

Kryosphäre und Wasserkreislauf:  
Wasserverfügbarkeit und -sicherheit in  
Hochgebirgsregionen

Hannah Schairer

*B.Sc. Physische Geographie*

*M.Sc. Studentin Physical Geography: Climate and Environmental  
Science*

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Hintergrund.....	2
2.1. Der Wasserkreislauf.....	2
2.2 Die Kryosphäre im Wasserkreislauf.....	4
2.2.1 Kryohydrologie.....	4
2.2.2 Wasserverfügbarkeit: Speicher, Abfluss, und Regulierungsfunktion.....	4
2.3 Wassersicherheit.....	7
3. Kryosphäre im Wandel und Folgen für Wasserverfügbarkeit.....	8
3.1 Aktuelle Veränderungen und das “Peak Water“ Konzept.....	8
3.2 Zukünftige Änderungen.....	10
3.2.1 Gletscher.....	10
3.2.2 Schneedecke.....	12
3.2.3 Permafrost.....	13
3.2.4 Blockgletscher.....	13
4. Regionaler Schwerpunkt.....	14
4.1 Klimatisch vulnerable Regionen.....	14
4.2 Die Anden Hochgebirgsregion.....	15
5. Fazit.....	20
6. Literaturverzeichnis.....	22

## **Zusammenfassung**

*Die Kryosphäre (Eis) als Wasserressource ist für zahlreiche Regionen von großer Bedeutung. Im Zuge des Klimawandels unterliegt die Kryosphäre drastischen Veränderungen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, diese Veränderungen zu untersuchen und die Rolle der Kryosphäre im Wasserkreislauf besser zu verstehen. Die wichtigsten hydrologischen Funktionen der Kryosphäre beziehen sich auf die Kryosphäre als Süßwasserreservoir (oder -speicher), Abflussquelle und Abflussregulator. Diese Funktionen beeinflussen die Wasserverfügbarkeit und damit Wassersicherheit innerhalb eines Einzugsgebietes. Durch die Speicherung von Süßwasser und eine zeitverzögerte Freisetzung als Abfluss, können Dürrejahre oder Trockenzeiten ausgeglichen werden. Gletscher regulieren den Abfluss sowohl auf einer saisonalen als auch auf einer dekadischen Zeitskala. Bei der Analyse langfristiger Abflussänderungen schrumpfender Gletscher, kommt es zu einem vorübergehenden Anstieg der Abflusswerte bis zum Erreichen eines Maximums (Peak Water), wobei die Abflusswerte ab diesem Zeitpunkt kontinuierlich abnehmen. Die Schneeschmelze wird sich wahrscheinlich auf einen früheren Zeitpunkt im Jahr verlagern und zu einer früheren Abflussspitze im Frühjahr führen. Blockgletscher könnten als Abflussverursacher an Bedeutung gewinnen, da sie klimatisch weniger anfällig sind als Gletscher. Einige Gebiete, wie z.B. Teile der Anden, sind in besonderem Maße von der Rolle der Kryosphäre als Wasserressource abhängig. Vor allem während der Trockenzeit spielt der Gletscherabfluss in vielen Andenregionen eine entscheidende Rolle als Wasserlieferant.*

## **1. Einleitung**

Die Kryosphäre (Eis) ist die größte Süßwasserquelle auf unserem Planeten. Etwa 68,7% des Süßwassers ist in der Kryosphäre gespeichert (Ding et al. 2020: 6). Viele Gebiete profitieren vom Beitrag des Gletscherschmelzwassers zum Gesamtabfluss (Huss & Hock 2018: 1). Die Schneeschmelze versorgt 17% der menschlichen Bevölkerung mit Wasser (Bormann et al. 2018: 924). Daher trägt die Kryosphäre wesentlich zum regionalen Abfluss und zur Wasserverfügbarkeit bei und spielt somit eine entscheidende Rolle für das Konzept der Wassersicherheit. Angesichts des weltweiten Rückgangs von Gletschern und Schneedecken aufgrund des anthropogenen Klimawandels (Hock et al. 2019: 142) ist es wichtig, die sich ändernde Rolle der Kryosphäre im Wasserkreislauf und ihren sich ändernden Beitrag zur Wasserverfügbarkeit zu verstehen. Dies ist besonders wichtig für bewohnte Gebiete und vor allem für Gebiete mit saisonaler Trockenheit, die auf (meist glaziales) saisonales Schmelzwasser als Wasserressource angewiesen sind (Kaser et al. 2010: 20223; Schoolmeester et al. 2018: 12; Soruco et al. 2015: 147).

In diesem Text wird die Rolle der Kryosphäre, einschließlich Gletscher, Schneedecken, Blockgletscher und Permafrost, im hydrologischen Kreislauf und ihr Beitrag zum Abfluss, Wasserverfügbarkeit und Wassersicherheit dargestellt.

## **2. Hintergrund**

### **2.1. Der Wasserkreislauf**

Der Wasserkreislauf ist ein vereinfachtes Konzept, das die Bewegungen des Wassers zwischen der Atmosphäre, Biosphäre, Pedosphäre (Boden), Lithosphäre (Erdreich), Kryosphäre (Eis) und den Ozeanen darstellt. Abbildung 1 zeigt a) Wasserpools und b) Wasserflüsse innerhalb des Wasserkreislaufs. Grundlegende Flüsse sind die Verdunstung von Wasser aus den Ozeanen oder vom Land, der Transport vom Ozean zum Land in der Atmosphäre, der Niederschlag von Wasser an Land oder im Ozean und der Abfluss in den Ozean (Hartmann 2016: 132). Dies ist jedoch eine sehr vereinfachte Beschreibung. Wichtig ist, dass der Niederschlag über Land als Regen oder Schnee fällt. Im letzteren Fall kann der Niederschlag zu Schneedecken und Gletschern beitragen, welche wichtige Wasserreservoirs darstellen (siehe Abbildung 1 a). In diesen Wasserreservoirs wird Wasser gespeichert und dem Wasserkreislauf entzogen, bis es wieder freigegeben wird und zum Abfluss beiträgt.

Die Darstellung des Wasserkreislaufs in Abbildung 1 b) umfasst auch menschliche Aktivitäten und deren Einfluss auf den Wasserkreislauf. Der Einfluss des Menschen auf das Wasser wird als grüne, blaue und graue Wassernutzung dargestellt. Die grüne Wassernutzung steht für Bodenfeuchtigkeit, die von Feldfrüchten und Weideflächen genutzt wird, die blaue Wassernutzung steht für Wasserverbrauch durch Landwirtschaft, Industrie und Haushalte und die graue Wassernutzung für Wasser, das zur Verdünnung menschlicher Schadstoffe benötigt wird (UNESCO, UN-Water 2020: 17). Laut einer Studie von Abbott et al. (2019: 533), die 464 Wasserkreislaufdiagramme analysierten, stellten nur 15% der Diagramme den menschlichen Einfluss auf den Wasserkreislauf dar, und nur 2% beinhalteten den Klimawandel oder Wasserverschmutzung.

