

Wasser in und aus den Alpen: Hydrologie im Wandel

Kerstin Stahl

Zusammenfassung

Hochgebirge sind Quellgebiete für Flüsse. In den Alpen gleicht die sommerliche Schnee- und Gletscherschmelze den Wassermangel in heißen und trockenen Jahren aus. Im Rhein ist dies auch flussabwärts noch spürbar. Wie sich der Klimawandel auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen auswirkt und was dies für die Ober- und Unterlieger bedeutet, wurde mit hydrologischen Modellierungen bis zum Jahr 2100 unter Verwendung eines Klimaprojektionsensembles erforscht. Die Modellexperimente erlauben die Quantifizierung täglicher Anteile der Abflusskomponenten in den Nebenflüssen und entlang des Hauptstroms. Insgesamt ergeben die Simulationen, dass die Schnee- und Eiskomponenten abnehmen und die Regenkomponente im Abfluss die jahreszeitlichen Schwankungen in Zukunft stärker dominieren wird als in der Vergangenheit. Dies hat Auswirkungen auf saisonale Abflüsse und Extreme. Besonders deutlich ist die Auswirkung auf Niedrigwasser, saisonal und besonders flussabwärts, wenn am Ende des Jahrhunderts in heißen sommerlichen Dürrejahre keine Eisschmelze mehr zur Niedrigwasserstützung beiträgt. Deren Abnahme wird Restwassermengen, Energieproduktion, Schifffahrt und andere Nutzungen beeinflussen. Trotz der Unsicherheiten sind die prognostizierten Veränderungen substantiell und ein klares Mandat dafür, die Wassernutzungen bei Niedrigwasser zu überdenken.

Summary

Hydrological shifts in the Alps and their downstream influences

High mountains are the source regions of major rivers. In the Alps, the seasonal snow and glacier melt in summer compensates for a lack of water in hot and dry years. This effect is also evident along the entire course of the River Rhine. The impact of climate change on the streamflow components from rain, snow and glacier melt in the Rhine and its tributaries and what this means for upstream and downstream users was investigated with hydrological modelling up to the year 2100 using a set of climate projections (climate model ensemble). The modelling experiments allow the quantification of daily contributions of the different streamflow components in the tributaries and along the main stream. Overall, the simulations show that the snow and ice components will decrease and the rain component will dominate the seasonal fluctuations more strongly in the future than in the past. This has an impact on seasonal hydrological regimes and daily flow extremes. The impact on low flows is particularly clear, seasonally and especially downstream, when glacier melt no longer buffers low flows in hot summer drought years. Their decrease will influence residual flows, energy production, waterborne navigation and other uses. Despite the uncertainties, the projected changes are expected to be substantial and a clear mandate to reconsider water use strategies during periods of low flow.

Der Beitrag basiert auf einem von der Autorin überarbeiteten Transkript ihres Vortrags vom 25. März 2025 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ Prof. Dr. Kerstin Stahl, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Umwelthydrosysteme, Friedrichstraße 39, 79098 Freiburg; kerstin.stahl@hydro.uni-freiburg.de

Einführung

Im Wasserkreislauf stellen das Grundwasser, das Meerwasser und auch die Gletscher der Hochgebirge die Speicher mit der höchsten Aufenthaltszeit des Wassers dar. Hochgebirge sind Quellgebiete für Flüsse. Sie haben oft höhere Niederschläge, geringere Verdunstung und eine größere Abflussbildung im Vergleich zum Tiefland, liefern relativ »sauberes« Wasser und decken einen erhöhten Wasserbedarf im Sommer über das Schmelzwasser aus dem Schnee des Winters sowie aus dem Gletschereis. Weltweit ist ein großer Anteil der Bevölkerung vom Wasser der Gebirge abhängig (Viviroli et al. 2007, Immerzeel et al. 2019). Im Falle der Alpen sind es im Wesentlichen die großen Flusssysteme von Rhone, Rhein, Po und Donau, die das Wasser aus dem Gebirge in das Alpenvorland bringen (Abb. 1, Dahlmann et al. 2022). Ober- und Unterlieger in diesen Flusssystemen lassen sich in verschiedener Weise darstellen. Üblich ist eine Oberlieger-Unterlieger-Einteilung über die Distanz zur Mündung (Abb. 1), aber auch eine Einteilung gemäß dem menschlichen Fußabdruck wäre z. B. möglich, nach der die großen Städte und Bevölkerungsräume als Unterlieger gelten (Dahlmann et al. 2022).

Im Rahmen eines EU-Alpenrahmenprogramm-Projekts¹ wurden die bis 2022 dokumentierten Berichte über Folgen von Trockenheit an den Flusssystemen Rhein und Po zusammengestellt. Basierend auf dem Konzept des European Drought Impact Report Inventory (EDII) wurde diese aus Berichten und Medientexten in verschiedene Folgen-Kategorien kodiert (Stahl et al. 2016, Stephan et al. 2021). Die Auswertung zeigt, dass Folgen bei den Unterliegern, wo Wasser für viele Nutzungen essenziell ist, deutlich häufiger berichtet wurden (Abb. 2, Dahlmann et al. 2022). Im Folgenden werde ich am Beispiel des Rheins darstellen, wie sich der Klimawandel auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen auswirkt, wie sich diese Mischung in der nächsten Zeit verändern wird und was dies für die Ober- und Unterlieger bedeutet.

Veränderungen der Hydrologie und der Abflusskomponenten in der Zukunft

Das Abflussregime des Rheins kehrt sich von den Quellgebieten in der Schweiz, in denen es noch Gletscher gibt, bis zur Mündung in den Niederlanden beinahe um. In der Vergangenheit lag z. B. der maximale Abfluss an der Weissen Lüttschine, in die der Grindelwaldgletscher (Berner Oberland, Schweiz) entwässert, im Sommer. In Basel, wo der Rhein schiffbar wird, tritt das Sommermaximum früher auf und ist bereits deutlich abgeschwächt. In Lobith an der niederländischen Grenze liegt hingegen das Abflussminimum in den (Spät)sommermonaten (Abb. 3, Stahl et al. 2017). Das Abflussgeschehen wird im Rijkswaterstaat Water Management Centrum Nederland (WMCN) in Lelystad intensiv überwacht, um über ein hydrodynamisches-hydrologisches Vorhersagemodell rechtzeitig vor Niedrigwasser zu warnen.

