

Schneemessungen in alpinen Einzugsgebieten im Zeichen des Klimawandels

Christian Noetzi, Mario Rohrer

Zusammenfassung

Die Schneedecke im Alpenraum ist in den letzten Jahrzehnten immer mehr in den Fokus des öffentlichen und wirtschaftlichen Interesses geraten. Dies, da infolge steigender Temperaturen und milderer Winter die Auswirkungen für den Wintertourismus und die Wasserwirtschaft spürbar und unübersehbar geworden sind und sich in einer Verkürzung der Schneedeckenphasen äussern. Die Befunde in der Schneeforschung bleiben jedoch punkto des medialen Interesses meist im Schatten der abschmelzenden Gletscher und des schwindenden Permafrostes im Gebirgsraum. Wohl zu Unrecht, hängt doch auch das Wasserangebot im Sommer (neben dem schon erwähnten Wintertourismus) in den tieferliegenden Gebieten oft direkt oder indirekt von den winterlichen Schneefällen in den Alpen und Voralpen ab.

Die Erfassung der wichtigen Schneedeckenparameter stellt die Forscher und Forscherinnen vor grosse Herausforderungen, die mittels modernster Satellitentechnik und begleitenden Messungen vor Ort angegangen werden. Letztere sind gerade in gebirgigen Regionen eminent wichtig für die Absicherung der Fernerkundungsdaten, da hier grössere Abweichungen bestehen können. Kontinuierlich erfasste Messdatenreihen stellen eine sehr wichtige Hilfe bei der korrekten Erfassung der Schneedecke und so auch für deren Beitrag zum hydrologischen Geschehen in Einzugsgebieten – insbesondere mit Gebirgsanteil – dar. Mithilfe solcher Messreihen, die auch vom Klimabeobachtungssystem GCOS (siehe Kasten am Schluss) als besonders erhaltenswert eingestuft wurden, können die Entwicklungen in vergangenen Jahren nachvollzogen und in gewissen Fällen auch Trends für die Zukunft abgeschätzt werden.

1. Die Schneedecke als Wasserspeicher

Der Gebirgsraum der Alpen stellt im Wasserkreislauf Europas einen wichtigen Zwischenspeicher dar, der geprägt ist von Wasservorräten in Gletschern, in der Schneedecke sowie in geohydrologischen Systemen. Informationen über diese Wasservorräte sind für verschiedenste Wirtschaftszweige wie die Energiewirtschaft, die Industrie und die Landwirtschaft sowie auch die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser von grösster Bedeutung. Es ist naheliegend, dass auch Wasservorräte aus Schnee und Eis grösseren Schwankungen unterliegen.

Die Einflüsse des Klimawandels auf schneedominierte (sog. «nivale») Regimes haben in den letzten Jahrzehnten dabei viel weniger Aufsehen erregt als diejenigen auf glazial geprägte Gebiete. Das bedeutet zudem auch, dass dem Abfluss aus schneebedeckten Gebieten ent-

sprechend weniger Aufmerksamkeit geschenkt wurde. (Rohrer et al., 2013). Dies scheint jedoch – zumindest was das mediale Interesse angeht – eine etwas verfehlt Entwicklung zu sein: Das BAFU (Bundesamt für Umwelt) ordnete beispielsweise in einer Studie 2010 über zwei Drittel der Grundwasserregimes in der Schweiz den Klassen «nivo-glazial» und «pluvio-nival» zu (BAFU 2010).

Zudem gibt es Gebiete, wie das Wägital in der Zentralschweiz, in denen schon seit Jahrzehnten präzise erhobene Schneemessdaten gesammelt werden. Diese Daten können bei der Untersuchung von langfristigen Prozessen in solchen Abflussregimes wertvolle Dienste leisten, wie zum Beispiel bei Trendanalysen bezüglich der Entwicklung von Schneedecke und Abfluss.

Die Schneedaten des Wägitals werden von der Meteorologie jedes Jahr erhoben, seit 2010 wird die Weiterführung

dieser Messreihen vom Swiss GCOS Office (MeteoSchweiz) unterstützt. Messreihen im Klimadatenbereich, die über Jahrzehnte sorgfältig durchgeführt werden, sind äusserst wertvoll für das Erkennen langfristiger Tendenzen. In Zeiten, in denen Begriffe wie «globale Erwärmung» und «Klimawandel» die Medienlandschaft fast tagtäglich prägen, können solche Daten Licht in vergangene Jahre bringen. Zudem können mögliche langfristigen Trends unter Umständen erkannt und mit anderen Messreihen verglichen werden.

