreichtums gelten die Alpen als «Wasserschloss Europas»; sie tragen entscheidend zur Wasserversorgung der vorgelagerten Tiefländer bei (Viviroli und Weingartner 2004). Inmitten dieses Wasserschlosses liegt das Welterbe Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn. Dieses trägt – bei einem Anteil von rund 2 % an der Gesamtfläche der Schweiz – mit 3.3 % überproportional zu dem in der Schweiz erzeugten Gesamtabfluss bei. Dieser Wasserreichtum beruht auf der alpinen Höhenlage und den damit verbundenen grossen Niederschlagsmengen bei gleichzeitig abnehmender Verdunstung. Zudem sind in den Gletschern grössere Wassermengen gespeichert.

Einen Gesamtüberblick über die verfügbaren Wasserressourcen vermittelt der Wasserhaushalt. Er setzt sich aus den Elementen Niederschlag (P), Verdunstung (E), Abfluss (R), und Speicheränderung (ΔS) zusammen. Es gilt: $P = E + R + \Delta S$. Im Folgenden werden diese Elemente zuerst einzeln und dann in der Wasserbilanz als Ganzes betrachtet. Dabei werden auch Aspekte wie die Saisonalität oder Extremwerte, welche über eine reine Wasserhaushaltsbetrachtung hinausgehen, diskutiert.

Niederschlag

Im hydrologischen Kreislauf stellt der Niederschlag (Regen, Schneefall, Nebelniederschlag) die wichtigste Einnahmegrösse dar. Niederschläge weisen in Gebirgsräumen eine hohe räumliche Variabilität auf. Im Allgemeinen nimmt die Jahresniederschlagsmenge mit zunehmender Höhe zu; im Aletschgebiet beträgt diese Zunahme 99 mm pro 100 m. Dieser regionale Niederschlagsgradient ist damit höher als der mittlere Gradient für die Alpennordseite (rund 70 mm/100 m; Sevruk 1997: 362), weil er durch die klimatischen Gegensätze zwischen nord- und inneralpiner Zone verstärkt wird.

Der langjährige mittlere Jahresniederschlag der im Bereich des Welterbes Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn gelegenen Bilanzierungsgebiete (vgl. Abb. 2) beträgt 1864 mm/a (Tab. 1). Da diese Bilanzierungsgebiete auch tiefer gelegene Gebiete ausserhalb des Welterbe-Perimeters umfassen, dürfte der «wahre» Gebietsniederschlag des Welterbe-Gebietes allerdings etwas höher ausfallen. Die höchsten Niederschläge mit Werten bis zu 3600 mm/a treten im Bereich von Jungfrau und Mittaghorn auf (Abb. 1). Das Oberwallis und auch das Lötschental bilden durch ihre inneralpine Lage eine «Trockeninsel», wie die langjährigen Jahresmittel der Stationen Fiesch (901 mm/a, 1951–1990), Brig (737 mm/a, 1951–1990), aber auch Blatten im Lötschental (1091 mm/a, 1961–1990) belegen.

Für Wasserbilanzstudien wurde die Schweiz in sogenannte Bilanzierungsgebiete mit Flächen zwischen 100 und 200 km^2 unterteilt (Breinlinger, Gamma und Weingartner 1992). Das Welterbe umfasst Teile der in Abbildung 2 dargestellten Bilanzierungsgebiete, welche

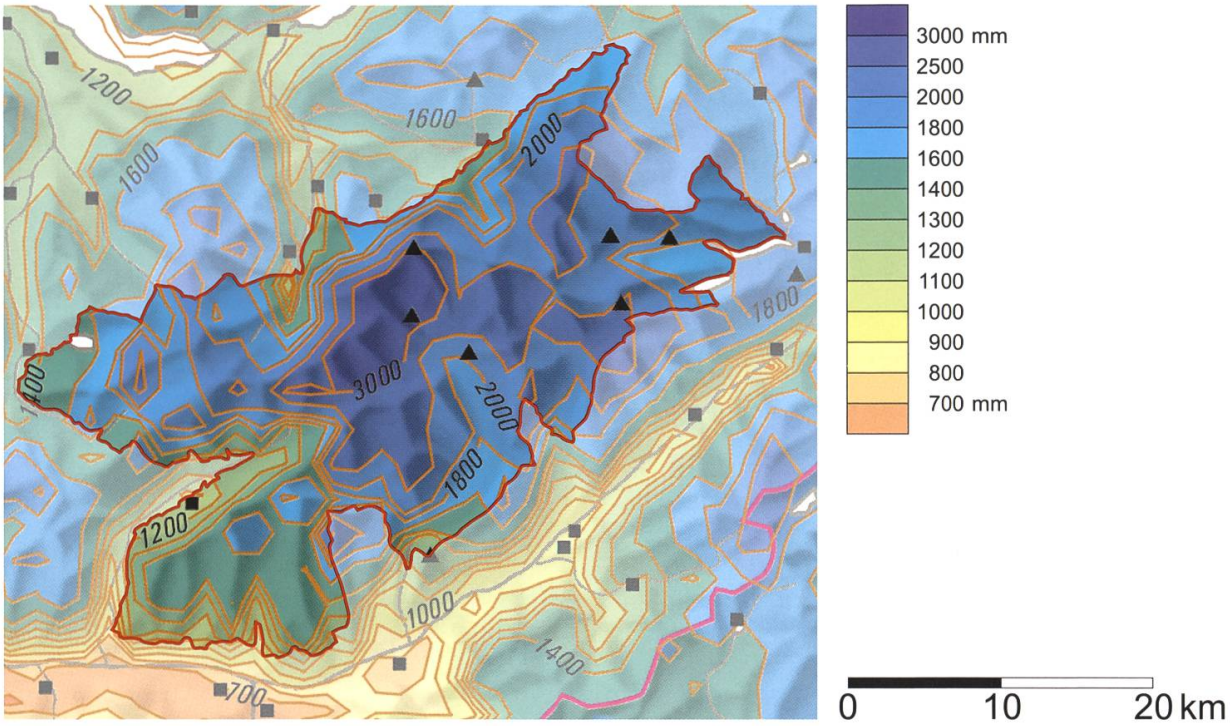


Abbildung 1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen 1971–1990 (aus Schwarb et al. 2001).