Die Regimekurve im Oberlauf wird von der Schnee- und Gletscherschmelze dominiert, während im Niederrhein die Schnee- und Eisschmelze im Sommer nur einen sehr geringen Teil ausmacht (Abb. 3, Stahl et al. 2017). Dennoch kann in Jahren mit extremer Sommertrockenheit und folgendem Niedrigwasser der Eintrag von Schnee- und Gletscherschmelzwasser auch noch im Unterlauf relevant sein. Die Frage ist, wie stark dieser sommerliche Einfluss von Schnee- und Eisschmelze aus dem Oberlauf künftig im Unterlauf bei Trockenheit noch wirksam sein wird.

Da es keinen guten Wasser-Markierstoff für die einzelnen Abflusskomponenten gibt, sind wir für ihre Berechnung auf Modelle angewiesen. Zur Berechnung der täglichen Abflusskomponenten wurde deshalb im ASG-Rhein-Projekt² ein hydrologisches Modell mit einem Gletschermodule erstellt (Stahl et al. 2017). Kalibriert wurde dieses, mit täglichen meteorologischen Daten von 1974 bis 2019 als ‚Hindcast‘ angetriebene, Modell mit

¹ EU Interreg Alpine Space Programme, Projekt Alpine Drought Observatory (ADO), 2019–2022; <https://www.alpine-space.eu/project/ado/> [abgerufen 31.03.2025].

² Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels; ASG Rhein: Abflussanteile Schnee und Gletscher; <https://ihf-projektplattform.uni-freiburg.de/asgrhein> [abgerufen 31.03.2025].

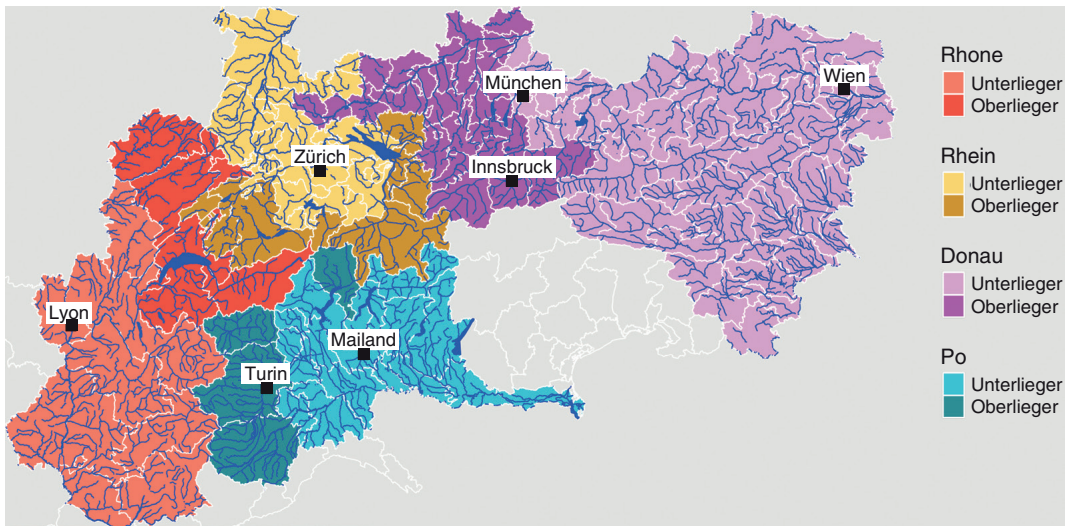


Abb. 1. Flusssysteme der Alpen (Rhône, Rhein, Donau, Po) und Einteilung in Unter- und Oberlieger der NUTS-3-Regionen (Kreise und kreisfreie Städte bzw. Provinzen, Kantone oder Gruppen von Gemeinden). – Dahlmann et al. (2022); (c) The Authors, CC BY 4.0.

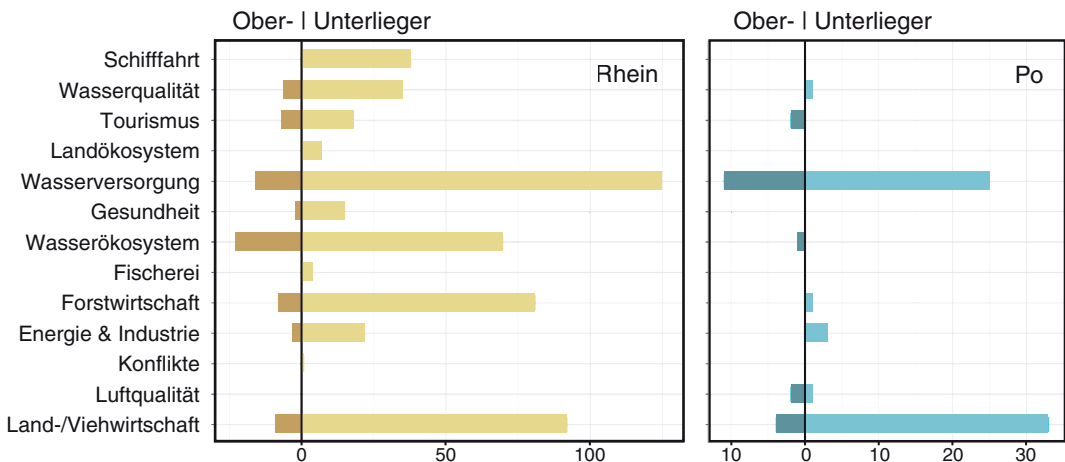


Abb. 2. Anzahl der Berichte über die Auswirkungen von Trockenheit in verschiedenen Bereichen von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft in den Einzugsgebieten von Rhein (links) und Po (rechts) für Ober- und Unterlieger (Einteilung nach der Höhenlage, vgl. Abb. 1). – Dahlmann et al. (2022); (c) The Authors, CC BY 4.0.

mehreren Kriterien: Beobachtungen der Schneedecke, des Abflusses sowie der Gletscherveränderung. Um die Hydrologie in die Zukunft zu projizieren, wurde das hydrologische Modell außerdem mit Zukunftsprojektionen aus mehreren Klimamodellen (RCP 8.5 Szenario) angetrieben, die zunächst einer multivariaten Biaskorrektur der meteorologischen Daten auf Standortebene unterzogen worden waren. Klimaszenario-

Simulationen für den Zeitraum 1974 bis 2100 erlaubten außerdem die Auswertung der langfristigen Entwicklung der Abflusskomponenten aufgrund des sukzessiven Gletscherrückgangs und die Zusammenfassung und den Vergleich verschiedener Abflusswerte für die nahe Zukunft (2031–2060) und die ferne Zukunft (2071–2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1981–2010) (Details s. Stahl et al. 2022).

