



Verbreitung von Carbonatgesteinen und Karstwasserressourcen im Alpenraum

Nico Goldscheider¹ · Julian Xanke² · Tanja Liesch¹

Eingegangen: 20. Dezember 2024 / Überarbeitet: 16. Juni 2025 / Angenommen: 17. Juni 2025
© The Author(s) 2025

Zusammenfassung

Grundwasserressourcen in alpinen Karstsystemen werden von vielen Städten und Gemeinden für die Trinkwasserversorgung genutzt und speisen vielfältige grundwasserabhängige Ökosysteme. Diese Studie quantifiziert erstmals die Verbreitung von Carbonatgesteinen und Karstwasserressourcen im Alpenraum. Rund 76.200 km² (40 %) der Alpen bestehen aus anstehenden Carbonatgesteinen. Die österreichischen Alpen zeigen die größte Carbonatgesteinsfläche (21.200 km²), während die französischen Alpen den höchsten Anteil aufweisen (51 %). Da die höchsten Gebirgsgruppen meist aus kristallinen Gesteinen bestehen, liegt nur ein relativ geringer Teil der Alpengletscher (10,7 %) in Karstgebieten. In den Alpen befinden sich einige der tiefsten und längsten Höhlen sowie eine der größten Karstwasserversorgungen (Wien) der Welt. Durch eine Kombination von Klimadaten und Karstkarte konnten die Grundwasserneubildung und nachhaltig verfügbaren Grundwasserressourcen abgeschätzt werden: Die langjährige (1991–2020) mittlere jährliche Neubildung in alpinen Karstgebieten beträgt rund 823 mm; dies entspricht erneuerbaren alpinen Karstwasserressourcen von etwa 57.500 Mio. Kubikmetern pro Jahr. Diese Daten bilden die Grundlage für eine verbesserte Bewirtschaftung der alpinen Karstwasserressourcen.

Schlüsselwörter Alpen · Karstaquifer · Karstquelle · Höhle · Gletscherschwund · Erneuerbare Wasserressourcen

Distribution of carbonate rocks and karst water resources in the European Alpine region

Abstract

Groundwater resources in alpine karst systems are used by many cities and communities for drinking water supply and feed diverse groundwater-dependent ecosystems. This study is the first to quantify the distribution of carbonate rocks and karst water resources in the European Alpine region. Around 76,000 km² (40%) of the Alps consist of exposed carbonate rocks. The Austrian Alps show the largest carbonate rock area (21,000 km²), while the French Alps have the highest proportion (51%). Since the highest mountain groups mostly consist of crystalline rocks, only a relatively small proportion of the Alpine glaciers (10.7%) are located in karst areas. The Alps are home to some of the deepest and longest caves as well as one of the largest karst water supplies (Vienna) in the world. Through a combination of climate data and the karst map, groundwater recharge and sustainably available groundwater resources could be estimated: the long-term (1991–2020) average annual recharge in the European Alpine karst areas is around 823 mm, corresponding to renewable Alpine karst water resources of about 57,500 million cubic meters per year. These data form the basis for improved management of Alpine karst water resources.

Keywords Alps · Karst aquifer · Karst spring · Cave · Glacier retreat · Renewable water resources

✉ Nico Goldscheider
nico.goldscheider@kit.edu

Julian Xanke
julian.xanke@tzw.de

Tanja Liesch
tanja.liesch@kit.edu

¹ Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abt. Hydrogeologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

² TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, Deutschland

Einleitung

Die Alpen gelten als Wasserschloss Europas. Mit zunehmender Höhe nehmen die Niederschläge zu, während die Temperaturen, die Vegetation und die Evapotranspiration abnehmen. Dies führt zu einer höheren Wasserverfügbarkeit für ober- und unterirdische Abflüsse (Viviroli und Weingartner 2004). Außerdem fällt ein mit der Höhe zunehmender Anteil der Niederschläge als Schnee und wird somit zwischengespeichert, wobei die Zwischenspeicherung auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen erfolgen kann: von Tagen bis Monaten in der normalen Schneedecke, bis hin zu Jahrzehnten, Jahrhunderten und teils sogar Jahrtausenden in den Alpengletschern (Goldscheider 2011). Diese Zwischenspeicherung führt zu einer teilweisen zeitlichen Entkopplung von Niederschlägen und Abflüssen, wobei die höchsten Abflüsse häufig zur Zeit der Schneeschmelze im Frühjahr und Frühsommer und lokal sogar im Hochsommer, zur Zeit der maximalen Gletscherschmelze stattfinden (Thibert et al. 2013; Hood und Hayashi 2015; Kurylyk und Hayashi 2017).

Mehrere große Flüsse haben ihren Ursprung in den Alpen, wie Rhône, Rhein, Po und Inn. Mit den Flüssen verbunden sind zahlreiche Seen unterschiedlichster Größe, die ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Zwischenspeicherung der Abflüsse und als Trinkwasserressourcen spielen (Hilberg et al. 2022). Der Genfer See (*Lac Léman*) ist mit rund 89 km³ oder 89.000 Mio. Kubikmetern (MCM) der größte Alpensee und hat eine überragende Bedeutung für die Wasserversorgung auf der schweizerischen und französischen Seite, mit einer Gesamtentnahme von etwa 80 MCM/Jahr (Ishiguro und Balvay 2003).

Weniger sichtbar und weniger gut erforscht sind die alpinen Grundwasservorkommen. Neben den Porengrundwasserleitern in den Tälern (Kessler et al. 2021) spielen die weitverbreiteten Karstgebiete eine herausragende Rolle für die Wasserversorgung. Die Trinkwasserversorgung der österreichischen Hauptstadt Wien mit ihren rund 2 Mio. Einwohnern ist hierfür das prominenteste Beispiel (Maloszewski et al. 2002; Plan et al. 2007). Das Wasser stammt aus drei alpinen Karstmassiven (Schneeberg, Rax, Hochschwab) und wird über zwei Hochquellenleitungen, die 1873 bzw. 1910 in Betrieb genommen wurden, in die Hauptstadt geleitet. Insgesamt stehen rund 70 Quellen zur Verfügung, von denen die Kläfferquelle mit einer mittleren Schüttung von etwa 5 m³/s die größte ist. Pro Tag werden im Mittel 375.000 m³ Wasser nach Wien geleitet, also 136 MCM/Jahr.

Weitere Beispiele sind Innsbruck und Hall in Tirol, die beide aus Karstwasserstollen im Karwendelgebirge versorgt werden. Auch viele kleinere Dörfer und Gemeinden beziehen ihr Trinkwasser aus Karstquellen, beispielsweise Lech, Österreich (Frank et al. 2018) oder Conthey, Schweiz (Gre-

maud et al. 2009). Wenn die genutzten Fassungen höher liegen als das Versorgungsgebiet, ist eine kombinierte Nutzung für die Wasserversorgung und Stromproduktion mittels Turbinen möglich, wie in den genannten Beispielen von Innsbruck, Hall und Conthey.

Eine wichtige Erscheinungsform von alpinen Karstsystemen sind Höhlen, von denen viele mit aktiven Fließsystemen und großen Quellen verbunden sind (Audra et al. 2007; Plan et al. 2009), wie das über 44 km lange Frauenmauer-Langstein-Höhlensystem im erwähnten Hochschwab-Massiv bei Wien. Etliche der tiefsten und längsten Höhlen der Welt befinden sich in den Alpen. Die hohe räumliche Konzentration von Höhlen in den Alpen ist nicht nur eine Folge der hydrogeologischen Bedingungen, sondern spiegelt auch den guten Forschungsstand durch aktive Höhlenforschung wider.

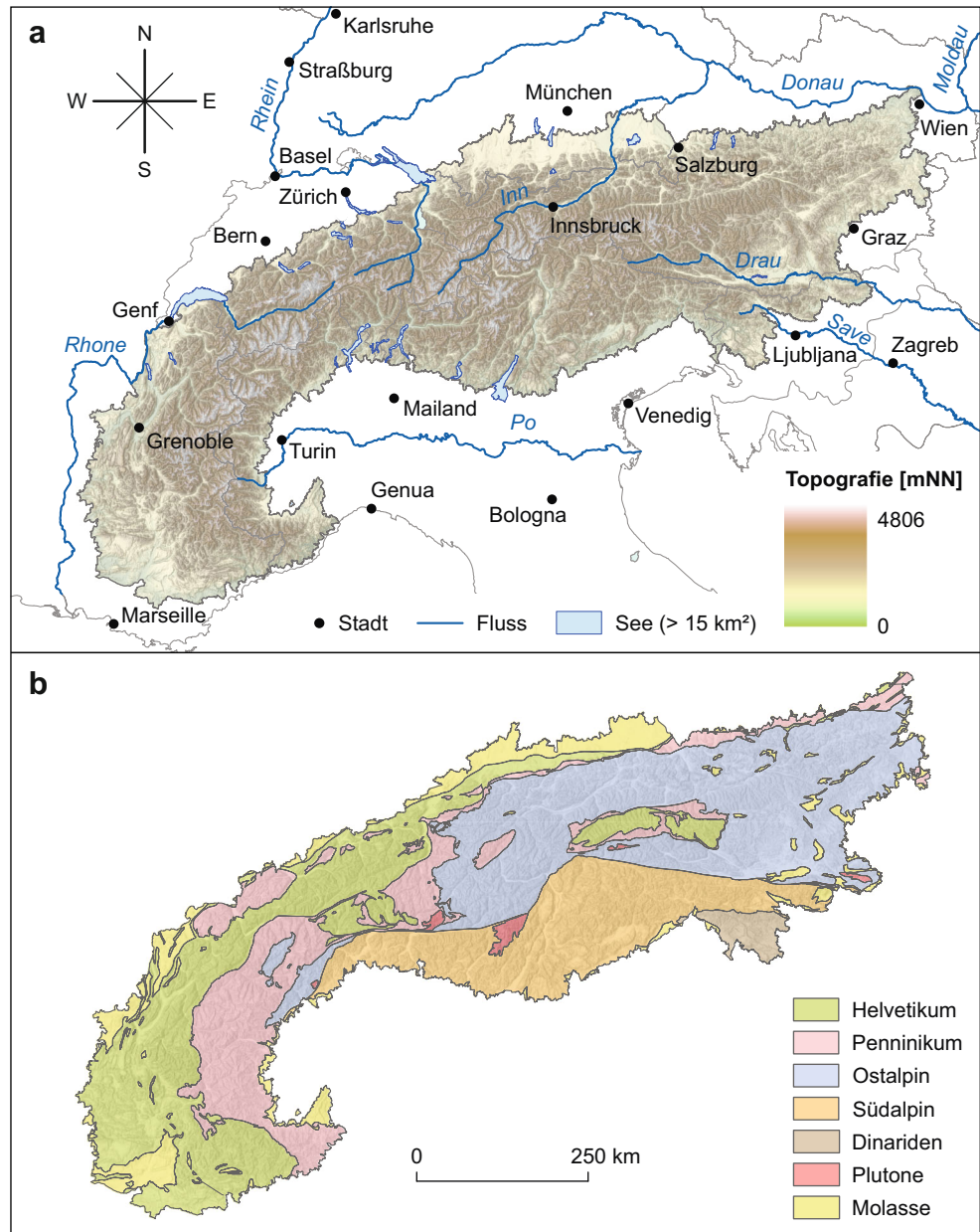
Alpine Karstsysteme speisen zahlreiche karstgrundwasserabhängige Ökosysteme (*karst groundwater dependent ecosystems*, KGDE), die bisher nicht alpenweit und systematisch erfasst und ausgewertet wurden. Eine rezente Studie der wichtigsten KGDE im erweiterten Mittelmeerraum nennt drei international bedeutende KGDE in den Alpen: die *Kalktuffquellen am Lappenbach*, den *Nassköhr Moorkomplex* (beide Österreich) sowie die *Buso della Rana-Höhle* (Italien), die aufgrund der dort vorkommenden endemischen Tierarten besonders wertvoll ist (Siegel et al. 2023).