Das Klimabeobachtungssystem GCOS möchte auf globaler Basis wertvolle Datenreihen zugänglich machen. Die Schneemessreihe im Wägital, bei der seit 1943 ohne Unterbruch Schneedaten erfasst werden, zählt unter anderen zu diesen Datenreihen.

Die Schwierigkeiten bei der Erfassung von saisonalen Schneefällen liegen dabei bei den grossen Unterschieden bezüglich der verschiedenen Messgrössen, die auf kürzeste räumliche Distanzen bereits beträchtliche Ausmasse erreichen können. Dazu kommen auch unterschiedliche, regional und zeitlich stark variierende Wetterlagen, die jeweils zu den grösseren Schneefallereignissen führen. Die Erfassung solch zeitlicher und räumlicher Dimensionen stellt die hauptsächliche Herausforderung bei der Schneemessung dar. Sowohl Fernerkundung als auch die Erhebung von Bodendaten helfen dabei, eine möglichst genaue Erfassung der Schneedecke und ihrer Eigenschaften zu erreichen.

2. Exakte Schneemessungen: Eine Herausforderung

Drei Schneeparameter sind dabei von GCOS als sogenannte «Essenzielle Klimavariablen» definiert worden: die Schneedeckenausdehnung (SCE), die Schneehöhe (SD) und das Schneewasseräquivalent (SWE). Als besonders prägend punkto Variabilität und Abflussrelevanz erwiesen

sich dabei SD und SWE (Rohrer et al., 2013).

Um eine effiziente Messung dieser Variablen auch in grossräumigen Gebieten zu ermöglichen, wurden in den letzten Jahrzehnten vermehrt auch Satellitenmessungen durchgeführt, wie zum Beispiel mittels des «Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers» (MODIS) an Bord der beiden Satelliten «Aqua» und «Terra» der NASA (siehe auch <http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Es zeigte sich, dass SCE mit einer hohen Genauigkeit abgeschätzt werden konnte.

Mit anderen Remote Sensing Produkten kann SWE und SD ausserhalb der grossen Gebirgsregionen recht gut abge-

schätzt werden, dies insbesondere in flachen und topografisch einfach strukturierten Gegenden. Während im Flachland die Erfassung von SWE noch einigermaßen gute Resultate zeigte, traten im Gebirge deutlich grössere Schwierigkeiten zutage (De Lannoy et al., 2012).

Die Schneedeckenausdehnung lässt sich mittels der Fernerkundung für verschiedene Gebiete in relativ guter Auflösung abschätzen. Die Problematik der Wolkenbedeckung konnte in jüngerer Zeit mittels verbesserter Messtechnik und nachträglicher Korrekturen der Messdaten massiv verkleinert werden. Die Messlücken, welche durch wolkige Bedingungen entstehen, konnten so auf ein Minimum reduziert werden (Foppa and Seiz, 2012).

Die Bilder 1 und 2 zeigen die Schneedeckenausdehnung in den zentralen Alpen Ende März 2014, wie sie von den beiden NASA-Satelliten «Aqua» und «Terra» erfasst wurde.

Neben aktuellen Messungen sind für die Forschung im Bereich der Schneemessung auch die Verhältnisse vergangener Jahre von grossem Interesse. Moderne globale Klimamodelle wie GMAO MERRA (MODERN-ERA RETROSPECTIVE ANALYSIS FOR RESEARCH AND APPLICATIONS) erlauben es, die Schneedecke vergangener Jahre zu simulieren. Dabei werden – auch bezüglich des Wasseräquivalentes – zum Teil recht gute Resultate erreicht. Diese lassen sich auch mit Bodendaten belegen, wie in Bild 3 ersichtlich. Das Jahr 1984 wurde mittels GMAO MERRA beispielsweise mit einer sehr guten Übereinstimmung im Vergleich zu den Bodendaten simuliert. Dasselbe gilt auch für die Jahre 1988, 1999, 2011 und 2013.