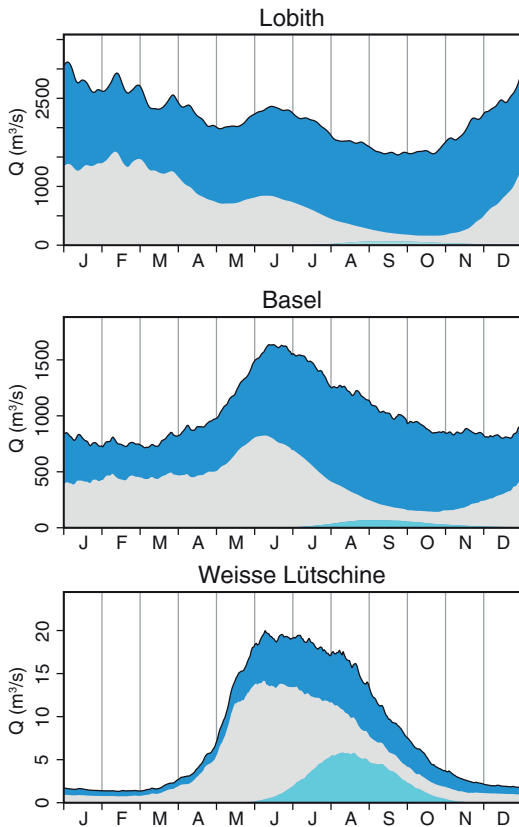


Abb. 3. Modellierte Anteile der Abflusskomponenten Gletscher- und Eisschmelze (■), Schneeschmelze (■) und Regen (■) im Quellgebiet des Rheins (Pegelstation Zweilütschinen, unten) und im Rhein bei Basel (Mitte) und Lobith (oben) im Jahresverlauf im Zeitraum 1901 (Mitte, oben) bzw. 1933 (unten) bis 2006. – Stahl et al. (2017).

Zukunftsentwicklung der Abflusskomponenten

Der simulierte gletscherbürtige Abfluss nimmt für die Zuflüsse des Alpenrheins sowie für Reuss und Limmat, und somit in der Summe auch für den Rhein bei Basel, bereits am Ende der Referenzperiode (1981–2010) ab. Für die Aare, deren Oberlauf die größten Gletscher enthält, bleibt der Beitrag in der Simulation bis 2040 noch relativ gleich. Sie wird damit also noch länger zu der Gletscherschmelzwasser-Komponente im Rhein beitragen als andere Nebenflüsse und für die nahe und ferne Zukunft den gletscherbürtigen Abfluss und damit den Anteil von Gletscherschmelzwasser im Rhein bis Basel dominieren

(Abb. 4,5). Insgesamt nimmt in der Simulation ab ca. 2050 der gletscherbürtige Abfluss relativ schnell ab. In der fernen Zukunft sinkt sein Anteil am Gesamtabfluss im Jahresdurchschnitt um über 80 % (Stahl et al. 2022). Die Unsicherheit ist bei solchen Modellierungen jedoch sehr hoch, da das hydrologische Modell sehr viele Annahmen hat und eine Auswahl mehrerer antreibender Klimamodelle hinter den Simulationen stehen. Die beträchtliche Abweichung zwischen Klimamodell-getriebener Referenz von der Beobachtungsdaten-getriebenen ‚Hindcast‘-Simulation (Abb. 5) zeigt auch, dass die Klimamodelle die Veränderungen in der jüngsten Vergangenheit sogar unterschätzen.

Der Beitrag der Schneeschmelze aus dem Quellgebiet zum Gesamtabfluss in Basel nimmt in den Modellrechnungen aufgrund der kürzeren Dauer der Schneedecke und der Schneespeicher ebenfalls ab. Ähnliches gilt für den schneebürtigen Beitrag aus den Mittelgebirgen nördlich von Basel. In Lobith am Niederrhein sinkt der schneebürtige Abflussanteil bis auf etwa die Hälfte in 2100 (Stahl et al. 2022).

Anders verhält sich die Situation für den modellierten regenbürtigen Anteil am Gesamtabfluss im Rhein. Dieser nimmt in der Szenario-Simulation im letzten Drittel des Jahrhunderts v. a. stromabwärts deutlich zu. Grund dafür sind die projizierten Niederschlagsentwicklungen aus den verwendeten Klimamodellen. Hier nehmen die Jahresniederschläge in der Schweiz zwar künftig eher ab, da eine projizierte Niederschlagsabnahme im Sommer nicht durch eine Niederschlagszunahme im Winter kompensiert wird. Im nördlichen Bereich des Rhein-Einzugsgebiets nehmen die Niederschläge dagegen zu, da dort die Zunahme der Winterniederschläge größer ist als die Abnahme der Sommerniederschläge (Stahl et al. 2022).

Saisonaler Abfluss und Niedrigwasser in der Zukunft

Für die vielfältige Nutzung des Rheinwassers ist der saisonale Abfluss von entscheidender Bedeutung. In der »fernen Zukunft« des Szenarios erhöht sich im Rhein bei Basel der Abfluss im Winter, im Sommer wird er dagegen geringer, da der Beitrag von Gletscher- und Schneeschmelze aus den Quellgebieten mit dem zunehmenden Rückgang der Gletscher sinkt. Der Wasserstand in den Sommermona-