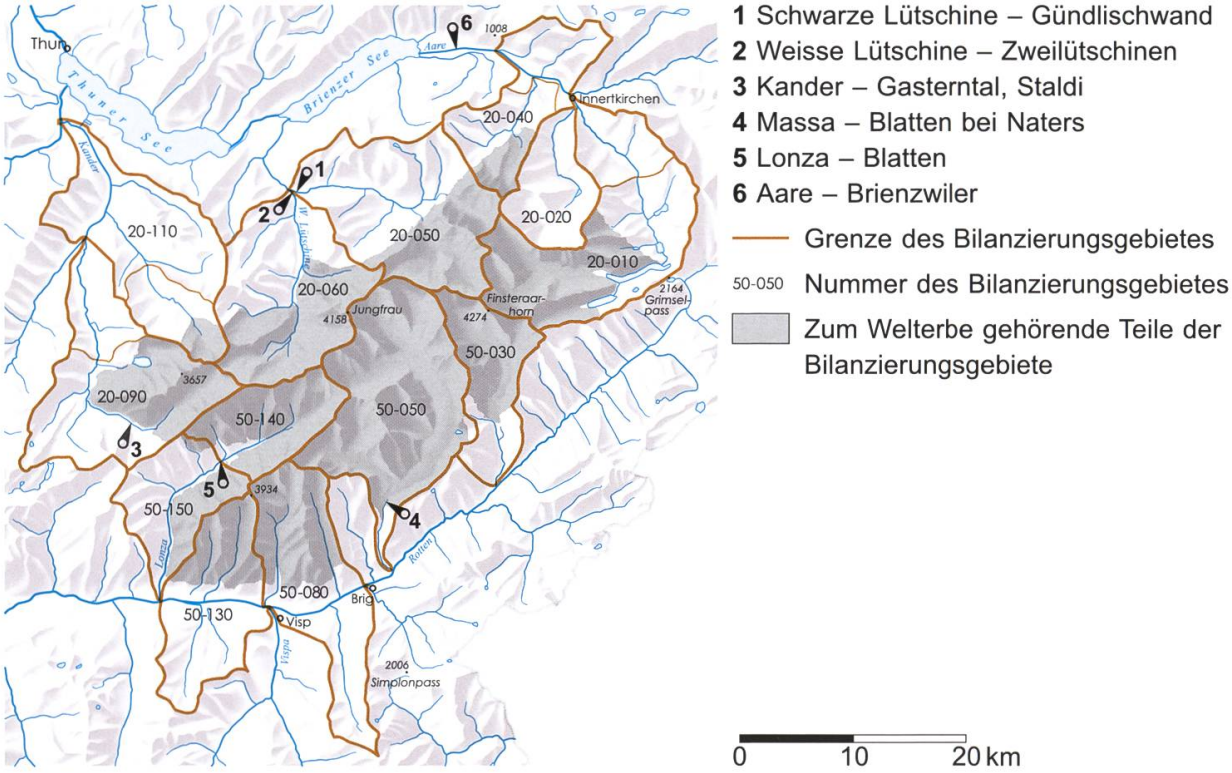


Abbildung 2: Bilanzierungsgebiete im Welterbe (aus Breinlinger, Gamma und Weingartner 1992) und Abflussstationen mit langen Messreihen (nach Kan 2002).

die hydrologischen Bedingungen im Welterbe sehr gut widerspiegeln. In Tabelle 1 sind für diese Gebiete die nach dem Ansatz von Schädler und Weingartner (2002) bestimmten Gebietsniederschläge ausgewiesen. Reduziert man diese Niederschläge aus Vergleichsgründen auf 2000 m ü.M. (Gradient 99 mm/100 m), so erhält man für die vier nordalpinen Gebiete in Tabelle 1 einen Mittelwert von 1760 mm/a. Dieser Wert ist um 360 mm/a grösser als der reduzierte Wert der inneralpinen Bilanzgebiete im Welterbe, was den Niederschlagsreichtum der nordalpinen Gebiete belegt.

Auch bei der saisonalen Verteilung der Niederschläge ist ein deutlicher räumlicher Unterschied zu erkennen: Während im nordalpin geprägten Teil die Sommerniederschläge (April bis September) im Mittel um den Faktor 1.5 grösser sind als die Winterniederschläge, liegt dieses Verhältnis im inneralpinen Bereich bei 0.95 (Aletschgebiet) bzw. 0.7 (Lötschental, Goms). Im inneralpinen Teil des Welterbes fallen somit mehr Winter- als Sommerniederschläge.

Das Welterbe ist also durch grosse hydroklimatische Gegensätze geprägt; dies gilt auch für die Anzahl der Tage mit Niederschlägen: Bei den tiefer gelegenen nordalpinen Klimastationen – z. B. Kandersteg (1003 m ü.M.) – treten Niederschläge mit mehr als 0.3 mm/d im Mittel an rund 40 % der Tage auf; bei den höher gelegenen Stationen – z. B. Eigergletscher (2320 m ü.M.) – regnet oder schneit es an rund der Hälfte der Tage. Inneralpin hingegen ist die Zahl der Niederschlagstage signifikant kleiner; hier fällt nur an 30 bis 40 % der Tage Niederschlag (Schüepp 1976).

Schädler und Weingartner (2002) haben die oben erwähnten Gebietsniederschläge aus dem Abfluss, der Verdunstung und der Speicheränderung abgeleitet; das heisst, sie haben keine Niederschlagsdaten zur Bestimmung der Gebietsniederschläge verwendet! Dies mag auf den ersten Blick erstaunen; es hängt aber damit zusammen, dass eine genaue Messung des Niederschlags im Hochgebirge äusserst schwierig ist. Man spricht in diesem Zusammenhang vom systematischen Niederschlagsmessfehler. Der systematische Messfehler beträgt in den Hochalpen beim Jahresniederschlag bis zu 30 %; in Einzelfällen ist er gar grösser (Sevruk 1985: 72). Ursache dafür sind insbesondere die hohen Windgeschwindigkeiten und der hohe Anteil des durch den Wind leicht ablenkbaren Schnees am Gesamtniederschlag. So schneit es nach Schüepp (1976: 473) in Grindelwald (1003 m ü.M.; Periode 1901–1940) im Mittel an 53 Tagen pro Jahr, also an rund einem Drittel der Tage mit Niederschlag. Bei der inneralpinen Station Reckingen (1332 m ü.M.) sind es 61 Tage (45 % der Tage mit Niederschlag).

Für die Beurteilung der Hochwassersituation eines Einzugsgebietes sind die Starkniederschlagsverhältnisse ein grundlegender Indikator. Starkniederschläge sind Ereignisse, die «lokal oder flächig gewisse Grenzkriterien überschreiten» (Grebner 1990: 870). Sie sind vor allem in der Form von Regen hochwasserrelevant. Aufgrund der grossen Höhenlage – die mittlere Gebietshöhe des Welterbes (flächengewichtet berechnet aus den Angaben in Tabelle 1) beträgt rund 2300 m ü.M. – liegen grosse Teile des Gebietes meistens im Bereich

Nr.	Fluss, Ausflusspunkt	Fläche [km²]	mittl. Höhe [m]	P [mm/a]	R [mm/a]	E [mm/a]	ΔS [mm/a]	R/P [–]
Alpennordsseite (Aare)								
20–010	**Aare,** Innertkirchen	209.3	2363	2380	2062	332	-14	0.87
20–050	**Schwarze Lütschine,** Zweilütschinen	179.9	2060	1903	1594	320	-11	0.84
20–060	**Weisse Lütschine,** Zweilütischinen	165.6	2152	1772	1468	314	10	0.83
20–090	**Kander,** Gasterntal	188.6	2133	1647	1315	341	-9	0.80
Inneralpine Region (Rhone)								
50–030	**Weisswasser,** Fiesch	84	2668	2442	2156	312	-26	0.88
50–050	**Massa,** Blatten bei Naters	202.8	2911	2179	1901	259	19	0.87
50–080	**Gredetsch- und Baltschiedertal**	145.8	2016	1264	832	436	-4	0.66
50–130	**Bietsch- und Jolital**	121.2	1766	1213	761	453	-1	0.63
50–140	**Lonza,** Blatten	78	2637	2180	1882	318	-20	0.86
50–150	**Lonza,** Blatten bis Rhone	84	2141	1517	1118	402	-3	0.74
Welterbe Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn								
	Bilanzierungsgebiete im Welterbe	1459.2	2283	1864	1528	342	-6	0.82

Nr.: Nummer des Bilanzierungsgebietes (siehe Abb. 2).