Bei einigen Simulationsjahren können jedoch wiederum starke Abweichungen von den Bodendaten auftreten, was mit verschiedenen Faktoren zusammenhängt: So fehlen im angesprochenen globalen Modell zum Beispiel Einflüsse wie die Abschattung durch Berge und andere Bodenerhebungen, ein Mangel, der sich vor allem in Jahren mit einem sonnigen Frühling zeigt. Das Wasseräquivalent der Schneedecke kann also auch von modernen globalen Modellen stark unterschätzt werden. Dies zeigt sich zum Beispiel in den Jahren 1982, 1985, 1995 und 2009.

3. Schneemessungen im Wägital

Die Schneemessungen vor Ort im Wägital, wie sie im Rahmen von GCOS (Global Climate Observation System, siehe Kasten) durch die Meteodat vorgenommen werden, sind als Vergleichsdaten in solchen topografisch schwierig zu simulierenden Gebieten eminent wichtig, wie der Vergleich mit den satellitengestützten Messdaten in Bild 3 zeigt.

Die Datenerhebung erfolgt seit dem Jahr 1943 lückenlos. Sie diente früher der Erstellung von Zuflussprognosen zum Pumpspeicherkraftwerk des Wägitalersees, das in seinen ersten Betriebsjahren eines der grössten der Welt war. Die Schneedaten wurden insbesondere für die Abschätzung des hydroelektrischen Potenzials dieses Einzugsgebietes verwendet. In der heutigen Zeit erfolgt die Datenerhebung nur noch aus wissenschaftlichem Interesse. Erfasst werden unter anderem die Variablen SD und SWE. Das

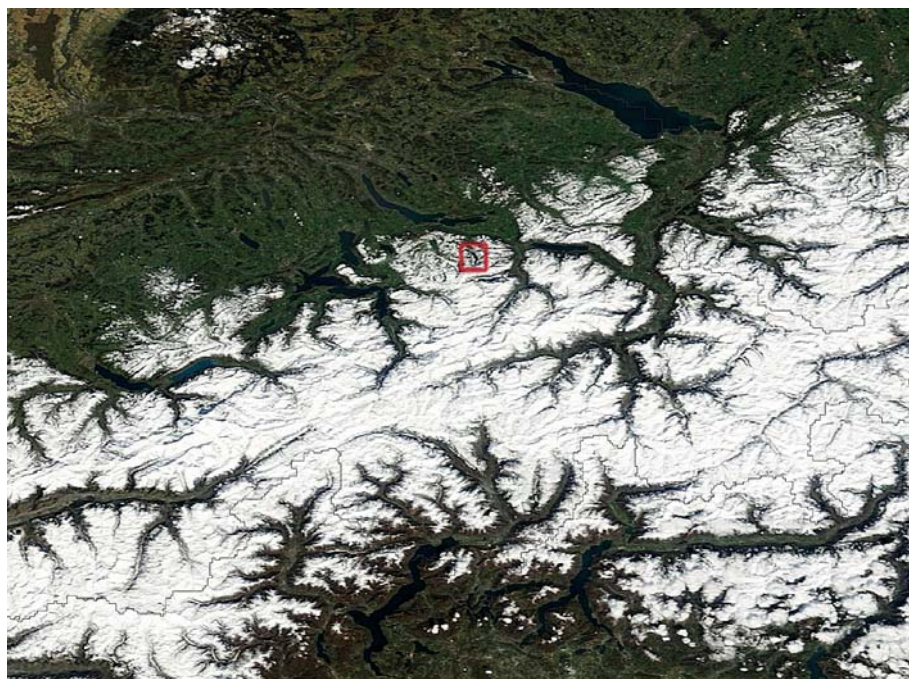


Bild 1. Die Schneedeckenausdehnung über dem Schweizer Alpenraum vom 28. März 2014 (MODIS AQUA-Bild, rot markiert das Gebiet des Wägitals) (Bild: NASA).