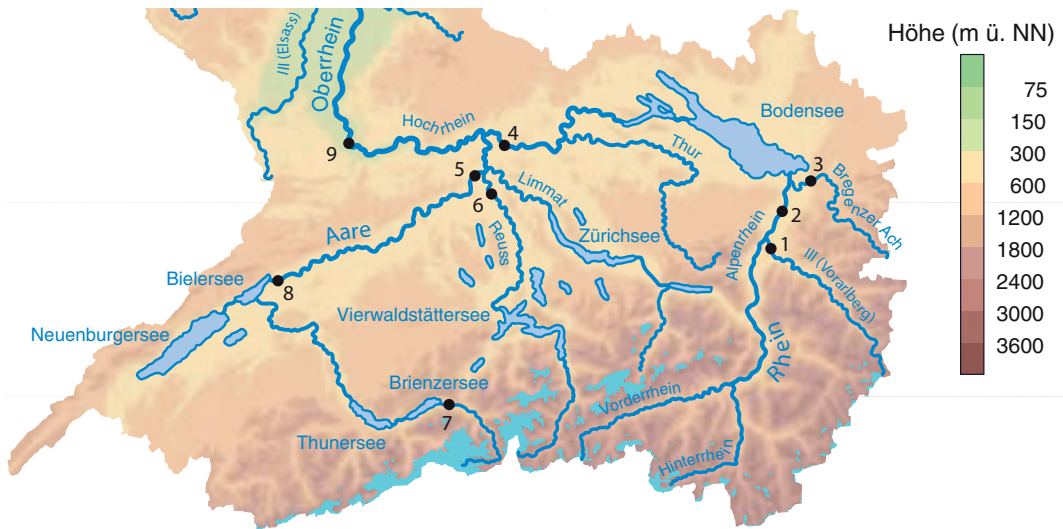


Abb. 4. Lage der Pegel-Messtellen und wichtigste Zuflüsse am Hoch- und Alpenrhein: 1: Gisingen (Ill), 2: Diepoldsau (Rhein), 3: Kennelbach (Bregenzer Ach), 4: Rekingen (Rhein), 5: Brugg (Aare), 6: Melingen (Reuss), 7: Brienzwiler (Aare), 8: Brügg-Aegerten (Aare), 9: Basel (Rhein).

Jahresmittel Q_{ice} (m³/s)

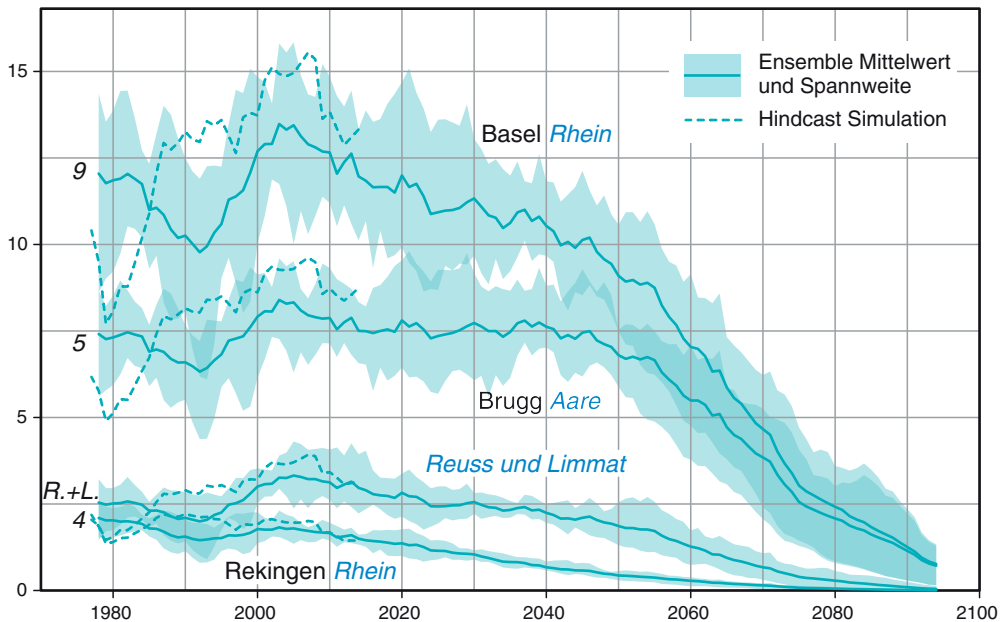


Abb. 5. Simulierte Abflussraten der Komponente Gletscher-/Eisschmelzwasser (Q_{ice} in m³/s; Jahresmittel, dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel) für verschiedene Teileinzugsgebiete des Rheins; gestrichelte Linie: Hindcast Simulation. Die Pegel repräsentieren die Hauptzuflüsse aus den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten (vgl. Abb. 4). – Stahl et al. (2022).

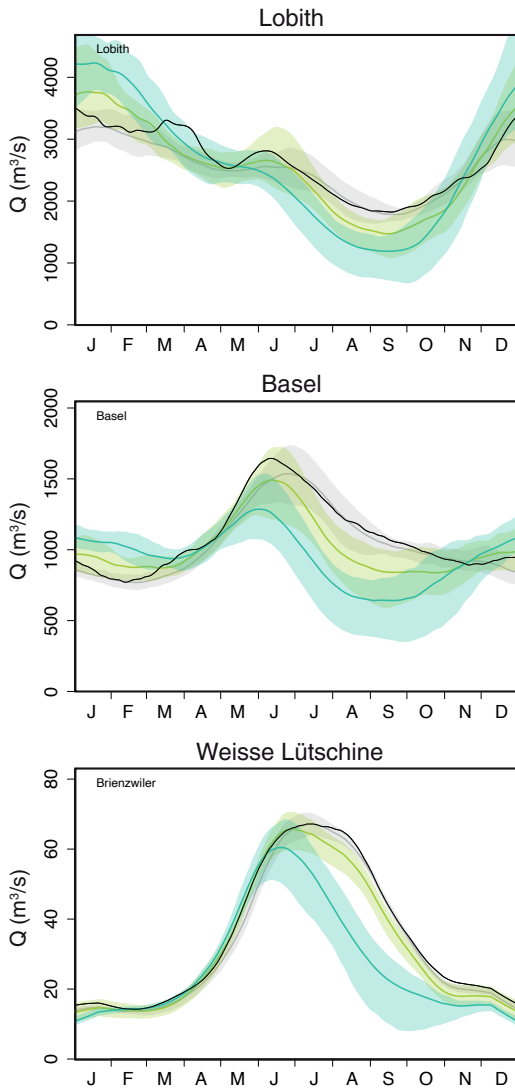


Abb. 6. Jahresverlauf des Abflussregimes (m^3/s ; Ensemble Mittelwert und Spannweite) im Einzugsgebiet der Aare bei Brienzwiler (unten) und im Rhein bei Basel (Mitte) und Lobith (oben) im Jahresverlauf und Veränderungen über die Zeit (■ Referenz: 1981–2010, ■ nahe Zukunft: 2031–2060, ■ ferne Zukunft: 2071–2100; simulierter mittlerer Abfluss je Kalendertag, dargestellt als 30-tägiges gleitendes Mittel. – Stahl et al. (2022).

ten wäre dann tiefer, die Niedrigwasserphase wird länger und vor allem verändert sich auch ihr Zeitraum (Abb. 6 Mitte, Stahl et al. 2022). Die typische Niedrigwasserzeit wird in Zukunft also auch im Alpenraum in den Spätsommer-Herbst verschoben (Abb. 6 unten) und somit stärker von Niederschlags-Abfluss-Prozessen abhängen als das bisherige Winter-Niedrigwasser, das v.a. von tiefen Temperaturen und als Schnee gespeichertem Niederschlag abhängt.