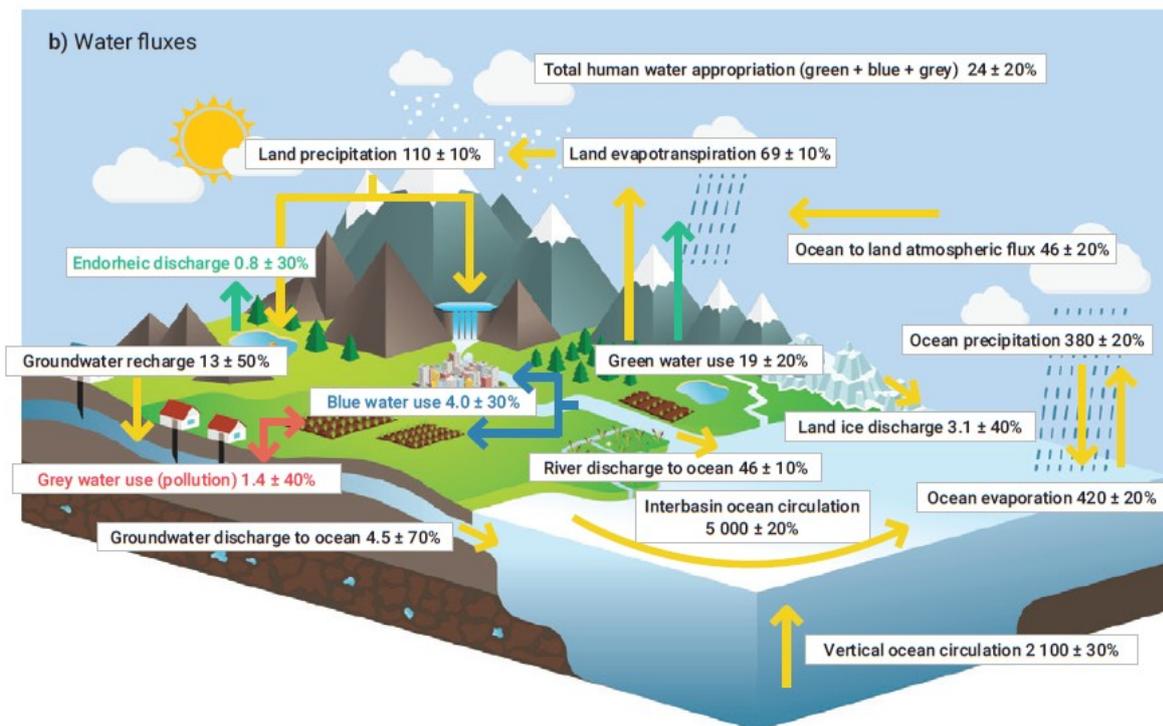
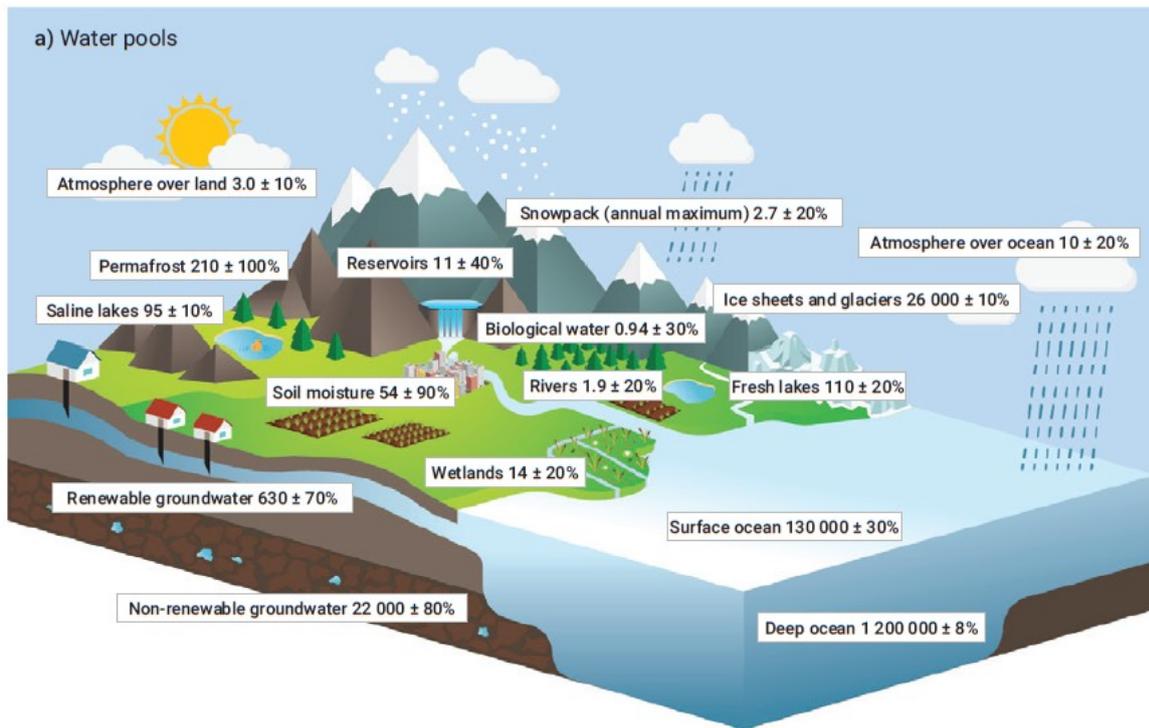


Abbildung 1: Der Wasserkreislauf: a) wasserpools (in  $10^3 \text{ km}^3$ ) und b) wasserflüsse (in  $10^3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ ) (UNESCO, UN-Water 2020: 17).

## **2.2 Die Kryosphäre im Wasserkreislauf**

### **2.2.1 Kryohydrologie**

Die Verbindung der Kryosphärenforschung mit der Hydrologie, wird von Ding et al. als Kryohydrologie bezeichnet. Die Kryohydrologie wird als eine Disziplin beschrieben, die hydrologische Prozesse verschiedener Elemente der Kryosphäre, in Verbindung mit der Hydrologie von Wassereinzugsgebieten, umfasst (Ding et al. 2020: 1). Der Schwerpunkt der Kryohydrologie liegt in der integrativen Betrachtung aller hydrologischer Prozesse der Kryosphäre (Ding et al. 2020: 2).

Ding et al. unterteilen die hydrologischen Funktionen der Kryosphäre in Wasserkonservierung, Abfluss, und hydrologische Regulierung. Die Wasserkonservierung bezieht sich auf die Rolle der Kryosphäre als Süßwasserressource und Speicher. Die Abflussanreicherung bezieht sich auf die Bereitstellung von Wasser durch den Beitrag der Kryosphäre zum Flussabfluss (Ding et al. 2020: 5). Die hydrologische Regulierung bezieht sich auf die Regulierung des Abflusses von Einzugsgebieten durch die Kryosphäre, auf saisonaler, interannueller und interdekadischer Zeitskala (Ding et al. 2020: 6). Diese Funktion ist mit der Speicherfunktion der Kryosphäre verbunden.

Alle diese Funktionen tragen zur Wasserverfügbarkeit bei und sind daher mit der Wassersicherheit verknüpft.

### **2.2.2 Wasserverfügbarkeit: Speicher, Abfluss, und Regulierungsfunktion**

Verschiedene Elemente der Kryosphäre fungieren als wichtige Wasserressourcen, zu denen in erster Linie Gletscher und Schneedecken gehören, aber auch Permafrost und Blockgletscher tragen zum Abflussverhalten in den jeweiligen Gebieten bei (Halla et al. 2021: 1187; Hock et al. 2019: 148). Die Kryosphäre von Gebirgen fungiert als wertvolle Wasserressource innerhalb von Gebirgsregionen, aber auch für flussabwärts gelegene Regionen (Hock et al. 2019: 148). Berggletscher werden als "Wassertürme" bezeichnet (Mark et al. 2015: 184). Durch die Akkumulation von Schnee und die damit einhergehende Eisbildung oberhalb der Schneegrenze wird Wasser gespeichert, während durch Ablation Wasser als Süßwasser freigesetzt wird. Die Speicherfunktion von Gletschern und der Kryosphäre im Allgemeinen ist entscheidend, da sie Trockenzeiten oder Dürrejahre ausgleichen kann (Huss & Hock 2018: 1).

Der Zeitraum der erhöhten Wasserfreisetzung aus der Kryosphäre ist in der Regel saisonal. Der Gletscherabfluss hat sein Minimum in der Saison der Schneeakkumulation oder der Trockenzeit (Tropen) und sein Maximum in der Saison der Gletscherschmelze oder der Regenzeit (Tropen) (Huss & Hock 2018: 1). In der frühen Schmelzsaison trägt die Schneedecke mehr zum Gesamtabfluss bei, während im August und September der relative Beitrag der Gletscher zum Gesamtabfluss am höchsten ist (Van Tiel et al. 2021: 3). Es wurde festgestellt, dass der Beitrag der saisonalen Gletscherschmelze zum Abfluss und zur Wasserverfügbarkeit, unter (saisonal) warmen und trockenen Bedingungen und dort, wo Bäche auf saisonal trockene Gebiete abzielen, am größten ist (Kaser et al. 2010: 20223). Diese saisonal trockenen Gebiete sind oft in hohem Maße von der Verfügbarkeit von Gletscherabflüssen abhängig. In einigen Makro-Skala-Einzugsgebieten (weltweit) trägt der Gletscherabfluss in den jeweiligen Monaten zu mehr als 25 % des Abflusses flussabwärts bei. Auffallend ist, dass solch hohe Beiträge auch in Einzugsgebieten mit weniger als 1% Vergletscherung auftreten können (Huss & Hock 2018: 1). Die Fähigkeit von Gletschern, reduzierte Wasserverfügbarkeit während warmer und trockener Bedingungen zu kompensieren, wurde von Van Tiel et al. (2021: 1) untersucht. Anhand von Langzeitbeobachtungen (>50 Jahre) und mit Fokus auf warmen und trockenen Events innerhalb der Schmelzsaison (Jun-Sep) in Norwegen, den europäischen Alpen und Kanada, wurde analysiert, inwieweit eine erhöhte Gletscherschmelze verminderte Niederschläge und erhöhte Verdunstung (über)kompensiert. Für die untersuchten Regionen wurde festgestellt, dass die gletscherbedingte (Über-)Kompensation während warmer und trockener Events zwischen 50% und 200% des normalen Abflusses liegt. Die Überkompensation ist im Juni am höchsten, was wahrscheinlich auch auf den Einfluss der Schneedecke zurückzuführen ist: Neben Gletschern hat auch die Schneedecke eine Speicherfunktion und trägt zum Ausgleich von Abflussdefiziten bei; allerdings ist das gespeicherte Wasser in der saisonalen Schneedecke auf die im Winter akkumulierte Schneemenge begrenzt (Van Tiel et al. 2021: 24, 25). Die Schneedecke reguliert den saisonalen Abfluss, und ist für den Abfluss im Frühjahr und Sommer unerlässlich (Hartmann 2016: 137). Sie beeinflusst auch den Abfluss von Niederschlägen (Ding et al. 2020: 6). Außerdem wurde festgestellt, dass die Gletscherkompensation umso höher ist, je stärker die Vergletscherung in einem Einzugsgebiet ist (Van Tiel et al. 2021: 25). Demnach können Gletscher eine dämpfende Wirkung auf die

Gesamtabflussvariabilität in Regionen der mittleren und hohen Breiten haben: Gletscherabflüsse werden bei warmen und trockenen Bedingungen verstärkt und bei kalten und feuchten Bedingungen verringert (Van Tiel et al. 2021: 3).