P = Niederschlag; R = Abfluss; E = Verdunstung; ΔS = Speicheränderung; R/P = Abflusskoeffizient

Tabelle 1: Wasserhaushalt der Bilanzierungsgebiete, welche das Welterbe abdecken (vgl. Abb. 2); Mittelwerte 1961–1990 (nach Schädler und Weingartner 2002).

negativer Lufttemperaturen, so dass die Saison hochwasserrelevanter Niederschläge vergleichsweise kurz ist. Für das Hochwassergeschehen entscheidend sind hier vor allem die langandauernden, durch Warmfronten ausgelösten sommerlichen Niederschläge mit hoher 0°C-Grenze (vergleiche dazu die Detailanalysen von Gyarmati 2004: 69–72) in Kombination mit einem hohen, durch die Schnee- und Eisschmelze bedingten Basisabfluss.

Bei der Weissen Lütschine, Zweilütschinen, beträgt der Anteil der Flächen, die oberhalb von 3000 m ü.M. liegen, 12 %, bei der Lonza, Blatten, 27 % und bei der Massa, Blatten bei Naters, sogar 47 % (Hegg 2002). Dies führte zum Beispiel beim grossen Hochwasserereignis vom Oktober 2000, mit einer 0°C-Grenze bei etwa 3000 m ü.M. dazu, dass die Spitzenabflussspende der Massa insgesamt nur 610 l/s*km² betrug, wobei grosse Differenzen zwischen den «beregneten» und «beschneiten» Gebieten auftraten. Die beregneten Gebiete unterhalb

von 3000 m ü.M. trugen mit rund 1200 l/s*km^2 namhaft zum Hochwasserabfluss bei, während der Beitrag der hochgelegenen beschneiten Gebiete vernachlässigbar klein war. Dank ihrer grossen Höhenlage blieben die Einzugsgebiete des Welterbes im Oktober 2000 also weitgehend von ausserordentlichen Hochwasserabflüssen verschont.

Verdunstung

Unter Verdunstung versteht man den Übergang des Wassers vom festen in den gasförmigen (Sublimation) und vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatszustand. In der Wasserbilanz stellt die Verdunstung einen Ausgabeposten dar. Sie ist eng mit der Nettostrahlung gekoppelt. Als Nettostrahlung oder Strahlungsbilanz wird die Differenz zwischen allen auf der Erdoberfläche einfallenden und allen die Erdoberfläche verlassenden Strahlungsströmen bezeichnet. 60 bis 80 % der Nettostrahlung wird für die Verdunstung verbraucht (Z'graggen und Ohmura 2002). Die Nettostrahlung nimmt mit zunehmender Gebietshöhe ab. Dabei spielt die Schneedecke mit ihren hohen Albedo-Werten (Mass für das Rückstrahlvermögen), welche die kurzwellige Einstrahlung entscheidend beeinflusst, eine wichtige Rolle. Entsprechend der Abnahme der Nettostrahlung nimmt die Jahresverdunstung im schweizerischen Mittel um 17 m pro 100 Höhenmeter ab (Menzel, Lang und Rohmann 1999).

Dass die hochalpine Schneedecke eng mit den Verdunstungsverhältnissen gekoppelt ist, zeigt auch eine Untersuchung von Föhn (1976: 40). Er schätzt die Verdunstung einer ganzjährig schneebedeckten Fläche in der Höhenzone 2000 bis 3000 m ü.M. auf 60 mm/a, die Verdunstung einer während drei bis vier Monaten schneefreien Fläche hingegen auf 140 mm/a. Weitere Faktoren, die zu einer Verdunstungsabnahme mit der Höhe führen, sind die verminderte Grösse der transpirierenden pflanzlichen Oberfläche pro Grundflächeneinheit (vgl. Wieser, Körner und Crenusca 1982: 94), die kürzere verdunstungsrelevante Vegetationszeit sowie die flachgründigen Böden und die kahlen Felswände.

Aufgrund der skizzierten Zusammenhänge wird verständlich, dass die mittlere Jahresverdunstung im Welterbe-Gebiet nur gerade 342 mm/a beträgt (1961–1990; Tabelle 1). In der Schweiz (mittlere Höhe: 1312 m ü.M.) verdunsten im Mittel 469 mm/a (Schädler und Weingartner 2002). Der Verdunstungswert 342 mm/a weicht rund 14 % vom Erwartungswert 301mm/a ab, der sich aus der Differenz der mittleren Höhen der Schweiz und des Welterbes sowie einem Gradienten von -17 mm/100 m berechnen lässt. Zur etwas höheren Verdunstung im Welterbe-Gebiet dürfte die relativ hohe Nettostrahlung an den südexponierten inneralpinen Hängen wesentlich beitragen. Dort nehmen die Verdunstungswerte zum inneralpinen Rhonetal markant zu. Im Zusammenspiel mit den tiefen Niederschlagsmengen wird deshalb der Bedarf nach einer Bewässerung der landwirtschaftlichen Flächen verständlich (vgl. Liniger 1983).

Abfluss

Der Abfluss ist jene hydrologische Grösse, die sich, wenn auch mit grossem Messaufwand, recht genau bestimmen lässt. Er liefert eine räumlich integrale Information über das gesamte Einzugsgebiet. Deshalb kommt ihm unter den Wasserhaushaltselementen eine besondere Bedeutung zu. Der Abfluss ist aber auch von grosser gesellschaftlicher Relevanz; er stellt sowohl eine Ressource (Wasserkraft, Bewässerung u.a.) als auch ein Gefahrenelement (Hochwasser, Trockenheit) dar.

Abflussspende und -höhe

Für die meisten Einzugsgebiete im Welterbe-Gebiet sind umfassende, mit langen Messreihen abgestützte Informationen zum Abfluss vorhanden. Die wichtigsten Abflusskennwerte dieser Gebiete sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Fluss, Station (Nr.)	Periode	F [km²]	mH [m]	MQ [m³/s]	Mq [l/s*km²]	HHq [l/s*km²]	mHq [l/s*km²]	Q_{347} [l/s]	NNq [l/s*km²]	Regime
Schwarze Lütschine, Gündlischwand **(1)**	1992–1998	180.1	2060	10.7	59	440	–	1410	4.55	a-glacio-nival
Weisse Lütschine, Zweilütschinen **(2)**	1933–2003	164.0	2170	7.99	49	671	381	1020	3.05	a-glacio-nival
Kander, Gasterntal **(3)**	1950–1982	40.7	2600	2.07	51	614	380	129	0.49	a-glacial
Massa, Blatten b. Naters **(4)**	1923–2003	195.0	2945	13.3	68	651	439*	260	0.67	a-glacial
Lonza, Blatten **(5)**	1956–2003	77.8	2630	4.68	60	1041	481	480	4.37	a-glacial
Aare, Brienzwiler **(6)**	1905–1929	554	2150	33.9	61	668	405	4200	4.56	b-glazial
Aare, Brienzwiler **(6)**	1954–2003	554	2150	35.0	63	668	353	10700	6.51	b-glazial