Die Modellierung früherer Extremjahre zeigt z. B. bei Lobith im »Jahrhundertsommer« 2003 einen maximalen täglichen Anteil des eisbürtigen Abflusses von ca. 12 % und im Trockenjahr 2018 immerhin von ca. 6 % (Tab. 1). Verlegt man in einem Modellexperiment als »Stresstest-Szenario« die meteorologischen Hitze und Trockenheitsbedingungen aus dem »Jahrhundertsommer« 2003 und dem Trockenjahr 2018 in die Zukunft, d. h. in einen Modellzustand, in dem die Gletschermasse bereits zurückgegangen ist, so sinken ihre Anteile am Tag des maximalen Eisbeitrags entsprechend (Tab. 1, Stahl et al. 2022, van Tiel et al. 2023). Bei einer Wiederholung dieser Wetterereignisse in der Zukunft hätte das Gletscherschmelzwasser in den Kopfeinzugsgebieten wie der Lutschine dann einen deutlich geringeren und in Basel und in Lobith fast keinen Einfluss mehr; d. h., Schmelzwasser kann in einem solchen Zukunftsszenario-Ereignis auch nicht mehr zu einer Linderung der Niedrigwassersituation am Unterlauf des Rheins beitragen.

Einflüsse auf die Schwellenwerte für die Wassernutzungen

Die Relevanz der Veränderungen wird deutlich, wenn man die vielfältigen beobachteten Auswirkungen von Niedrigwasser in den Dürre Jahren aus dem Zeitraum 2000 bis 2015 auf die Wassernutzungen entlang des Rheins betrachtet. Beispiele für solche Folgen sind in der oben erwähnten Dürrefolgen-Datenbank archiviert und mittlerweile auch als Teil des European Drought Observatory³ verfügbar. Für den Rhein wurden von Stahl et al. (2024) die Folgen beispielhaft zusammengestellt:

Süßwasserökosysteme:

- 2018 (Schweiz, Aarezufluss beim Rhein): Massives Fischsterben beeinträchtigte die

3 Drought Observatories of the Copernicus Emergency Management Service: The European and Global Drought Observatories; <https://drought.emergency.copernicus.eu> [abgerufen 31.03.25].

Äschenpopulation (*Thymallus thymallus*) aufgrund hoher Wassertemperaturen.

- 2003 (Frankreich, Elsass): 11.–13. August: Die Wassertemperatur des Rheins an der Station Lauterbourg überschritt 28 °C (ökologische Schwelle).
- 2003 (Rheinland-Pfalz): Ein spektakuläres Massensterben der Muschelart *Corbicula fluminea* aufgrund ungewöhnlich hoher Wassertemperaturen im Fluss.
- 2011 (Niederlande): Erhöhte Salinität des Oberflächenwassers aufgrund geringer Wasserführung.

Landwirtschaft und Viehzucht:

- 2003: Das Eindringen von Salzwasser an den Küsten der Niederlande hat die landwirtschaftlichen Dürrekosten um 10 % erhöht.

Energie und Industrie:

- 2015 (Schweiz): Die Stromerzeugung aus Wasserkraft an den drei Kraftwerken Rheinfelden, Augst/Wyhlen und Laufenburg wurde aufgrund des niedrigen Wasserstands im Rhein auf die Hälfte reduziert.
- 2018 (Frankreich, Elsass): Das Kernkraftwerk Fessenheim reduzierte die Stromproduktion aufgrund hoher Wassertemperaturen.
- 2003 (Baden-Württemberg): Das Kernkraftwerk Obrigheim musste abgeschaltet werden.

Öffentliche Wasserversorgung:

- 2003 (Niederlande): Die Entnahme von Trinkwasser aus dem Rhein wurde aufgrund von Salzwassereintrag ins Flusswasser gestoppt.

Schifffahrt:

- 2003 (Baden-Württemberg): Die geschätzten Verluste für die Schifffahrtsbranche aufgrund niedriger Wasserführung belaufen sich auf 111 Millionen Euro.
- 2011 (Hessen): Im Oktober ging die umgeschlagene Gütermenge in den hessischen Häfen aufgrund niedriger Wasserstände um etwa 11 % zurück.
- 2015 (Rheinland-Pfalz): Schiffe auf dem Rhein können nur 50 % ihrer Ladung transportieren, da der Wasserstand bei Kaub nur etwa 65 cm beträgt (Mittelwert: 2,24 m).

Menschliche Gesundheit und öffentliche Sicherheit:

- 2011 (Niederlande): Drei Torfdeiche in Friesland zeigten infolge der Dürre Risse.

Eine Veränderung üblicher Schwellenwerte für verschiedene Wassernutzungen wirkt sich in verschiedener Weise aus (Stahl et al. 2022). Die zur Erhaltung der ökologischen Funktionen von Gewässern benötigten Restwassermengen (Q_{347} -Werte)⁴ sind sogar im Quellgebiet in der Schweiz groß. In den Alpenflüssen wirkt sich vor allem die zeitliche Verlagerung des Niedrigwassers

4 Q_{347} : Abfluss eines Gewässers an einer bestimmten Stelle, welcher an 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird (d.h. an nur 18 Tagen im Jahr unterschritten wird). Entspricht Q_{95} , dem durchschnittlichen Durchfluss an einem beliebigen Tag, der voraussichtlich an 95 von 100 Tagen höher ist.

