

## 4.5 Hydrologische Veränderungen in vergletscherten Einzugsgebieten

REGINE HOCK

*Gletscherabflüsse unterscheiden sich markant von Abflüssen nicht vergletschelter Gebiete, da sie weitgehend vom Massenhaushalt der Gletscher geprägt sind und so starke saisonale und tägliche Schwankungen aufweisen. Der weltweite Gletscherschwund führt zu Veränderungen im Wasserhaushalt vergletschelter Gebiete, aber der Einfluss ist komplex und variiert regional stark. In vielen vor allem stark vergletscherten Einzugsgebieten steigt der Jahresabfluss derzeit infolge der Klimaerwärmung und entsprechend erhöhter Gletscherschmelze. In anderen Gebieten, wo sich die Gletscher massiv zurückgezogen haben und so das im Gletscher gespeicherte Wasservolumen entsprechend verringert ist, hat der Abfluss einen Wendepunkt („Peak Wasser“) erreicht und nimmt nun kontinuierlich ab. Zunehmende Gletscherabflüsse vor Peak Wasser können zu Hochwasser und Überflutungen führen, während abnehmende Abflüsse in der Schmelzsaison selbst in weit entfernten umliegenden Ebenen zu reduzierten Gebietsabflüssen führen kann, und in Gebieten mit ausgeprägten Trockenmonaten auch zu Wassermangel. Kontinuierliches Monitoring von Gletscherschwund und Gletscherabflüssen sind von kritischer Bedeutung, um dessen Einfluss auf die Hydrologie vergletschelter Gebiete zu quantifizieren und vorherzusagen.*

**Hydrological changes in glacierized drainage basins:** *Glacier runoff differs strongly from runoff in unglacierized drainage basins due to its dependence on glacier mass budgets causing pronounced seasonal and daily runoff variations. Worldwide glacier decline has led to significant hydrological changes in many glacierized catchments, but the impact is complex and varies regionally. In many catchments annual runoff is increasing in response to enhanced glacier melt due to atmospheric warming. In other regions, where glaciers have strongly declined in recent decades, and thus their ice storage is significantly depleted, a turning point (peak water) has been reached and annual runoff is continuously decreasing. Before peak water is reached increasing glacier runoff poses a flood hazard. In contrast decreasing runoff amounts, especially in regions with pronounced dry seasons can lead to water shortage even in lowlands far away from the glacierized mountains. Continued monitoring of glacier mass changes and resulting runoff changes is critical to quantify and project the hydrological consequences of glacier decline in glacierized drainage basins.*

**G**letscher ziehen sich weltweit zurück infolge der Klimaerwärmung. Dies führt nicht nur zu einem Anstieg des globalen Meeresspiegels und zu einem veränderten Landschaftsbild, sondern hat auch unmittelbaren Einfluss auf den Wasserhaushalt von vergletscherten Einzugsgebieten. Gletscher sind natürliche Wasserspeicher, die sowohl saisonal als auch über Zeitspannen von vielen Jahren wachsen und schrumpfen. Wieviel und wann Gletschereis schmilzt, hängt stark vom Klima ab. Die Lufttemperatur spielt eine entscheidende Rolle, aber auch Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung steuern das Abschmelzverhalten. Modellberechnungen projizieren, dass sich das globale Gletschervolumen (außerhalb des grönländischen und antarktischen Eisschildes) zwischen 2015 und 2100 um 18–36% verringern wird (MARZEION et al. 2020). In manchen Gletschergebieten, wie zum Beispiel den Europäischen Alpen und den Tropen werden für höhere Emissionsszenarien sogar mehr als 80% Gletschervolumenverlust prognostiziert. Wenn die Gletscher Masse verlieren, hat dies Konsequenzen für den Wasserhaushalt der vergletscherten Einzugsgebiete.