Die Wasserressourcen im Alpenraum werden auf vielfältige Weise vom Klimawandel beeinflusst (Beniston 2005; Gobiet et al. 2014). Der rapide und flächendeckende Rückgang aller Alpengletscher, der nach dem Ende der Kleinen Eiszeit im 19. Jahrhundert begann, ist hierfür das sichtbarste Phänomen (Haeberli und Beniston 1998). Da beim Rückzug eines Gletschers im Jahresmittel das Abschmelzen die Akkumulation übersteigt, sind Zeiten des Gletscher-rückgangs durch verstärkte Abflüsse charakterisiert, v. a. in heißen Sommern. Langfristig, nach dem weitgehenden Verschwinden der Gletscher, ist jedoch gerade dann mit Wassermangel zu rechnen (Thibert et al. 2013; Huss und Fischer 2016). Die Einflüsse des Klimawandels auf die sonstigen alpinen Wasserressourcen sind deutlich komplexer, da steigende Temperaturen und erhöhte Evapotranspiration sowie sich ändernde zeitlich-räumliche Niederschlagsmuster teils gegenläufige und lokal sehr unterschiedliche Auswirkungen haben können (Hayashi 2020; Brussolo et al. 2022). Insgesamt wird in den Alpen mit einer Zunahme von „grünem Wasser“ (also Evapotranspiration) und einem Rückgang des „blauen Wassers“ (Abflüsse) gerechnet (Mastrotheodoros et al. 2020). Die Implikationen des Klimawandels in den Alpen fürs Wasserressourcenmanagement werden von Vanham (2012) diskutiert.

Die Beantwortung und Quantifizierung der damit verbundenen und vielfältigen Fragestellungen hinsichtlich der

Abb. 1 Topografischer und geologischer Überblick: **a** Grenze des Alpenraums gemäß Alpenkonvention, Alpenländer, Relief, Gewässernetz und wichtige Städte; **b** Geologischer Überblick mit den Baueinheiten der Alpen: Helvetikum, Penninikum, Ostalpin, Südalpin, Dinariden, Plutone und Molasse

Fig. 1 Topographical and geological overview: **a** Border of the European Alpine region according to the Alpine Convention, Alpine countries, relief, water network and important cities; **b** Geological overview with the structural units of the Alps: Helvetic, Penninic, Eastern Alpine, Southern Alpine, Dinarides, plutons and Molasse



Auswirkungen des Klimawandels auf die Karstwasserressourcen werden jedoch dadurch erschwert, dass bis heute kein umfassender Überblick der alpinen Karstgebiete vorliegt. Wir präsentieren erstmalig eine systematische Quantifizierung der Carbonatgesteine und Karstwasserressourcen im gesamten Alpenraum, mit folgenden Forschungsfragen:

1. Wie hoch ist die Fläche und der relative Anteil von anstehenden Carbonatgesteinen in den Alpen insgesamt sowie in den einzelnen Alpenländern und den geologischen Baueinheiten?
2. Was sind die wichtigsten und größten Karstquellen und Höhlen im Alpenraum und wie hängen diese miteinander zusammen?
3. Wie hoch ist der Anteil und die Fläche von Gletschern in alpinen Karstgebieten und wie wirkt sich der Gletscherschwund auf die Karstwasserressourcen aus?
4. Wie hoch ist die mittlere jährliche Grundwasserneubildung in den Karstgebieten der Alpen und welche Bandbreite von Werten ist in den verschiedenen Regionen zu beobachten?
5. Wie hoch sind demnach die mittleren jährlichen, nachhaltig verfügbaren Grundwasserressourcen in den alpinen Karstsystemen?

Die Analyse wird ergänzt durch Beispiele wichtiger Karstsysteme, Quellen und Höhlen. Der Alpenraum wird gemäß Alpenkonvention (Hasslacher 2017) abgegrenzt

(Abb. 1a) und der jeweilige Alpenanteil folgender sieben Länder analysiert: Frankreich (FR), Italien (IT), Schweiz (CH), Liechtenstein (LI), Österreich (AT), Deutschland (DE) und Slowenien (SLO); Monaco wird aufgrund seiner geringen Größe nicht separat betrachtet, sondern FR zugeordnet. Eine wichtige Datengrundlage ist die Mediterrane Karstaquifer-Karte (MEDKAM) im Maßstab 1:5.000.000 (Xanke et al. 2024). MEDKAM basiert auf der empirischen Erfahrung, dass fast alle Carbonatgesteine mit einem Anteil von Carbonatmineralen >75% zumindest zu einem gewissen Grad verkarstet sind und daher als Karstgrundwasserleiter (kurz: Karstaquifer) angesprochen werden können.

Geologisch-topografischer Überblick

Die Alpen bilden einen rund 1200 km langen und 150 und 250 km breiten Bogen vom Ligurischen Meer bis zum Panonischen Becken. Höchster Gipfel ist mit 4806 m der Mont Blanc. Die Alpen entstanden durch einengende Relativbewegungen zwischen der Eurasischen und der Afrikanischen Platte, wobei es zur Kollision des europäischen Kontinents mit der Adriatischen Platte und zur Subduktion dazwischenliegender Meeresbereiche kam. Geologisch sind die Alpen durch Falten und Überschiebungen gekennzeichnet, wobei große Gesteinspakete als Decken übereinander geschoben wurden. Die geologischen Baueinheiten der Alpen entsprechen paläogeografischen Ablagerungsräumen, die heute als Deckensysteme weite Gebiete der Alpen aufbauen. Diese Deckensysteme bestehen teils aus vielen Teildecken und beinhalten kristallines Grundgebirge und sedimentäres Deckgebirge. Die wichtigsten Baueinheiten sind das Helvetikum, das Penninikum, das Ostalpin, das Südalpin sowie die Molasse am Nord- und Südrand der Alpen (Pfiffner 2009). Der südöstlichste Teil der Alpen wird geologisch bereits zu den Dinariden gerechnet, gehört aber gemäß Alpenkonvention zu den Alpen; einzelne junge Plutone durchschlagen den Deckenbau (Abb. 1b). Im Folgenden werden diese Baueinheiten vereinfacht skizziert, mit Fokus auf den Carbonatgesteinen.

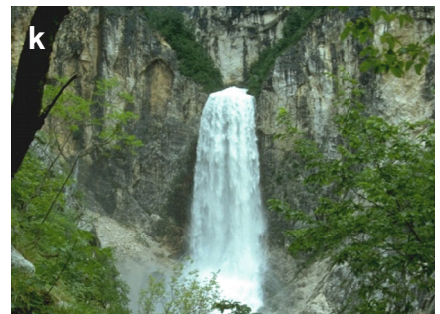
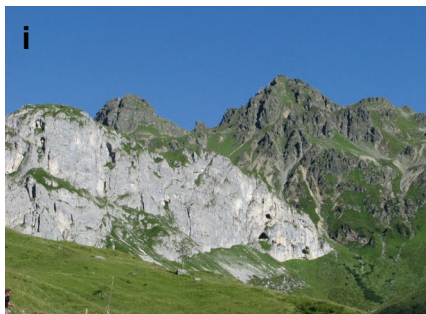
Das Helvetikum baut weite Teile der nördlichen Schweizer Alpen und der französischen Alpen auf, wo es als Dauphinois bezeichnet wird. Nach Osten setzt es sich nach Vorarlberg fort und ist weiter östlich nur noch als schmaler Streifen am Alpennordrand nachweisbar. Paläogeografisch entspricht es dem südlichen europäischen Kontinentalschelf (Pfiffner 2009). Im Deckgebirge des Helvetikums dominieren Sedimentgesteine aus Jura, Kreide und Paläogen, darunter prominente Carbonatgesteinsformationen wie der Schratenkalk (Französisch: Urgonien), der viele spektakuläre alpine Karstlandschaften aufbaut, beispielsweise Hochifen-Gottesacker (DE/AT, Abb. 2b) und in dem die

Abb. 2 Fotos ausgewählter Karstgebiete, Quellen und Wasserfassungen in den Alpen: **a** Eiger-Mönch-Jungfrau (CH), das höchste Carbonatgesteinsmassiv der Alpen; **b** das Karstgebiet Hochifen-Gottesacker (DE/AT); **c** die Schwarzwasserhöhle in diesem Gebiet fungiert bei Niedrigwasser als Schwinde; **d** bei Hochwasser wird sie zur Quelle; **e** das Zugspitzplatt im Wettersteingebirge (DE); **f** der Partnachursprung, der dieses Gebiet entwässert; **g** der Eingang der Koppenbrüllerhöhle im Dachsteingebiet (AT) ist zugleich ein großer Quellaustritt; **h** das Karstplateau der Sulzfluh (CH/AT) taucht nach Osten unter kristalline Gesteine ab; **i** hier ist die Überschiebung von Kristallin (*dunkel*) über den Sulzfluh-Kalk (*hell*) besonders gut zu erkennen; **j** rund 6,5 km weiter südöstlich ist der Kalkstein wieder aufgeschlossen; dort befindet sich die gefasste Fidelisquelle; **k** die Boka-Quelle in den Julischen Alpen (SLO); **l** die als Stollen gefasste Glarey-Quelle bei Conthey (CH); **m** der Karstwasserstollen von Hall in Tirol; **n** die Geislerspitzen als typisches Beispiel für ein Gebirgsmassiv in den Dolomiten (IT). (Fotos: N. Goldscheider)

Fig. 2 Photos of selected karst areas, springs and water catchments in the Alps: **a** Eiger-Mönch-Jungfrau (CH), the highest carbonate rock massif in the Alps; **b** the Hochifen-Gottesacker karst area (DE/AT); **c** the Schwarzwasser cave in this area acts as a sinkhole at low water levels; **d** it becomes a spring at high water levels; **e** the Zugspitze cirque in the Wetterstein Mountains (DE); **f** the Partnachursprung, which drains this area; **g** the entrance to the Koppenbrüller cave in the Dachstein area (AT) is also a large spring outlet; **h** the Sulzfluh karst plateau (CH/AT) plunges to the east beneath crystalline rocks; **i** here the over thrust of crystalline rock (*dark*) over the Sulzfluh limestone (*light*) is clearly visible; **j** around 6.5 km further to the southeast the limestone is exposed again; this is where the Fidelis spring is located; **k** the Boka spring in the Julian Alps (SLO); **l** the Glarey spring captured by a drainage gallery near Conthey (CH); **m** the karst water gallery of Hall in Tirol; **n** the Geisler peaks as a typical example of a mountain massif in the Dolomites (IT). (Photos: N. Goldscheider)

beiden größten Höhlen der Alpen entwickelt sind, das Hölloch und das Siebenhengste-Hohgant-Höhlensystem (CH) (Jeannin 2001; Häuselmann et al. 2002). Zum helvetischen Grundgebirge gehören u. a. das kristalline Aar- und Gotthard-Massiv. An dessen Nordrand ist ein relativ schmaler Streifen von Jura-Kalken erhalten, der nicht als tektonische Decke transportiert wurde. Dort befindet sich das höchste Carbonatgesteinsmassiv der Alpen: Eiger, Mönch und Jungfrau (Abb. 2a), wobei der Eiger (3967 m) bis zum Gipfel aus Kalkstein besteht, während Mönch (4110 m) und Jungfrau (4158 m) eine Kappe aus kristallinen Gesteinen des Aarmassivs aufweisen.