Tab. 1. Maximale Anteile der Eisschmelze (Q_{Eis}) in der Weissen Lüttschine und im Rhein bei Basel und Lobith im Sommer 2003 und 2018 (Berechnung gemäß Hindcast-Simulation und Stress-Test-Szenarien für die Zukunft). – Stahl et al. 2022.

		Datum	Q_{Eis} [%]			
			Hindcast	Stresstests		
				Heute (2018)	Nahe Zukunft (2031–2060)	Ferne Zukunft (2071–2100)
2003	Lobith	28.08.	12,1	11,0	9,2	1,1
	Basel	27.08.	18,6	17,5	14,5	2,2
	Weisse Lüttschine	13.08.	63,7	60,5	58,7	17,6
2018	Lobith	03.09.	6,4	–	5,5	0,6
	Basel	28.08.	10,9	–	9,1	1,2
	Weisse Lüttschine	21.09.	47,8	–	42,0	6,4



Abb. 7. Wassernutzung am Rhein: **a:** Stauwehr Märkt des Wasserkraftwerks Kembs, **b:** Schifffahrt auf dem Rhein während der Niedrigwassersituation im November 2015. – Fotos: a: Thomas Berwing, CC BY-SA 4.0; b: Jörg Uwe Belz, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

vom Winter in den Spätsommer (Abb. 6 unten) negativ für kälteliebende Fischarten wie die Forelle aus. Die Dauer des Niedrigwassers an der Pegelstation Brugg-Aegerten (Aare) nimmt in den Modellrechnungen in der nahen Zukunft um beinahe 20 %, in der fernen Zukunft um über 200 % zu.

Für die Wasserkraft sind die Schwankungen der Pegelstände wichtig (Abb. 6 Mitte), wie z. B. in dem Kraftwerk Kembs am Seitenkanal Canal d'Alsace in Frankreich, in dem der größte Teil des Rheinabflusses am Stauwehr Märkt unterhalb von Basel (Abb. 7a) geleitet wird. In dem Kanal wird er für die Wasserkraftnutzung, für die Schifffahrt und als Kühlwasser genutzt. In der Modellrechnung (Ensemble-Mittel) ergibt sich bei Basel noch eine geringe Abnahme des Wasserkraftpotenzials in der nahen Zukunft, aber eine deutlichere Abnahme um etwa 10 % für die ferne Zukunft.

Für die Schifffahrt am Mittelrhein ist vor allem die in der Zukunft längere Dauer des Niedrigwassers relevant, da unterhalb bestimmter Pegelstände eine Befahrung mit großer Ladung nur noch mit ökonomischen Nachteilen möglich ist (Abb. 7b). Ausgehend von aktuell geltenden Grenzwerten und Bedingungen im Flussbett könnte es in ferner Zukunft für durchschnittlich mehr als zwei Monate pro Jahr zu Schifffahrtseinschränkungen kommen.

In Lobith am Niederrhein ist die künftig wesentlich öfter auftretende Unterschreitung der Schwellenwerte (Abb. 6 oben) für das Warnzentrum in den Niederlanden von größter Bedeutung. Nach den Simulationen sind in der fernen Zukunft wesentlich längere Perioden mit Abflüssen unterhalb der Schwelle zu erwarten, bei der die Warnstufe 1 ausgelöst und eine Taskforce aktiv wird.

Fazit

In einer »Hydrologie im Wandel« wird die ausgleichende saisonale Gletscher- und Schneeschmelzkomponente im Abfluss fehlen. Niederschlagsabflussprozesse werden, ebenso wie Speicher, in Zukunft den Abfluss dominieren. Besonders nachteilig wird sich das Fehlen der Gletscherschmelze bei Sommertrockenheit auswirken.

Die Einflüsse auf die Vielfalt der Wassernutzungen sind groß. Für das Wasser in den Alpen wirkt sich die veränderte Saisonalität u.a. auf Ökologie und Wasserkraft aus. Für das Wasser aus den Alpen wird es verschärfte Niedrigwassersituationen bei steigender Nutzungskonkurrenz geben. Eine Priorisierung und Anpassung an die künftig zu erwartenden Abflussregimes ist erforderlich.

Literatur

- Dahlmann, H., R. Stephan & K. Stahl. 2022. Upstream-downstream asymmetries of drought impacts in major river basins of the European Alps. – *Frontiers in Water*, 4: 1061991. DOI: [10.3389/frwa.2022.1061991](https://doi.org/10.3389/frwa.2022.1061991)
- Immerzeel, W. W., A. F. Lutz, M. Andrade, A. Bahl, H. Biemans, T. Bolch, S. Hyde, S. Brumby, B. J. Davies, A. C. Elmore, A. Emmer, M. Feng, A. Fernández, U. Haritashya, J. S. Kargel, M. Koppes, P. D. A. Kraaijenbrink, A. V. Kulkarni, P. A. Mayewski, S. Nepal, P. Pacheco, T. H. Painter, F. Pellicciotti, H. Rajaram, S. Rupper, A. Sinisalo, A. B. Shrestha, D. Viviroli, Y. Wada, C. Xiao, T. Yao & J. E. M. Baillie. 2019. Importance and vulnerability of the world's water towers. – *Nature*, 577: 364–369. DOI: [10.1038/s41586-019-1822-y](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y)
- Stahl, K., I. Kohn, V. Blauhut, J. Urquijo, L. De Stefano, V. Acácio, S. Dias, J. H. Stagge, L. M. Tallaksen, E. Kampragou, A. F. Van Loon, L. J. Barker, L. A. Melsen, C. Bifulco, D. Musolino, A. de Carli, A. Massarutto, D. Assimacopoulos & H. A. J. Van Lanen. 2016. Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 801–819. DOI: [10.5194/nhess-16-801-2016](https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016)
- Stahl, K., M. Weiler, I. Kohn, D. Freudiger, J. Seibert, M. Vis, K. Gerlinger & M. Böhm. 2017. Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Synthesebericht. – Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, KHR-Bericht Nr. I-25, Lelystad, Niederlande, 20 S. <http://www.chr-khr.org/de/veroeffentlichungen> [abgerufen 31.03.2025]
- Stahl, K., M. Weiler, M. van Tiel, I. Kohn, A. Häsler, D. Freudiger, J. Seibert, K. Gerlinger & G. Moretti. 2022. Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen. Synthesebericht. – Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, KHR-Bericht Nr. I-28, Lelystad, Niederlande, 27 S. <http://www.chr-khr.org/de/veroeffentlichungen> [abgerufen 31.03.2025]
- Stahl, K., V. Blauhut, L. J. Barker & J. H. Stagge. 2024. Chapter 12 Drought Impacts. – In: Tallaksen, L. M. & H. A. J. Van Lanen (eds.): *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods für Streamflow and Groundwater*, 2nd Edition. – Elsevier: 563–594. DOI: [10.1016/B978-0-12-819082-1.00005-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819082-1.00005-9)
- Stephan, R., M. Erfurt, S. Terzi, M. Žun, B. Kristan, K. Haslinger & K. Stahl. 2021. An inventory of alpine drought impact reports to explore past droughts in a mountain region. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2485–2501. DOI: [10.5194/nhess-21-2485-2021](https://doi.org/10.5194/nhess-21-2485-2021)
- Van Tiel, M., M. Weiler, D. Freudiger, G. Moretti, I. Kohn, K. Gerlinger & K. Stahl. 2023. Melting alpine water towers aggravate downstream low flows: A stress-test storyline approach. – *Earth's Future*, 11: e2022EF003408. DOI: [10.1029/2022EF003408](https://doi.org/10.1029/2022EF003408)
- Viviroli, D., H. H. Dürr, B. Messerli, M. Meybeck & R. Weingartner. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: typology, mapping, and global significance. – *Water Resources Research*, 43: W07447. DOI: [10.1029/2006WR005653](https://doi.org/10.1029/2006WR005653)