Weitere Komponenten der Kryosphäre, die die Wasserverfügbarkeit beeinflussen, sind Permafrost und Blockgletscher. Permafrost beeinflusst die Abflusseigenschaften durch seinen jahreszeitlichen Zyklus. In Form von gefrorenem Boden fungiert er als Barriere für Niederschlag oder Schmelzwasser und kann dadurch den Abfluss verstärken, während sich im Sommer der active layer (aufgetaute Oberfläche) bildet, der die Wasserspeicherkapazität erhöht und dadurch zu einer erhöhten Speicherung von Sommerniederschlägen und einer Verzögerung des Abflusses führt (Ding et al. 2020: 7). Blockgletscher fungieren wie Gletscher als langfristige Wasserspeicher (Jones et al. 2019: 67). Aufgrund von Isolationseffekten sind sie relativ unempfindlich gegenüber Temperaturen über dem Gefrierpunkt, sowie gegenüber Erwärmungstrends. Die langfristige Wasserspeicherfunktion bezieht sich auf das Eis von Blockgletschern, das sich unterhalb des isolierenden active Layers von Blockgletschern befindet. Ähnlich wie Gletscher haben Blockgletscher eine mittelfristige, saisonale Speicherfunktion und eine kurzfristige, tägliche Speicherfunktion, die beide zu den Abflusseigenschaften des Einzugsgebiets beitragen (Jones et al. 2019: 71). Der Abfluss von Blockgletschern stammt aus verschiedenen Quellen, darunter schmelzende saisonale Schneedecken, Gletschereis und Blockgletschereis sowie Niederschläge. Das Wasser aus externen Quellen (Gletscher, Schneedecke, Regen) wird im Blockgletscher gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgegeben. Der Beitrag des Blockgletschereises zur Wasserabgabe ist aufgrund der Isolierung gering. Daher ist langfristig gespeichertes Blockgletschereis als verfügbare Wasserquelle (noch) nicht geeignet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass laut Jones et al. nur wenig über die Beziehung zwischen Blockgletschern und der Hydrologie von Einzugsgebieten bekannt ist. Dies liegt unter anderem daran, dass es aus verschiedenen Gründen herausfordernd ist, Abflusswerte von Blockgletschern zu messen und zu untersuchen (Jones et al. 2019: 78-80).

Bei der Abschätzung der verfügbaren Wassermenge von Gletschern oder anderen Komponenten der Kryosphäre ist es entscheidend, den Unterschied zwischen Schmelzwassermessungen und Abflussmessungen flussabwärts zu berücksichtigen. Dies ist auf den offenen Charakter der Abflusssysteme zurückzuführen, in denen Wasser durch Niederschlag, Bewässerung, Verdunstung usw. zu- oder abfließen

kann. Insgesamt geht in den meisten Fällen mehr Wasser verloren als zugeführt wird, was häufig zu einer Überschätzung der von den Gletschern verfügbaren Wassermenge führt. Dieser Effekt nimmt in der Regel mit zunehmender Entfernung von Gletschern zu (Kaser et al. 2010: 20223). In Bezug auf den Gesamtabfluss ist zu berücksichtigen, dass neben der Kryosphäre auch Faktoren wie Niederschlag, Verdunstung, Vegetation usw. den Abfluss und die Wasserverfügbarkeit beeinflussen (Hock et al. 2019: 149).

### **2.3 Wassersicherheit**

Nachdem die Rolle der Kryosphäre im hydrologischen Kreislauf und ihr Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit erörtert wurde, soll das damit eng verbundene Konzept der Wassersicherheit beleuchtet werden. Wassersicherheit ist ein weit gefasster Begriff und wird von Grey & Sadoff (2007: 545) definiert als "die Verfügbarkeit einer akzeptablen Menge und Qualität von Wasser für Gesundheit, Lebensunterhalt, Ökosysteme und Produktion, verbunden mit einem akzeptablen Niveau wasserbezogener Risiken für Menschen, Umwelt und Wirtschaft".

Die Wasserverfügbarkeit durch Gletscherschmelze ist in vielen Regionen eine Grundlage für Wassersicherheit, jedoch hängt diese von weiteren Faktoren ab. Dazu gehören neben ökologischen auch technische, wirtschaftliche, politische, soziale und rechtliche Aspekte (Besbes 2019: 31). Genauer gesagt hängt Wassersicherheit u.a. von Wasserpolitik und dem Management von Wasserressourcen ab. So muss beispielsweise die Verteilung von Wasser auf verschiedene Nutzungssektoren (Trinkwasser, Landwirtschaft, Mineraliengewinnung etc.) berücksichtigt werden (Mark et al. 2015: 184, 186). Wassersicherheit umfasst nicht nur den Zugang zu Wasserressourcen, sondern auch Energiesicherheit und Ernährungssicherheit. Außerdem ist Wasserknappheit eng mit Wassersicherheit verbunden. Bei der Analyse von Wasserknappheit ist es wichtig, neben der geringen physischen Wasserverfügbarkeit auch die Erschöpfung der Wasserressourcen, die steigende Nachfrageentwicklung und die abnehmende Wasserqualität zu berücksichtigen (Besbes 2019: 39). Darüber hinaus betrifft Wassersicherheit nicht nur menschliche Gesellschaften, sondern auch Ökosysteme (Hock et al. 2019: 148; Milner et al. 2017: 9770).

### **3. Kryosphäre im Wandel und Folgen für Wasserverfügbarkeit**

#### **3.1 Aktuelle Veränderungen und das "Peak Water" Konzept**

Gletscher ziehen sich aufgrund des anthropogenen Klimawandels weltweit zurück (Hock et al. 2019: 142). Bei Betrachtung der langfristigen Abflusswerte von sich zurückziehenden Gletschern ist ein vorübergehender Anstieg des Schmelzwasserabflusses zu beobachten, bis ein Maximum erreicht wird. Dieses Maximum wird als "Peak Water" bezeichnet. Mit Erreichen des Peak Water beginnen die Abflusswerte kontinuierlich zu sinken (Mark et al. 2015: 185). Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein Gletscherrückgang in allen Fällen zu einer geringeren Wasserverfügbarkeit und damit zu Problemen bezüglich der Wassersicherheit führt. Es ist wichtig, Faktoren wie den Standort, die Größe des Einzugsgebiets, den Zeitpunkt, die klimatischen Bedingungen und vor allem soziale Faktoren zu berücksichtigen (Mark et al. 2015: 184). Abbildung 2 zeigt jedoch die Folgen eines langfristigen Gletscherschwunds für die Abflusswerte: Die dekadische Zeitskala zeigt den Anstieg des Gesamtabflusses bis zum Erreichen des Spitzenwertes und den anschließenden Rückgang. Sie veranschaulicht die allgemeine Bedeutung des Gletscherschmelzwassers für gletscherdominierte (>50% Gletscherbedeckung) Einzugsgebiete sowie die Entwicklung des abnehmenden Schneeschmelzwassers und der zunehmenden Niederschläge. Die jährliche Zeitskala zeigt, dass der Gletscherabfluss im Sommer am höchsten ist (gilt für mittlere und hohe Breiten), und die tägliche Zeitskala zeigt, dass der Gletscherabfluss während des Tages am höchsten ist. Mit Peak Water nimmt der Gesamt- und Gletscherabfluss auch auf der Jahres- und Tagesskala stark zu. Mit dem abgeschlossenen Gletscherrückgang ist das Gletscherschmelzwasser als Abflussquelle verschwunden, und Niederschlag, Schneeschmelzwasser und Grundwasser sind die verbleibenden Wasserquellen. Nach dem vollständigen Gletscherrückgang ist an niederschlagsfreien Sommertagen das Grundwasser die einzige Wasserquelle, neben der Schneeschmelze als anteilige Wasserquelle (Hock et al. 2019: 152).