Das Penninikum ist aus den ozeanischen Becken und Schwellen zwischen dem europäischen Kontinent und der Adriatischen Platte hervorgegangen, wurde also überwiegend südlich des Helvetikums gebildet und während der Gebirgsbildung über dieses geschoben. Heute baut es weite Teile der italienischen Westalpen und der südlichen und östlichen Schweizer Alpen auf und ist in den österreichischen Zentralalpen als großes tektonisches Fenster aufgeschlossen (Pfiffner 2009). Im Penninikum dominieren Tiefseesedimente (z. B. Turbidite), die oft metamorph überprägt wurden. Auf den Schwellen kam es aber auch zu einer bedeutenden carbonatischen Sedimentation. Beispiel hierfür ist die Sulzfluh-Decke bzw. der Sulzfluhkalk (Oberjura),



der die Kalkgipfel des Rätikon aufbaut, mit der Sulzfluh (2818 m) als bekanntestem Karstplateau (Abb. 2h). Nach Osten taucht der helle Kalkstein unter die kristallinen Gesteine der ostalpinen Silvretta-Decke ab (Abb. 2i; Nagel 2006) und ist etwa 6,5 km weiter südöstlich im tektonischen Fenster von Gargellen wieder aufgeschlossen.

Die nächsthöhere Einheit ist das Ostalpin, das vom Nordrand der Adriatischen Platte stammt und während der alpinen Gebirgsbildung über das Penninikum geschoben wurde (wie die oben beschriebene Überschiebung der Silvretta-Decke über die Sulzfluh-Decke). Es besteht ebenfalls aus kristallinen Anteilen und mächtigen Sedimenten, überwiegend aus der Trias (Pfiffner 2009). Dabei dominieren teils sehr mächtige Carbonatgesteinsformationen, wie Hauptdolomit, Wettersteinkalk und Dachsteinkalk, die zahlreiche prominente Karstgebiete der nördlichen Kalkalpen aufbauen, wie das Wettersteingebirge (Abb. 2e) und das Dachsteinmassiv (Küfmann 2014; Lauber und Goldscheider 2014; Ortner und Kilian 2022; Rummler und Plan 2023).

Das Südalpin ist dem Ostalpin ähnlich und wird teils mit diesem zu einer Einheit zusammengefasst, wurde aber nicht über das Penninikum geschoben, sondern blieb auf der Adriatischen Platte. Vom Ostalpin ist es durch eine bedeutende Störungslinie getrennt und zeigt andere geologische Strukturen als dieses. Das Südalpin baut weite Teile der Südalpen auf, von den oberitalienischen Seen über die Dolomiten bis nach Slowenien (Pfiffner 2009). Auch hier dominieren Carbonatgesteine, die in den Dolomiten prominente Gebirgsmassive aufbauen, zu denen einerseits sehr steile Gipfel und Wände gehören (Abb. 2n), andererseits aber auch weitflächige Karstplateaus (Lucianetti et al. 2019). Der südliche Teil der slowenischen Alpen wird geologisch bereits zu den Dinariden gezählt.

Molasse bezeichnet die Sedimentgesteine, die im nördlichen und südlichen Vorlandbecken der Alpen abgelagert wurden. Weite Teile der Molasse sind relativ flach und gehören nicht zu den Alpen. Insbesondere am Nordrand der Alpen wurde die Molasse jedoch durch Falten und Überschiebungen deformiert und in den geologischen Bau der Alpen mit einbezogen (Faltenmolasse) (Pfiffner 2009). Die Molasse besteht überwiegend aus Sedimenten des Oligozäns und Miozäns, wobei am Alpenrand große Schuttfächer mit carbonatischer Zusammensetzung (Konglomerate der Nagelfluh) abgelagert wurden, die ober- und unterirdische Karsterscheinungen zeigen (Goeppert et al. 2011).

Verbreitung von Carbonatgesteinen

Um die Verbreitung von Carbonatgesteinen bzw. Karstaquifern im Alpenraum zu quantifizieren, wurde die Mediterrane Karstaquifer-Karte (MEDKAM), die digital und gedruckt im Maßstab 1:5.000.000 vorliegt, als Grundlage ver-

wendet (Xanke et al. 2024). Abb. 3a zeigt die Verbreitung von Karstaquifern und anderen hydrogeologischen Einheiten, die hier kurz erläutert werden.

Die meisten Carbonatgesteinen sind Sedimentgesteine, aber einige haben auch eine gewisse Metamorphose durchlaufen. Daher werden hier (wie auf MEDKAM) sedimentäre und metamorphe Carbonatgesteine zu einer hydrogeologischen Einheit zusammengefasst und als Karstaquifere bezeichnet. Der Grad der Verkarstung kann über einen weiten Bereich variieren, von überwiegend geklüfteten Dolomitgesteinen, wie dem triassischen Hauptdolomit der Ost- und Südalpinen Decken, in dem teils nur einzelne Klüfte durch Lösungsprozesse um wenige Zentimeter erweitert sind (Hilberg und Schneider 2011), bis hin zu extrem verkarsteten, hochreinen Kalksteinen, wie dem kreidezeitlichen Schratzenkalk des Helvetikums, in dem einige der größten Höhlen der Alpen entwickelt sind (Jeannin 2001; Häuselmann et al. 2003). Trotz dieser Unterschiede gibt es wichtige Gemeinsamkeiten, die die Zusammenfassung zu einer Einheit begründen: meist spärliche oder fehlende oberirdische Abflüsse, hohe Grundwasserneubildung, hohe Durchlässigkeiten und Fließgeschwindigkeiten. Auf MEDKAM werden auch Sulfatgesteine als eigene Einheit gezeigt, mit teils großen Vorkommen im südlichen Mittelmeerraum (Xanke et al. 2024). Auch in den Alpen gibt es Sulfatgesteine und damit verbundene Karsterscheinungen (Dolinen, Gipshöhlen, Quellen). Meist handelt es sich aber um kleinräumige Aufschlüsse, die in diesem Maßstab nicht darstellbar sind.

Alle anderen sedimentären (und vulkanischen) Formationen werden zu einer weiteren Einheit zusammengefasst, wobei nicht zwischen Lockersedimenten und Sedimentgesteinen unterschieden wird, da hier der Fokus auf Karstaquifern liegt. In dieser Einheit sind sehr unterschiedliche hydrogeologische Verhältnisse anzutreffen – von ergiebigen Porengrundwasserleitern aus Sand und Kies in den Alpentälern bis hin zu gering durchlässigen Mergeln und Tonsteinen. Diese Formationen liegen häufig im Verbund mit Carbonatgesteinen und überlagern diese; dort ist also teilweise mit überdeckten, tiefen Karstaquifern zu rechnen. Geologische Kontakte, an denen Carbonatgesteine unter andere sedimentäre Formationen abtauchen, sind auf der Karte mit einer Linie aus roten Dreiecken dargestellt (Abb. 3a). Ein Beispiel hierfür ist das Valensoles-Becken (FR). Dort befinden sich mesozoische Carbonatgesteine unter einer Überdeckung von inneralpiner Molasse (Pfiffner 2009).

Die dritte hydrogeologische Einheit umfasst alle anderen metamorphen und magmatischen Gesteine, also Granit, Gneis, Glimmerschiefer und ähnliche Gesteine. Hier gibt es meist nur lokale, wenig ergiebige Grundwasservorkommen. Diese Einheit bildet meist das kristalline Grundgebirge; dort wo diese Gesteine anstehen, sind meist keine Karstaquifere in der Tiefe vorhanden. Allerdings gibt es aufgrund der alpinen Deckentektonik prominente Ausnahmen, wie