Diskussion

J. Geist: Sie hatten die Schwellenwerte angesprochen, die auch für die Ökologie von entscheidender Bedeutung sind. Die Wassertemperaturen und damit einhergehend die Löslichkeit von Sauerstoff ist für Gewässerorganismen von zentraler Bedeutung. Können Sie etwas dazu sagen, wie stark die zeitlichen Veränderungen und auch die veränderten Wassermengen auf kritische Wassertemperaturen durchschlagen?

K. Stahl: Das haben wir im Rahmen der vorgestellten Studie nicht analysiert. Aber ich würde natürlich vermuten, dass es sich um ein doppeltes Feedback-Problem handelt. Die Verlagerung von Niedrigwasser vom Winter in den Sommer und die künftige Temperaturerhöhung plus weniger Wasser führen zu einer Verstärkung der Effekte. Wir haben ja bereits viele Probleme in den letzten Jahren bei hohen Temperaturen gesehen.

J. Geist: An Gewässern wie dem Inn sieht man das Umgekehrte, was man laienhaft vom Klimawandel erwarten würde: Durch das starke Abschmelzen der Gletscher hat er deutlich kühlere Temperaturen und einige Fischarten, gerade im Jungfischstadium, haben dadurch Probleme. In der Restaurierung muss man daher versuchen, wärmere Bereiche bereitzustellen. Aber das wird wahrscheinlich wieder komplett kippen, wenn die Gletschermassen weiter abnehmen.

J. Kollmann: Das Schmelzwasser der Gletscher enthält sehr viele Trübstoffe, was man z.B. an der milchig-grauen Farbe des Inns gut sieht. Wie werden sich die Trübstoffe bzw. die Wasserqualität in den kommenden Jahrzehnten verändern? Und wie wirkt sich dies wiederum auf die Temperatur und andere Umweltfaktoren der im Wasser lebenden Organismen aus?

K. Stahl: Auch das haben wir leider nicht mehr untersuchen können. Es wäre aber sehr spannend und man könnte es sicher noch an die Modelle ankoppeln. Ich denke, auch hier sind es zwei Faktoren: Der Gletscher schmilzt und sehr viel mehr Sediment wird bereitgestellt. Das heißt, in den Oberläufen könnte es mehr Pulse geben, die für Fische problematisch sind.

Im Unterlauf könnte ich mir insgesamt vorstellen, dass die Sedimente in Seen oder anderen Sedimentfallen hängen bleiben. Am Rhein ist es so, dass alles flussabwärts der großen Seen wie dem Bodensee, Vierwaldstättersee, Bielersee, etc. von diesen beeinflusst ist. Aber wo keine Seen sind, kann man sicher noch eine Zeitlang mit großen Sedimentpulsen rechnen.

E. Grill: Inwieweit spielt die Wasserentnahme, vor allem durch Landwirtschaft, Kommunen und Industrie eine Rolle? Ist sie relevant für die künftigen Abflussgeschehen?

K. Stahl: Zunehmende multiple Nutzungen sind derzeit ein großes Thema. Die landwirtschaftliche Bewässerung hat in den letzten Jahren extrem zugenommen. Ich denke, da werden noch stärkere Konkurrenzen zu Tage kommen. Wir haben dies in zwei Masterarbeiten in Baden-Württemberg schon genauer untersucht. Die bereits bestehenden Wasserkonflikte sind deutlich zu sehen. Das bezieht sich nicht nur auf die großen Einzugsgebiete, die aus den Alpen kommen, sondern das ist eigentlich überall der Fall.

T. Hipp: Neben den Alpen als Reservoir mit Schnee und den noch vorhandenen Gletschern hat der Alpenverein als Naturschutzverband auch die Landschaft und Ökologie in den Einzugsgebieten im Blick. Besteht Gefahr, dass in Zukunft mehr Staudämme und Reservoirs gebaut werden müssen, um die Wassersicherheit zu garantieren? Hat die Wasserrückhaltung tatsächlich so viel Potenzial, dass man sie nutzen muss, oder ist sie nur ein Tropfen auf dem heißen Stein? Das heißt, brauchen wir tatsächlich Speicherkraftwerke und Rückhaltebecken für die Wasserversorgung?