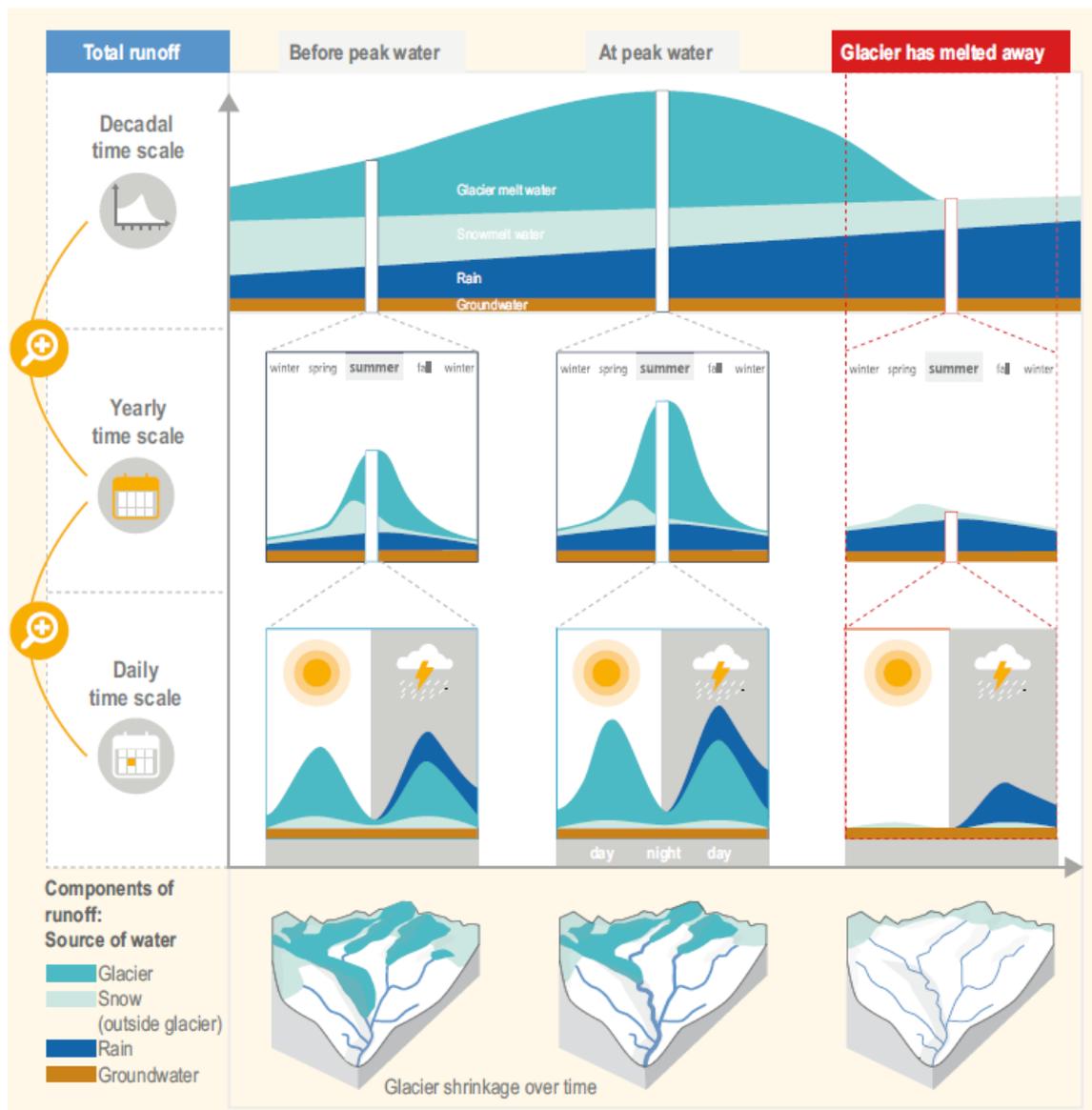


Abbildung 2: Abflussänderungen in einem gletscherdominierten Einzugsgebiet vor, während, und nach peak water, auf einer dekadischen, jährlichen, and täglichen Skala (Hock et al. 2019: 152).

In zahlreichen Gebieten, die von Gletscher- und Schneeschmelze beeinflusst werden, hat sich der Abfluss in den letzten Jahren verändert, auch in Bezug auf die Saisonalität (Hock et al. 2019: 148). Je nach untersuchter Region wurden Zunahmen des Winterabflusses - als Folge von mehr Niederschlag in Form von Regen -, Ab- oder Zunahmen des Sommerabflusses, oder Ab- oder Zunahmen des Jahresabflusses beobachtet (Hock et al. 2019: 149). Diese unterschiedlichen Entwicklungen können unter anderem mit unterschiedlichen Stadien des Gletscherrückzugs und des Erreichens des Peak Water, unterschiedlichen Einflüssen von Schneedecke vs. Gletscherschmelze oder mit unterschiedlichen Höhenlagen zusammenhängen. Laut Huss & Hock (2018: 2), die die Veränderungen des Gletscherabflusses auf globaler

Ebene modelliert haben, hatten 2017 bereits 45% aller untersuchten Einzugsgebiete Peak Water erreicht.

Neben den Gesamtabflusswerten, unterliegt auch die Fähigkeit der Gletscher warme und trockene Bedingungen zu kompensieren dem aktuellen Wandel. Die Analyse langfristiger Abflussbeobachtungen hat ergeben, dass die Kompensationsleistung der Gletscher während der Schmelzsaison in den mittleren bis hohen Breiten abnimmt (Van Tiel et al. 2021: 22).

## **3.2 Zukünftige Änderungen**

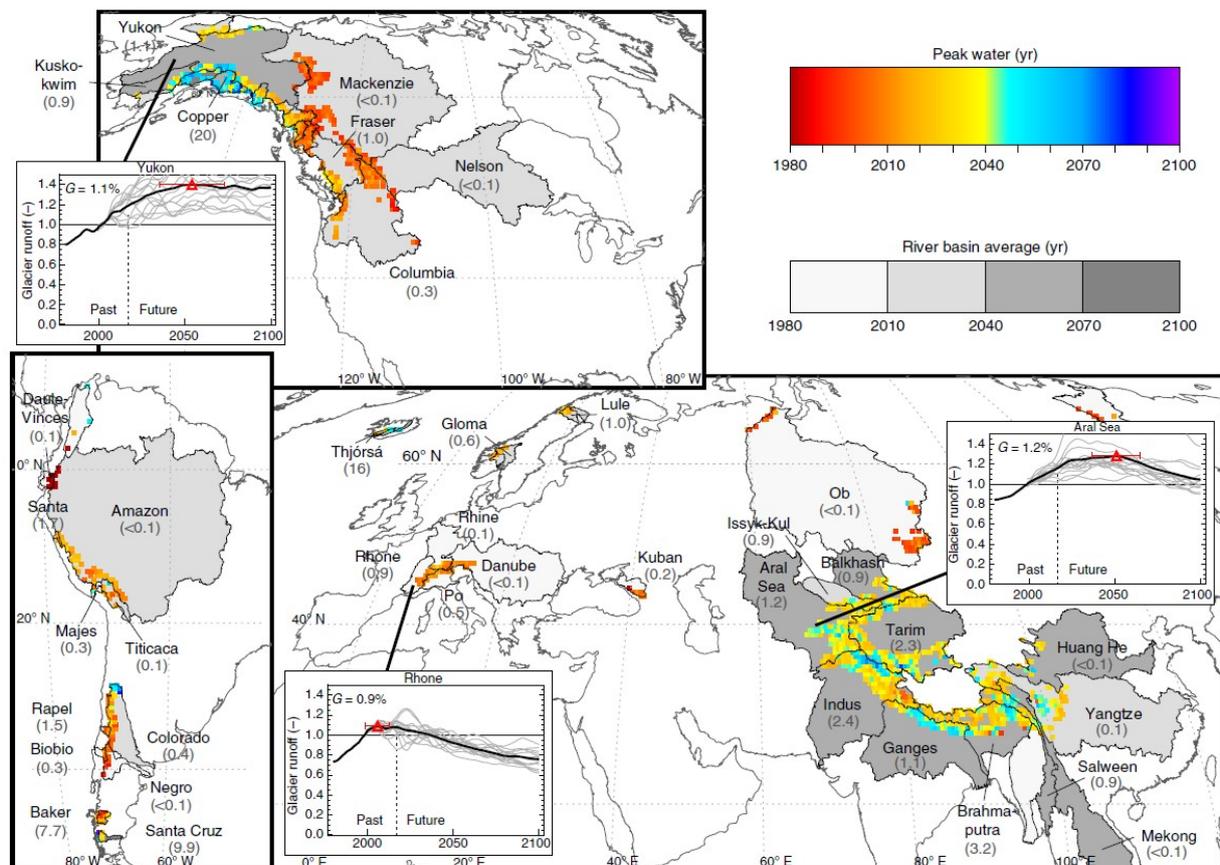
### **3.2.1 Gletscher**

Bei der Analyse der künftigen Rolle der Kryosphäre und insbesondere des Beitrags der Gletscher zur regionalen Wasserverfügbarkeit muss zunächst der Gletscherrückgang berücksichtigt werden. Gemäß der verschiedenen Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 - mit erwarteten Emissionsspitzen in den Jahren 2020, 2050 bzw. nach 2100 - wird das Gesamtvolumen aller Gletscher bis 2100 um  $43 \pm 14 \%$ ,  $58 \pm 13 \%$  bzw.  $74 \pm 11 \%$  abnehmen. Das gesamte Gletschervolumen bezieht sich auf das Gletschervolumen in allen 56 vergletscherten Makroskala-Einzugsgebieten weltweit, ohne Antarktis und Grönland (vgl. Huss & Hock 2018: 2). Diese Entwicklung wird in allen Einzugsgebieten zu durchschnittlichen Abflusszunahmen von 26%, 28% bzw. 36% führen, bis Peak Water erreicht wird. In einigen Einzugsgebieten könnte der Abfluss um mehr als 50% steigen (Huss & Hock 2018: 2). Nach dem vollständigen Gletscherrückgang können die jährlichen Abflusswerte eines Einzugsgebiets wieder auf ihre ursprünglichen Werte vor dem Gletscherrückgang zurückkehren, allerdings wird es sehr wahrscheinlich zu einem Rückgang des saisonalen Abflusses während der Schmelzsaison kommen, da die langfristige Speicherfunktion der Gletscher fehlt (Huss & Hock 2018: 1).