Gletscherschmelzwasser trägt in vielen Gebieten markant zu Einzugsgebietsabflüssen bei und stellt somit eine wertvolle Wasserreserve dar. Die Gletscher

modifizieren nicht nur die Mengen, sondern auch die Saisonalität des Jahresabflusses. Gletscherwasser trägt so in vielen Regionen der Erde direkt zur Wasserkraftproduktion bei (SCHÄFLI et al. 2019) und liefert Wasser für die Landwirtschaft. So kommen im Einzugsgebiet des Indus in der Vormonsunsaison bis zu 60% des gesamten Bewässerungswassers von der Schnee- und Gletscherschmelze und der Anteil an der Ernte beträgt 11% (BIEMANS et al. 2019). Es ist daher von sozio-ökonomischem Interesse, die Auswirkungen des Gletscherschwundes auf den Wasserhaushalt zu untersuchen und verlässliche Prognosen für die Zukunft zu erstellen.

### Charakteristische Eigenschaften von Gletscherabflüssen

Schmelz- und Regenwasser fließt entweder oberflächlich auf der Eisoberfläche ab oder dringt via Gletscherspalten und Gletschermühlen tief in das Gletscherinnere, wo es schließlich in subglazialen Entwässerungssystemen seinen Weg zur Gletscherzunge findet. Dort entspringen oft ein oder mehrere Gletscherbäche (Abb. 4.5-1). Diese Bäche haben aufgrund des Gletscherschmelzwassers charakteristische Eigenschaften, die sich von Abflüssen unvergletschelter Einzugsgebiete markant unterscheiden (ESCHER-VETTER & REINWARTH 2013, HOCK et al. 2005):

1. Der Gletscherjahresabfluss hängt direkt von der jährlichen Gletschermassenbilanz ab. Wenn ein Gletscher im Laufe eines Jahres Gletschermasse verliert, trägt langzeitgespeichertes Schmelzwasser zu erhöhten Abflüssen im Vergleich zum Abfluss eines ansonsten identischen unvergletscherten Einzugsgebietes bei. Umgekehrt ist der Abfluss geringer, wenn ein Gletscher an Masse gewinnt, da Wasser temporär dem Wasserkreislauf entzogen wird.
2. Gletscherabflüsse unterliegen charakteristischen saisonalen Schwankungen. Die Abflüsse sind minimal im Winter, da Niederschlag meist als Schnee gespeichert wird. Sobald die Schmelzsaison beginnt, steigt der Abfluss markant und erreicht ein saisonales Maximum normalerweise im Hoch- oder Spätsommer (Abb. 4.5-2). Dies unterscheidet sich von schneedominierten, aber unvergletscherten Einzugsgebieten, die ein schneesmelzbedingtes Maximum im Frühjahr aufweisen. Gletscher dagegen können weiter Schmelzwasser generieren, auch wenn der Winterschnee geschmolzen ist, und haben daher ihr Maximum später in der Saison, wenn Lufttemperatur und Sonnenstrahlung und somit die Schmelzmengen am höchsten sind. So kompensieren Gletscher in vielen Gebieten, vor allem in Trockengebieten, die durch höhere Verdunstung und geringeren Niederschlag oft niedrigen Abflüsse im Sommer.
3. Gletscherabflüsse weisen extrem starke Tageschwankungen auf (Abb. 4.5-2), wobei die Maxima um ein Zehnfaches oder mehr die Minima überschreiten können. Tagesmaxima werden am Nachmittag erreicht, wenn die Schmelzwasserproduktion am intensivsten ist. Die täglichen Schwankungen werden zunehmend stärker im Laufe der Schmelzsaison; dies aufgrund steigender Schmelzmengen, aber auch weil Schmelz- und Regenwasser zunehmend schneller durch den Gletscher fließt, wenn die Schneebedeckung schrumpft und das interne glaziale Drainagesystem sich erweitert.
4. Gletscher beeinflussen auch die Abflussvariabilität von Jahr zu Jahr. In Einzugsgebieten mit moderatem Gletscheranteil (ca. 10-40%) ist die Variabilität am geringsten, aber wächst sowohl mit geringerem als auch größerem Gletscheranteil. Dieser Effekt, auch Gletscherkompensationseffekt genannt (LANG 1986), entsteht, wenn in trockenen und heißen Jahren



**Abb. 4.5-1:** Der Findelengletscher in den Schweizer Alpen. Zwei Gletscherbäche entspringen an der Gletscherzunge. Der starke Gletscherrückzug der letzten Jahre beeinflusst die Gletscherabflussmengen (Photo: Matthias Huss, 28 September 2013).

größere Gletscherschmelze die ansonsten geringeren Abflussmengen kompensiert und umgekehrt.