K. Stahl: Ich kann bestätigen, dass bezüglich Wasserrückhalt auf einmal Diskussionen geführt werden, die vor zehn Jahren noch nicht oder nicht mehr geführt wurden, bis hin zu Überlegungen zu neuen Talsperren, auch weiter nördlich in Deutschland. Es ist eine sehr komplexe Thematik, bei der auch die Energiewirtschaft eine Rolle spielt. Größere Pumpspeicherkapazitäten wollen derzeit gerade alle, denke ich. Man muss die

Frage insgesamt betrachten und dazu wäre eine interdisziplinäre Diskussion wichtig. Eine Zahl, wie viel Wasser künftig fehlen wird, kann ich nicht liefern. Selbst die Frage, ob netto Wasser fehlt, ist bei den großen Unsicherheiten der Modelle unsicher. Es ist noch ungeklärt, ob es im Winter tatsächlich mehr Regen geben wird. Im Moment sagen dies viele Szenarien der Klimamodelle, aber zumindest bisher sehen wir es noch nicht unbedingt. Auch der Beitrag von Starkniederschlägen ist noch fraglich. Letztes Jahr hatten wir einen verhältnismäßig nassen Sommer. Ich persönlich würde denken, dass man einen Wassermangel im Moment noch durch besseres Management ausgleichen kann, vermutlich in allen Sektoren. Vielleicht wird man manche Dinge aufgeben müssen, aber im Vergleich zu anderen Regionen der Welt sind wir immer noch relativ luxuriös mit Wasser ausgestattet.

M. Krautblatter: Neben den Gletscher- und dem Schneespeicher gibt es noch Permafrost als kryosphärischen Speicher. Wilfried Haeberli hat vor etwa zehn Jahren eine Kurve erstellt, nach der die kryosphärischen Speicher heute bereits wichtiger sind als das sichtbare Eis. Gibt es Abschätzungen, wie viel Wasser aus den Permafrostspeichern dazukommt, wenn sie auftauen? Nach isotopischen Messungen im Ötztal und im Kaunertal sieht es aus, als ob schon mehr Wasser aus diesen unterirdischen Permafrostspeichern als aus den Gletschern kommt.

K. Stahl: Die Permafrostspeicher sind einer der vielen Faktoren, die wir in unseren Modellen nicht integriert haben, ebenso wie zum Beispiel die künftige Vegetationsentwicklung oder die künftige Entwicklung der wasserwirtschaftlichen Regulierung. Es handelt sich vielmehr um idealisierte Modellszenarien, die sehr viel vernachlässigen.

U. Strasser: Wirkt sich das Jahr 2022, das, wie wir heute schon gehört haben, am Vernagtferner so große Auswirkungen auf die Massenbilanz der Gletscher hatte,⁵ auch auffällig in den Abflussdaten am Rhein aus?

K. Stahl: Da 2022 gerade unser Projekt zu Ende ging, habe ich die Daten nicht mehr selbst ausgewertet. Hierzu gibt es von Marit van Tiel an der ETH Zürich eine Auswertung.⁶ Aber ich kann

bestätigen, dass 2022 aus Trockenheitssicht ein schlimmes Jahr war.

M. Huss: Ich kann ergänzen, dass 2022 rekordmäßig viel Wasser von den Gletschern kam, noch mehr als im Jahr 2003, aber doch nicht so viel mehr, wie die zusätzliche Schmelze implizieren würde. Der Verlust der Gletscherfläche über die letzten 20 Jahre hat sich doch schon stark ausgewirkt. Deshalb hat 2022 zusammen mit der Trockenheit stark zum Abfluss beigetragen, aber wir sehen langsam den Verlust der Pufferungsfähigkeit der Gletscher.

C. Mayer: Du hast am Anfang deines Vortrags erwähnt, dass die Aufenthaltszeit des Grundwassers im Wasserkreislauf sehr lang ist. Wie groß ist die Kompensationsfähigkeit des Grundwassers für den Abfluss?

K. Stahl: Das ist schwer zu beantworten. Wir hatten diese Diskussion letzte Woche bei einer Veranstaltung geführt und da meinten unsere Geologen, die sich unter anderem mit den eiszeitlichen Ablagerungen und pleistozänen Grundwässern beschäftigen, dass man nicht wirklich weiß, ob man diese Grundwässer, wenn man sie anbohrt, auch nachhaltig bewirtschaften kann. Bei den tiefen Grundwasserreserven gibt es noch sehr viel Forschungsbedarf. Wir sehen uns gerade den Rheinaquifer um Freiburg herum an, da er für die Wasserversorgung in Freiburg eine wichtige Rolle spielt, neben einem Grundwasserfördergebiet in einem Tal, das aus dem Schwarzwald kommt und das einen kleineren Aquifer hat. Mittlerweile reicht dieser kleine Aquifer nicht mehr, daher greift man verstärkt auf den Rheinaquifer zu unter der Annahme, dass er jedes Frühjahr immer wieder gut gefüllt wird.

-
- 5 Mayer, C. 2026. Schnee, Gletscher und Permafrost: Was macht das Hochgebirge aus? Einführung in das Rundgespräch. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen. Pfeil, Günding: 9–20.
 - 6 van Tiel, M., M. Huss, M. Zappa, T. Jonas & D. Farinotti. 2025. Swiss glacier mass loss during the 2022 drought: persistent streamflow contributions amid declining melt water volumes. – EGU sphere [preprint]. DOI: [10.5194/egusphere-2025-404](https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-404)

Das klappt im Moment noch, aber künftig sollte man die Auffüllung im Auge behalten. Und das ist nur eine kleine Wasserversorgung, andere wie zum Beispiel in Frankfurt machen das in größerem Stil.

M. Huss: Wird in den Modellen bei der Wassernutzung auch berücksichtigt und berechnet, wie viel Wasser saisonal in den Speicherwerken enthalten ist? Das verschiebt ja die Menge an Schnee- und Gletscherschmelzwasser um mehrere Monate.

K. Stahl: Für die Wassernutzungen haben wir nur die Schwellenwerte und die Ganglinien verwendet. Die saisonale Speicherung ist in der

Vergangenheit berücksichtigt, aber wir haben keine weiteren Veränderungen in der Seensteuerung und Speicherbewirtschaftung in der Zukunft berücksichtigt, da diese viele Annahmen erfordern würden. Die drei Abflusskomponenten werden im See nicht komplett durchmischt. Wenn man das mit Tracern machen würde, hätte man flussabwärts vom Bodensee oder auch vom Vierwaldstättersee ganzjährig konstante Komponenten, daher haben wir sie quasi »durchgeschoben«. Wir wollten ja den Effekt, der sich aus den Mengenänderungen ergibt, wissen und nicht den molekularen Anteil. Um für die Zukunft solche Effekte herausrechnen zu können, muss man in den Modellen etwas »tricksen«.