Huss & Hock untersuchten die künftigen monatlichen Veränderungen des Gletscherabflusses in Makroskala-Einzugsgebieten von 2000-2050 und 2000-2090. Sie stellten fest, dass der Gletscherabfluss vor allem im August und September (nördliche Hemisphäre) abnehmen wird, da beide Monate zur Schmelzsaison (Juni-Okt) gehören, sowie in den meisten Monaten der Schmelzsaison der südlichen Hemisphäre (Dez-Apr). Dennoch wird im Juni - bzw. Dezember (südliche Hemisphäre) - in den meisten Einzugsgebieten weltweit mit einem Anstieg des

Gletscherabflusses gerechnet. Dies deutet darauf hin, dass die maximalen Abflusswerte zu einem früheren Zeitpunkt in der Schmelzsaison erreicht werden (Huss & Hock 2018: 3).

Ob der Zeitpunkt maximaler Abflusswerte (Peak Water) noch bevorsteht oder bereits erreicht ist, hängt vom jeweils betrachteten Gletschergebiet ab. Laut Huss & Hock (2018: 2) liegt in etwa der Hälfte aller (untersuchten) Einzugsgebiete weltweit das Erreichen von Peak Water noch in der Zukunft, und in 22% aller Einzugsgebiete könnten die Abflusswerte bis nach 2050 ansteigen.



**Abbildung 3: Peak Water in allen vergletscherten Makroskala-Einzugsgebieten, basierend auf dem RCP 4.5 Emissionsszenario (Huss & Hock 2018: 2)**

Dies wird durch den IPCC-Sonderbericht über Ozeane und Kryosphäre bestätigt, der mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit feststellt, dass die Gletscherschmelzwasserwerte in von Gletschern gespeisten Einzugsgebieten einige Jahrzehnte lang ansteigen werden und dann abzunehmen beginnen (Hock et al. 2019: 148). Je höher die Anzahl der kleinen Gletscher und je geringer die Eisbedeckung in einer Region ist, desto

früher wird Peak Water erreicht, und je höher die Anzahl der großen Gletscher und je großflächiger die Eisbedeckung ist, desto später. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass Peak Water in den nächsten Jahrzehnten und um die Mitte dieses Jahrhunderts in den meisten Regionen erreicht wird, vorausgesetzt es wurde nicht schon erreicht, und bis zum Ende dieses Jahrhunderts wird Peak Water in allen Gletscherregionen erreicht sein (Hock et al. 2019: 149). Das wird in Abbildung 3 verdeutlicht. Peak Water wird auf der bunten Skala für Gletscher und auf der Grauskala für Makro-Einzugsgebiete dargestellt. Die Werte in Klammern beziehen sich auf den Grad der Vergletscherung eines Einzugsgebiets in Prozent (Huss & Hock 2018: 2).

Wie bereits erwähnt, kann das Gletscherschmelzwasser selbst in Einzugsgebieten mit eher geringer Gletscherbedeckung einen wichtigen Beitrag zum Gesamtabfluss und zur Wasserverfügbarkeit leisten. Darüber hinaus wirken sich die Veränderungen des Gletscherabflusses in den verschiedenen Einzugsgebieten unterschiedlich auf den Gesamtabfluss flussabwärts aus. Huss & Hock haben modelliert, dass bis 2100 in einem Drittel der (untersuchten) Einzugsgebiete weltweit, von denen die meisten nur eine geringe Gletscherbedeckung (<2,5 %) aufweisen, ein Rückgang des Gletscherabflusses zu verzeichnen ist, der in mindestens einem Monat der Schmelzsaison 10 % des Gesamtabflusses übersteigt (2018: 4). Diese Verringerung des Gletscherabflusses kann beträchtlich sein, insbesondere wenn sie mit trockenen Bedingungen zusammenfällt und in besiedelten Gebieten.

### **3.2.2 Schneedecke**

Neben Gletschern werden sich auch Schneedecken in Zukunft aufgrund des Klimawandels verändern. Die Dauer und Ausdehnung von Schneedecken nehmen ab (Bavay et al. 2013: 14,15; Bormann et al. 2018: 924). Nach Mark et al. (2015: 200) wird die zukünftige saisonale Entwicklung von Schneedecken für die Wasserverfügbarkeit regional wichtiger sein als die Entwicklung der Gletscher. Wie in Abbildung 2 gezeigt wurde, dürfte die Schneedecke auch dann noch eine Rolle bei der Abflussproduktion spielen, wenn die Gletscher bereits vollständig abgeschmolzen sind (Hock et al. 2019: 152). Was die Saisonalität betrifft, so ist es sehr wahrscheinlich, dass sich die Schneeschmelze auf einen früheren Zeitpunkt im Jahr verlagert und zu einem früheren Spitzenabfluss im Frühjahr führt, insbesondere in

Einzugsgebieten, die stark von der Schneeschmelze beeinflusst werden (Hock et al. 2019: 149).

### **3.2.3 Permafrost**

Des Weiteren ist Permafrost-degradation ein Phänomen, das auf globaler Ebene auftritt (Biskaborn et al. 2019: 1). Das Auftauen des Permafrosts wird wahrscheinlich zu Veränderungen des Abflusses und der Wasserverfügbarkeit beitragen. Neben dem Schmelzwasser, das aus Permafrost freigesetzt wird, kann das Auftauen des Permafrosts zu veränderten hydrologischen Pfaden führen und damit indirekt den Abfluss beeinflussen. Permafrost-tau wird wahrscheinlich in Gebieten mit hohem Permafrostvorkommen und trockenen Bedingungen sowie in Zeiten, in denen Gletscher stärker als Permafrost von der globalen Erwärmung beeinflusst werden, am relevantesten sein, da Permafrost weniger schnell auf Klimaänderungen reagiert als Gletscher (Hock et al. 2019: 149).

### **3.2.4 Blockgletscher**

Zusammen mit Permafrost sind Blockgletscher im Vergleich zu Gletschern weniger anfällig für den Klimawandel (Jones et al. 2019: 66). Wie bereits erwähnt, trägt das Eis von Blockgletschern aufgrund von Isolationseffekten wahrscheinlich nur in geringem Maße zum Abfluss bei; mit der Degradation von Blockgletschern und ihren gefrorenen Kernen aufgrund der globalen Erwärmung könnten ihre langfristigen Wasserspeicher jedoch zu einer verstärkten Wasserfreisetzung führen und in Zukunft zum Abfluss beitragen (Jones et al. 2019: 81). Jones et al. gehen daher davon aus, dass langfristig mit der globalen Erwärmung und dem Rückgang der Gletscher die Rolle der Blockgletscher als Wasserspender für flussabwärts gelegene Regionen an Bedeutung gewinnen wird. Die Autoren vermuten auch, dass der Prozess des Übergangs von Gletschern zu Blockgletschern dazu beitragen könnte, dass die Gebirgskryosphäre widerstandsfähiger gegen die globale Erwärmung wird. Es ist daher von Interesse, in Zukunft die Prozesse besser zu verstehen, die bestimmen, ob Gletscher zu Blockgletschern werden oder ganz abschmelzen. Darüber hinaus könnte es im Zuge der Gletscherschmelze zu einer verstärkten Ansammlung von supraglazialem Schutt auf Gletschern kommen, was die Gletscherschmelze durch Isolierung verringern könnte (Jones et al. 2019: 70, 83, 84).

Letztlich muss bei der Betrachtung künftiger Abflussänderungen und des sich ändernden Beitrags der Kryosphäre zur Wasserverfügbarkeit berücksichtigt werden, dass auch die Faktoren außerhalb der Kryosphäre, welche zu den Gesamtabflusswerten beitragen, wie Verdunstung, Niederschlag, Landbedeckung usw., Entwicklungen und künftigen Veränderungen unterliegen.