–: Daten nicht verfügbar
*: Periode für mHq: 1931–2003
Nr.: siehe Abb. 2; Periode: Messperiode; F: Fläche; mH: mittlere Gebietshöhe; MQ, Mq: langjähriger mittlerer Jahresabfluss; HHq: höchste in der Messperiode beobachtete Abflussspitze; mHq: mittlere jährliche Hochwasserspitze; Q_{347}: Abflussmenge, die an 347 Tagen (95 % der Tage) erreicht oder überschritten wird; NNq: tiefster in der Messperiode beobachteter mittlerer Tagesabfluss; Regime: Abflussregime nach Weingartner und Aschwanden (1992)
Aare, Brienzwiler 1905–1929: Periode vor Errichtung der Stauseen mit unbeeinflusstem Abfluss

Tabelle 2: Wichtige Kenngrössen von Abflussstationen am Rande des Welterbe-Perimeters. (Datenquelle: Bundesamt für Wasser und Geologie (heute: Bundesamt für Umwelt) und Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern)

Eine Basisgrösse für den direkten Vergleich von Einzugsgebieten stellt die Abflussspende dar. Die mittlere Jahresabflussspende (Mq) variiert im Welterbe zwischen rund 50 und 70 l/s*km². Diese Werte, welche rund zweimal höher sind als der schweizerische Mittelwert von 31 l/s*km², sind typisch für hochalpine Gebiete; sie belegen deren hohe «hydrologische Produktivität». Werden die Abflussspenden in Abflusshöhen umgerechnet, so ergibt sich für das Welterbe ein langjähriger Mittelwert von 1528 mm/a (1961–1990; Tab. 1). Die räumlichen Schwankungen der Abflusshöhen innerhalb des Welterbe-Gebietes mit Werten zwischen 2160 mm/a und 760 mm/a (vgl. Tab. 1) orientieren sich weitgehend an jenen des Gebietsniederschlags. Die relativ kleine Abflusshöhe von 760 mm/a wurde – methodisch bedingt – aus dem Bilanzierungsgebiet 50–130 abgeleitet, das neben dem zum Welterbe gehörenden Bietsch- und Jolital auch die Tallagen unterhalb von Visp umfasst (vgl. Abb. 2). Die Abflusshöhen dieser beiden Täler werden dadurch natürlich etwas unterschätzt.

Abflussregimes

Die saisonalen Schwankungen des Abflusses können mit den Abflussregimes beschrieben werden (vgl. Weingartner und Aschwanden 1992). Im Welterbe treten ausschliesslich eingipflige Abflussregimes auf, die von der Schnee- und vor allem auch von der Gletscherschmelze dominiert werden (vgl. Abb. 3). Die Hauptabflussphase liegt in den Monaten Mai bis September. Das Winterhalbjahr ist durch minimale Abflüsse gekennzeichnet, da die Niederschläge in Form von Schnee zwischengespeichert werden. Die Abflüsse der Massa, der Lonza und des Weisswassers (vgl. Abb. 2) weisen aufgrund der starken Vergletscherung ihrer Einzugsgebiete (>> 30 %) ein glaziales Regime mit den grössten Monatsabflüssen im Juli und im August auf. Anders die Weisse und die Schwarze Lütschine: Da hier der Anteil vergletscherter Flächen mit rund 20 % bedeutend kleiner ist, besitzen sie ein glazio-nivales Abflussregime mit einer stärkeren Betonung der nivalen, also durch die Schneeschmelze massgeblich beeinflussten Abflusskomponente in den Monaten Mai und Juni.

Interessant war das Verhalten der Abflüsse vergletscherter Einzugsgebiete im Trockensommer 2003: Die Trockenperiode begann auf der Alpennordseite im Februar 2003 und dauerte in wechselnder Ausprägung bis zum Oktober 2003 an. Vergleicht man die Monatsniederschläge 2003 mit dem langjährigen Mittel, so wiesen einzig Januar und Oktober überdurchschnittliche Niederschlagsmengen auf (BUWAL, BWG und MeteoSchweiz 2004: 32). Im weiteren hatte der grosse Wärmeüberschuss, der im März 2003 einsetzte und seinen Höhepunkt mit der Rekordhitze im Juni und August erreichte, einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussverhalten (BUWAL, BWG und MeteoSchweiz 2004: 47). Auf diesen Wärmeüberschuss reagierten die stark vergletscherten Einzugsgebiete mit überdurchschnittlichen Jahres- und Monatsabflüssen. So wies die Massa (Messstation Blatten bei Naters) mit einem Vergletscherungsanteil von 66 % ein Jahresmittel auf, das mit 20.2 m³/s den mittleren Jahresabflusses der Messperiode 1923–2002 (13.3 m³/s) massiv, nämlich um 50 %, überschritt.

Dieser überdurchschnittliche Wert kam vor allem durch die sehr grossen Abflüsse in den Monaten Juni bis August zustande. Im Gegensatz dazu fielen die Abflüsse wenig oder nicht vergletscherter Einzugsgebiete im Jahr 2003 stark unterdurchschnittlich aus. Nach Abschluss der Schneeschmelze im Juni war dort nur noch wenig Wasser aus den Speichern verfügbar.

Betrachtet man die Variabilität der alpinen Regimes von Jahr zu Jahr bzw. die Abweichungen des Regimes eines Einzeljahres vom langjährigen Mittelwert, so fällt die hohe Stabilität der saisonalen Muster auf (Abb. 3). Diese Stabilität ist charakteristisch für alpine und speziell glazial geprägte Regimes, wie gesamtschweizerische vergleichende Analysen von Oppliger (1997) und Diezig (2004) gezeigt haben.

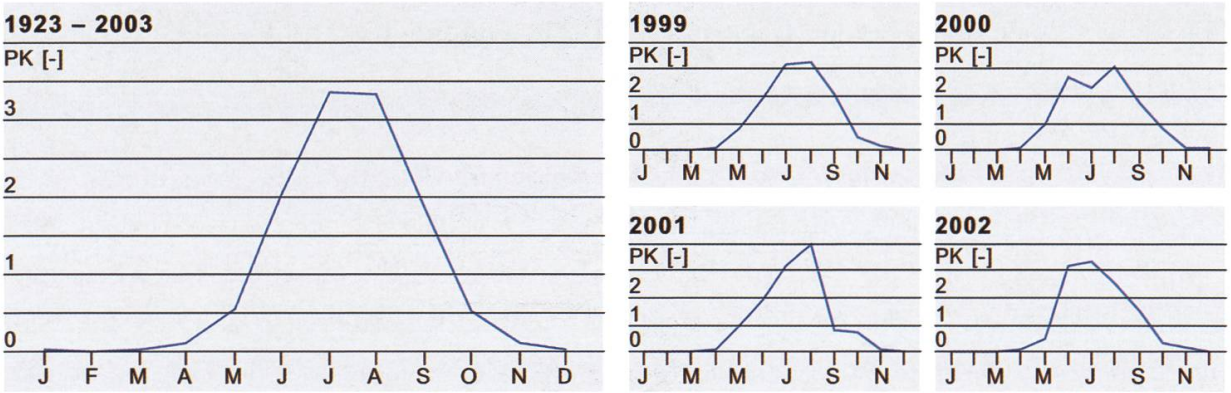


Abbildung 3: Abflussregime der Massa – Vergleich des mittleren Regimes mit dem Regime ausgewählter Einzeljahre.