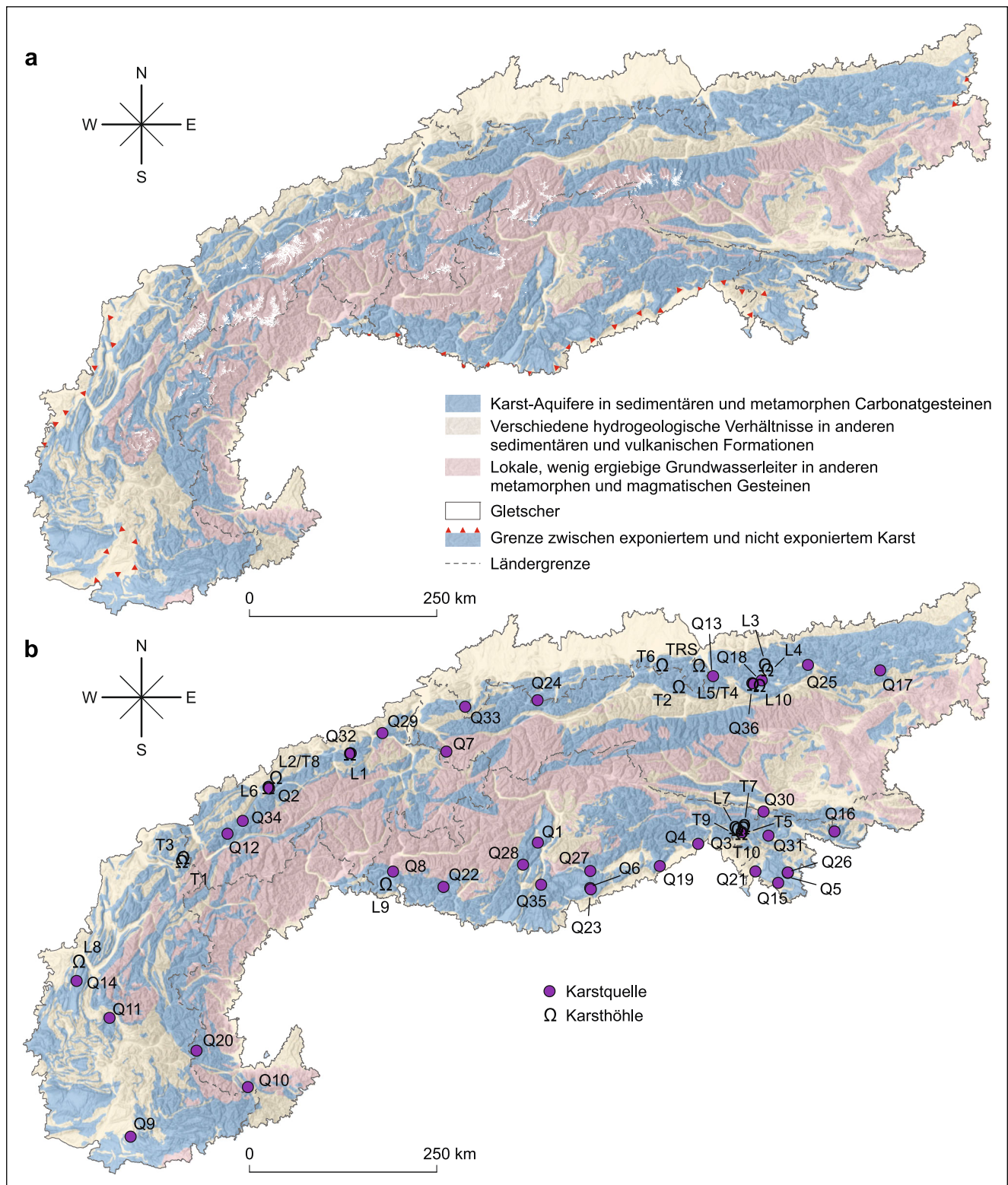


Abb. 3 Verbreitung von anstehenden Karstaquifern im Alpenraum, basierend auf der Mediterranen Karstaquifer-Karte (Xanke et al. 2024): **a** Hydrogeologische Karte mit Verbreitung von Karstaquifern und anderen Einheiten; **b** Lage ausgewählter Karstquellen und Höhlen (Details s. Tab. 2 und 3)

Fig. 3 Distribution of exposed karst aquifers in the European Alpine region, based on the Mediterranean Karst Aquifer Map (Xanke et al. 2024): **a** Hydrogeological map with distribution of karst aquifers and other units; **b** Location of selected karst springs and caves (details see Tables 2 and 3)

Tab. 1 Absolute Flächen und relative Anteile von anstehenden Carbonatgesteinen **a** im gesamten Alpenraum, **b** im Alpenanteil der sieben Alpenländer (ohne Monaco), **c** in den geologischen Baueinheiten.

Table 1 Absolute areas and relative proportions of exposed carbonate rocks **a** in the entire Alpine region, **b** in the Alpine part of the seven Alpine countries (excluding Monaco), **c** in the geological units.

Gebiet	Gesamtfläche [km ²]	Fläche Carbonatgesteine [km ²]	[%]
a Alpenraum	190.707	76.242	40
b Alpenländer			
Österreich	54.830	21.211	38,7
Frankreich	40.316	20.532	50,9
Italien	52.190	19.741	37,8
Schweiz	25.211	8637	34,3
Slowenien	6819	3290	48,3
Deutschland	11.204	2739	24,4
Liechtenstein	137	92	67
c Geologische Baueinheit			
Helvetikum	49.087	22.077	45
Penninikum	32.528	12.744	39,2
Ostalpin	57.186	20.832	36,4
Südalpin	30.750	17.268	56,2
Dinariden	3037	1378	45,4
Molasse	16.762	1914	11,4

z. B. die oben genannten Carbonatgesteine des Rätikons, die nach Osten unter die kristallinen Gesteine der Silvretta-Decke abtauchen und weiter südöstlich bei Gargellen wieder aufgeschlossen sind (Nagel 2006). Dort befindet sich die Fidelisquelle, eine zur Trinkwasserversorgung gefasste Karstquelle (Abb. 2h–j).

Anhand der Alpen-Karstkarte wurden die absoluten Flächen (in km²) und die Anteile (%) von anstehenden Carbonatgesteinen in den gesamten Alpen, den sieben Alpenländern und den geologischen Baueinheiten ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst und werden hier kurz diskutiert.

Der Alpenraum gemäß Alpenkonvention hat eine Gesamtfläche von 191.000 km² (Hasslacher 2017). Davon bestehen 76.200 km² aus anstehenden Carbonatgesteinen, was einem Anteil von 40 % entspricht. Die größten absoluten Flächen von Carbonatgesteinen entfallen auf Österreich (21.200 km²), Frankreich (20.500 km²) und Italien (19.700 km²). Der größte prozentuale Anteil ist (abgesehen vom kleinen Liechtenstein) in Frankreich zu beobachten (50,9 %), dicht gefolgt von Slowenien (48,3 %). Deutschland hat insgesamt nur einen recht geringen Anteil am Alpenraum, darunter eine Fläche von 2740 km² Carbonatgesteinen, was 24,4 % des deutschen Alpenraums entspricht.

Bei den geologischen Baueinheiten sind die größten absoluten Flächen von Carbonatgesteinen im Helvetikum bzw. Dauphinois zu finden (22.100 km²), dicht gefolgt von Ostal-

pin (20.800 km²) und Südalpin (17.300 km²), das mit 56,2 % auch den höchsten prozentualen Anteil aufweist. Derjenige Teil der Südalpen, der geologisch den Dinariden zugeordnet wird, zeigt 45,5 %, gefolgt von Helvetikum (45,0 %), Penninikum (39,2 %) und Ostalpin (36,4 %). Auch in der Molasse-Zone wurden 1910 km² bzw. 11,4 % Carbonatgesteine festgestellt – hierbei handelt es sich um die carbonatischen Konglomerate der Faltenmolasse. Der Flächenanteil von nicht exponierten Carbonatgesteinen kann mit den vorliegenden Daten und Methoden nicht bestimmt werden.

Karstquellen und Höhlen im Alpenraum

Trotz der ökologischen und hydrologischen Bedeutung von alpinen Karstquellen gibt es bisher keine systematische Zusammenstellung für den gesamten Alpenraum. In vielen Alpenländern werden die Daten hydrologischer Messstellen von den Umweltbehörden öffentlich zur Verfügung gestellt: Für Österreich vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK), für die Schweiz vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), für Frankreich vom Umweltministerium (MTE), für Slowenien vom nationalen Umweltamt (ARSO) und für Deutschland bzw. Bayern vom Landesamt für Umwelt (LfU). In Italien sind kaum kontinuierliche Messreihen öffentlich zugänglich zu finden.

Nur ein sehr geringer Teil dieser Messstellen sind jedoch alpine Karstquellen, und gerade an den größten und wichtigsten Quellen sind aufgrund ihrer schwierigen Zugänglichkeit oft keine kontinuierlichen Messungen möglich. Für Karstquellen (weltweit und im Mittelmeerraum) sind diverse Datensammlungen verfügbar (Goldscheider et al. 2020; Olarino et al. 2020; Xanke et al. 2024). Durch Auswertung der genannten Datenbanken und ergänzt durch eigene Recherchen, teils basierend auf Einzelmessungen, Schätzungen oder nicht-wissenschaftlichen Quellen (z. B. Berichte von Höhlenforschern, touristischen Websites etc.) kann hier erstmals eine Auswahl wichtiger Karstquellen im gesamten Alpenraum präsentiert werden (Q1–Q36 in Tab. 2 und Abb. 3b).

Hinsichtlich der Quellschüttung bei Niedrigwasser (Q_{NW}) sind die Fontaine L'Évêque (Q9), der Pießlingursprung (Q25) und Kamniška Bistrica (Q16) die größten Karstquellen der Alpen. Von der Boka-Quelle (Q3, Abb. 2k) werden Hochwasserschüttungen (Q_{HW}) von 40 m³/s und teils sogar 100 m³/s berichtet (diese basieren aber nicht auf Messungen und sind vermutlich überschätzt). Von drei weiteren Quellen in Slowenien (Q5, Q15, Q16) sind Maximalwerte von rund 60 m³/s zuverlässig dokumentiert. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Q_{NW} und Q_{HW} wäre Kamniška Bistrica die größte Karstquelle der Alpen; allerdings befindet sich der Messpunkt einige Kilometer stromabwärts der

Tab. 2 Ausgewählte Karstquellen im Alpenraum, mit Angabe von Niedrig- und Hochwasserschüttungen (QNW, QHW). * Nur Mittelwert verfügbar; *n. d.* keine Daten auffindbar. Zuverlässigkeit der Schüttungsdaten: o grobe Schätzungen, keine Messwerte; + unzuverlässig, teils nur Einzelmessungen; ++ mittel; +++ sehr gute Messreihen. Die Lage der Quellen ist auf der Karte in Abb. 3b verzeichnet.

Table 2 Selected karst springs in the Alpine region, with low and high water discharges (QNW, QHW). * Only mean value available; *n. d.* no discharge data available. Reliability of the discharge data: o only rough estimations, no measurements; + unreliable, partly only single measurements; ++ moderate; +++ very good data series. The location of the springs is shown on the map in Fig. 3b.

ID	Name	Land	Besonderheit	Q _{NW} [m ³ /s]	Q _{HW} [m ³ /s]	Zuverlässigkeit
Q1	Acqua Santa	IT	–	n. d.	n. d.	o
Q2	Bätterich	CH	Im Thuner See	n. d.	20	o
Q3	Boka	SLO	–	0	40	+
Q4	Cornino-Pakar group	IT	–	2,5*	n. d.	+
Q5	Divje jezero	SLO	–	n. d.	60	+
Q6	Elefante Bianco	IT	Wasserhöhle	2,2*	n. d.	+
Q7	Fidelisquelle	AT	–	0,08	0,6	+++
Q8	Fiume Latte	IT	–	0	n. d.	o
Q9	Fontaine L'Evêque	FR	–	2,3	19	++
Q10	Galleria Tenda	IT	–	0,3*	n. d.	+
Q11	Gillardes (Source des)	FR	–	0,5	60	++
Q12	Glarey-Quelle	CH	Trinkwasser	0,06	0,2	++
Q13	Gollinger Wasserfall	AT	–	0,03	42,4	++
Q14	Goule Noire	FR	–	0,5	34	++
Q15	Hubelj	SLO	–	0,03	60	++
Q16	Kamniška Bistrica	SLO	–	2,1	62,6	++
Q17	Kläfferquelle	AT	Trinkwasser	0,44	34	+++
Q18	Koppenbrüllerhöhle	AT	Wasserhöhle	0	10	o
Q19	Livenza group	IT	–	11,4*	n. d.	+
Q20	Maira group	IT	–	0,6*	n. d.	+
Q21	Mrzlek	SLO	–	0,5	40	++
Q22	Nossena	IT	–	2*	n. d.	+
Q23	Oliero group	IT	Wasserhöhlen	0,8	40	++
Q24	Partnachursprung	DE	–	0,5	8,8	++
Q25	Pießlingursprung	AT	–	2,2	40	++
Q26	Podroteja	SLO	–	0,2	n. d.	+
Q27	Resenzuola	IT	–	0,6*	n. d.	+
Q28	Ri Bianco	IT	–	0,8*	n. d.	+
Q29	Rinquelle	CH	–	0	30	+
Q30	Sava Dolinka, Zelenci	SLO	–	0,01	3,3	++
Q31	Savica	SLO	–	<1	13	++
Q32	Schlichenden Brünnen	CH	–	0,04	12	++
Q33	Schwarzwasserhöhle	AT	Estavelle	–0,5	4	+
Q34	Siebenbrünnen	CH	–	0,5	15	++
Q35	Spino	IT	–	1,3*	n. d.	+
Q36	Waldbachursprung	AT	–	0,01	19	++

Quelle, sodass die Daten durch kleinere seitliche Zuflüsse verfälscht werden.