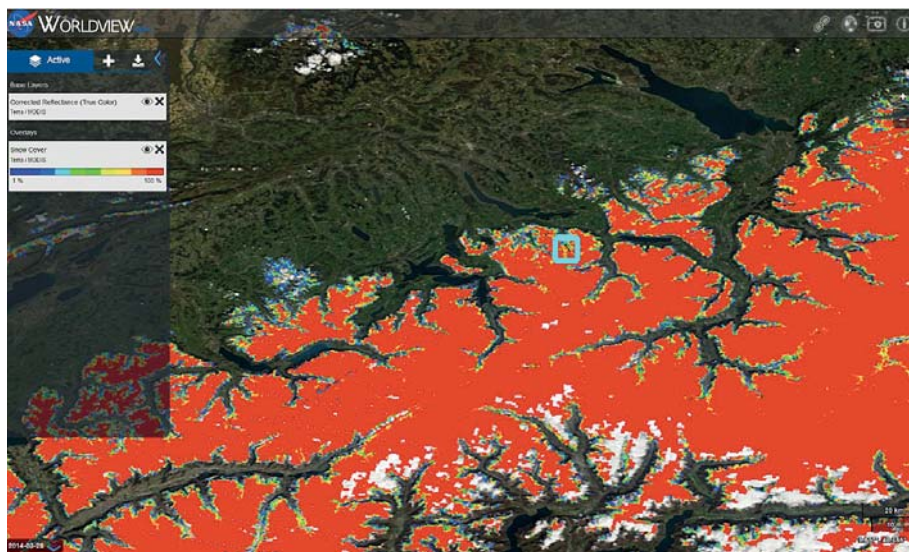


Bild 2. Die Schneedeckenausdehnung über dem Schweizer Alpenraum vom 28. März 2014 (MODIS TERRA, blau markiert das Gebiet des Wägitals) (Bild: NASA).



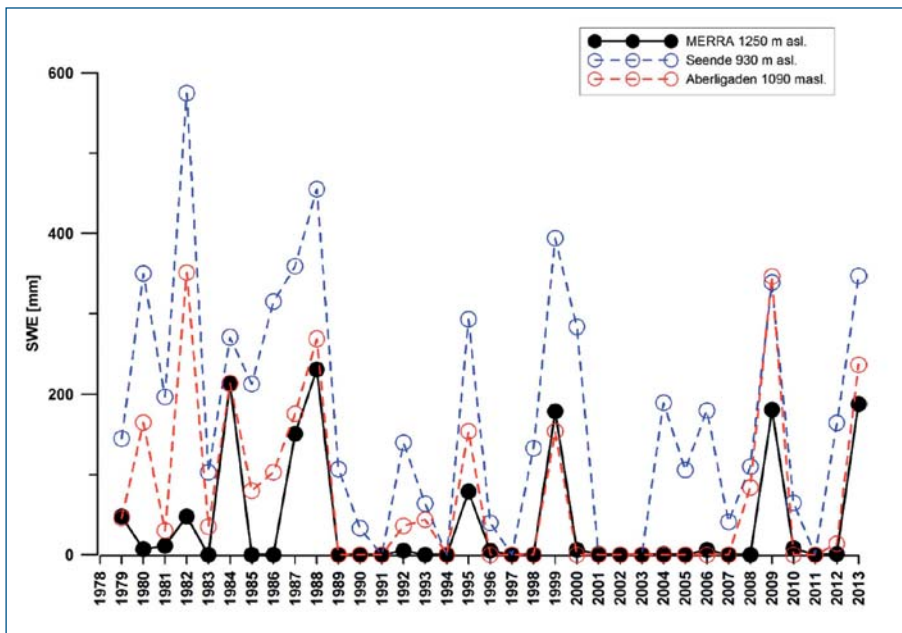


Bild 3. Modellierung des Schneewasseräquivalents (SWE) der Schneedecke im Wägital (Stichtag 1. April). Die schwarzen Punkte zeigen die GMAO MERRA Reanalyse, die blauen (930 m ü. M.) und roten (1090 m ü. M.) Bodenmessungen an zwei verschiedenen Messpunkten (Daten: NASA, Grafik: Meteodat GmbH).



Bild 4. Einzugsgebiet des Wägitalersees mit dem eingetragenen Schneemessnetz (Grafik: Meteodat GmbH).

Gebiet wird in *Bild 4* dargestellt. An über 40 Stellen werden Schneedichten oder Schneehöhen gemessen. Die Messungen werden jeweils um den 1. April an den jeweils exakt gleichen Stellen erhoben, was eine ideale Vergleichbarkeit der einzelnen Messjahre erlaubt.

Die Messkampagne im Wägital kann dabei auf rund 70 Jahre Erfahrung zurückblicken, womit die Messreihe bezüglich der Wasseräquivalentswerte der Schneedecke zu einer der längsten im Alpenraum und auch weltweit zählt.