Wassernutzung

Grosse Abflusshöhen kombiniert mit einer geringen Variabilität von Jahr zu Jahr machen die Welterbe-Region aus hydrologischer Sicht zu einem wasserwirtschaftlichen Gunstraum. Besonders intensiv wird die Wasserkraft im Oberhasli seit den 1930er Jahren in einem ausgeklügelten System von Ableitungen, Stollen und Speicherseen genutzt. Das Welterbe umfasst wichtige Teile der stark vergletscherten Einzugsgebiete dieser Speicherseen. Die Kraftwerksanlagen selber wie auch die Flussabschnitte der Aare, deren Wasserführung durch die Stromerzeugung stark verändert wird (vgl. Tab. 2), liegen ausserhalb des Welterbes. Bis Innertkirchen führt die Aare gerade noch maximal 40 % der mittleren natürlichen Abflussmengen (Margot et al. 1992). Im Rahmen einer vom Kanton Bern in Auftrag gegebenen Studie haben Sägesser und Weingartner (2005) die natürlichen Abflussmengen der Aare seit der Inbetriebnahme der ersten Anlagen im Jahr 1932 rekonstruiert und das Ausmass der Beeinflussungen in Tagesschritten quantifiziert.

Ausserhalb des Grimselgebietes beschränkt sich die Wasserkraftnutzung im Wesentlichen auf die Massa (mit dem Stausee Gibidum), die Lonza und das Weisswasser (Margot et al. 1992). Dies hängt einerseits mit den ungünstigen naturräumlichen Bedingungen für

die Wasserspeicherung (Topographie, Geologie) zusammen. Andererseits verhinderte in den 1940er Jahren eine Initiative aus Kreisen des Naturschutzes den Bau eines Stausees in der grossartigen Landschaft des Hinteren Lauterbrunnentals (Pro Natura 1999). Bei der Schwarzen und der Weissen Lütschine ist die Wasserführung in etwa 3 % der Gewässerstrecken durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst; beim Weisswasser und bei der Lonza wurde sie in je etwa 15 % der Gewässerstrecken verändert; bei der Massa sind gar 78 % der Wasserläufe betroffen (Weingartner 1999: 160). Der hohe Beeinflussungsgrad bei der Massa kommt dadurch zustande, dass der grösste Teil des Einzugsgebietes vergletschert ist, so dass sich die eigentlichen Fliessgewässerstrecken auf den Unterlauf der Massa beschränken, deren Abfluss intensiv genutzt wird. Ein kleinerer Teil des Massa-Abflusses (bis maximal 4 m^3/s) wird zur Bewässerung der Wiesen der Gemeinde Ried-Mörel sowie zur Stromproduktion im Kraftwerk Aletsch AG in Mörel genutzt. Der Rest wird im Stausee Gibidum zwischengespeichert und dann im Berginnern auf die Turbinen des Kraftwerks Electra-Massa in Bitsch geleitet. Ein Unterwasserkanal führt das Wasser von dort direkt der Rhone zu. Unterhalb der Staumauer Gibidum ist das Flussbett der Massa meist ausgetrocknet. Da für die beiden Kraftwerke an der Massa noch alte Wassernutzungsrechte gelten, sind nach dem Gewässerschutzgesetz von 1991 bis zur Konzessionserneuerung im Jahr 2048 noch keine Mindestrestwassermengen vorgeschrieben (Crameri 2004: 75). Aufgrund der in Tabelle 2 ausgewiesenen Abflussmenge Q_{347} würde die Restwassermenge bei der Massa nach Artikel 31 des Gewässerschutzgesetzes 174 l/s betragen.

Hochwasser

Im Abschnitt «Niederschlag» wurde am Beispiel des Hochwassers 2000 darauf hingewiesen, dass sich die grosse Höhenlage des Welterbe-Gebietes entschärfend auf die Hochwassersituation auswirkt. Dies zeigt sich nun auch bei den in Tabelle 2 ausgewiesenen Hochwasserkennwerten HHq und mHq, welche im gesamtschweizerischen Vergleich eher tief ausfallen. Dafür ist – wie bereits erwähnt – vor allem der hohe Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag verantwortlich.

Wasserhaushalt und Reserveänderungen

Der Wasserhaushalt der mehrheitlich glazial geprägten Bilanzierungsgebiete des Welterbes ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Wie der Abflusskoeffizient (R/P) belegt, gelangt der grösste Teil des Jahresniederschlags, nämlich rund 82 %, zum Abfluss. Die Verdunstung ist in der Jahresbilanz nur von untergeordneter Bedeutung.

Welche Bedeutung spielen nun die Gletscher bzw. deren Reserveänderungen im Wasserhaushalt? Dies soll am Beispiel unterschiedlich vergletscherter Einzugsgebiete diskutiert werden:

Das zu rund 66 % vergletscherte Einzugsgebiet der Massa (195 km²) wird zwar vom Grossen Aletschgletscher (85 km²) dominiert; es enthält aber insgesamt 33 Teilgletscher. Im Mittel über den Zeitraum 1856 bis 2002 betrug die gesamte Reserveänderung (ΔS) dieser Gletscher -267 mm/a. Im Trockenjahr 1947 war die Reserveänderung mit -2354 mm/a rund achtmal grösser. Für das Trockenjahr 2003 geben BUWAL, BWG und MeteoSchweiz (2004: 39) einen Wert von «nur» ca. -1300 mm/a an, was im Vergleich mit dem Wert von 1947 doch eher erstaunt. Inwiefern hier unterschiedliche Methoden zur Herleitung der Massenbilanz eine Rolle spielen, ist Gegenstand einer aktuellen Untersuchungen an der VAW-ETHZ. In Tabelle 1 wird für die Massa im Zeitraum 1961–1990 eine positive Reserveänderung ausgewiesen (19 mm). Dies hängt damit zusammen, dass die Gletscher im Einzugsgebiet in der zweiten Hälfte der 1960er Jahre und um 1980 kurzfristig wieder etwas an Masse gewannen. Diese positive Reserveänderung ist somit nicht repräsentativ für den allgemeinen negativen Trend im 20. Jahrhundert.