Die Kläfferquelle (Q17) gehört ebenfalls zu den größten alpinen Karstquellen und leistet einen bedeutenden Anteil zur Trinkwasserversorgung von Wien (s. Einleitung). Auch die Karstwasserstollen von Innsbruck und Hall in Tirol (Abb. 2m) wurden im Bereich natürlicher Quellaustritte (Mühlauer und Bettelwurfquellen) errichtet, um eine stabi-

lere Schüttung und besseren Schutz vor Lawinen und Muren zu gewährleisten, ähnlich wie bei der bereits genannten Glarey-Quelle (Q12, Abb. 2l).

Der Partnachursprung im Wettersteingebirge (Q24, Abb. 2f) ist eine der größten Karstquellen im deutschen Alpenraum. Er entwässert das Zugspitzplatt (Abb. 2e) mit dem rapide schwindenden Schneeferner (Rappl et al. 2010). Viele alpine Karstquellen stehen in direktem Zusammen-

Tab. 3 Liste der 10 längsten (L1–L10) und der 10 tiefsten Höhlen (T1–T10) der Alpen, mit Angabe der vermessenen Länge und Tiefe sowie dem Rang dieser Höhle auf den Listen der längsten und tiefsten Höhlen der Welt (Daten aus Burger 2024). Die ID beschreibt den Rang der Höhlen innerhalb der Alpen und wird auch in Abb. 3b verwendet. Die Hirlatzhöhle (L5, T4) und das Siebenhengst-Hohgant-Höhle-System (L2, T8) gehören gleichzeitig zu beiden Gruppen. Die Riesending-Schachthöhle (TRS) ist die längste und tiefste Höhle Deutschlands, gehört aber nicht zu den 10 längsten oder tiefsten Höhlen der Alpen.

Table 3 List of the 10 longest (L1–L10) and the 10 deepest caves (T1–T10) in the Alps, indicating the measured length and depth, as well as the rank of this cave on the lists of the longest and deepest caves in the world (data from Burger 2024). The ID describes the rank of the caves within the Alps and is also used in Fig. 3b. The Hirlatzhöhle (L5, T4) and the Siebenhengst-Hohgant cave system (L2, T8) belong to both groups. Riesending cave (TRS) is the longest and deepest cave in Germany, but is not among the 10 longest or deepest caves in the Alps.

ID	Name	Land	Länge	Tiefe
Rang Alpen			[km]	[m]
L1	–	Hölloch	CH	208
L2	T8	Siebenhengste-Hohgant Höhlensystem	CH	164,5
L3	–	Schönberg-Höhle-System	AT	153,1
L4	–	Schwarzmooskogel-Höhle-System	AT	135,8
L5	T4	Hirlatzhöhle, Dachstein	AT	113,6
L6	–	Bärenschacht	CH	86
L7	–	Complesso del Monte Canin	IT	83,8
L8	–	Reseau de l'Alpe	FR	72,3
L9	–	Complesso della Valle del Nose	IT	68,3
L10	–	Dachstein Mammothöhle	AT	67,7
–	T1	Gouffre Mirola/Lucien Bouclier	FR	13
–	T2	Lamprechtsofen	AT	60
–	T3	Reseau Jean Bernard	FR	26,7
–	T5	Cehi 2	SLO	5,5
–	T6	Hochscharten-Höhle-System	AT	14,7
–	T7	Cave system of Crnlesko brezno	SLO	20,1
–	T9	Renejevo brezno, P4	SLO	12,3
–	T10	Mala Boka, BC4-System	SLO	11,9
–	TRS	Riesending-Schachthöhle	DE	22,6

hang mit großen Höhlen und sind daher im Abschnitt über Höhlen und in Tab. 3 dokumentiert. Weitere prominente Beispiele sind die 186 m tiefe Quellschöpfung Elefante Bianco (Q6) in den italienischen Alpen (Venetien) und die nahegelegenen Höhlen und Quellen von Oliero (Q23), die mit bis zu 40 m³/s zu den größten Karstquellen der Alpen gehören.

Estavellen sind Höhleneingänge oder Felsspalten, die in Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen als Schwinde oder Quelle fungieren können. Die größte Estavelle der Alpen befindet sich im Schwarzwassertal (AT) (Q33, Abb. 2c, d). Bei Niedrigwasser versinkt dort der Schwarzwasserbach im Höhleneingang (bis zu 500 l/s); bei Hochwasser wird er zur Quelle (bis zu 4 m³/s) (Goldscheider 2005). In den vergangenen Jahren hat sich eine neue Versickerungsstelle im Bachbett oberhalb gebildet, sodass sich die Dynamik der Estavelle aktuell verändert.

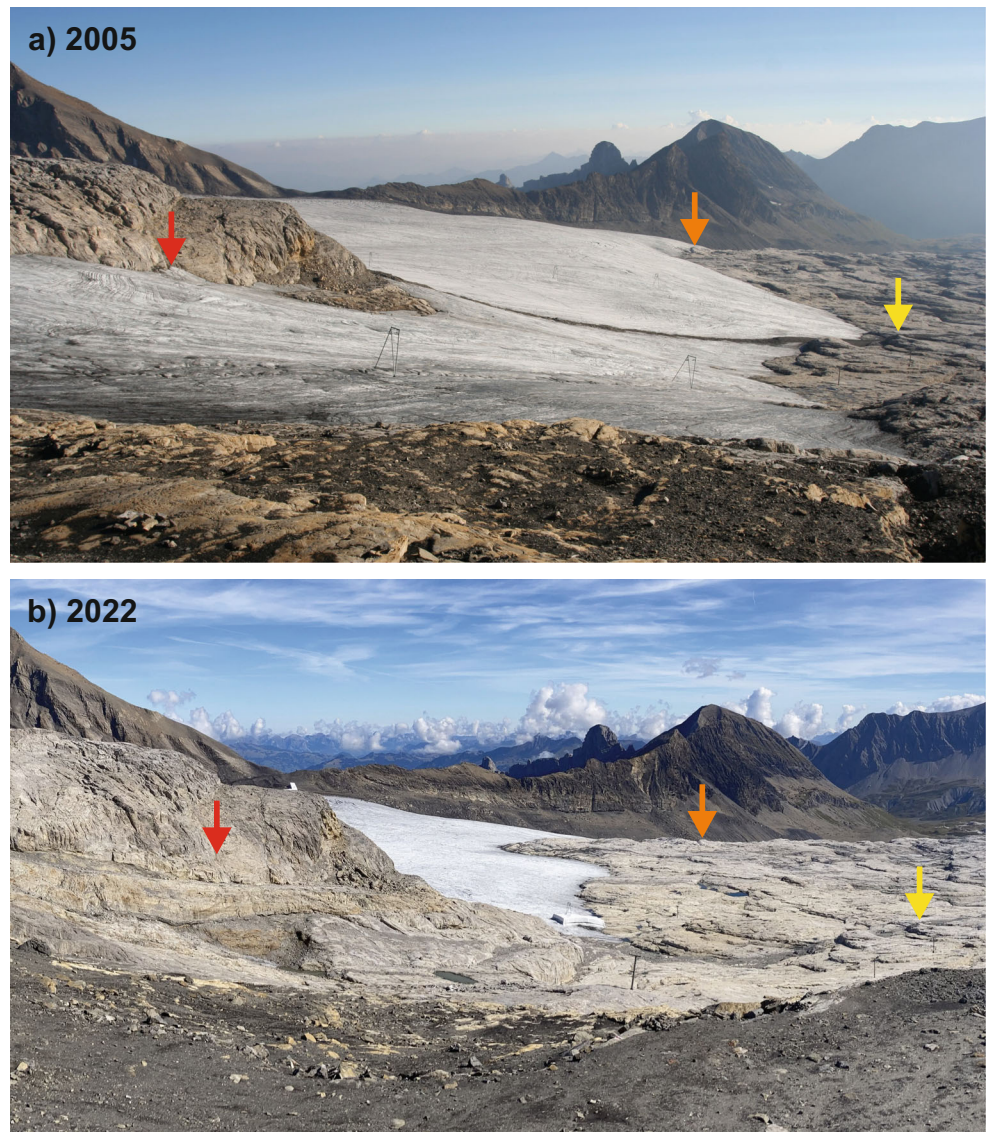
Im Alpenraum gibt es sicher Tausende von erfassten und vermessenen Höhlen. Dies liegt nicht nur an den günstigen hydrogeologischen und topografischen Bedingungen, sondern spiegelt auch die Forschungstätigkeit der Höhlenvereine wider (Audra et al. 2006). Tab. 3 dokumentiert die zehn längsten und die zehn tiefsten Höhlen der Alpen, basierend auf einer Auswertung der internationalen Höhlendatenbank

Cave-Exploring.com (Burger 2024). Die beiden längsten Höhlen der Alpen, das Hölloch mit 208 km und das Siebenhengste-Hohgant-Höhle-System (7HHH) mit 164,5 km vermessener Länge, befinden sich beide in der Schweiz und sind im kreidezeitlichen Schotterkalk des Helvetikums entwickelt (Jeannin 2001; Häuselmann et al. 2002). Weltweit belegen sie Platz 11 und 13 auf der Liste der längsten Höhlen. Tiefste Höhle der Alpen ist der Gouffre Mirola (FR), mit 1733 m Tiefe weltweit auf Platz 5. Zwei Höhlen, die Hirlatzhöhle im Dachsteinmassiv (AT) (Plan et al. 2022) und das genannte 7HHH gehören gleichzeitig zu den zehn längsten und den zehn tiefsten Höhlen der Alpen und zu den 25 längsten und 25 tiefsten Höhlen der Welt. Wenn Länge und Tiefe gleichzeitig berücksichtigt werden (durch Addition der jeweiligen Rangnummern), dann ist die Hirlatzhöhle sogar die größte Höhle der Welt, und das 7HHH liegt weltweit auf Platz 3.