Der Einfluss des Gletscherabflusses ist nicht nur markant in stark vergletscherten Gebieten, sondern kann selbst in Einzugsgebieten mit nur wenigen Prozent Gletscheranteil bemerkbar sein. So berechnete HUSS (2011) einen Gletscherschmelzwasseranteil von 9% des Gesamtabflusses für das Einzugsgebiet der unteren Donau für den September des trockenen und heißen Extremjahres 2003, obwohl das Gebiet nur zu 0,06% vergletschert ist (Huss 2011).

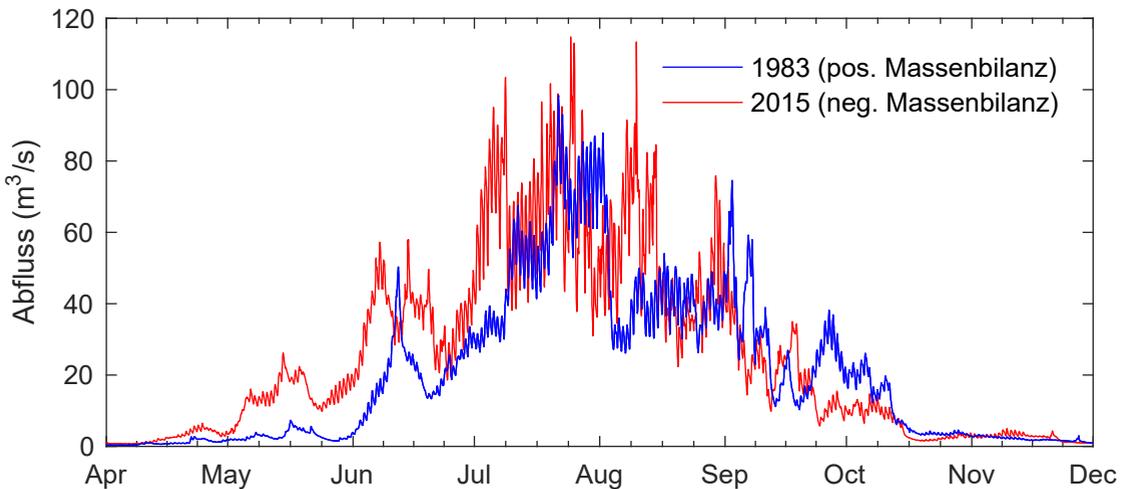
### Gletscherabflüsse im Klimawandel

Wie ändern sich die Abflüsse in vergletscherten Gebieten, wenn sich das Klima ändert? Dies hängt nicht nur von der Intensität der Klimaveränderung ab, sondern auch vom dynamischen Verhalten der Gletscher, ihrer Mächtigkeit oder auch ihrer Höhenlage. Im Fall einer Erwärmung der Atmosphäre steigt oft zunächst die jährliche Schmelzwassermenge und damit der Gletscherabfluss an.