Die langfristige mittlere Reserveänderung von rund -267 mm/a entspricht ungefähr einem Achtel des Niederschlagsinputs. In Einzeljahren wie 1921, 1928 und 1947 erreichte der aus der Eisschmelze resultierende Input ins hydrologische System sogar ähnliche Grössenordnungen wie der Gebietsniederschlag. In den Sommermonaten Juli bis September übertrifft der Zufluss aus der Gletscherschmelze den Niederschlagsinput regelmässig um den Faktor 2 bis 3. So erhalten wir für den August nach Aellen und Funk (1999) folgende mittlere Bilanz (1931–1980):

	Input		=		Output	
Niederschlag	+	Speicheränderung	=	Abfluss	+	Verdunstung
150 mm	+	360 mm	=	480 mm	+	30 mm

Die für glaziale Einzugsgebiete typischen positiven Reserveänderungen der Gletscher in den Sommermonaten tragen also massgeblich zum Abfluss bei. Sind bei diesen sommerlichen Abflüssen angesichts der Klimaerwärmung signifikante Veränderungen zu beobachten? Eine Trendanalyse bei den «glazialen Abflüssen» der Monate Juli und August zeigt bei der Massa eine signifikante Zunahme in der Periode 1961–2003, nicht aber in der Periode 1931–2003. Die Abflusszunahme in der kürzeren Periode ab 1961 ist auf die bereits beschriebene Tatsache zurückzuführen, dass in den 1960er Jahren und um 1980 Jahre mit positiven Reserveänderungen überwogen, während nach 1985 Jahre mit (stark) negativen Reserveänderungen dominierten.

Bei der Lütschine (Vergletscherungsgrad 17.6 %) kann ein schwach signifikanter Trend zu höheren «glazialen Abflüssen» nur in der Gesamtperiode 1908–2003, nicht aber in der Periode 1961–2003 beobachtet werden. Das Gleiche gilt auch für die Lonza (Vergletscherung 36.5 %), wobei die Gesamtperiode hier nur den Zeitraum 1956–2003 abdeckt.

Es ergibt sich also ein uneinheitliches Bild, das zeigt, dass bei der Frage der hydrologischen Auswirkungen einer Klimaänderung neben dem allgemeinen Trend (Erwärmung) weitere Effekte wie Gletschervolumen und (Höhen-) Lage berücksichtigt werden müssen. Insgesamt sind die Einzugsgebiete im Welterbe aufgrund ihrer grossen mittleren Höhe und beträchtlichen Vergletscherung gegenüber einer Klimaänderung weniger anfällig als tieferliegende.

Wasser als Ressource

Die Wasserressourcen im «Wasserschloss» Welterbe sind sowohl für die einheimische Bevölkerung als auch für das Unterland von grosser Bedeutung. Die Gebirgswasser sichern die Versorgung mit Trink- und Bewässerungswasser sowie die Stromversorgung (vgl. Abschnitt «Abfluss»). Dank der Wassernutzung, z. B. durch Wasserzinsen für die Nutzung der Wasserkraft, können die Berggemeinden aus dem Wasser Kapital schlagen. Das Wasser bildet auch eine wichtige Grundlage für touristische Aktivitäten.

Wasserversorgung

Wegen des Wasserreichtums stellte die Wasserversorgung für die Welterbe-Region auf der Alpennordseite nie ein Problem dar. Ganz anders dagegen sind die Verhältnisse im innralpinen Teil: An den südexponierten Hängen des Aletschgebietes und des Bietschhorns war die Wasserversorgung aufgrund der Trockenheit schon immer problematisch (Crameri 2004). Mit enormem Aufwand muss das Wasser seit jeher von den Gletscherbächen abgezweigt oder an weit entfernten Quellen gefasst und dann über kilometerlange Leitungen den Südhängen zugeführt werden. Die kühnen Konstruktionen der historischen Wasserfuhren (Suonen), die teilweise gar an überhängenden Felsen verlaufen, sind eindrückliche Zeugen dieses jahrhunderte alten Kampfes um die «Heiligen Wasser». Die Gesamtlänge der Walliser Wasserfuhren wird auf 1750 km geschätzt (Vischer 2004). Von diesem ausgedehnten Netz ist heute allerdings nur noch ein kleiner Teil in Betrieb. In den letzten Jahrzehnten wurden die alten Holzkännel, deren Unterhalt sehr aufwändig und gefährlich ist, zudem meist durch Beton- oder Plastikleitungen ersetzt, und das Wasser wird heute an den besonders exponierten Stellen durch sichere Stollen geführt.

Mit der Realisation diverser Wasserversorgungsprojekte konnten die Probleme der Wasserversorgung in den letzten Jahren weitgehend gelöst werden. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenang das Märjelenprojekt im Aletschgebiet, bei dem sich 1972 die sechs Gemeinden Bitsch, Ried-Mörel, Greich, Goppisberg, Martisberg und Lax zum «Verband für Wasserwirtschaft und Entwicklungsplanung im Aletschgebiet» zusammenschlossen. Eine neue Wasserversorgung sollte genügend Wässerwasser für die Landwirtschaft sowie das erforderliche Trinkwasser für Einheimische und Gäste bereitstellen. Erste Studien führten zu zwei wichtigen Erkenntnissen:

1. Genügend Wasser kann nur vom Gebiet Märjelen-Galtjinen bezogen werden;
2. Ohne Langzeitspeicher (Stausee) können die beiden Anforderungen «Wasserbeschaffung für die Bewässerung von 300 ha Wiesland» und «Trinkwasser für 10 000 Einwohnergleichwerte» nicht erfüllt werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden bezüglich der Leitungsführung zwei Varianten, eine Nord- und eine Südvariante, ausgearbeitet. Die Nordvariante sah die Erschliessung über die Nordhänge von Eggishorn und Bettmerhorn vor. Die geplante Route wäre fast identisch mit der Linienführung der historischen Wasserleitung «Riederfurka». Das Wasser sollte beim tiefsten Punkt zwischen Bettmerhorn und Moosfluh, bei «Biel» (2290 m ü.M.), über den Grat geleitet und von dort verteilt werden. Die Südvariante sah die Wasserführung durch den Tälligrat zu einer Wasserverteilstation auf der Laxeralp vor (vgl. Crameri 2005).

Der Verband entschied sich 1976 für die kostengünstigere Nordvariante. In der Folge kam es aus naturschützerischen (Bau im BLN-Perimeter), aber auch ökonomischen Gründen zu verschiedenen Einsprachen. 1980 hiess der Bundesrat eine Beschwerde des Schweizerischen Bundes für Naturschutz gut, was dazu führte, dass schliesslich doch die Südvariante realisiert wurde. 1988 konnte die Anlage in Betrieb genommen werden. Das Wasser stammt aus den Galtjinenquellen, deren Einzugsgebiet 1.35 km^2 gross ist. Das Wasser wird auf 2374 m ü. M. gefasst. Die nutzbare Menge beträgt maximal 245 l/s. Da es sich vor allem um Schneeschmelzwasser handelt, erfolgt der Hauptabfluss in den Monaten Mai bis September. Im Winter versiegen die Quellen vollständig. Um die Wasserversorgung der Südhanggemeinden auch im Winter gewährleisten zu können, wenn aufgrund der touristischen Hauptsaison ein hoher Trinkwasserbedarf besteht, ist ein Wasserspeicher nötig. Basierend auf Auswertungen von Zu- und Abflussganglinien wurde ein benötigtes Speichervolumen von 500 000 m^3 berechnet. Als Speicherbecken erwies sich der Vordersee im Märjelental – ein Überbleibsel des Märjelensees, eines Randsees des Aletschgletschers – als günstig. Vom Speicherbecken wird das Rohwasser über eine Leitung und in einem Tunnel durch den Tälligrat zur Wasseraufbereitungsanlage auf der Laxeralp geführt, von wo es getrennt nach Trink- und Wässerwasser zu den Gemeinden geleitet wird.