Mittels der gemessenen Schneedichten wird eine Funktion ermittelt, welche die Höhenabhängigkeit der Schneedichte aufzeigt. Diese ist von Jahr zu Jahr unterschiedlich und hängt stark vom klimatischen Verlauf des jeweiligen Winters ab. Mithilfe dieser Funktion werden auch für diejenigen Messstellen die Wasseräquivalentswerte abgeschätzt, an denen bloss die Schneehöhe gemessen wurde.

Die Abhängigkeit des Wasseräquivalents der Schneedecke von der Meereshöhe ist je nach Messjahr mehr oder weniger ausgeprägt. Der Tatsache, dass dieser Zusammenhang stark von der Exposition der Messstellen abhängig ist, wird Rechnung getragen: Es werden Funktionen ermittelt, die diese Zusammenhänge bei der entsprechenden Exposition zeigen.

Es zeigt sich auch hier deutlich, wer präzise Angaben über Schneevariablen und Wasservorräte der Schneedecke in einem gebirgigen Gebiet erhalten will, muss auch Messdaten vor Ort erheben.



Bild 5. Typische Schneesituation Ende März im Wägital (Foto: Meteodat GmbH).

Reine Simulations- und/oder Fernerkundungslösungen greifen in vielen Fällen zu kurz. In verschiedenen Fällen führt die mangelhafte Abbildung der naturräumlichen Bedingungen zu entsprechenden Problemen bei der Simulation von SD und SWE, wie *Bild 3* aufzeigt.

Um eine möglichst präzise Abschätzung des gespeicherten Wassers in der Schneedecke zu erhalten, erfolgt beim Wägital eine Umrechnung der Wasseräquivalente auf die Wasserreserven pro Höhenstufe. Es werden die prozentualen Anteile der vier Expositionsklassen Nord,

Süd, Ost und West an den Höhestufen berechnet und für diese Höhenstufen die gesamten Wasserreserven ermittelt.

In *Bild 6* werden die zwei Haupt Höhenstufen, 900–1500 m ü.M. und 1500–2300 m ü.M. unterschieden. Es werden hier die Wasserwerte der gesamten Messreihe von 1943 bis 2014 gezeigt.

4. Auswertungen und lang-jährige Trends

Auf den ersten Blick ist in *Bild 6* kaum ein deutlicher Trend zu erkennen. Phasen mit hohen Schneewasserwerten im Ein-

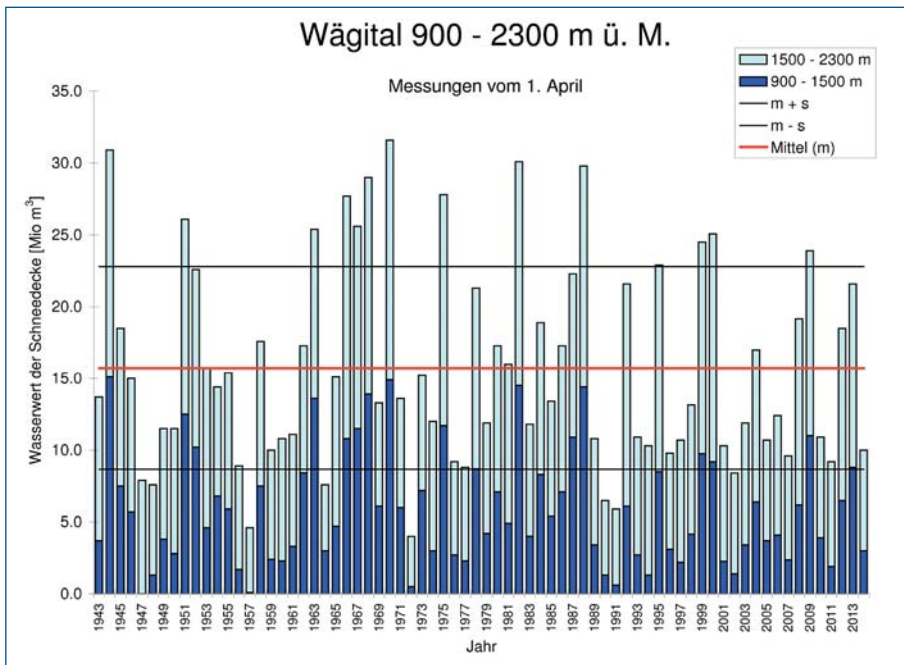


Bild 6. Wasserwerte der Schneedecke im Wägital am 1. April, aufgeteilt in 2 Höhenstufen (900–1500 m ü.M. und 1500–2300 m ü.M.) (Grafik: Meteodat GmbH).