Der Gletscher verliert vornehmlich im tiefergelegenen wärmeren Zungenbereich an Fläche, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Akkumulation und Ablation einstellt und damit die Gletscherfläche nicht weiter schrumpft. Wenn die Erwärmung zu stark ist, kann das zu einem gänzlichen Verschwinden des Gletscher führen. Da sich mit dem Flächenrückgang auch das gespeicherte Wasservolumen verringert, wird durch diesen Prozess nach einer gewissen Zeit ein gletscherspezifischer Wen-

depunkt erreicht, ab dem der Gletscherabfluss abnimmt. Dieser Wendepunkt wird oft als Peak Wasser bezeichnet und ist entscheidend für regionale Süßwasserreserven und die Wasserwirtschaft. Der Abfluss vom Gletscher kann um 50% oder mehr ansteigen, bevor Peak Wasser erreicht wird und damit den Einzugsgebietsabfluss temporär stark erhöhen. Sowohl der Anstieg als auch die anschließende Abflussreduktion nach Peak Wasser können sich über Jahrzehnte hinziehen.

Abflussmessungen und Modellstudien zeigen, dass viele Gletschergebiete Peak Wasser bereits erreicht haben und somit die jährlichen Gletscherabflussmengen kontinuierlich abnehmen (Huss & Hock 2018, Hock et al. 2019). Dies ist vor allem in relativ wenig vergletscherten Gebieten mit vielen kleineren Gletschern, wie zum Beispiel den Trophochgebirgen, den Europäischen Alpen oder den nordamerikanischen Rocky Mountains der Fall. Ob Jahresabflüsse ansteigen oder fallen, variiert nicht nur von Region zu Region, sondern kann auch kleinräumig stattfinden. So zeigten zum Beispiel Abflussmessungen in leicht bis stark vergletscherten Einzugsgebieten in Österreich eher zunehmende Abflüsse in höheren Lagen und eher abnehmende Abflüsse in tieferen Lagen zwischen 1980 und 2010 (KORMANN et al., 2015). Modellstudien zeigen, dass Peak Wasser umso später erreicht wird, je grösser der Vergletscherungsanteil ist, aber sowohl für Niedrig- als auch für Hochemissionsszenarien erreichen fast alle Gletscher weltweit Peak Wasser spätestens gegen Ende des 21. Jahrhunderts (Huss & Hock 2018, BLISS et al. 2014).



**Abb. 4.5-2:** Abflussschwankungen der Massa am Grossen Aletschgletscher in den Schweizer Alpen (Station 2161 Blatten bei Naters nur wenige 100 m unterhalb der Gletscherzunge) für 1983 und 2015. Die Gletschermassenbilanz 1983 war positiv (Huss et al. 2015), während in 2015 die Gletscher der Alpen generell negative Massenbilanzen aufwiesen (ZEMP et al. 2019). Die täglichen Abflussschwankungen sind generell ausgeprägter in 2015 als in 1983 aufgrund des höheren Schmelzvolumens, obwohl der Gletscher sich zwischen 1983 und 2015 markant zurückgezogen hat.

Analog zu den Jahresabflüssen nehmen die Gletscherabflüsse im Sommer in manchen Gebieten zu, während sie in anderen abnehmen, je nachdem, ob sich die Gletscher vor oder nach Peak Wasser befindet. Dies führt zu saisonalen Veränderungen des Abflussregimes; nach Peak Wasser verringert sich das Vermögen der Gletscher, die ansonsten niedrigen Abflüsse in trockenen Sommermonaten zu kompensieren. So projiziert HUSS & HOCK (2018) basierend auf einem höheren Emissionsszenario, dass selbst in großen Einzugsgebieten (>5.000 km<sup>2</sup>) mit minimaler Vergletscherung (<2%) vor allem in Hochasien der Gebietsabfluss gegen Ende des Jahrhunderts in mindestens einem Schmelzmonat um mehr als 10% reduziert werden kann. *Abb. 4.5-3* zeigt ein Beispiel eines hochvergletscherten Einzugsgebietes in den Alpen, in dem die Sommerabflüsse in den letzten Jahrzehnten als Folge der Klimaerwärmung kontinuierlich angestiegen sind, aber Peak Wasser trotz starkem Gletscherrückgang noch nicht erreicht ist.