## **4. Regionaler Schwerpunkt**

### **4.1 Klimatisch vulnerable Regionen**

Wie bereits erwähnt, ist die Funktion der Kryosphäre als Wasserressource für bestimmte Gebiete besonders wichtig. Nach Kaser et al. (2010: 20226) ist der Beitrag der saisonalen Gletscherschmelze zur Wasserverfügbarkeit und damit zur Wassersicherheit vor allem in sehr trockenen Einzugsgebieten von großer Bedeutung. Trockenheit tritt oft saisonal auf. Dementsprechend sind Fragen der Wassersicherheit in vielen Fällen ein saisonales Problem (UNESCO, UN-Water 2020: 18). In vielen Teilen der Anden gibt es starke saisonale Schwankungen des Abflusses. Dies ist auf die Regen- und Trockenzeit zurückzuführen, die oft die Hauptkontrolle über den Zeitpunkt des maximalen Gletscherabflusses darstellen (Hock et al. 2019: 151). In den äußeren Tropen der Anden fallen mehr als 80 % des Niederschlags von Oktober bis April (Baraer et al. 2012: 135). An den Westhängen der tropischen Anden herrscht von Juni bis September extreme Trockenheit (Kaser et al. 2010: 20223). Große Teile der Anden sind also (saisonal) aride bis semiaride Regionen. Diese klimatisch vulnerablen Regionen sind weitgehend von der Gletscher-/Kryosphärenschmelze als Wasserquelle während der Trockenzeit abhängig (Schoolmeester et al. 2018: 12). Daher wurde viel über die Anden im Hinblick auf eine sich verändernde Kryosphäre und Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit geschrieben, die Herausforderungen für die Wassersicherheit mit sich bringen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass Kaser et al. (2010: 20223) feststellten, dass der Beitrag der Gletscher zur Wasserverfügbarkeit in (monsunbestimmten) Tieflandbecken flussabwärts unbedeutend ist. Wichtig ist, dass die Autoren feststellten, dass in den meisten Einzugsgebieten die Abhängigkeit des Menschen vom Beitrag der Gletscherabflüsse nicht unbedingt in Gebieten mit der höchsten

Bevölkerungsdichte am größten ist (Kaser 2010: 20223). Im Folgenden wird ein Überblick über einige Fallstudien aus den Anden gegeben, die die Rolle der Kryosphäre für die Wasserverfügbarkeit thematisieren.

#### 4.2 Die Anden Hochgebirgsregion

Das Andengebirge erstreckt sich von Norden nach Süden entlang des westlichen Randes des südamerikanischen Kontinents. In dieser Region spielen die Berge eine wichtige Rolle für die Wasserversorgung von über 75 Millionen Menschen und für weitere 20 Millionen Menschen außerhalb der Region, die flussabwärts leben (Schoolmeester et al. 2018: 12). Dazu gehört auch die Wasserversorgung aus Gletschern und anderen Komponenten der Kryosphäre. Durch den Klimawandel unterliegt jedoch auch die Kryosphäre der Anden drastischen Veränderungen, welche mit hydrologischen Veränderungen einhergehen und Herausforderungen für die Wassersicherheit mit sich bringen.

Rabatel et al. (2013: 81), die einen Fokus auf die tropischen Anden legten, stellten fest, dass der Rückgang der Gletscherfläche und -länge in den letzten drei Jahrzehnten in dieser Region beispiellos ist. Bezüglich der Massenbilanz ist in den letzten fünf Jahrzehnten ein negativer Trend festzustellen. Besonders kleine Gletscher sind vom Massenverlust betroffen, aber insgesamt ziehen sich derzeit alle Gletscher in den tropischen Anden zurück (Rabatel et al. 2013: 81). Die Auswirkungen des Gletscherrückzugs auf die langfristigen Abflusswerte wurden bereits erläutert (Kapitel 3.1). Ein wichtiger

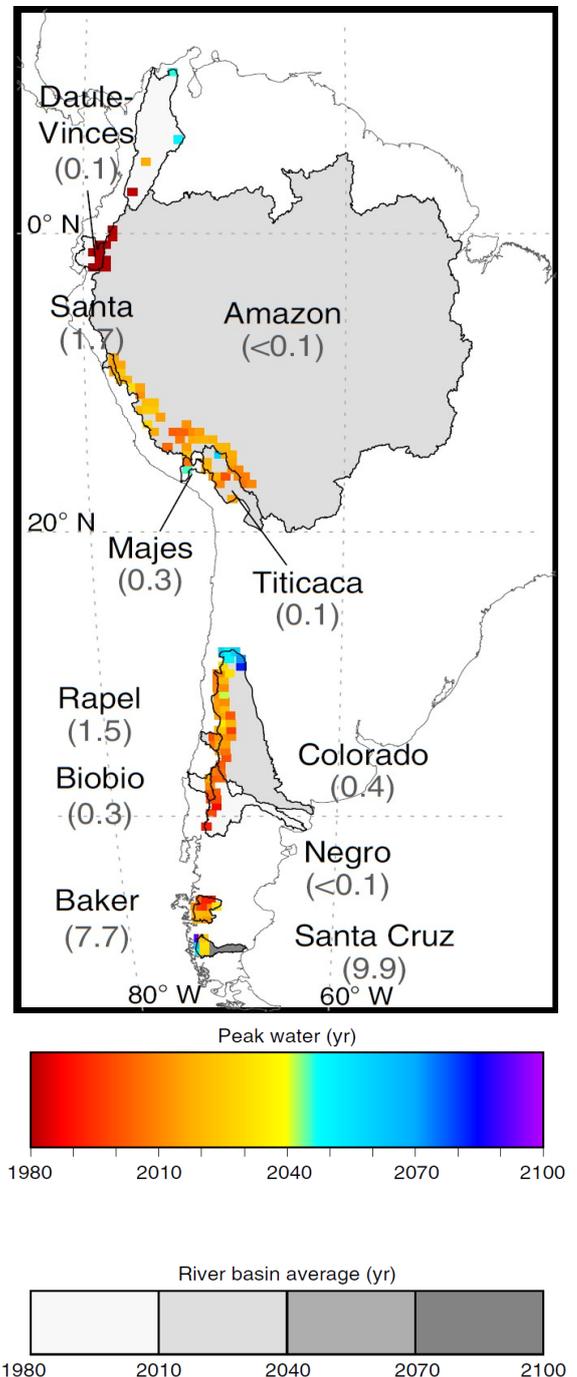


Abbildung 3: Peak Water in allen vergletscherten Makroskala-Einzugsgebieten der Anden (Huss & Hock 2018: 2).

Faktor bei der Analyse der Wasserverfügbarkeit ist die Frage, ob Peak Water bereits erreicht wurde oder bald erreicht sein wird. Nach Angaben des IPCC besteht weitgehende Übereinstimmung darüber, dass in den meisten vergletscherten Einzugsgebieten der tropischen Anden Peak Water bereits in der Vergangenheit erreicht wurde. Genauer gesagt, ist Peak Water für 82-95% der Gletscher in dieser Region bereits vor 2019 überschritten worden (Hock et al. 2019: 149). Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, ist auch in den südlichen Anden Peak Water für die meisten Gletscher bereits erreicht. Nur wenige Gletscher in den Anden und einige Gletscher im nördlichen Colorado-Becken könnten in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts Peak Water erreichen. Im Gegensatz dazu erreichten zahlreiche Gletscher in Ecuador Peak Water bereits in den 1980er Jahren.

Die Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf die Hydrologie der Einzugsgebiete und die Wasserverfügbarkeit wurden von Baraer et al. (2012: 134) für die Cordillera Blanca in Peru untersucht. Zu diesem Zweck wurden historische und aktuelle Zeitreihen des täglichen Abflusses aus neun verschiedenen Wassereinzugsgebieten analysiert. Die Gletscherbedeckung in der untersuchten Region hat im Laufe des letzten Jahrhunderts deutlich abgenommen. Es wurde festgestellt, dass in sieben der untersuchten Einzugsgebiete die jährlichen Abflusswerte und die Werte während der Trockenzeit abnehmen, was bedeutet, dass Peak Water bereits erreicht wurde, was mit den oben beschriebenen Erkenntnissen über Peak Water in den Anden übereinstimmt. Baraer et al. gehen davon aus, dass der jährliche Abfluss nach dem vollständigen Abschmelzen der Gletscher in der Region Cordillera Blanca um 2-30 % in Vergleich zum derzeitigen Abfluss zurückgehen wird. Es ist maßgeblich, dass dieser Abflussrückgang in der Trockenzeit stärker ausgeprägt sein wird. In drei der untersuchten Einzugsgebiete könnte der saisonale Abfluss in der Trockenzeit um mehr als 60 % der derzeitigen Werte (2008/2009) zurückgehen. Darüber hinaus zeigen Abflussmessungen am oberen Río Santa einen Rückgang des Abflusses in der Trockenzeit, der wahrscheinlich bereits in den 1970er Jahren eingesetzt hat. Der Río Santa liegt in der Region Cordillera Blanca und entwässert die meisten Wassereinzugsgebiete in diesem Gebiet. 10-20 % seines jährlichen Abflusses und <40 % seines Trockenzeitabflusses werden dem Schmelzwasser zugeschrieben (Baraer et al. 2012: 135, 136, 148).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Gletscher, Schneedecke und Wasserverfügbarkeit wurden von Corripio et al. (2008: 126) für die zentralen

trockenen Anden in Chile und Argentinien modelliert. Genauer gesagt, wurde die Ablation von Schnee und Gletschern für zwei Gletschergebiete in der Grenzregion modelliert. Es wurde festgestellt, dass die Ablation und damit der Abfluss während der Schmelzsaison wahrscheinlich zunehmen werden. Schließlich wird der sommerliche Abfluss aufgrund des Verlusts der Gletschereisspeicherung abnehmen. Interessanterweise wird der Mendoza-Fluss auf der argentinischen Seite wahrscheinlich einen allmählichen Abflussrückgang erleben, während das Einzugsgebiet des Aconcagua-Flusses wahrscheinlich einen schnellen Abflussrückgang erleben wird, nachdem die Abflusswerte zuvor aufgrund der lokalen Orographie stark angestiegen waren (Corripio et al. 2008: 132-134).