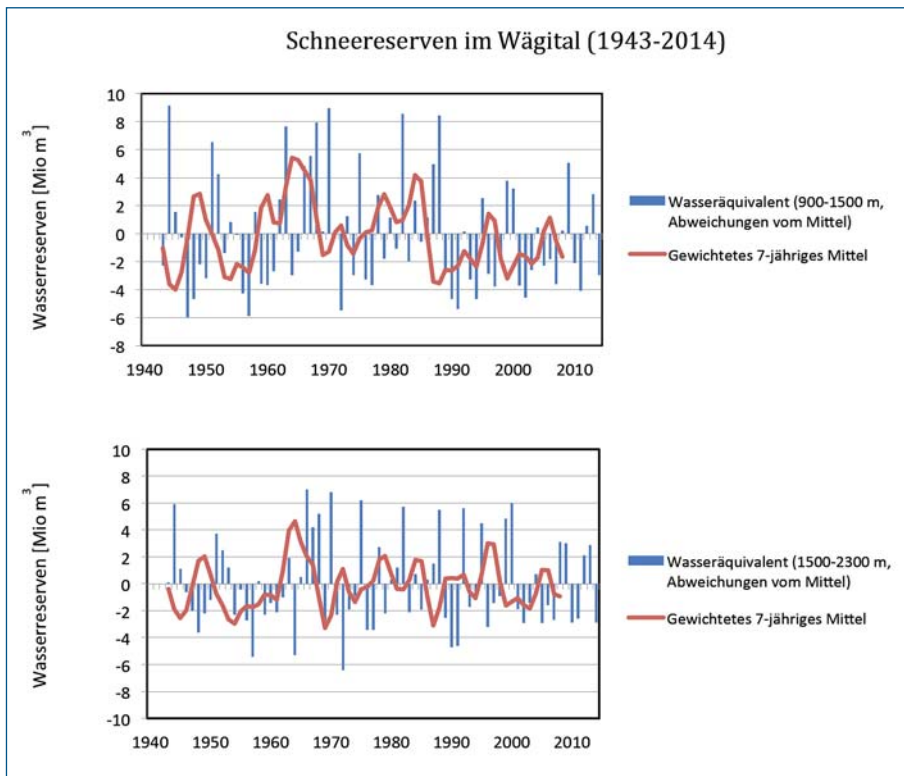


Bild 7. Schneereserven in den tieferen und höheren Lagen im Wägital (Stichtag 1. April). Die jeweiligen Abweichungen vom Mittelwert (1943–2014) wurden durch Anwendung eines gewichteten 7-jährigen Mittels für beide Gebietshöhenstufen dargestellt (Gauss-Tiefpassfilter, rote Linien). Vor allem in der Höhenstufe über 1500 m ist kein deutlicher Trend zu erkennen (Grafik: Meteodat GmbH).

zugsgebiet des Wägitalersees wechseln sich mit eher schneearmen Perioden ab, deren Frühlingssehneedecke nur wenig zum Abfluss aus diesem Gebiet beitrug. Diese Unterschiede sind in einigen Phasen sehr gross: Zwischen den zwei ausgesprochen, schneereichen Jahren 1970 und 1975 liegen einige mittelmässigen-

Jahre sowie das Miniumjahr 1972. Dass auch in jüngerer Zeit schneereiche Jahre auftreten können, zeigen die Jahre 1999, 2000 sowie auch 2009. Um hier allfällige Tendenzen sichtbar zu machen, können die Messdaten mittels verschiedener statistischer Methoden untersucht werden. Ein Beispiel zeigt Bild 7.

In Bild 7 wurden die Trends der Messdaten aus dem Wägital mittels eines Gauss-Tiefpassfilters hervorgehoben. Die roten Kurven entsprechen dabei den gewichteten 7-jährigen Mittelwerten.

Auch diese systematische Auswertung der Messreihe (1943–2014) bestätigt den ersten Befund: Es zeigen sich letztlich nur undeutliche Trends, dies vor allem in den höheren Lagen. In den tieferen Lagen (900–1500 m ü.M.) sind drei recht starke Sprünge nach unten auszumachen. Einer in den frühen 50er-, einer in den späten 60er- sowie einer in den späten 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts.