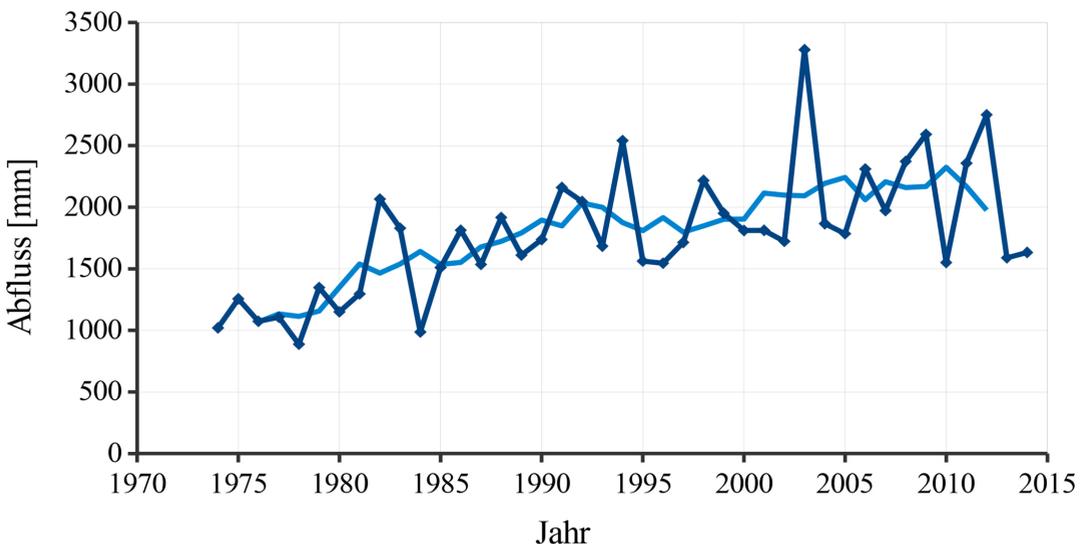
Die höheren Schmelzwassermengen vor dem Erreichen von Peak Wasser führen auch zu veränderten Tageszyklen. So können sich die typischen Abflussamplituden zwischen Tagesminima und -maxima um ein Vielfaches erhöhen (*Abb. 4.5-2*), was insbesondere zu Hochwasser und Überflutungen führen kann, wenn intensive Schmelze mit Starkniederschlägen zusammenfällt, vor allem in stark vergletscherten Gebieten. Nach

dem Überschreiten von Peak Wasser werden die Tagesabflussmaxima wieder sinken.

Neben dem Gletscherschwund beeinflussen auch Veränderungen der Schneedecke, des Niederschlags und der Verdunstung den Gebietsabfluss. Die Schneeschmelzmaxima werden nicht nur kleiner, sondern geschehen auch zunehmend früher mit abnehmenden Schneemengen. Auch fällt mit steigender Temperatur ein zunehmend größerer Anteil des Schnees als Regen und verändert so das Abflussregime. Je nach Vorzeichen und Größe dieser Veränderungen können die durch den Gletscherschwund hervorgerufenen Abflussveränderungen verstärkt oder kompensiert werden. Der Gletschereinfluss wird generell mit zunehmender Entfernung zu den Gletschern geringer.

### Schlussbetrachtung

Der Einfluss von Gletscherschwund auf Einzugsgebietsabflüsse ist nicht nur komplex, sondern kann auch paradox erscheinen. Gletscherschwund kann sowohl zu markant ansteigenden als auch zu stark reduzierten Jahres-, saisonalen und Tagesabflüssen führen, je nachdem, ob in einem Einzugsgebiet der Zeitpunkt von Peak Wasser bereits erreicht wurde oder nicht. Steigende Abflüsse vor Peak Wasser können zu Hochwasser insbesondere in stark vergletscherten Gebieten führen, während sinkende Gletscherabflüsse in den Jahren nach Peak Wasser vor allem in ansonsten trockenen Monaten