Nachdem die Auswirkungen der Andengletscher und der Schneedecke auf den Abfluss und die Wasserverfügbarkeit in einigen Gebieten beschrieben wurden, soll im Folgenden die Rolle der Blockgletscher dargestellt werden. Aufzeichnungen, die die Verbreitung und andere Informationen über Blockgletscher dokumentieren, fehlen in Andenregionen häufig (Jones et al. 2019:84). Halla et al. (2021: 1187) untersuchten jedoch Blockgletscher und ihre Funktion als Wasserspeicher und Abflussspender in den semi-ariden bis ariden Anden Argentiniens. Die Autoren untersuchten die Wasserspeicherkapazitäten und ihre zwischenjährlichen Veränderungen eines Blockgletschers, indem sie dessen volumetrischen Eis- und Wassergehalt quantifizierten. Dies geschah für die Zeiträume 2016-2017 und 2017-2018. Die interannuellen Veränderungen der Wasserspeicherung wurden mit -36 mm im Jahr für 2016-2017 und 28 mm im Jahr für 2017-2018 ermittelt. Dies deutet darauf hin, dass erhebliche Mengen an Jahresniederschlag aus dem Blockgletschersystem freigesetzt und darin gespeichert worden sein könnten (Halla et al. 2021: 1207). Der Massenverlust / Eisgewinn in den Jahren 2016-2017 / 2017-2018 entspricht 25-80% / 17%-55% des Jahresniederschlags. Die positive Speicherveränderung in den Jahren 2017-2018 könnte durch höhere Niederschlagshöchstwerte erklärt werden. Außerdem deuten die Oberflächentemperaturen am Boden im Jahr 2016-2017 auf einen früheren Sommer und höhere Sommerhöchsttemperaturen hin, was zusätzlich zu der negativen Speicherveränderung beigetragen haben könnte. Es wurde festgestellt, dass im untersuchten Einzugsgebiet das Bodeneis, einschließlich der Blockgletscher, eine wichtige Rolle als langfristiger Wasserspeicher spielt. Die Autoren vermuten, dass etwa 11% bis 42% des Wassergehalts des untersuchten Blockgletschers über eine Blockgletscherquelle zum Abfluss beitragen könnten.

Darüber hinaus kamen sie zu dem Schluss, dass Blockgletscher für die Pufferung und Regulierung des saisonalen Grundwasserflusses und der Grundwasserneubildung sehr wichtig sein können. Die langfristige Speicher- und saisonale Pufferfunktion könnte für die Anden in Zukunft aufgrund des Klimawandels noch wertvoller werden (Halla et al. 2021: 1208).

Neben Veränderungen der Wasserspeicherung und des Abflusses wächst auch die Sorge um die Wassersicherheit in der Andenregion. Soruco et al. (2015: 147) untersuchten den Beitrag des Gletscherabflusses zur Wasserverfügbarkeit in La Paz, Bolivien. Zu diesem Zweck wurde eine Quantifizierung der Massenbilanz von 70 Gletschern in den Einzugsgebieten von La Paz durchgeführt. Jährlich trugen die Gletscher zu ca. 15% der Wasserressourcen der Stadt La Paz bei (1963 bis 2006). Auf saisonaler Ebene war der Beitrag in der Trockenzeit höher als der Beitrag in der Regenzeit (27 % bzw. 14 %). Von 1963 bis 2006 betrug der Verlust an Gletscherfläche in der untersuchten Region etwa 50 %. In den vier Einzugsgebieten, die La Paz mit Wasser versorgen, wurden in diesem Zeitraum jedoch nur geringfügige Änderungen des Abflusses beobachtet. Die Autoren führen dies auf die ausgleichende Wirkung der verstärkten Eisschmelze der Gletscher zurück und vermuten, dass die Abflusswerte eher stabil waren. Peak Water, auf den ein Rückgang der Abflüsse im Einzugsgebiet folgt, war also im Durchschnitt zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht. Die Analyse der künftigen Entwicklung des Beitrags der Gletscher zur Wasserverfügbarkeit in der Region La Paz ist besonders wichtig, weil die Bevölkerung von La Paz und El Alto, der Nachbarstadt von La Paz, zunimmt. Daher steigt die Anfälligkeit bezüglich der Wassersicherheit. Die Autoren gehen davon aus, dass bei einem Szenario, das ein vollständiges Abschmelzen der Gletscher vorsieht, der jährliche Abfluss um 12% zurückgehen könnte. Auf einer saisonalen Skala könnte der Abfluss in der Regenzeit um 9% und in der Trockenzeit um 24 % zurückgehen (Soruco et al. 2015: 147, 151, 152).

Eine weitere Studie, die den Beitrag der Gletscherschmelze zur Wasserverfügbarkeit untersucht, stammt von Buytaert et al. (2017: 1). Genauer gesagt untersuchten die Autoren, wie der Gletscherabfluss zur Wassernutzung flussabwärts beiträgt, und analysierten dabei den regionalen Wasserbedarf in den wichtigsten Einzugsgebieten der tropischen Anden in Ecuador, Peru und Bolivien. Abbildung 5 zeigt den Beitrag der Gletscherschmelze zum Gesamtabfluss in den untersuchten Gebieten. Das Einzugsgebiet des Río Santa und die Region La Paz wurden bereits behandelt.

Zusätzlich sind die Regionen Vilcanota und Quito in Peru bzw. Ecuador dargestellt. Abbildung 5 verdeutlicht, dass der Beitrag der Gletscher zum Gesamtabfluss mit zunehmender Entfernung von den Gletschern tendenziell abnimmt.

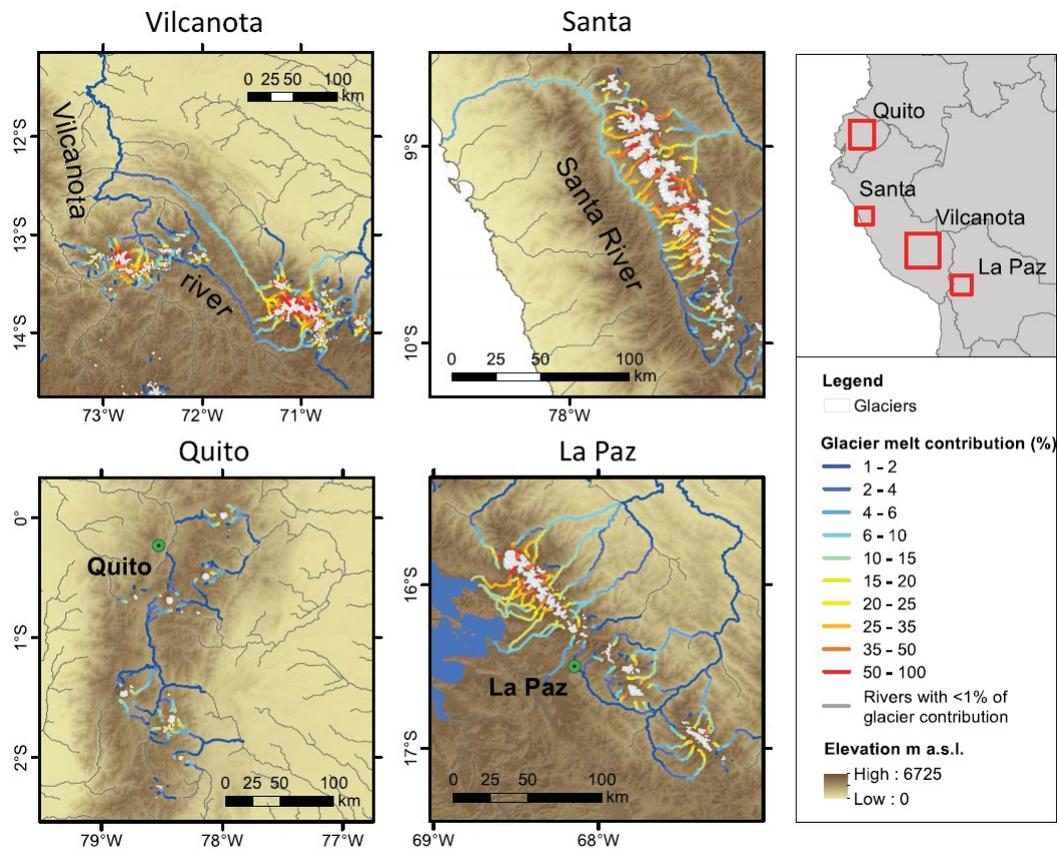


Abbildung 4: Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss in den Regionen Vilcanota, Santa, Quito, und La Paz, während eines meteorologisch normalen Jahres (Buytaert et al. 2017: 5).

Abhängig von meteorologischen Bedingungen und der Lage von Ortschaften, kann die Gletscherschmelze jedoch eine entscheidende Rolle als Wasserlieferant spielen. Für die Analyse des Beitrags der Gletscherschmelze zur anthropogenen Wassernutzung, wurde die Wassernutzung in die Bereiche Bewässerung (irrigation), Wasserkraft (hydropower) und Hausgebrauch (domestic use) unterteilt.