Die ersten beiden Sprünge wurden in den darauffolgenden Jahren wieder ausgeglichen, indem die Schneemengen und Wasserreserven wiederum auf Werte anstiegen, wie sie vor dem jeweiligen Absacken auftraten. Bei der dritten «Stufe» gegen Ende der 80er-Jahre ist erst eine langsame «Erholung» der Messwerte sichtbar.

5. Fazit und ein Blick in die Zukunft

In den Medien prägten Schlagwörter wie «Klimaerwärmung», «Schneemangel» sowie «Austrocknung der Alpen» die letzten Jahre.

Eine in diese Richtung gehende Interpretation der Trends ist zumindest für das Wägital zum heutigen Zeitpunkt fraglich, zu undeutlich sind die Trends der Messwerte für die Schneeparameter und Wasserreserven. Wie aus der Grafik 7 hervorgeht, wird es spannend sein, die zukünftigen Messjahre zu analysieren, um zu sehen, in welche Richtung die Entwicklungen für die beiden Höhenbereiche (900–1500 m sowie 1500–2300 m) laufen werden.

Insbesondere der Verlauf in den tiefer gelegenen Gebieten des Wägitals könnte auch – falls der Trend hin zu wieder höheren Werten der Schneereserven anhält – in den nächsten zwei bis drei Dekaden wieder hin zu Maximalwerten in der Messreihe führen. Dies, obwohl letztlich zu erwarten ist, dass der langfristige Trend zu eher kleineren Wasserreserven in der saisonalen Schneedecke infolge einer zunehmenden Erwärmung des globalen Klimas weitergehen wird. Denn es ist nicht zu erwarten, dass die globalen Treibhausgasemissionen bis gegen Ende dieses Jahrhunderts markant gesenkt werden können.

Die Meteodat und das Swiss GCOS Office (MeteoSchweiz) werden diese Entwicklungen im Auge behalten und auch

weiterhin die erhobenen Schneemesswerte aus dem Gebiet mit Modellierungen und Fernerkundungsdaten vergleichen. So wird gewährleistet, dass die Wägital-Reihe auch weiterhin fortgeführt werden und ihren Beitrag zum Verständnis der zukünftigen Entwicklung des Klimas im Alpenraum leisten kann. Es wird interessant sein zu sehen, ob sich auch hier die ausgeprägte Komplexität der Zusammenhänge

in Sachen Klimaentwicklung zeigen wird. Und auch ob je einfache Interpretationen zu solchen Fragen möglich sein werden.

Literatur

Foppa, N., Seiz, G. Inter-annual variations of snow days over Switzerland from 2000–2010 derived from MODIS satellite data, *The Cryosphere*, 6, S. 331–342, 2012.

Rohrer, M., Salzmann, N., Stoffel, M., Kulkarni, A.V. Missing (in-situ) snow cover data hampers climate change and runoff studies in the Greater Himalayas, *Science of the Total Environment*, vol. 468–469, pp. S. 60–70, 2013.

De Lannoy, G. J. M., Reichle, R. H., Arsenault, K.R., Houser, P.R., Kumar, S., Verhoest, N.E.C., Pauwels, V.R.N. Multiscale Assimilation of Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS Snow Water Equivalent and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Snow Cover Fraction Observations in Northern Colorado. *Water Resources Research* 48, 2012.

BAFU 2010: Grundwasser-Quantität: Grundwasserbulletin. www.umwelt-schweiz.ch Grundwasser-Quantität. Bundesamt für Umwelt.