Wasserkraftnutzung

Am Rand – ausserhalb des Welterbes – wird die Wasserkraft intensiv genutzt. Die mittleren Energieproduktionswerte der grossen Werke lauten:

- KWO: 2300 GWh (inkl. Umwälzbetrieb), 1722 GWh (ohne Umwälzbetrieb)
- Kraftwerke an der Massa: 633 GWh
- Kraftwerke an der Lonza: 327 GWh

Die Gesamtsumme von 3260 GWh entspricht rund 5.7 % des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs (57300 GWh).

In einigen Gebieten im Welterbe wurde auf die Nutzung der Wasserkraft zugunsten des Landschaftsschutzes verzichtet, neben dem bereits an anderer Stelle erwähnten Lauterbrunnental auch in den Tälern auf der Südseite des Bietschhorns: Im Jolital, Bietschtal, Baltschiedertal und Gredetschtal trifft man deshalb noch auf natürliche, ungebändigte Bergbäche (vgl. Abb. 2: Bilanzierungsgebiete 50-080 und 50-130). Die Gemeinden erhalten Abgeltungsbeiträge als Entschädigung für die finanziellen Einbussen durch den Verzicht auf die Wasserkraftnutzung (Crameri 2004: 71).

Tourismus

Der Tourismus ist sowohl im Aletschgebiet wie auch in der übrigen Welterbe-Region ein wichtiger Wirtschaftsfaktor, der viele Arbeitsplätze schafft. Für den Wintersport stellt das Wasser in Form von Schnee eine bedeutende Ressource dar.

Bei der Wahl des Skigebietes spielt für die Wintersportler(innen) die Schneesicherheit eine zentrale Rolle. Ein Skigebiet gilt dann als schneesicher, wenn in mindestens 7 von 10 Wintern, also in 70 % der Winter, in der Zeit vom 16. Dezember bis 15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Schneesport ausreichende Schneedecke von 30 cm (alpin) bzw. 15 cm (nordisch) liegt (100-Tage-Regel, siehe Elsasser und Messerli 2001: 336). Für alle Schneemessstationen im Perimeter Visp – Adelboden – Meiringen – Grimsel und damit auch für die Welterbe-Region wurde die Schneesicherheit beurteilt, ohne allerdings die Schneehöhe zu berücksichtigen. Wie Abbildung 4 belegt, liegen schneesichere Gebiete, bei denen in mehr als 70 % der Winter genügend Schnee liegt, im betrachteten Perimeter generell oberhalb 1300 m ü.M.; sie umfassen damit den grössten Teil der Region. Bis ins Jahr 2050 ist aufgrund der prognostizierten Klimaerwärmung mit einem Anstieg dieser Höhengrenze um 200 bis 300 m zu rechnen. Wie die Abbildung weiter klar zum Ausdruck bringt, treten an den inneralpinen Stationen bei gleicher Höhenlage etwas häufiger Winter mit ausreichender Schneedecke auf.

Um die Schneesicherheit angesichts des Klimawandels zu erhalten, aber auch um exponierte Stellen zu beschneien und insbesondere auch um für die Weihnachtsferien, während derer ein beträchtlicher Teil der Einnahmen erzielt werden, bereit zu sein, wird heute in den meisten Skiorten mit Hilfe von Schneekanonen Kunstschnee erzeugt. Elsasser und Messerli (2001: 338) schätzen, dass in der Schweiz ca. 8 % der Pistenfläche künstlich beschneit werden. Zur künstlichen Beschneiung braucht es neben tiefen Temperaturen und Energie auch sehr viel Wasser (pro Schneekanone 20 bis 75 l/s). Der hohe Wasserbedarf stellt vielerorts ein Problem dar, da im Winter in den Gerinnen Niedrigwasser herrscht und die Quellschüttungen ihr Minimum erreichen. Das Wasser muss deshalb vielfach aus künstlichen Speicherseen bezogen werden, so z. B. im Aletschgebiet aus dem Vordersee im Märjelental.

Aber auch für den Sommertourismus spielt Wasser eine wichtige Rolle. Die Gewässer werden zur Erholung vielfältig genutzt, sei dies für Wanderungen entlang unberührter Bäche

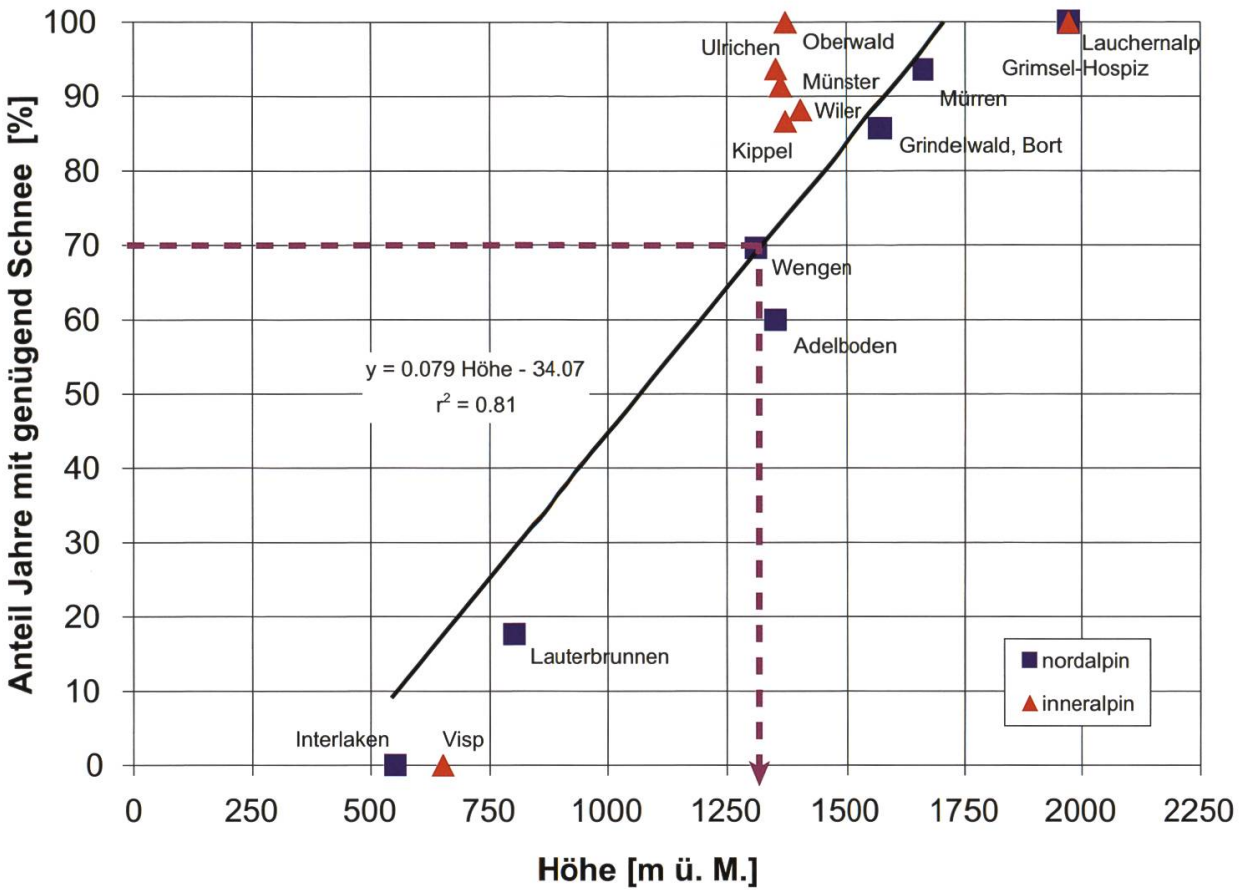


Abbildung 4: Schneesicherheit im Bereich der Berner Alpen und des Oberwallis (Daten: SLF 1936/37–1993/94).