Die zahlreichen alpinen Höhlen mit über 1000 m Vertikalerstreckung geben eine Vorstellung von der Mächtigkeit der ungesättigten (vadosen) Zone in vielen alpinen Karstsystemen, in denen ein geschlossener Grundwasserkörper, wenn überhaupt, erst in großer Tiefe anzutreffen ist (Turk et al. 2015). Viele der Höhlen in Tab. 3 stehen in direk-

Abb. 4 Gletscherschwund im alpinen Karstgebiet Tsanfleuron-Sanetsch, Schweiz: **a** Ausdehnung des Gletschers im Jahr 2005; **b** Im Jahr 2022 ist der vordere, südliche Gletscherteil vollständig verschwunden; der hintere hat rund 400 m an Länge eingebüßt. Die Liftstützen können als Größenvergleich dienen. Die Pfeile zeigen ausgewählte Geländepunkte zum besseren Vergleich beider Aufnahmen. (Fotos: N. Goldscheider)

Fig. 4 Glacier retreat in the alpine karst region of Tsanfleuron-Sanetsch, Switzerland: **a** Extent of the glacier in 2005; **b** In 2022, the front, southern part of the glacier has completely disappeared; the rear part has lost around 400 m in length. The ski lift can be used for size comparison. The arrows show selected terrain points for a better comparison of both images. (Photos: N. Goldscheider)



ter Verbindung mit bedeutenden ober- und unterirdischen Wasserressourcen. Das Hölloch entwässert beispielsweise zu einer großen Karstquelle (Schliechenden Brünnen, Q32 in Tab. 2) mit einer mittleren Schüttung von $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (Jeanin 2001). Siebenhengste-Hohgant und Bärenschacht bilden ein hydrologisch zusammenhängendes System, das zu einer großen sublimnischen Karstquelle (Bätterich, Q2) entwässert, die im Thuner See austritt, rund 30 m vom Ufer entfernt, wobei der Grund des Quellsiphons bei -28 m liegt. Die Schüttung ist daher schwer zu erfassen, dürfte aber aufgrund der Größe des Einzugsgebiets bei Hochwasser ebenfalls bei etlichen Zehner m^3/s liegen (Häuselmann et al. 2003).

Auch im Dachsteingebiet gibt es vielfältige Zusammenhänge zwischen den Höhlensystemen und den Wasserressourcen. Der Waldbachursprung (Q36) am Nordfuß des Massivs gehört mit einer mittleren Schüttung von $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$

und Spitzenwerten von rund $19 \text{ m}^3/\text{s}$ zu den größten Karstquellen der Ostalpen (Völkl 2018). Die Koppnenbrüllerhöhle (Q18) im gleichen Gebiet zeigt exemplarisch das Zusammenspiel von Höhlen, Wasserressourcen und touristischer Nutzung. Es handelt sich um eine wasserführende Höhle, die als Schauhöhle ausgebaut ist und deren Höhlenbach zeitweise als große Karstquelle zutage tritt, wobei der Höhleneingang direkt am Quellaustritt liegt (Abb. 2g).

Gletscher und Gletscherschwund in alpinen Karstgebieten

Die Alpengletscher befinden sich auf dem Rückzug (Huss und Fischer 2016; Zekollari et al. 2019; Paul et al. 2020). Verschiedene nationale Gletscherobservatorien bieten jeweils einen aktuellen Überblick. Die aktuellste alpenweite,

digitale und detaillierte Darstellung ist das Alpine Glacier Inventory von 2015 mit einer Auflösung von 10 m (Paul et al. 2020). Durch Verschneidung der Karstkarte (Abb. 1a) mit diesem Glacier Inventory konnte erstmals die Verbreitung von Gletschern in alpinen Karstgebieten analysiert werden. Demnach betrug die Gesamtfläche aller alpinen Gletscher im Jahre 2015 rund 1806 km², wobei die Schweizer Alpen mit 892 km² die bedeutendste Vergletscherung zeigen, gefolgt von Österreich (361 km²), Italien (325 km²) und Frankreich (227 km²), während in Slowenien, Deutschland und Liechtenstein fast keine Gletscher mehr vorhanden sind (der Schneeferner und der Höllentalferner im Wettersteingebirge sind jeweils kleiner als 0,2 km²). Nur 192 km² bzw. 10,66 % der gesamten Gletscherfläche befinden sich jedoch auf Carbonatgesteinsflächen, hiervon 82 km² in den österreichischen und 63 km² in den Schweizer Alpen, gefolgt von Italien (28 km²) und Frankreich (20 km²). Insgesamt sind 0,95 % der gesamten Alpenfläche vergletschert (Stand 2015), während nur 0,25 % der Carbonatgesteinsflächen von Gletschern bedeckt werden. Gletscher in Karstgebieten sind also etwa um den Faktor 4 unterrepräsentiert. Diese Zahlen spiegeln wider, dass sich die höchsten und am stärksten vergletscherten Gebirgsmassive der Alpen in den Kristallingebieten der Zentralalpen befinden, während die Carbonatgesteine eher die weniger hohen Gebirgsketten am äußeren und inneren Rand des Alpenbogens aufbauen.

Das Gebiet Tsanfleuron-Sanetsch im Helvetikum der westlichen Schweizer Alpen ist ein Beispiel für ein vergletschertes alpines Karstsystem (Abb. 4). Dort bedeckt der schwindende Tsanfleuron-Gletscher einen regionalen Karstaquifer, der überwiegend aus kreidezeitlichem Kalkstein (Urgonien) besteht (Gremaud et al. 2009). Die glazialen Schmelzwässer infiltrieren meist vollständig in den Karstaquifer. Am tiefsten Punkt befindet sich die Glarey-Quelle (Abb. 2l), die als Karstwasserstollen ausgebaut ist und zur Trinkwasserversorgung der Gemeinde Conthey und zur Stromerzeugung mittels Wasserkraft genutzt wird. Aktuell trägt die Gletscherschmelze erheblich zur Quellschüttung im Sommer und Herbst bei, während nach dem Verschwinden des Gletschers mit saisonaler Wasserknappheit zu rechnen ist (Gremaud und Goldscheider 2010). Abb. 4 vermittelt einen Eindruck des Gletscherschwundes zwischen 2005 und 2022. Die Auswirkungen schwindender Gletscher auf die Karstwasserressourcen wurden auch am Plaine Morte Gletscher (CH) untersucht. Auch dort wird mit zunehmender Wasserknappheit im Sommer und Herbst gerechnet (Finger et al. 2013).

Grundwasserneubildung und erneuerbare Wasserressourcen

Zur Abschätzung der Grundwasserneubildung (R) in den Karstgebieten wurde ein einfacher Ansatz über die lokale Wasserbilanz gewählt (Riedel und Weber 2020), der um die Änderung in der Schneespeicherung erweitert wurde. Dieser Ansatz berücksichtigt den Niederschlag (P), den Oberflächenabfluss (R_s), die reale Evapotranspiration (ET_r) sowie Änderungen im Bodenwasser (dS/dt) und in der Schneespeicherung ($dSWE/dt$):

$$R = P - R_s - ET_r - \frac{dS}{dt} - \frac{dSWE}{dt}$$

Hierfür wurden Monatswerte aus ERA5-Land-Daten (Muñoz-Sabater et al. 2021) zur Berechnung genommen und zu Jahresmitteln aufsummiert. Von diesen wurden wiederum Mittelwerte über die Zeitspanne 1991–2020 und über räumliche Einheiten gebildet. ERA5-Land-Daten stellen hierbei einen Kompromiss dar, da sie einerseits einen einheitlichen Datensatz über den gesamten Alpenraum mit einer Auflösung von $0,1 \times 0,1$ Grad liefern, einen langen Zeitraum über 30 Jahre abdecken und zudem alle erforderlichen Eingangsdaten (Niederschlag, Oberflächenabfluss, reale Evapotranspiration, Bodenwassergehalt und Schneespeicherung) beinhalten. Andererseits ist bekannt, dass ERA5-Land-Daten sowohl den Niederschlag als auch die Schneespeicherung in alpinen Gebieten häufig überschätzen (Bandhauer et al. 2022; Monteiro und Morin 2023; Dalla Torre et al. 2024). Daher, und aufgrund der Einfachheit des Ansatzes über die lokale Wasserbilanz, sind die hier ermittelten Werte der Grundwasserneubildung als eine erste, relativ grobe Abschätzung zu verstehen.

Abb. 5 zeigt die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung in den Karstgebieten der Alpen für den 30-jährigen Gesamtzeitraum (1991–2020). Es sind deutliche regionale Unterschiede erkennbar, mit den niedrigsten Werten (<250 mm) im äußersten Südwesten und Osten der Alpen und Werten von deutlich über 1000 mm in vielen Regionen des übrigen Alpenbogens, lokal sogar über 1500 mm.

Im Mittel beträgt die jährliche Grundwasserneubildung in den Karstgebieten der Alpen 823 mm und liegt damit deutlich über der mittleren Grundwasserneubildung im gesamten Alpenraum (ca. 765 mm). Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung in den alpinen Karstgebieten ist mit 1029 mm in der Schweiz am höchsten (lokaler Spitzenwert: 1477 mm), gefolgt von Deutschland (972 mm), Liechtenstein (917 mm), Österreich (833 mm), Italien (810 mm), Slowenien (703 mm) und Frankreich (497 mm), das durch extreme regionale Unterschiede geprägt ist (18–1112 mm).

Diese Werte sind niedriger als diejenigen von Malard et al. (2016), die die Neubildung in 42 alpinen und peri-