*Abb. 4.5-3: Jährliche Sommerabflussspenden (Mai-September, dunkelblau) und fünfjährige gleitende Mittel (hellblau) an der Pegelstation Vernagtferner, Ötztal, Österreich (2.640 m NN). Das 11,4 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet ist stark vergletschert (81% im Jahr 1974 und 64% in 2014) und der Abfluss hat sich in der Messperiode mehr als verdoppelt. Der Gletscher ist einer der am besten untersuchten Gletscher der Welt. Abb. aus ESCHER-VETTER (2019).*

temporäre Dürren auslösen können. Langfristiges Gletscher- und Abflussmonitoring ist entscheidend, um die komplexen und regional stark variierenden Einflüsse des Gletscherschwundes auf den Wasserhaushalt von vergletscherten Einzugsgebieten zu quantifizieren und zu prognostizieren.

### **Danksagung**

*Die Abflussdaten der Massa wurden vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation in Bern bereitgestellt.*

### **Literatur**

BIEMANS, H., C. SIDERIUS, A. F. LUTZ et al. (2019): Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. *Nature Sustainability*, 2(7): 594-601. doi: 10.1038/s41893-019-0305-3.

BLISS, A., R. HOCK & V. RADIĆ (2014): Regional estimates of glacier runoff for the twenty-first century. *Journal of Geophysical Research*, 119. doi: 10.1002/2013JF002931.

ESCHER-VETTER, H. & O. REINWARTH (2013): Meteorologische und hydrologische Registrierungen an der Pegelstation Vernagtbach – Charakteristika und Trends ausgewählter Parameter. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, 45(46): 117-128.

ESCHER-VETTER, H. (2019): Computer in der Glaziologie - vorgestellt am Beispiel der Abflussmessreihe des Vernagtferrers. In: WOLFSCHMIDT, G. (Hrsg.): Vom Abakus zum Computer - Geschichte der Rechentechnik, Teil 1, Begleitbuch zur Ausstellung, 2015-2018. *Nuncius Hamburgensis - Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*, Band 21. Hamburg, Kap. 15: 348-359.

HOCK, R., G. RASUL, C. ADLER et al. (2019): High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, V. MASSON-DELMOTTE et al. (eds.)]. In press (<https://www.ipcc.ch/srocc/home/>).

HOCK, R., P. JANSSON & L. BRAUN (2005): Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming. In: HUBER, U. M., M. A. REASONER & H. BUGMANN (Eds.): *Global Change and Mountain Regions - A State of Knowledge Overview*. Springer, Dordrecht. 243-252.

HUSS, M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macrocale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 47(7). W07511. doi:10.1029/2010WR010299.

HUSS, M., L. DHULST & A. BAUDER (2015): New long-term mass balance series for the Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 61 (227): 551-562.

HUSS, M. & R. HOCK (2018): Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8: 135-140. doi:10.1038/s41558-017-0049-x.

KORMANN, C., T. FRANCKE, M. RENNER & A. BRONSTERT (2015): Attribution of high resolution streamflow trends in Western Austria – an approach based on climate and discharge station data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3): 1225-1245. doi:10.5194/hess-19-1225-2015.

MARZEION, B., R. HOCK, B. ANDERSON et al. (2020): Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change. *Earth's Future*. 12, e2019EF001470. doi: 10.1029/2019EF001470.

LANG, H. (1986): Forecasting meltwater runoff from snow-covered areas and from glacier basins. In *River flow modelling and forecasting* (pp. 99-127). Springer, Dordrecht.

SCHÄFLI, B., P. MANSO, M. FISCHER et al. (2019): The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renewable Energy*, 132: 615-627.

ZEMP, M., M. HUSS, E. THIBERT et al. (2019): Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752): 382-386.

### **Kontakt:**

*Dr. Regine Hock  
Geophysical Institute  
University of Alaska, Fairbanks, Alaska, USA  
Department of Geosciences  
University of Oslo, Norway  
regine.hock@geo.uio.no*

*HOCK, R. (2020): Hydrologische Veränderungen in vergletscherten Einzugsgebieten. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. Kap.4.5 - Online: [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). doi:10.2312/warnsignal-klima.hochgebirge-im-wandel.57.*