Tabelle 1 zeigt die geschätzte Wassernutzung mit einem hohen Gletscherschmelzanteil; definiert als > 25 % Gletscherschmelzanteil. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Abhängigkeit von Wasserressourcen mit hohem Gletscherschmelzwasseranteil in einem meteorologisch normalen Jahr relativ gering ist (siehe Tabelle 1). Die Abhängigkeit vom Gletscherabfluss nimmt jedoch unter Trockenheitsbedingungen (Dürre) deutlich zu, insbesondere während des

monatlichen Maximums eines Dürrejahres (siehe Tabelle 1) (Buytaert et al. 2017: 4, 6).

**Tabelle 1: Wassernutzung mit hohem Gletscherschmelzwasser-anteil (>25%) in Ecuador, Peru, und Bolivien, während meteorologisch normalen und trockenen Bedingungen (Dürre) (Buytaert et al. 2017: 6).**

	Domestic users	Irrigated area (km <sup>2</sup> )	Hydropower (MW)
Annual average (normal year)	391 000 [67 500–1 530 000]	398.2 [79.6–632.7]	11 [0–298]
Monthly maximum (normal year)	2 320 000 [1 830 000–3 170 000]	1231.0 [782.6–1921.9]	582 [308–673]
Average annual (drought year)	626 000 [180 000–1 590 000]	546.0 [397.5–794.3]	275 [264–308]
Monthly maximum (drought year)	3 920 000 [3 050 000–5 040 000]	2096.5 [1857.3–2452.4]	732 [308–762]

Die Studien von Rabatel et al. (2013), Huss & Hock (2018), Baraer et al. (2012), Corripio et al. (2008), Halla et al. (2021), Soruco et al. (2015) und Buytaert et al. (2017) zeigten Veränderungen des Abflusses und der Wasserverfügbarkeit für verschiedene Komponenten der Kryosphäre der Anden. Darüber hinaus wurde die Bedeutung des Beitrags der Gletscherschmelze zum Abfluss, insbesondere während der Trockenzeit oder in Dürrejahren, für verschiedene Andeneinzugsgebiete aufgezeigt.

## 5. Fazit

In dieser Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen Kryosphäre und Wasserkreislauf dargelegt. Die Kryosphäre ist ein wichtiger Faktor für den Flussabfluss, insbesondere auf saisonaler Ebene (Huss & Hock 2018: 1). Diese Funktion ist in den meisten Fällen in Gebieten, die relativ nahe an Gletschern liegen, von höherer Bedeutung. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei Trockenheit auch flussabwärts gelegene Regionen in stärkerem Maße vom Beitrag der Gletscherschmelze abhängen können (Schoolmeester et al. 2018: 58). Zusammen mit dem Klimawandel und einer degradierenden Kryosphäre ist es von zentraler Bedeutung, die zukünftige Entwicklung verschiedener Komponenten der Kryosphäre und ihre Rolle bei der Freisetzung von Süßwasser zu verstehen. So liegen

beispielsweise in klimatisch vulnerablen Gebieten oft keine Bestandsaufnahmen von Blockgletschern vor, obwohl diese in Zukunft zu bedeutenden Süßwasserquellen werden könnten (Jones et al. 2019:84; Halla et al. 2021: 1208). Darüber hinaus ist es von großer Bedeutung, Strategien zur Bewältigung der (zukünftigen) Herausforderungen der Wassersicherheit zu entwickeln. Dazu gehören u.a. die Verbesserung der natürlichen Wasserspeicher in Ökosystemen, die Implementierung einfacher und effektiver Wassergewinnungssysteme, die Verbesserung der Wassereffizienz und -versorgung etc. (Schoolmeester et al. 2018: 62-64). Die zukünftige Entwicklung der Kryosphäre, insbesondere der Gletscher und der Schneedecke, hängt stark mit der Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit von Süßwasserressourcen zusammen (Mark et al. 2015: 184).

## 6. Literaturverzeichnis

- Abbott, B.W., K. Bishop, J.P. Zarnetske, C. Minaudo, F.S. Chapin III, S. Krause, D.M. Hannah, L. Conner, D. Ellison, S.E. Godsey, S. Plont, J. Marçais, T. Kolbe, A. Huebner, R.J. Frei, T. Hampton, S. Gu, M. Buhman, S.S. Sayedi, O. Ursache, M. Chapin, K.D. Henderson, and G. Pinay (2019): Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. In: *Nature Geoscience*. 12. 533-540.
- Baraer, M., B.G. Mark, J.M. McKenzie, T. Condom, J. Bury, K.-I. Huh, C. Portocarrero, J. Gómez, and S. Rathay (2012): Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. In: *Journal of Glaciology*. 58 (207). 134-150.
- Bavay, M., T. Grünewald, and M. Lehning (2013): Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland. In: *Advances in Water Resources*. 55. 4-16.
- Besbes, M., J. Chahed, and A. Hamdane (2019): On the Water Security Concept: State of the Art. In: *National Water Security*. Springer, Cham. 31-55.
- Biskaborn, B.K., et al. (2019): Permafrost is warming at a global scale. In: *Nature Communications*. 10 (264). 1-11.
- Bormann, K.J., R.D. Brown, C. Derksen, and T.H. Painter (2018): Estimating snow-cover trends from space. In: *Nature Climate Change*. 8. 924-928.
- Brown, M.E., H. Ouyang, S. Habib, B. Shrestha, M. Shrestha, P. Panday, M. Tzortziou, F. Policelli, G. Artan, A. Giriraj, S.R. Bajracharya, and A. Racoviteanu (2010): HIMALA: Climate Impacts on Glaciers, Snow, and Hydrology in the Himalayan Region. In: *Mountain Research and Development (MRD)*. 30 (4). 401-404.
- Buytaert, W., S. Moulds, L. Acosta, B. De Bièvre, C. Olmos, M. Villacis, C. Tovar, and K.M.J. Verbist (2017): Glacier melt content of water use in the tropical Andes. In: *Environmental Research Letters*. 12 (11). 1-8.
- Corripio, J.G., R.S. Purves, and A. Rivera (2008): Modelling climate-change impacts on mountain glaciers and water resources in the Central Dry Andes. In: B. Orlove, E. Wiegandt, B.H. Luckman (eds.): *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*. 126-135.
- Ding, Y., S. Zhang, R. Chen, T. Han, H. Han, J. Wu, X. Li, Q. Zhao, D. Shangguan, Y. Yang, J. Liu, S. Wang, J. Qin, and Y. Chang (2020): Hydrological Basis and Discipline System of Cryohydrology: From a Perspective of Cryospheric Science. In: *Frontiers in Earth Science*. 8. 1-12.
- Grey, D. and C.W. Sadoff (2007): Sink or swim? Water security for growth and development. In: *Water policy*. 9 (6). 545-571.
- Halla, C., J.H. Blöthe, C. Tapia Baldis, D. Trombotto Liaudat, C. Hilbich, C. Hauck, and L. Schrott (2021): Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina. In: *The Cryosphere*. 15. 1187-1213
- Hartmann, D.L. (2016): Chapter 5 - The Hydrologic Cycle. In: D.L. Hartmann (ed.): *Global Physical Climatology*. 2. Elsevier. 131-157.
- Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Käab, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer (2019): High Mountain Areas. In: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N.M. Weyer (eds.): *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. In press. 131-202.

- Huss, M. and R. Hock (2018): Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. In: *Nature Climate Change*. 8. 1-8.
- Jones, D.B., S. Harrison, K. Anderson, and W.B. Whalley (2019): Rock glaciers and mountain hydrology: A review. In: *Earth-Science Reviews*. 193. 66-90.
- Kaser, G., M. Großhauser, and B. Marzeion (2010): Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 107 (47). 20223-20227.
- Mark, B.G., M. Baraer, A. Fernandez, W. Immerzeel, R.D. Moore, and R. Weingartner (2015): Glaciers as water resources. In: C. Huggel, M. Carey, J.J. Clague and A. Kääb (eds.): *The High-Mountain Cryosphere*. Cambridge University Press. 184-203.
- Milner, A.M., K. Khamis, T.J. Battin, J.E. Brittain, N.E. Barrand, L. Füreder, S. Cauvy-Fraunié, G.M. Gíslason, D. Jacobsen, D.M. Hannah, A.J. Hodson, E. Hood, V. Lencioni, J.S. Ólafsson, C.T. Robinson, M. Tranter, and L.E. Brown (2017): Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 114 (37). 9770-9778.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Caceres, J.-L. Ceballos, M. Vuille, J.-E. Sicart, and C. Huggel (2013): Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. In: *The Cryosphere*. 7 (1). 81-102.
- Schoolmeester, T., K.S. Johansen, B. Alfthan, E. Baker, M. Hesping, and K. Verbist (2018): *The Andean Glacier and Water Atlas - The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. UNESCO and GRID-Arendal.
- Soruco, A., C. Vincent, A. Rabatel, B. Francou, E. Thibert, J.E. Sicart, and T. Condom (2015): Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16° S). In: *Annals of Glaciology*. 56 (70). 147-154.
- UNESCO, UN-Water (2020): *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*, Paris, UNESCO.
- Van Tiel, M., A.F. Van Loon, J. Seibert, and K. Stahl (2021): Hydrological response to warm and dry weather: do glaciers compensate? In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. [preprint]. 1-32