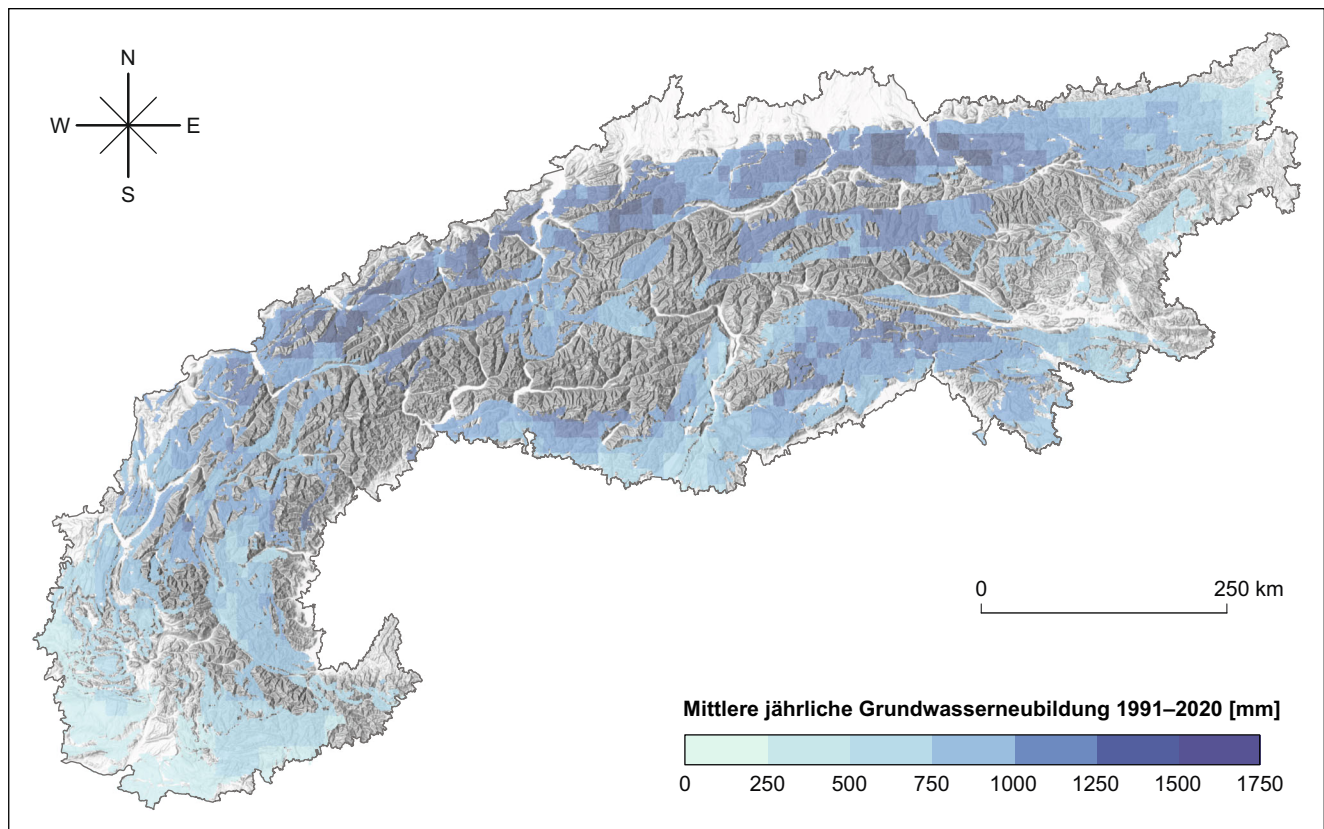


Abb. 5 Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Alpenraum für den Zeitraum 1991–2020

Fig. 5 Average annual groundwater recharge in the European Alpine region for the period 1991–2020

alpinen Karstgebiete verglichen und eine Bandbreite von 63 bis 1987 mm/Jahr dokumentiert haben. Für die Karstgebiete der Schweizer Alpen wurden von diesen Autoren als Mittelwerte 1040 mm (Ostalpin), 1200 mm (Voralpen) bzw. 1450 mm (Helvetikum) pro Jahr bestimmt, was 70 bis 90 % der Jahresniederschläge entspricht.

Vom Volumen her betragen die mittleren jährlichen erneuerbaren Wasserressourcen in den Karstgebieten der Alpen rund 57.500 Mio. Kubikmeter (MCM) oder 57,5 km³ pro Jahr. Dies entspricht einem Anteil von 41,3 % an den gesamten erneuerbaren Grundwasserressourcen in den Alpen (139.000 MCM). Von den mittleren jährlichen erneuerbaren Karstwasserressourcen entfallen ca. 30 % (17.300 MCM) auf Österreich, 28 % (16.300 MCM) auf Italien, 18 % (10.300 MCM) auf Frankreich, 15 % (8400 MCM) auf die Schweiz, 5,2 % (3000 MCM) auf Deutschland, 4 % (2300 MCM) auf Slowenien und 0,13 % (77 MCM) auf Liechtenstein. Auch diese Werte sind als relativ grobe Abschätzungen zu verstehen und können als Ausgangspunkt für detailliertere Analysen dienen.

Schlussfolgerungen

Diese Studie quantifiziert erstmals die Verbreitung von Carbonatgesteinen und Karstwasserressourcen im Alpenraum. Die eingangs formulierten Forschungsfragen können wie folgt beantwortet werden:

1. Im Alpenraum stehen auf 76.200 km² Carbonatgesteine an, was einem Anteil von 40 % entspricht. Die größten Flächen wurden in Österreich (21.200 km²), Frankreich (20.500 km²) und Italien (19.700 km²) ermittelt; die größten Anteile wurden in Frankreich (50,9 %) und Slowenien (48,3 %) festgestellt. Bei den geologischen Baueinheiten wurde die größte Fläche von Carbonatgesteinen im Helvetikum identifiziert (22.100 km²), gefolgt von Ostalpin (20.800 km²) und Südalpin (17.300 km²), das mit 56,2 % auch den höchsten Anteil aufweist. Über die Verbreitung nicht exponierter (bedeckter) Carbonatgesteine kann hier keine Aussage getroffen werden.
2. Die Alpen sind reich an Höhlen, von denen etliche zu den längsten und tiefsten der Welt gehören. Werden beide Kriterien gleichzeitig berücksichtigt, so ist die Hirtlathöhle im Dachsteinmassiv mit 113,6 km Länge und 1560 m Tiefe als größte Höhle der Welt zu bezeichnen.

In den Alpen gibt es auch zahlreiche große Karstquellen mit Maximalschüttungen über $10\text{ m}^3/\text{s}$, die oft mit den Höhlensystemen in Zusammenhang stehen. Die größten alpinen Karstquellen schütten auch in Trockenzeiten rund $2\text{ m}^3/\text{s}$ und können bei Hochwasser Spitzenwerte von rund $60\text{ m}^3/\text{s}$ erreichen.

- Die Gesamtfläche aller alpinen Gletscher beträgt rund 1806 km^2 (Stand 2015), aber nur 192 km^2 bzw. $10,7\%$ davon befinden sich in Karstgebieten. Insgesamt sind $0,95\%$ der gesamten Alpenfläche vergletschert, während es auf Carbonatgestein nur $0,25\%$ sind. Gletscher sind also in alpinen Karstgebieten um den Faktor 4 unterrepräsentiert, aufgrund der generell geringeren Höhe der Carbonatgesteinsmassive. Der Gletscherschwund in diesen Gebieten ist rapide.
- Eine erste Abschätzung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung in den Karstgebieten der Alpen über einen 30-jährigen Zeitraum von 1991 bis 2020 beträgt rund 823 mm , mit extremen regionalen Unterschieden und einer Gesamtbandbreite zwischen 18 und 1477 mm .
- Daraus ergeben sich erneuerbare alpine Karstwasserressourcen von 57.500 Mio. m^3 (rund $2/3$ des Volumens des Genfer Sees). Davon entfallen rund 30% auf Österreich, 28% auf Italien, 18% auf Frankreich, 15% auf die Schweiz, 5% auf Deutschland und 4% auf Slowenien.

Die hier genannten Werte der Grundwasserneubildung und erneuerbaren Wasserressourcen sind aufgrund der gewählten, relativ einfachen Methode und der teils unsicheren Datenbasis mit Unsicherheiten behaftet, zeigen jedoch die große Bedeutung der alpinen Karstwasserressourcen. Die bereits beobachteten und prognostizierten zeitlichen und räumlichen Änderungen dieser Wasserressourcen durch den Klimawandel sind ein wichtiges Forschungsthema mit hoher Praxisrelevanz, auch in Hinblick auf zunehmende Nutzungskonflikte in den Alpen. Hier sind unter anderem der zunehmende Bewässerungsbedarf für die Landwirtschaft (Fuhrer et al. 2014), der Ausbau der Wasserkraft (Schaeffli et al. 2007) und der Bedarf für die Beschneidung von Ski-gebieten zu nennen (Vanham et al. 2009; François et al. 2023).

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach

gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F., Hauselmann, P., Hoblea, F., Jeannin, R. Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Sustersic, F., Tognini, P., Trim-mel, H., Wildberger, A.: Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. *J. Geomorphol* **50**, 153–176 (2006)
- Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F., Hauselmann, P., Hoblea, F., Jeannin, P. Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Sustersic, F., Tognini, P., Trim-mel, H., Wildberger, A.: Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography. *Acta Carsol.* **36**, 53–67 (2007)
- Bandhauer, M., Isotta, F., Lakatos, M., Lussana, C., Båserud, L., Iz-sák, B., Szentes, O., Tveito, O. E., Frei, C.: Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS (v19.0e) and ERA5 by compar-ison to regional high-resolution datasets in European regions. *Int. J. Climatol.* **42**, 727–747 (2022). <https://doi.org/10.1002/joc.7269>
- Beniston, M.: Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps. *Pure Appl. Geo-phys.* **162**, 1587–1606 (2005). <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2684-9>
- Brussolo, E., Palazzi, E., von Hardenberg, J., Masetti, G., Vivaldo, G., Previati, M., Canone, D., Gisolo, D., Bevilacqua, I., Provenzale, A., Ferraris, S.: Aquifer recharge in the Piedmont Alpine zone: historical trends and future scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **26**, 407–427 (2022). <https://doi.org/10.5194/hess-26-407-2022>
- Burger, P.: Long and deep caves of the world, compiled by Bob Gulden (2024). <https://cave-exploring.com/index.php/long-and-deep-caves-of-the-world/>. Zugegriffen: 1. Dez. 2024
- Dalla Torre, D., Di Marco, N., Menapace, A., Avesani, D., Righetti, M., Majone, B.: Suitability of ERA5-Land reanalysis dataset for hydrological modelling in the Alpine region. *J. Hydrol. Stud.* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101718>
- Finger, D., Hugentobler, A., Huss, M., Voinesco, A., Wernli, H., Fischer, D., Weber, E., Jeannin, P. Y., Kauzlaric, M., Wirz, A., Ven-nemann, T., Hüsler, F., Schädler, B., Weingartner, R.: Identifica-tion of glacial meltwater runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **17**, 3261–3277 (2013). <https://doi.org/10.5194/hess-17-3261-2013>
- François, H., Samacoïts, R., Bird, D. N., Köberl, J., Prettenhaler, F., Morin, S.: Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nat. Clim. Chang.* **13**, 935 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01759-5>
- Frank, S., Goeppert, N., Goldscheider, N.: Fluorescence-based multi-parameter approach to characterize dynamics of organic carbon, faecal bacteria and particles at alpine karst springs. *Sci. Total. Environ.* **615**, 1446–1459 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.095>
- Fuhrer, J., Smith, P., Gobiet, A.: Implications of climate change scenar-ios for agriculture in alpine regions—A case study in the Swiss Rhone catchment. *Sci. Total. Environ.* **493**, 1232–1241 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.038>
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stof-fel, M.: 21st century climate change in the European Alps—A review. *Sci. Total. Environ.* **493**, 1138–1151 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Goeppert, N., Goldscheider, N., Scholz, H.: Karst geomorphology of carbonatic conglomerates in the Folded Molasse zone of the Nor-