und Wasserleitungen (Suonen), für Ausflüge zu idyllischen Bergseen, für Freizeitaktivitäten wie Fischen oder für Trendsportarten wie Canyoning (z. B. in der Massa-Schlucht), River-Rafting (z. B. auf der Lütschine) oder Bungy-Jumping (z. B. in der Schlucht unterhalb des Unteren Grindelwaldgletschers). Für die Welterbe-Region und insbesondere für das Aletsch-Gebiet bestehen mehrere Exkursionsführer, die z.T. auch dem Wasser gewidmet sind (Hauser und Weingartner 2005) und welche das hier Beschriebene vor Ort darstellen und erlebbar machen.

Ausgewählte weiterführende Literatur

Aellen, M., Funk, M. 1999: Längen- und Massenänderung der Gletscher seit dem letzten Höchststand um 1850. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.

Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. 1992: Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2, Bern.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), MeteoSchweiz 2004: Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt, 369, Bern.

Crameri, S. 2004: Wasser im UNESCO-Weltnaturerbe Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

Crameri, S. 2005: Gletscher und Wasserversorgung, Riederalp – Fiescheralp. In: F. Hauser, R. Weingartner (Hrsg.). Exkursionsführer Region Aletsch. «Wege durch die Wasserwelt» – Hydrologische Exkursionen in der Schweiz. Exkursionsprogramm zum «Hydrologischen Atlas der Schweiz» HADES, Bern.

Diezig, R. 2004: Die natürliche Variabilität der Monatsabflüsse von Einzeljahren um deren langjähriges Mittel. Seminararbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (unveröffentlicht).

Elsasser, H., Messerli, P. 2001: The vulnerability of the snow industry in the Swiss Alps. In: Mountain Research and Development, 21/4: 335–339.

Föhn, P. 1976: Schnee-Verdunstung im alpinen Gelände. In: Studiengruppe Verdunstung (Hrsg.). Die Verdunstung in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, 25, Bern: 35–42.

Grebner, D. 1990: Starkniederschlag: Zum Spektrum des Begriffs. In: Gas–Wasser–Abwasser, 70/12: 870–873.

Gyarmati, P. 2004: Atmosphärische Zirkulationsmuster bei Starkniederschlägen im Wallis. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

Hauser, F., Weingartner, R. (Hrsg.) 2005: Exkursionsführer Region Aletsch. «Wege durch die Wasserwelt» – Hydrologische Exkursionen in der Schweiz. Exkursionsprogramm zum «Hydrologischen Atlas der Schweiz» HADES, Bern.

Hegg, Ch. 2002: Einfluss der Schneefallgrenze auf die Abflussbildung. In: Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hochwasser 2000. Berichte des BWG, Serie Wasser, 2, Bern: 74–79.

Kan, C. 2002: Hydrometrische Netze. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.1[2], Bern.

Kirchhofer, W., Sevruk, B. 1992: Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.2, Bern.

Liniger, H. 1983: Veränderung des Bodens im Aletschgebiet (VS) durch die traditionelle Wiesenbewässerung. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

Margot, A., Sigg, R., Schädler, B., Weingartner, R. 1992: Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.

Menzel, L., Lang, H., Rohmann, M. 1999: Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Bern.

Oppliger, M. 1997: Die zeitliche Variabilität schweizerischer Abflussregimes. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

Pro Natura 1999: Naturschutzgebiet Hinteres Lauterbrunnental. Communiqué vom 30. Juni 1999. http://www.pronatura.ch/content/presse/DE/1999/page1999.11.html. Zugriff am: 15. Januar 2005.

Sägesser, M., Weingartner, R., 2005: Veränderung der Hydrologie der Aare, Pegel Brienzwiler, von 1921 bis 2004. Schlussbericht zum Teilprojekt «Abfluss» im Rahmes des Projektes «Veränderungen im Ökosystem Brienzersee». Publikation Gewässerkunde, Nr. 340, Bern.

Schädler, B., Weingartner, R. 2002: Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3, Bern.

Schädler, B., Weingartner, R. (in Vorbereitung): Wasserhaushalt der Schweiz im 20. Jahrhundert.

Schüepp, M. 1976: Niederschlag. Klimatologie der Schweiz, Teil 9–12, Heft 16/E: 335–483.

Schwarb, M., Frei, Ch., Schär, Ch., Daly, Ch. 2001: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.6, Bern.

Sevruk, B. 1985: Fehlerquellen, Genauigkeit, Korrekturmöglichkeiten. In: Sevruk, B. (Hrsg.). Der Niederschlag in der Schweiz, Beiträge zur Geologie – Hydrologie, 31, Bern: 65–75.

Sevruk, B. 1997: Regional dependency of precipitation-altitude-relationship in the Swiss Alps. In: Climatic Change, 36: 355–369.

SLF (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung) 1936/37–1993/94: Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen, Winterberichte, 1–57, Davos.

Vischer, D. 2004: Wasser, Quelle des Lebens. 500 Jahre Nidelbad. Th. Gut Verlag, Stäfa.

Viviroli, D., Weingartner, R. 2004: Hydrologische Bedeutung des europäischen Alpenraums. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.4, Bern.

Weingartner, R. 1999: Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 37, Bern.

Weingartner, R., Aschwanden, H. 1992: Abflussregimes. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern.

Wieser, G., Körner, Ch., Cernusca, A. 1982: Die Wasserbilanz von Graslandökosystemen in den österreichischen Alpen. In: Verhandlungen Gesellschaft für Ökologie, Band XII, Bern: 89–99.

Z'graggen, L., Ohmura, A. 2002: Räumlich-zeitliche Variationen der Nettostrahlung 1984–1993. In: Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.2, Bern.

Dank

Viele der hier dargestellten Fakten basieren auf Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Schweiz, die ich mit Dr. Bruno Schädler vom Bundesamt für Umwelt in den letzten Jahren durchführen durfte. Sandra Crameri trug wesentlich zum Abschnitt «Wasser als Ressource» bei. Einige Textpassagen wurden aus einer von ihr erstellten CD-ROM übernommen (Crameri 2004). Bernhard Wehren führte einige Berechnungen durch. Ruedi Sigg hat mich bei Fragen rund um die Elektrizitätsgewinnung mit konkreten Zahlen unterstützt. Schliesslich war Tom Reist für die redaktionellen Arbeiten besorgt.

Adresse des Autors

Prof. Dr. Rolf Weingartner, Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, wein@giub.unibe.ch