Anschrift der Verfasser

Christian Noetzli, Mario Rohrer, Meteodat
info@meteodat.ch

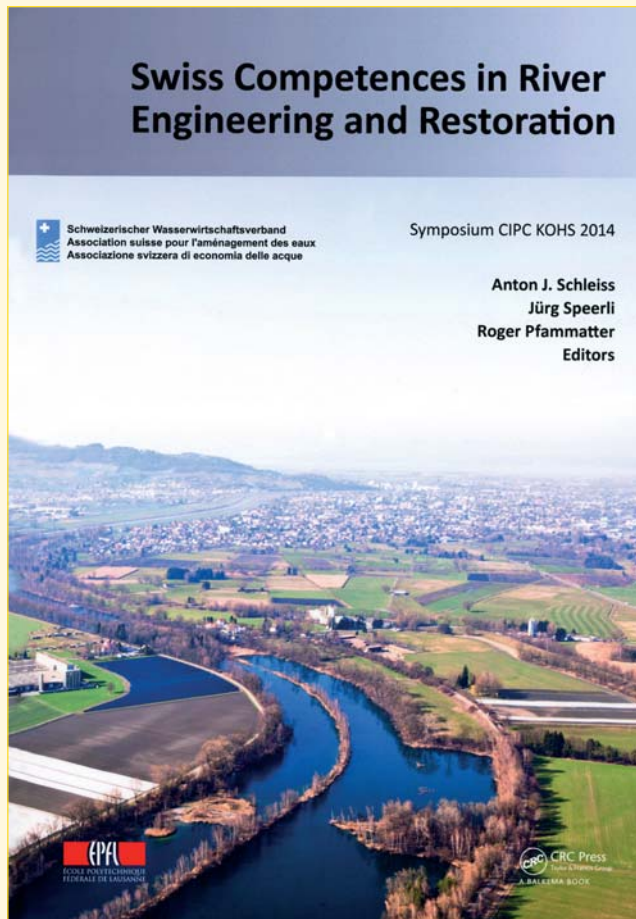
Stichwort «GCOS»: Global Climate Observing System

Als Resultat der 2. Weltklimakonferenz 1990 in Genf etablierten die World Meteorological Organization (WMO) und andere das Global Climate Observing System (GCOS). Ziel dieses Programms ist die Sicherung langjähriger Messreihen und die Ermöglichung des Zugangs zu den Messdaten. GCOS bezieht sich dabei auf das gesamte Klimasystem; es werden Messreihen der Atmosphäre, der Ozeane sowie der Landoberfläche im System erfasst. Die Messdaten leisten so auch einen wertvollen Beitrag zum Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Für die Koordination der Klimabeobachtungen in der Schweiz ist das Swiss GCOS Office der MeteoSchweiz zuständig. Infos unter: www.meteoschweiz.ch und www.meteodat.ch

VS Nr. 68: Swiss Competences in River Engineering and Restoration

2014, Schleiss, Speerli, Pfammatter (Eds.); © CRC Press, 214 Seiten, Format A4, ISBN 978-1-138-02676-6, CHF 50.–.

The world is like a river, running along in its bed, this way and that, forming sandbanks by chance and then being forced by these to take a different course. Whereas this all proceeds smoothly and easily and gradually, the river engineers have great difficulties when they seek to counteract this natural behaviour (Goethe).



Goethe recognized that the dynamics of a river can only be controlled to a limited extent by channel modifications and rigid river training works. The term «dynamics» refers to variations in hydromorphology over space and time due to flood discharges and sediment transport. These processes regularly lead to the destruction of habitats, especially in riparian areas, and the creation of space for new habitats. Dynamic watercourses require a lot of space. For example, naturally meandering rivers may migrate laterally within a belt of roughly 5–6 times the width of the channel bed. In the valleys of the Swiss Alps and Pre-Alps the rivers originally divagated over the entire valley floor.

To reclaim land for urban development and agriculture as well as to provide flooding, watercourse alterations were carried out over the last two centuries in Switzerland. Efforts were thus made to impede the dynamics; rivers and streams were channelized, and channel bed widths were optimized with regard to sediment transport. This resulted in monotonous watercourses, with almost no variation in hydraulic or morphological characteristics.

Recognizing the ecological deficit of the Swiss, a new approach in the strategic planning of flood protection projects was promoted by the Swiss Government which gave the basis for the first restoration programs more than 40 years ago. Since then much has been achieved. Nevertheless, today's challenge of river engineers, in collaboration with environmental scientists, is to restore the channelized rivers under the constraints of high urbanization and limited space. The behaviour of river systems is a result of the complex interaction between flow, sediments, morphology and habitats. Furthermore, rivers provide important sources of water supply and energy production in addition to a means of transportation.

Each year the Swiss Commission for Flood Protection (KOHS) of the Swiss Association for Water Management (SWV) organizes a symposium where professionals, officers of public administrations and researchers exchange their experiences on special topics and on-going projects. In 2014 this symposium was organized as a special session of the seventh International Conference on Fluvial Hydraulics «River Flow 2014» at École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland. Aside from the Swiss participants, scientists and professionals from all over the world were informed about the Swiss competences in river engineering and restoration. In the presented book, invited and selected contributions regarding the latest tendencies and key-projects in Switzerland are presented to an international community of river engineers and researchers, hoping that they can enrich flood protection and river restoration projects all over the world.