- thern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology* **130**, 289–298 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.011>
- Goldscheider, N.: Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochfien-Gottesacker. *Eclogae Geol. Helvetiae* **98**, 1–17 (2005)
- Goldscheider, N.: Alpine Hydrogeologie. *Grundwasser* **16**, 1–1 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00767-010-0157-2>
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G.H., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., Veni, G.: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeol J* **28**, 1661–1677 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Gremaud, V., Goldscheider, N.: Geometry and drainage of a retreating glacier overlying and recharging a karst aquifer, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps. *Acta Carsol.* **39**, 289–300 (2010)
- Gremaud, V., Goldscheider, N., Savoy, L., Favre, G., Masson, H.: Geological structure, recharge processes and underground drainage of a glacierised karst aquifer system, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps. *Hydrogeol J* **17**, 1833–1848 (2009)
- Haeblerli, W., Beniston, M.: Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* **27**, 258–265 (1998)
- Hasslacher, P.: The protection of Alpine open spaces and the Alpine Convention—a timeline. *Eco Mont J. Prot. Mt. Areas Res.* **9**, 98–98 (2017). <https://doi.org/10.1553/eco.mont-9-sis98>
- Häuselmann, P., Jeannin, P.Y., Monbaron, M., Lauritzen, S.E.: Reconstruction of Alpine Cenozoic paleorelief through the analysis of caves at Siebenhengste (BE, Switzerland). *Geodinamica Acta* **15**, 261–276 (2002)
- Häuselmann, P., Otz, M., Jeannin, P.Y.: A review of the dye tracing experiments done in the Siebenhengste karst region (Bern, Switzerland). *Eclogae Geol. Helvetiae* **96**, 23–36 (2003)
- Hayashi, M.: Alpine hydrogeology: the critical role of groundwater in sourcing the headwaters of the world. *Groundwater* **58**, 498–510 (2020). <https://doi.org/10.1111/gwat.12965>
- Hilberg, S., Schneider, J.F.: The aquifer characteristics of the dolomite formation a new approach for providing drinking water in the northern Calcareous alps region in Germany and Austria. *Water Resour. Manag.* **25**, 2705–2729 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9834-x>
- Hilberg, S., Sandler, F., Furlinger, F.: Hydrogeology of alpine lakes in the Northern Calcareous Alps: a comparative study on the role of groundwater in Filblingsee and Eibensee. *Austrian J. Earth Sci.* **115**, 199–212 (2022). <https://doi.org/10.17738/ajes.2022.0010>
- Hood, J.L., Hayashi, M.: Characterization of snowmelt flux and groundwater storage in an alpine headwater basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **521**, 482–497 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.041>
- Huss, M., Fischer, M.: Sensitivity of very small glaciers in the Swiss alps to future climate change. *Front. Earth Sci.* (2016). <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>
- Ishiguro, N., Balvay, G.: Water movement of the Rhone River entering Lake Geneva. *Arch. Des Sci.* **56**, 117–126 (2003)
- Jeannin, P.Y.: Modeling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Hölloch cave (Muotatal, Switzerland). *Water Resour. Res.* **37**, 191–200 (2001)
- Kessler, T., Marschallinger, R., Höfer-Öllinger, G.: Rising groundwater levels is challenging future groundwater management in alpine valleys. *Grundwasser* **26**, 395–407 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00497-9>
- Küfmann, C.: Solution dynamics at the rock/snow interface during the ablation period in the subnival karst of the Wetterstein Mountains (Northern Calcareous Alps, Germany). *Z. Geomorphol.* **58**, 37–57 (2014). <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0121>
- Kurylyk, B.L., Hayashi, M.: Inferring hydraulic properties of alpine aquifers from the propagation of diurnal snowmelt signals. *Water Resour. Res.* **53**, 4271–4285 (2017). <https://doi.org/10.1002/2016wr019651>
- Lauber, U., Goldscheider, N.: Use of artificial and natural tracers to assess groundwater transit-time distribution and flow systems in a high-alpine karst system (Wetterstein Mountains, Germany). *Hydrogeol J* **22**, 1807–1824 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1173-6>
- Lucianetti, G., Mazza, R., Mastroiello, L.: Hydrogeology of a high Alpine carbonate aquifer (Pale di San Martino, Dolomites, Northern Italy). *J. Maps* **15**, 448–459 (2019). <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1611497>
- Malard, A., Sinreich, M., Jeannin, P.Y.: A novel approach for estimating karst groundwater recharge in mountainous regions and its application in Switzerland. *Hydrol. Process.* **30**, 2153–2166 (2016). <https://doi.org/10.1002/hyp.10765>
- Maloszewski, P., Stichler, W., Zuber, A., Rank, D.: Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental O-18 and H-3 isotopes. *J. Hydrol.* **256**, 48–59 (2002)
- Mastrotheodoros, T., Pappas, C., Molnar, P., Burlando, P., Manoli, G., Parajka, J., Rigon, R., Szeles, B., Bottazzi, M., Hadjidoukas, P., Faticchi, S.: More green and less blue water in the Alps during warmer summers. *Nat. Clim. Chang.* **10**, 155 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0676-5>
- Monteiro, D., Morin, S.: Multi-decadal analysis of past winter temperature, precipitation and snow cover data in the European Alps from reanalyses, climate models and observational datasets. *Cryosphere* **17**, 3617–3660 (2023). <https://doi.org/10.5194/tc-17-3617-2023>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N.J., Zsoter, E., Buontempo, C., Thépaut, J.N.: ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* **13**, 4349–4383 (2021). <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Nagel, T.: Structure of Austroalpine and Penninic units in the Tilsuna area (Eastern Rätikon, Austria): Implications for the paleogeographic position of the Allgäu and Lechtal nappes. *Eclogae Geol. Helvetiae* **99**, 223–235 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00015-006-1192-y>
- Olarinoye, T., Gleeson, T., Marx, V., Seeger, S., Adinehvand, R., Allocca, V., Andreo, B., Apaestegui, J., Apolit, C., Arfib, B., Auler, A., Barbera, J.A., Batiot-Guilhe, C., Bechtel, T., Binet, S., Bittner, D., Blatnik, M., Bolger, T., Brunet, P., Charlier, J.-B., Chen, Z., Chiogna, G., Coxon, G., De Vita, P., Doummar, J., Epting, J., Fournier, M., Goldscheider, N., Gunn, J., Guo, F., Guyot, J.L., Howden, N., Huggenberger, P., Hunt, B., Jeannin, P.-Y., Jiang, G., Jones, G., Jourde, H., Karmann, I., Koit, O., Kordilla, J., Labat, D., Ladouche, B., Liso, I.S., Liu, Z., Massei, N., Mazzilli, N., Mudarra, M., Parise, M., Pu, J., Ravbar, N., Sanchez, L.H., Santo, A., Sauter, M., Sivel, V., Skoglund, R.O., Stevanovic, Z., Wood, C., Worthington, S., Hartmann, A.: Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater. *Sci Data* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0346-5>
- Ortner, H., Kilian, S.: Thrust tectonics in the Wetterstein and Mieming mountains, and a new tectonic subdivision of the Northern Calcareous Alps of Western Austria and Southern Germany. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* **111**, 543–571 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02128-3>
- Paul, F., Rastner, P., Azzoni, R.S., Diolaiuti, G., Fugazza, D., Le Bris, R., Nemec, J., Rabatel, A., Ramusovic, M., Schwaizer, G., Smiraglia, C.: Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth Syst.*

- Sci. Data **12**, 1805–1821 (2020). <https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020>
- Pfiffner, O.A.: Geologie der Alpen. utb, Bern, Stuttgart, Wien (2009)
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., Grasmann, B.: Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. Symposium on Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas, Vienna., S. 285–297 (2007)
- Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R., Jeutter, P.: Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology—A case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). *Geomorphology* **106**, 118–129 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.011>
- Plan, L., Buchegger, G., Kaminsky, E., Koltai, G., Racine, T., Szczygiel, J.: Flow regime evolution of a major cave system in the Eastern Alps (Hirlatzhöhle, Dachstein). *Int. J. Speleol.* **51**, 181–191 (2022). <https://doi.org/10.5038/1827-806x.51.3.2433>
- Rappl, A., Wetzel, K.F., Buttner, G., Scholz, M.: Dye tracer investigations at the Partnach Spring (German Alps). *Hydrol. Wasserbewirtsch.* **54**, 220–230 (2010)
- Riedel, T., Weber, T.K.D.: Review: the influence of global change on Europe's water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeol. J.* **28**, 1939–1959 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>
- Rummeler, L., Plan, L.: Cave Levels in the Dachstein Massif (Eastern Alps). *Austrian J. Earth Sci.* **116**, 151–163 (2023). <https://doi.org/10.17738/ajes.2023.0009>
- Schaeffli, B., Hingray, B., Musy, A.: Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11**, 1191–1205 (2007). <https://doi.org/10.5194/hess-11-1191-2007>
- Siegel, L., Goldscheider, N., Petitta, M., Xanke, J., Andreo, B., Bakalowicz, M., Barberá, J.A., Bouhlila, R., Burg, A., Doummar, J., Ezzine, I., Fernández-Ortega, J., Ghanmi, M., Jourde, H., Marín, A.I., Mhimdi, A., Pipan, T., Ravbar, N., Stevanovic, A.M., Stevanovic, Z.: Distribution, threats and protection of selected karst groundwater-dependent ecosystems in the Mediterranean region. *Hydrogeol. J.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02711-9>
- Thibert, E., Eckert, N., Vincent, C.: Climatic drivers of seasonal glacier mass balances: an analysis of 6 decades at Glacier de Sarennes (French Alps). *Cryosphere* **7**, 47–66 (2013). <https://doi.org/10.5194/tc-7-47-2013>
- Turk, J., Malard, A., Jeannin, P.Y., Petric, M., Gabrovsek, F., Ravbar, N., Vouillamoz, J., Slabe, T., Sordet, V.: Hydrogeological characterization of groundwater storage and drainage in an alpine karst aquifer (the Kanin massif, Julian Alps). *Hydrol. Process.* **29**, 1986–1998 (2015). <https://doi.org/10.1002/hyp.10313>
- Vanham, D.: The Alps under climate change: implications for water management in Europe. *J. Water Clim. Chang.* **3**, 197–206 (2012). <https://doi.org/10.2166/wcc.2012.032>
- Vanham, D., Fleischhacker, E., Rauch, W.: Impact of snowmaking on alpine water resources management under present and climate change conditions. *Water Sci. Technol.* **59**, 1793–1801 (2009). <https://doi.org/10.2166/wst.2009.211>
- Viviroli, D., Weingartner, R.: The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **8**, 1016–1029 (2004)
- Völkl, G.E.: Künstliche und natürliche Markierungen des Karstwassers am Beispiel des Dachsteinmassivs. *Österreichische Wasser-Abfallwirtschaft* **71**, 51–65 (2018)
- Xanke, J., Goldscheider, N., Bakalowicz, M., Barbera, J.A., Broda, S., Chen, Z., Ghanmi, M., Guenther, A., Hartmann, A., Jourde, H., Liesch, T., Mudarra, M., Petitta, M., Ravbar, N., Stevanovic, Z.: Carbonate rocks and karst water resources in the Mediterranean region. *Hydrogeol. J.* **32**, 1397–1418 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02810-1>
- Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D.: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Cryosphere* **13**, 1125–1146 (2019). <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.